

MA2022

Department of Architecture
Meijo University Yearbook 2022

名城大学建築学科・大学院建築学専攻

優　秀　論　文　集　2　0　2　2

MA2022 Department of Architecture Meijo University Yearbook 2022

名城大学建築学科・大学院建築学専攻 優秀論文集2022

CONTENTS | 目次→

はじめに

本書は、名城大学建築学科・大学院建築学専攻の学生の研究・学習成果をまとめたものです。
修士論文と卒業論文、巻頭インタビューによる論文編と、卒業設計と学部設計課題による作品編により構成されています。
修士論文は、建築の専門家として研究成果を社会に発信するものになります。本年は各研究室から特に優秀な論文として推薦された5名の論文を掲載しています。
卒業論文は、４年間をかけて学んだ建築の専門知識の集大成です。長い時間をかけて仮説の立案と検証を繰り返すことで、建築学に新たな知見を与える研究を書き上げます。その過程は、社会で広く活躍していくために必要な思考方法の鍛錬の時間でもあります。
卒業設計は、学部４年間の学習の成果になります。現代社会の課題や魅力に対して、自らの提案で社会に新たな可能性を提示するものです。設計を通して自身の空間デザインの原点を探求することを求めています。
学部課題は、未来に向けた柔軟な発想を育むとともに、建築の設計スキルを磨くものです。
学生の努力の結晶である本書を通して、多くの方々に本学科・専攻の活動を見ていただき、叱咤激励やご感想をいただければ幸いです。

名城大学建築学科作品集　編集担当　佐藤布武

Intro Articles

巻頭インタビュー

002 技術としての建築 - 構造系編

004 技術としての建築 - 環境・設備系編

Selected Articles

構造系

006 系紹介

007 優秀修士論文 中根 健太

009 優秀修士論文 坂本 遼

013 優秀卒業論文 川上 巧

015 優秀卒業論文 古居 元

設計・計画系

017 系紹介

018 優秀修士論文 市瀬 智之

022 優秀修士論文 山田 侑希

026 優秀卒業論文 洞口 拓海

材料・生産系

027 系紹介

028 優秀卒業論文 岡野 克彦

環境・設備系

030 系紹介

031 優秀修士論文 坪井 智一

035 優秀修士論文 西木 栄策

038 優秀修士論文 金子 知可

歴史・意匠系

044 系紹介

045 優秀修士論文 古川 耕平

046 優秀卒業論文 城戸 美穂

コストの高い一品生産の建築だからこそ必要とされる学問

建築の安全を保障する「構造系」の役割について、今年度でご退官される市之瀬先生にお話を伺いました。

–

話し手｜市之瀬敏勝教授（構造系）
聞き手｜佐藤布武助教（設計・計画系）

構造と意匠が一体なって作り上げられた美しい建築は、多くの人の心を魅了します

―まずは構造を学ぶことの面白さを教えてください。

構造の面白さの一つに、これまでにできなかったことができるようになることが挙げられます。構造と意匠が一体となって作り上げられた美しい建築は、多くの人の心を魅了します。丹下健三氏の代々木体育館や伊東豊雄氏のせんだいメディアテークなどは日本の代表的な例ですし、シドニーのオペラハウスなどは街のランドマークにまでなっています。

これらは、構造と意匠のコラボレーションがないとできません。弥生時代の竪穴式住居などはそれなりの合理性があればできますが、大きなものの開発には、構造の力が不可欠なのです。

―なるほど。大きなものへの挑戦は、構造の魅力なのですね。

これまでにできなかった形態や規模のものを生み出す。そういった挑戦ができるのが、構造の醍醐味なのではないでしょうか。人は大きなものをみると感動します。ピラミッドや教会、神殿 ,,,、あんなに大きい必要性はないのに、人々は大きなものを作ってきました。きっと感動したのだと思います。これまでに目にしたことがないものや大きいものに対する、人間の本能的な畏怖の念みたいなものもあるのかもしれません。

また、構造には魅力と同時に、人の命を守る学問としての責任もあります。中世ヨーロッパの建築は、建てること自体が命がけで、建てる途中で建物が壊れて職人が大量に亡くなるということも起きていました。完成した後の建物でも、地震などで壊れてしまうこともあります。非常にたくさんの人が亡くなってしまう悲しい出来事を生じさせないためにも、構造をきちんと学び、学問として進歩させていく必要があります。



台湾の世界最大規模の構造実験器具を使った実験風景

構造設計はきちんと筋が通っている、簡単な理屈で現象が説明できるもの

―市之瀬先生はどのような研究に力を入れてきたのでしょうか。

私は主として耐震設計に取り組んできました。今では日本各地に超高層マンションがありますが、それは技術の進捗があってこそです。地震国・日本でどのように作ると耐震性が確保できるのか。そういう設計式を導き出したのが私の研究の１番の成果でした。企業と話し合いながら、実験を企画し、実験室で実験を行う。それを元に新しい式を作ったり、ディテールの有効性を確認する。それの積み重ねで、施工性を考慮した高強度のコンクリートや鉄筋の配置を決め、日本や世界の指針となりました。

もう一つの大きなテーマは、構造設計の理論や考え方を合理的にするという取り組みです。実は、２年生まで構造力学が一番嫌いでした。鉄筋コンクリートの授業は、どこか学ぶべきことを押し付けられているような気もあり、得意ではなかったのです。しかし、実際にやってみると、きちんと筋が通っているというか、簡単な理屈で現象が説明できるものだということに気づき、学部３年くらいからスイッチが入ったというか、面白さに気付きました。そんな経験から、構造設計をもっとわかりやすくしたいと思ったのです。

建築に携わる職業は、人に喜ばれてお金がもらえる幸せな職業

―最後に、学生に向けてメッセージをお願いします。

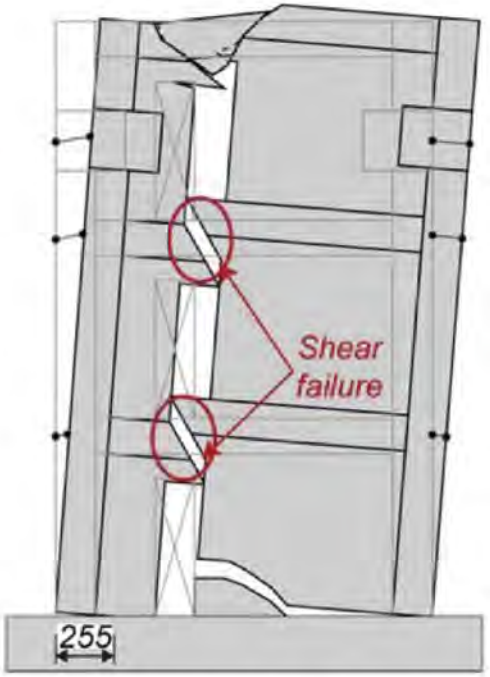
建築は、コストの高い一品生産です。住宅は一生に一回建てるくらいですし、会社にとってもオフィスビルを作ることは一大事です。建築は非常にコストがかかる出来事なんです。だから、少しでも安く質の高いものを作る必要があり、そのためには、建築をきちんと学んだ層が一定数社会に必要になるわけです。

また、敷地や用途も多様で、それに併せて建物を設計する必要があります。そうすると、それに関わる人間も必要とされます。だから、建築業界は就職率もいいですよね。社会には、建築を学んだ人が世の中にたくさん必要とされていますし、良いものを作ると多くの人が喜んでくれます。このように、建築を学ぶことには、価値や必要性があるのだと信じています。

建築に携わる職業は、人に喜ばれてお金儲けができる職業だということも伝えておきたいです。もちろん、うまく行かなかった際には責任をとる立場でもありますが、喜ばれることが多いです。建築の設計をやる人もそうだし、施工をやる人もそうだし、構造や設備設計の人もそうです。全てが人々の喜びに直結しています。そういう意味で、報われることの多い仕事とも言えるのではないでしょうか。私自身も楽しみましたし、いろいろな分野で、良い人生を送って欲しいと思っています。



ドア開口を持つ耐震壁の実験。左右から地震力を加えた。



ドアの上下で激しい破壊が生じた。

技術と心理の両方から建築をとらえられるのが建築の強みです。

人が安心して過ごせる建築にはたくさんの技術が隠されています。そのような技術の向上・開発を推し進めている「環境･設備系」の岡田先生にお話を伺いました。

話し手｜岡田恭明教授 (環境・設備系)
聞き手｜佐藤布武助教（設計・計画系）

建築を知ると、まちや風景がもっと楽しくなる。

ーまず、学生に向けて建築学科で学んで欲しいことをお話いただけますか？

　建築を好きになって欲しいですね。好きなことを学ぶということがすごく自然だと思っていますし、僕自身、建築が好きだから続けています。
　我々が作る建築は街や風景を作るものです。建物の中で人々の生活が行われ、その反復によって街ができて、結果として地域の文化が作られる。僕はそういう風にできた街を見るのも好きなので、国際学会などで他の国に行った時も、街を巡るようにしています。

ー街の中でどのような建築を見にいくのでしょうか？



ドイツのオペラハウス改修時の工事用看板。

　例えば、ドイツのベルリンを訪れた時、オペラハウスを見に行きました。残念ながら改修中でしたが、工事看板に書かれていた文章がとても印象的だったのを覚えています。そこには、「WE' RE BUILDING THE SOUND OF THE OPERA」と書かれていました。「僕たちはオペラの音を建てている。」という意味ですが、洒落ているし素敵だな、って思いましたね。工事看板には他にも、設計者の名前や改修意図などの情報も記載されていました。日本だと真っ白な工事看板がドイツでは彩られていて、人々が建築に愛着を持っているのも感じました。こういう些細なところで建築に関する文化を感じますし、建物のコンセプトや設計者の思いを知っていると、街を見るのはもっと楽しくなりますよね。

建築の知識は、幅広い分野に応用できるものです。

ー技術者として建築を支える魅力を教えください。

日本の建物は震度５でも潰れません。環境に目を向けると暖房をつけても結露しません。人々は安心しきって家に住めるのです。我々にとっては当たり前に感じてしまいますが、実はそれはすごいことです。他者に安心して建築を作ることを任せられる現代の建築を取り巻く環境は、これまでの数多の技術者のおかげなのです。

建築の技術者は、技術の向上や開発を進めていくと同時に、それを使う人の心理からも考えることができます。この技術と心理の両方から捉える能力は、建築の特徴であり長所ですし、環境・設備分野で特に大切にされる部分でもあります。我々は当たり前のように両者を大切にするのですが、その技術は、簡単でも汎用性のあるものでもありません。それゆえに、建築の知識は、幅広い分野に応用することができます。実際、建築の世界から離れた自動車会社や楽器を作る会社などで、建築で学んだことを活かして活躍するOBOGもたくさんいます。

ー技術と心理のどちらからも分析できるのが建築の特徴なのですね。岡田先生もそのような研究をされているのでしょうか？

僕の専門分野の音でも、同じことが言えます。最近取り組んだ企業との共同研究では、新築マンションの音環境の検証を行いました。

その建物は、駅前の好立地で、線路のすぐ近くにあります。屋外の電車の音への影響は当然、クリアしなければならない課題です。建物内に入って驚いたのですが、すぐ隣から発生する大きな騒音である電車音は全くしませんでした。外の騒音を抑えるため配慮ができ静謐な環境できている一方で、今度は屋内の微細な音も気になるようになり、私に相談があったという流れで共同研究はスタートしました。その音の正体は、室内に流れる上階からの配管音でした。

当たり前ですが、音を見ることはできません。我々の役割は、このような室内の音環境を数値化して、このくらいなら大丈夫というところを探ることです。どういう時間の中で音の変化があるのか。高い音なのか低い音なのか。遮音と吸音の違いなども大切な考え方です。音を抑えたり許容したり、様々な選択肢がある中で適材適所を見定めて、提案をしていきます。

現地に行って、空間を感じよう。

ー最後に、学生に何かメッセージをお願いします。

建築学科は３年生から研究室に配属されることになります。しかし、それぞれの系に入ったからといって、他をやらなくて良いというわけではありません。幅広く全分野をきちんと勉強して、その中で、自分の専門分野に関しては誰よりも知っている、というのが理想だと思っています。構造が嫌いだからとか、設計が面倒だからとか、そういうネガティブな理由で挑戦しないのではなく、もっとポジティブに建築のいろいろな学問を学んで欲しいです。環境設備系の私の研究室にも建築設計事務所を構えているOBOGがいます。「モノを作るのも好きだけど、環境も好きだから。」という理由で私の研究室にきた彼女は、音を知った上で建築設計をしています。

あとは、とにかく学生のうちに多くの現場にいって欲しい。建物に入っていろいろなことを感じて欲しいのです。いくら見栄えが良くても、そこで過ごす人間にとっての内部環境がよくないといけない。現代社会はネットを利用していろいろ情報や写真は見れますが、中に入って空間を感じることに建築の醍醐味があります。音の静かさや響き、寒さ、暑さ、明るさなど、五感をフルに使ってその場を感じられる。そうすると、居心地の良さがどういうモノなのかわかりますし、こういう空間を作りたい、ということの参考にもなります。そういった経験は、必ず設計や研究に生きていきますし、みなさんの人生の糧になっていきます。



騒音測定の様子。専門の器具で数値化を図る。



隣に鉄道が走る集合住宅。外への防音性能は高い。

建築学科　系紹介

- 構造系 -

「安全性」そして「合理性」と「構造美」のバランスをめざす

建物が存在する前提として安全性の確保があります。また、構造デザインにおいて合理性と構造美は密接な関係があります。これらバランスの良い建築技術を目指します。主な専門科目として以下があります。『構造力学』では安全性評価や構造物として成立させる基本として力の流れ･変形･崩壊などを学び､『建築各種構造』や『建築構造デザイン』では鋼構造・RC 構造・木質構造など各種構造形式の基本事項や特徴を踏まえ構造デザインの基本を学びます。

構造系の研究手法

構造系の研究は、実験・実測や構造解析で検討し、その結果を理論と結びつけることで進めていきます。実験・実測では、建物を模擬した構造物にゆっくりと力を加えて耐力や壊れ方を把握したり、振動を加えて揺れ方を把握したり、振動観測により建物や周辺地盤の特性を調べたりします。構造解析ではコンピュータを使った数値計算により、様々なシミュレーションをして構造物を評価します。どちらも構造的な物理現象を確認することが目的で、得られた結果を理論と関連付けながら分析し、建築の構造デザインやリノベーションなどへ役立てることになります。

検討の対象は構造物となることが多いですが、それ以外に例えば地震時の家具の転倒対策などの安全性評価に関する活動も実施しています。関連して防災全般について構造的な面からアプローチするような研究もあります。

構造系の研究テーマ

研究テーマについては、構造物の力学的特性の分析・把握に重点を置いた基礎研究、合理的な構造システムを提案する開発研究、様々なシステムを建物の構造デザインへと活かす方法を模索する応用研究など、色々な形態があります。学生は興味がある分野について教員と相談しながら研究テーマを決定します。

（文責 / 構造系教員 松田和浩）



中高層木造建物の開発実験の様子

●論文一覧

○修士論文

－犬塚千聖｜ CLT ロッキング壁柱における柱頭およびミドルゾーンの力学的挙動に関する実験研究
－坂本遼｜プレストレスを導入したオイルダンパー木質制振架構の力学的特性の把握及び地震応答予測法の提案
－中根健太｜連続体シェルの高性能化に関する基礎的研究－繊維補強モルタルを用いた部材開発とその応用検討－

○卒業論文

－跡見勇斗｜空間微分の差分近似に基づく回転動の推定およびラブ波の位相速度推定に関する研究
－伊地知秋水｜高強度せん断補強筋を有する短スパン RC 梁の耐震性能 (その 1) せん断強度
－板谷優輝｜高強度せん断補強筋を有する短スパン RC 梁の耐震性能 (その 2) 変形性能
－遠藤隆也｜人口流動が災害時における被災者数に及ぼす影響に関する研究
－榊原唯｜様々な制振壁履歴を再現する複合モデル作成法
－久田悠太｜ CLT ロッキング架構の開発における壁柱柱頭部定着板の力学的挙動に関する実験研究～定着板圧縮実験及び解析検討～
－濱田 龍星｜高強度・高靭性な薄肉パネルの開発に関する研究　～その１　載荷試験による評価～
－渡邊 舜也｜高強度・高靭性な薄肉パネルの開発に関する研究　～その２　工法の検証と適用検討～
－熊田健汰｜建築業界におけるデジタルツインの適用について
－河地大輝｜地震波干渉法に基づく二次元地盤構造推定手法の高度化に関する研究 その 1：適切な擬似加振記録を得るための計測時間と測線長に関する検討
－三輪竜雅｜地震波干渉法に基づく二次元地盤構造推定手法の高度化に関する研究 その 2：名古屋市港区における二次元地盤構造推定への適用
－原田貴斗｜地震波干渉法に基づく二次元地盤構造推定手法の高度化に関する研究 その 3：高分解能な二次元地盤構造を推定するための試み
－苅谷碧斗｜鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の終局モーメント算定法の簡略化
－川上巧｜高強度せん断補強筋の重ね継手性能に関する実験
－小林拓斗｜高減衰ゴムによる振動軽減効果を期待した片持ち梁形式階段モデル実験
－松井歩斗｜釘接合部の繰り返し挙動に着目した真壁パネル制振壁の開発 その 1 ～架構の実大実験～
－古本圭｜釘接合部の繰り返し挙動に着目した真壁パネル制振壁の開発 その 2 ～数値解析による検討～
－鈴木颯太｜火災と地震が同時に発生した場合の固有値計算を用いた鋼構造骨組の崩壊荷重
－相馬佑太｜微動アレイ探査における空間自己相関法と周波数－波数法の特長に関する研究
－橋本晃輔｜数値シミュレーションに基づく長周期緊急地震速報の適用に関する研究 その 1：手法の提案と数値シミュレーションの検証
－吉田龍弘｜数値シミュレーションに基づく長周期緊急地震速報の適用に関する研究 その 2：既存の予測手法との比較による妥当性の検討
－岡田大空｜ 3 本の杭を有するフーチングの有限要素解析
－加納隆平｜最貧国の難民キャンプでも作成可能な住宅の試作
－古居元｜高密度地震観測ネットワークへの適用を想定した乗用車の振動特性に関する研究
－水野由唯｜中高層木造建物用の集成材における圧縮応力経験後の引張強度の低下に関する検討～昨年度からの改良を行った圧縮・引張実験～
－水野凜｜プレストレスで LVL の支持材を補強したオイルダンパー木質制振壁の開発～実用化に向けたテンション材の改良～
－本田有貴也｜大地震時の熱機器使用に関する安全性検討の試み～検証実験による現象の再現～
－川端祥英｜高強度鉄筋を用いた RC 柱のせん断ひび割れとせん断強度 (その 1) せん断スパン比の影響
－古橋佳歩｜高強度鉄筋を用いた RC 柱のせん断ひび割れとせん断強度 (その 2) コンクリート強度，軸力比，せん断補強筋比の影響
－三井紀代高｜コンサートホール音響反射板の取り付け角度による振動特性の変化
－山下達也｜ケーブルラックにおける水平構面の耐震補強方法
－渡邉美咲｜将来の木造建物分布推計に基づく活断層地震に対する土地利用規制に関する研究
－津村慶二郎｜石の配置および全体形状の違いによる城石垣の耐力に関する数値解析的検討

連続体シェルの高性能化に関する基礎的研究
－繊維補強モルタルを用いた部材開発とその応用検討－

Fundamental Research on Improving the Performance of Continuum Shells: Development of Members Using Fiber-Reinforced Mortar and Its Application Study

武藤研究室　　213435006　中根 健太

はじめに

本研究では、次世代の高強度・高耐久かつ薄肉・軽量の RC 曲面構造への可能性の検討を目的として、高強度モルタルに着目し開発を行う。既往の高強度繊維補強モルタルは従来の材料と同等の質量密度でありながら、Fc100 クラスの高強度材料も利用されている。一方、流動性や充填性の問題で内部配筋の難易度が高く、面外曲げへの補強には部材表面への各種補強材の接着が用いられることもあるが、剥離や耐火性の問題もある(写真 1,2)。

本報では前報に続き、高流動性と自己充填性に優れた超高強度繊維補強モルタル(以降 UFC)にステンレスメッシュを内部配筋し、配筋条件の異なる薄肉平板の製造と曲げ特性の試験を行い、高性能なシェル構造への可能性を検討する。



写真 1 ステンレス板補強

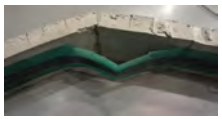


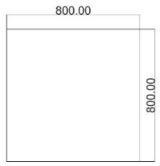
写真 2 CF 補強(剥離)

試験体の概要

表 1 に試験ケース、図 1 に試験体の平面、図 2 に各試験体の断面を示す。断面は幅 800mm、厚さ 20mm、配筋条件は無筋モルタルと SUS304 メッシュを厚さ方向に対して中央、下、中央＋下に配筋した計 4 種とした。

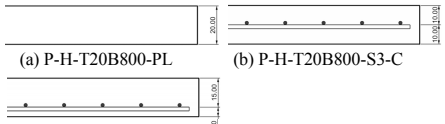
表 1 試験ケース

ケース名	寸法	配合条件	配筋条件(SUS304-Mesh)	引張鉄筋比
P-H-T20B800-PL	20×800×800	UFC		
P-H-T20B800-S3-C			中央	0.79%
P-H-T20B800-S3-U			下	0.79%
P-H-T20B800-S3-CU			中央+下	1.58%



(a) 試験体平面　　(b) メッシュ平面

図 1 試験体平面



(a) P-H-T20B800-PL　(b) P-H-T20B800-S3-C

(c) P-H-T20B800-S3-U　(d) P-H-T20B800-S3-CU

図 2　試験体断面

本研究では Fc150 以上の超高強度モルタルに対して PVA(ポリビニルアルコール)繊維による補強を行った超高強度繊維補強モルタルを用いる。UFC の 3 分静置後のフロー値は 320～340mm であった。また、養生後の圧縮強度は 143.1～155.8N/mm^2、平均 149.1 N/mm^2 であった。本実験では、線径 2.0mm、間隔 20mm、交点を電気抵抗溶接した SUS304 メッシュを使用した。なお、UFC の自己充填性と高流動性に期待し、厚さ 20mm の平板にメッシュを組み合せている。

本実験では、打設時の変形を抑えるため鋼製型枠を使用し UFC の流動性を生かした回転打設を採用した。これにより、密度が均一になる他、表面加工が不必要になる。養生に関しては脱型後に蒸気養生を行った後、気中養生を実施した。

脱型後の目視では、試験体の表面に断面欠損は見られず、上下面ともにはらみ出しは確認されなかった。脱型後及び養生後も厚さ 20mm で良好な製作精度での製作を確認することが出来た。



写真 3 打設の様子



写真 4 加力の様子

実験概要

本実験では、PCa 部材のイメージとして 4 辺単純支持の条件で、アクシデンタルな面外のパンチングを含めた状況を想定した面外集中荷重による単調増加載荷を実施した（載荷面は直径 100mm の円形）。載荷速度は 1 mm/min と設定した。

実験結果

図 3 に荷重－変位関係を示す。

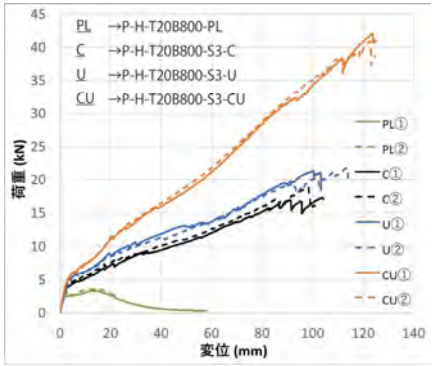


図 3 荷重-変位関係

耐力・変位の評価

先ず、曲げに有効な主筋位置にメッシュを配筋することにより、大幅な耐力と変形性能の向上が確認されている（U は最大荷重において PL の約 6.3 倍）。さらに断面中央（初期中立軸位置）のみの配筋のケースでも、それに近い補強効果が確認された（これは薄肉での大変形までの追従性と膜伸びへの抵抗及びメッシュの厚さ方向への拘束効果と想定される）。さらに、多段配筋の CU では U の約 1.9 倍の最大耐力を示すことが示された。

表 2 最大耐力と最終変位

ひび割れの進行について

U は同心円状のひび割れが一周発生した。そして側面から変位を観察してみると、CU が全体的に変形しているのに対して U は載荷部分の付近から急激に変形している。これによりセンター筋はアンダー筋に組み合わせることで荷重を周囲へと分散する効果があると推測できるが、これはセンター筋とアンダー筋が繊維によって一体となって挙動することに起因すると想定される。



写真 5 CU① 最終状態



写真 6 CU① 載荷後側面



写真 7 U② 最終状態



写真 8 U② 載荷後側面



写真 9 C① 最終状態



写真 10 C① 載荷後側面

理論解

表 1 に示した試験ケースのうち、配筋条件のみ異なる 3 種類の試験体を分析する。配筋条件は、中央一段配筋(以降 C)、下一段配筋(以降 U)、中央+下二段配筋(以降 CU)である。表 3 に使用した材料の機械的特性を示す

表 3 材料の機械的特性

	モルタル	SUS304
ヤング係数	46000 N/㎟	193000 N/㎟
ポアソン比	0.2	0.3
圧縮強度	150 N/㎟	
引張強度	7.45 N/㎟	
降伏点		222 N/㎟

試験の精度と弾性変形の確認の為、平板の基本解であるナヴィエの解より導出し、級数解と比較する。[2),3),4)]

中央に長方形の面荷重を載荷する場合のたわみ w の式は、

$$\omega = \frac{16p_0}{\pi^6 D}\sum_{m=1,3,5,\cdots}\sum_{n=1,3,5,\cdots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi\alpha}{2a}\sin\frac{n\pi\beta}{2b}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

となり、平板全域等分布荷重の場合のたわみ w の式は、

$$\omega = \frac{16p_0}{\pi^6 D}\sum_{m=1,3,5,\cdots}\sum_{n=1,3,5,\cdots}\frac{1}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

となる。板の曲げ剛性 D、荷重 p_0 の式はそれぞれ、

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

$$p_0 = \frac{P}{A} \quad (4)$$

である。

自重によるたわみは微小であるため無視する。以後、評価の際にはこの値を指標とする。

数値解析概要

シェル要素を用いた複合非線形解析により実施した。図 4 に解析に使用したモルタルの応力-ひずみ関係、図 5 にメッシュの応力-ひずみ関係を示す。超高強度繊維補強モルタルの引張側は実験結果に基づき破壊エネルギー Gf を設定した。解析モデルは実際の平板の 1/4 の範囲を対象とした(図 6)。表 4 に数値解析の諸条件を示す。平板の四隅の反り上がりについては、無引張のインターフェース要素でモデル化した。

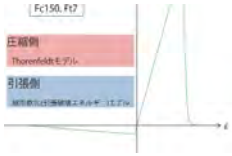


図 4 モルタルの応力-ひずみ関係のモデル化

図 5 メッシュの応力-ひずみ関係のモデル化

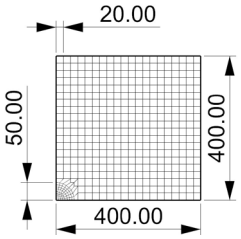


表 4 解析条件

使用要素	8節点シェル要素 (積層分割数: 8)
要素数	449
解析種別	複合非線形解析
増分法	荷重増分法

図 6 解析モデル

解析結果

写真 11 に試験後の試験体 U の変形、図 8 に解析の変形モードを示す。また、図 7 にそれぞれ実験、解析により得られた荷重－変位関係を示す。解析結果は実験値に概ね良い対応を示した。

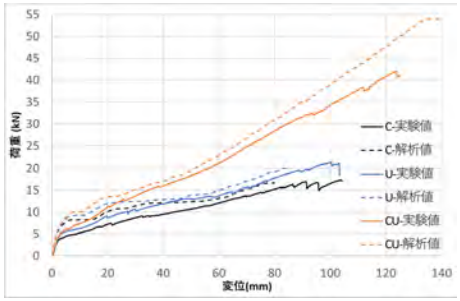


図 7 荷重-変位関係



写真 11 試験体 U 変形

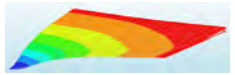


図 8 解析の変形モード

ひび割れ発生時

表 5 にひび割れ発生時の各試験体の荷重と変位を示す。実験は載荷速度 1 mm/min.と変位基準の制御としたため、ひび割れ発生付近では荷重が急速に上昇しており、各試験体に少しばらつきはあるが、3.1~4.9kN の間で初期ひび割れが発生している。初期ひび割れの発生にはステンレスメッシュの影響はない可能性が高い。また、試験体のひび割れは目視による確認のため、解析における初期ひび割れと比較すると、発生時の荷重は幾分大きい。

表 5 ひび割れ発生時の荷重・変位

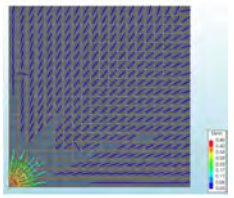
		荷重(kN)	変位(mm)			荷重(kN)	変位(mm)			荷重(kN)	変位(mm)
C	C①	3.2	1.9	U	U①	4.6	2.7	CU	CU①	3.1	1.5
	C②	4.4	2.8		U②	3.4	2.2		CU②	4.9	3.3
	C解析	1.8	0.5		U解析	1.8	0.5		CU解析	1.8	0.5

ひび割れ分布

図 9 に実験後の各試験体の下面側ひび割れと、数値解析のひび割れ分布の比較を示す。試験体 C・U においては放射状のひび割れのみ生じているが、試験体 CU に関しては放射状のひび割れに加え、それに直交する同心円状のひび割れも生じていることがわかる。また、数値解析においても CU のみ同心円状のひび割れが生じており、実験結果と良い対応を示している。



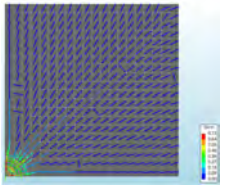
(a) 試験体 U 裏面



(b) 同左解析結果



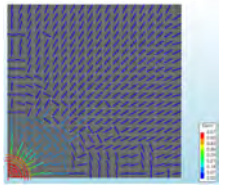
(c) 試験体 C 裏面



(d) 同左解析結果



(e) 試験体 CU 裏面



(f) 同左解析結果

図 9 ひび割れ分布の比較

最大耐力

表 6 に試験体 C・U・CU の最大耐力時の荷重と変位の比較を示す。C は中立軸位置に配筋されているため、U ほどの補強効果はないが、変形が進行することにより、大変形時の軸伸びに引張抵抗することで一定の耐力向上が見込めることが示された。C・U に関しては解析の最大荷重は比較的良い対応を示している。

表 6 最大荷重・変位

		荷重(kN)	変位(mm)			荷重(kN)	変位(mm)			荷重(kN)	変位(mm)
C	C①	17.0	91.0	U	U①	21.4	100.0	CU	CU①	42.0	123.6
	C②	18.8	98.2		U②	22.0	113.0		CU②	40.9	122.8
	C解析	16.6	76.5		U解析	19.9	82.8		CU解析	53.9	133.7

まとめ

本報では超高強度繊維補強モルタルを使用した薄肉平板に対するメッシュ補強効果に関して、先ず面外曲げ挙動を確認する為の載荷実験を実施し、同時にパネル製作の可能性と精度の検証を実施した。試験体は多段配筋を含め不具合無く、良好な精度での製作が確認され、それぞれ耐力・靭性共に良好な性能を確認することが出来た

また、平板の曲げ特性を数値解析によって評価をした。平板は超高強度繊維補強モルタルとステンレスメッシュ筋の組み合わせにより、曲げに対する耐力が非常に向上した。実験と解析により、超高強度繊維補強モルタルのもつ強度とメッシュ筋の補強効果があると示され、試験体 C、U、CU のどれもが平板として十分な性能を持つことより、20mm という挑戦的な薄さでも高強度で高靭性な薄肉平板を開発することは可能であると考えられる。

参考文献

1) 武藤 厚、加賀 俊一、他「コンクリートシェルの薄肉・軽量化に関する基礎的検討（1~4)」、日本建築学会大会、2021
2) 半谷裕彦、平板の基礎理論、第 1 版、第 1 刷、彰国社、1995
3) Pucher, A., Einflubfelder elastischer Platten, Springer-Verlag, 1961
4) Sawczuk, A. and Jaeger, T., Grenztragfahigkeits-Theorie der Platten, Springer-Verlag, 1963

プレストレスを導入したオイルダンパー木質制振架構の力学的特性の把握及び地震応答予測法の提案

INVESTIGATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PASSIVELY－CONTROLLED WOODEN FRAME WITH OIL DAMPER USING PRE-STRESS AND PROPOSAL OF ITS SEISMIC RESPONSE PREDICTION METHOD

坂本 遼*
Ryo SAKAMOTO

Keywords : *Timber Structure, Passive control system, Oil-Damper, Bi-liner+Slip, Seismic Response Prediction Method*
木質構造, 制振壁, オイルダンパー, ポストテンション, 地震応答予測法

1. はじめに

1. 1 背景・目的

建物の財産保持性を高めるため、躯体損傷時のエネルギー吸収以外の手段で耐震性能を向上させる技術の研究が進められてきた。その中でも制振構造は、建物壁内にダンパーを導入することで剛性と粘性を付加し、応答を抑制するものであり、既存構造物の耐震性能を比較的効率よく向上させることができる。近年、このような技術に関する研究が盛んに行われており、例えば笠井・坂田らはシアリンク型の K 型ブレース制振壁に対して粘弾性、鋼材、摩擦ダンパーを適用した事例を示している [1]。佐藤・永野らはダイヤモンド形状に組んだ斜材の上下頂点に粘弾性ダンパーを配置した制振壁を対象として解析検討を行っている [2]。このような研究を元にして、様々な制振壁が商品化されているが、速度依存型ダンパーでは減衰性能と剛性を同時に加えるというコンセプトのもと、粘弾性ダンパーが最も多く用いられている [3]。ただし、粘弾性ダンパーは一般に温度依存性が高く、住宅における性能評価面で課題が残る。

速度依存型ダンパーとしては、性能の安定したオイルダンパーが自動車などの機械分野で多く用いられ、建築分野でも高層建物の振動制御で多く用いられている。一方、小規模住宅を想定した開発では宮津・曽田 [4]や、篠原・五十田ら [5]による開発事例などがあるものの、多く普及しているとは言えない。その原因としては、荷重レベルが比較的低いこと、小さい層間変形時のエネルギー吸収効率が低いことなどが挙げられる。加えて、それを解決しようと部材断面を増やせばコストや施工で問題となることが多い。

また、小規模住宅に広く用いられる木質構造は概してスリップ挙動を示すが、この場合については弾性挙動を示す主架構とは異なり、未だ応答制御法 [6]が確立しておらず、検討に関しても、例えば松田らの事例 [7]などがあるものの、弾性架構のそれと比べて充実しているとは言い難い。それゆえ、このような構造物は現状、目標変形を満足するダンパー量を決定するためには時刻歴応答解析を試行錯誤的に行う必要があるが、制振構造の応答低減度はダンパー量のみならず、ダンパーの取り付け部材やその接合部周辺部材である「支持材」、柱や大梁などで構成される「主架構」などの剛性バランスに支配される [6]ため、この手法で決定した場合のダンパー量はあくまでその構造物のみでしか適用できない断片的なものであり、単に非効率であるだけではなく、それ以降の知見につながり辛い。

以上を踏まえ、小規模住宅の設計自由度を高めるためにも、小規模住宅におけるオイルダンパーの効率的な設置方法を検討すること、スリップ架構においても種々のダンパーについて理論に基づく合理的な設計法に関する議論を進めることは重要であり、さらには、近年注目されつつある大型木質構造物への制振技術の適用研究の発展に寄与し得ると考える。

そこで、本論文では①オイルダンパーを対象とした小規模住宅用の新しい制振壁②本制振壁を包括するような、オイルダンパーを対象とした弾塑性一質点系の応答予測法を提案する。

本研究では、支持材にポストテンションを導入した新しい制振壁の動的・力学的挙動の把握のためにそれらの静的・動的な強制変形実験や 1 層木質架構における振動台実験を実施した。さらに、提案する予測法の精度検証を、時刻歴解析により得た精解と予測法により求まる最大応答を比較することで行った。

1. 2 本制振壁のコンセプト

以下に本研究で提案する制振壁のコンセプトを述べる。本研究では主要なダンパーの一つであるオイルダンパーを用いるが、住宅の壁内に無理なく収められる容量として、荷重レベルが 4～8kN のものを対象とする。

ダンパー荷重が制振壁の水平抵抗力に変換されるとき、その比率はダンパーの設置方法によって変化する。例えば図 1 のように、一般的なブレース型でダンパーを入れると、壁のアスペクト比から水平抵抗力は約 1/3 となり、木造住宅用の構造要素としては耐力が低くなる。一方、図 2 のように間柱型で水平にダンパーを設置すると、ダンパー荷重は制振壁の水平抵抗力とほぼ等しくなり、制振壁の耐力を高めることができる。しかし、ダンパー周辺の部材や接合部(以下、支持材)は引張力により変形しやすいため、支持材の剛性を高めることが難しく、壁の変形に対するダンパー変形量、すなわちエネルギー吸収量が低下してしまう(図 2 右)。支持材の剛性を強引に高めることも可能だが、コスト面、施工面で無理のある設計になってしまう。また、木造住宅用の制振壁では、様々な壁高さ・柱スパンに同一製品で対応させるために、支持材に長さ調整機構を持たせることが一般的だが、それが支持材に生じるガタの原因ともなっており、制振壁の設計を更に難しくしている。

そこで本論文では、支持材全体にポストテンションを加えた間柱型のオイルダンパー制振壁（図 3）を提案する。間柱型のため制振壁の耐力を十分に確保でき、ポストテンションにより支持材全体を締め固めるため、横架材との圧着面で離間が生じる前の支持材は極めて高剛性になる。圧着面を離間させないために必要なテンション力は、用いるダンパーの耐力から容易に評価でき、本ケースでのテンション材は M12 全ねじボルト 2 本程度で十分である。圧着面は常に圧縮応力状態を確保するため、ビスの本数等、圧着面の接合部設計を簡素化できる。テンション材のダンパー側端部は、オイルダンパーおよび支持材のピンと同一にすることで、各部材に生じる曲げ変形を防ぐようにする。下側テンション材の土台側端部は、基礎にアンカーした金物と固定し、土台の曲げによるダンパー変形の損失を抑える効果も併せ持つ。上側テンション材の梁側端部は、梁せいが 180mm 程度あれば梁の曲げ変形・曲げ応力度が問題にならないことを確認している。様々な住宅のサイズに合わせる長さ調整機構に関しても、調整後に全体にテンションを導入することで当該部にガタが生じることを防ぐようにする。

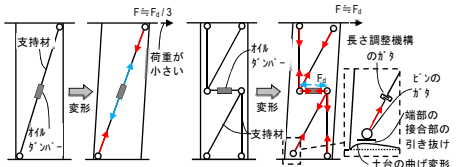


図 1 ブレース型のオイルダンパー制振壁

図 2 間柱型のオイルダンパー制振壁

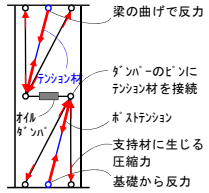


図 3 支持材全体にポストテンションを加えた制振壁

2. 制振壁の力学的挙動

2. 1 試験体概要

図 4 に、試験体鋼管タイプ、合板タイプ、LVL タイプ 1、LVL タイプ 2 を示す。各試験体は共通して、柱高さは 2812.5mm、柱スパンは 910mm であり、鋼管タイプと合板タイプは 2P、両 LVL タイプは 1P である。上下に 2 本ずつあるテンション材に、鋼管タイプ、合板タイプは M12 の全ネジをターンバックルで、LVL タイプはナットで締め固めることでポストテンションをそれぞれ 15kN 導入する。また、ダンパーと支持材及びテンション材で共通のピンを用いて接続することで接合部のガタや支持材の曲げ変形を防ぐことができる。さらに、支持材が面外へ変形することを防ぐために、支持材のダンパー付近に面外拘束を設けている。なお、合板タイプ、LVL タイプ 1, 2 は、L 字の金物にビスを打ち込むことで支持材と横架材を接合しており、支持材が横架材に局所的にめり込むことを防ぐために、これら接合部の間に鋼板を敷いている。

鋼管タイプ(図 4a)は、支持材はϕ 42.7 の鋼管で構成されており、ねじで長さの調整を行う。但し、今回は試作段階のため鋼管はねじがなく、圧着力のみで固定されている。合板タイプ（図 4b）は、支持材に厚さ 28mm の針葉樹構造用合板(2 級、C-D)を用いており、現場でカットすることにより架構に応じた寸法に調整することを想定している。

LVL タイプ 1(図 4c)は支持材とダンパーを、LVL に設けられたスリットに鋼板(以下、ダンパー受け材)を差し込み、ドリフトピンを打ち込むことで接続している。

LVL タイプ 2(図 4d)は支持材とダンパーを、LVL の断面とダンパー受け材をビスによって接続しており、この 2 つの接触面積を既往試験体から増加させている。さらに、載荷に伴うポストテンションの減少を抑制するためにテンション材の接合部をダブルナットにしている。

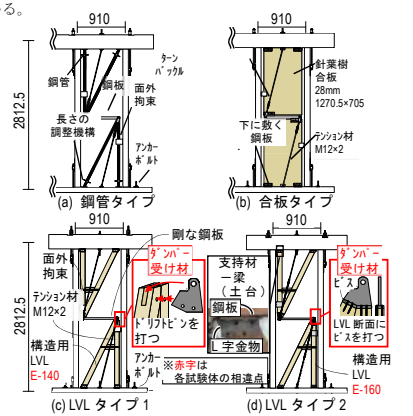


図 4 試験体概要

2. 2 静的実験

2. 2. 1 実験概要

図 5 にセットアップを示す。オイルジャッキにより梁に水平方向の強制変位を与えることで載荷する。柱頭・柱脚のホールダウン金物は、載荷前のボルト軸力を 3kN で管理した。試験体が面外方向に変形することを防ぐために梁に面外拘束を設けている。載荷スケジュールは、表 1 中の目標変形角を基本とし、上から順に正負交番 3 回繰り返し載荷とする。梁頂部の荷重 F_R, 層間変形 u_R、柱脚の浮きや土台の変形等に加え、支持材の軸力や接合治具の水平変位や浮き上がりを計測している。

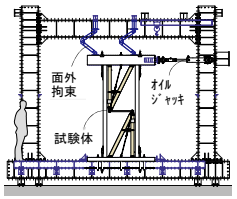


図 5 セットアップ

表 1 載荷スケジュール

目標変形角 (rad.)	変形 (mm)
1/ 900	3.13
1/ 600	4.69
1/ 450	6.25
1/ 300	9.38
1/ 200-(1)	6.25
1/ 150	18.75
1/ 100-(1)	28.13
1/ 200-(2)	14.06
1/ 75	37.50
1/ 50	56.25
1/ 30	93.80

2. 2. 2 実験結果

図 6 に各試験体の状態 R での荷重－変形関係を示す。

いずれの試験体も、載荷が進むごとにテンション材が横架材から離間し、プレストレスが抜けていくことで剛性が徐々に低下していくものの、想定のダンパー荷重である 6kN 内では線形挙動を示した。

＊名城大学院理工学研究科建築学専攻　大学院生　　* Grad. Student, Grad. S. of Sci. and Eng., Architecture Major, Meijo Univ..

主査　松田和浩　准教授
副査　市之瀬敏勝　教授
副査　高橋広人　准教授

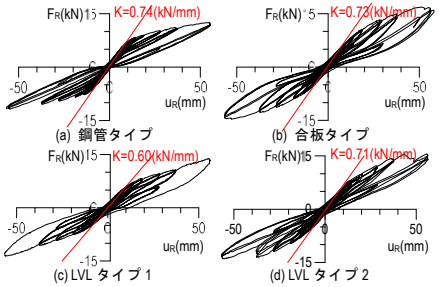


図 6　状態 R　荷重ー変形関係

2. 2. 3　変形寄与分担の把握

ダンパーによるエネルギー吸収効率を高めることを目的として詳細な検討を行うために、各試験体状態 R における各部分の変形寄与分担を分析する。ここで、変形寄与とは各部材の壁頂部水平方向の変形への寄与を指す。文献 8), 9)で示す木質制振壁の水平バネモデルのように、図 7 に示すような局所変形はいずれも直列系のバネによる変形と考える。すなわち、ダンパーを配置した制振壁では、ダンパーと直列の関係になる部分であり、これらの変形を最小限にすることで、ダンパー変形を最大化させることができる。

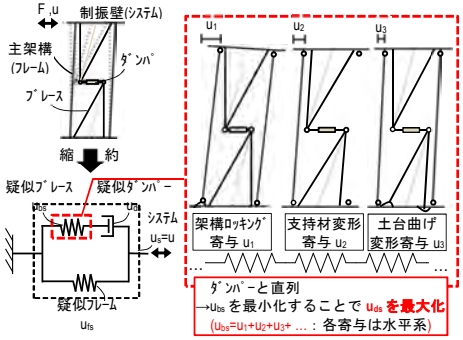


図 7　制振壁のバネ系モデルへの縮約

図 8 に F_R=6.0kN 時の各タイプの変形寄与分担を示す。壁頂部の変形 u_R を 100%としたときの割合で示しており、上記で求めた変形を全て加えても足りない部分は「残り」として示している。架構のロッキング $u_{(i)}$や横架材の曲げ変形 $u_{(ii)}$+$u_{(iii)}$、およびブレースの水平変形の寄与 $u_{(iv-1)}$がそれぞれ 20%を超えており、この 3 つの局所変形が制振壁の剛性に大きく影響していると言える。また、図 8a から、鋼管ブレースの水平方向の変形寄与の割合が 35%と大きいことがわかる。図 8b の合板タイプでは残りが 53%で鋼管タイプよりも大きい。合板の高さ 1270.5mm, 幅 710mm, 厚さ 30mm, 文献 10)より曲げヤング係数を 3.5kN/mm², せん断弾性係数を 0.4kN/mm² とした時の、上下の合板の曲げ及びせん断変形を導出した場合、それぞれ 2.7mm, 1.8mm となる。これは全体の約 29%と約 20%の寄与に相当することから、合板自体が変形していると考えられる。

また、各 LVL タイプでは、どちらもロッキング寄与はほぼ同じような値をとることに対し、横架材の曲げ変形は LVL タイプ 2 の方が LVL タイプ 1 と比べて、割合として倍近く大きい値を示した。これは、タイプ 1 の支持材と横架材の間に敷く鋼板がタイプ 2 と比べて薄いことで横架材に局所変形が生じ、計測結果に反映されなかったことが考えられる。また、ダンパー受け材の接合部のガタによる寄与も無視できないが計測不良により求めることができなかった。この値は「その他」に含まれていると考えられる。

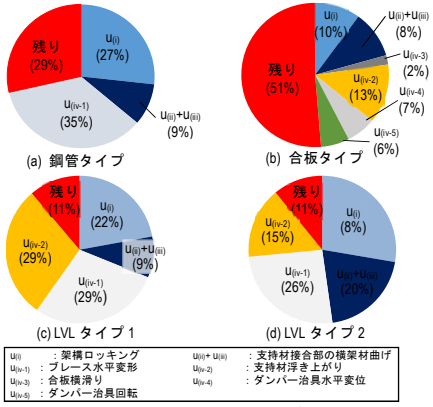


図 8　F_R=6kN 時の変形寄与分担割合

2. 3　動的実験

合板タイプおよび LVL タイプ 2 において、動的載荷実験を実施した。実験に用いる試験体は 2.1 節で扱った試験体とほぼ同様である。ダンパー部には最大荷重が 6kN 程度のオイルダンパーを用いた。なお、各タイプの実験の仕様や結果は殆ど同様であるため、ここでは LVL タイプ 2 のみの結果を述べる。

2. 3. 1　実験概要

図 9 にセットアップを示す。制振壁頂部の荷重 F と変形 u およびダンパー荷重 F_d と変形 u_d を中心に計測した。加えて、支持材軸力のつり合いを把握するために斜め方向の LVL の軸力を計測している。ダンパー荷重および LVL の軸力は，ダンパー或いは LVL の表面と裏面に貼りつけた歪ゲージにより計測する。ただし、ダンパー荷重はダンパー歪の計測不良のため、支持材軸力の釣り合いから得た値の平均値を用いている。なお、制振壁およびダンパーの荷重ー変形の値の一部にノイズが見られたため、高振動数成分を除去している。表 2 に各加振の目標変形角と振動数のセットを示す。サンプリング周期は 102.4 Hz である。

表 1　加振ｽｹﾞｭｰﾙ

目標変形角 (rad.)	変形 (mm)	振動数 (Hz)
1/ 1000	3.2	2.06
1/ 500	5.6	2.06
1/ 400	6.6	2.06
1/ 240	11.7	2.04
1/ 200	14.5	1.70
1/ 120	24.8	1.02
1/ 100	30.0	0.85
1/ 67	43.3	0.57
1/ 60	48.6	0.51
1/ 45	63.6	0.38

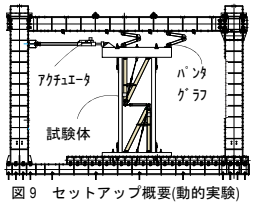


図 9　セットアップ概要(動的実験)

2. 3. 2　実験結果

図 10 と図 11 に、1/400, 1/200, 1/120, 1/67, 1/60 rad. における本試験体の制振壁の荷重ー変形履歴およびダンパーの荷重ー変形履歴を示す。ダンパーは小変形時こそループの面積が小さく、エネルギーをあまり吸収していないものの、それ以降ではほぼ矩形の履歴形状を示しており、スリップも殆ど確認されなかった。

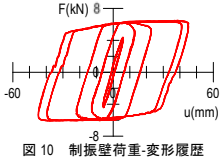


図 10　制振壁荷重-変形履歴

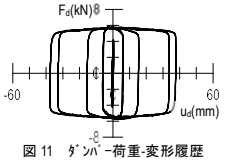


図 11　ﾀﾞﾝﾊﾟｰ-荷重-変形履歴

3.　木質制振架構の動的挙動

3. 1　振動台実験概要

LVL タイプ 2 を組み込んだ木質架構(図 12)について、その動的挙動を把握するために振動台実験を実施した。

図 13 に、本実験で比較検討する 2 種類の試験体、耐震試験体および制振試験体を示す。どちらも 3P の木質架構で、両外は耐力壁を両面で計 4 枚まで張ることができる。耐力壁として構造用合板を用い、釘本数により壁倍率を調整している。本実験では比較的軽めの耐震等級 3 相当の総 2 階建 30 坪住宅の一階部分を想定しており、1/120 rad.時の標準層せん断力係数 C_0 の値が 0.4 程度になるように錘の質量を耐震試験体は 49.0kN, 制振試験体は 48.4kN とした。加えて、各試験体の見かけのせん断耐力を 27~28 kN 程度となるように、フレーム部の耐力を加味した上で、耐震壁試験体は壁倍率 3.5 相当を 1 枚、壁倍率 2.5 相当を 3 枚、制振試験体は中央に配置する LVL タイプ 2 制振壁の負担耐力 6 kN を考慮し、壁倍率 3.5 相当を 1 枚、壁倍率 2.5 相当を 2 枚配置した。なお、1/120 rad.時のフレームおよび耐力壁のせん断耐力は、別途で行われたそれぞれの単体での動的実験の結果を元にしている。

入力地震動として、BSL 波および JMA 神戸波を用いた。20 gal の step 波、white noise 波、BSL 波の 45%と 91%のセットをこの順に 4set 繰り返した後、BSL 波の 100 %を 2 回、最後に JMA 神戸波の 70 %を 1 回入力した。計測位置は主に、試験体梁中央の絶対変位を振動台外にある計測用タワーに取り付けられたレーザー変位計から、梁および土台の絶対加速度を各々取り付けられた 1 軸の加速度計から計測している。また、ダンパー及びテンション材の軸力を各部材の表裏に貼付した 2 枚の歪ゲージの出力の平均値から把握している。

3. 2　実験結果

3. 2. 1　架構の層せん断力ー層間変形履歴

図 14, 15 に本制振架構及び耐震要素のみの層せん断力 Qー層間変形 u の関係を、図 16 に加振毎の最大応答を示す。耐震要素のみの架構は、91 %を経験した後に再び 45 %を経験すると 1 度目の応答よりも大きくなり，2 度目の 91 %加振では剛性が顕著に低下した。一方、本制振架構における BSL100%の 2 回目の応答は、1 回目から 5mm 程増加しているものの、BSL45%と 91%の加振でのそれぞれの応答は入力地震動毎に殆ど同じ値を示している。以上から、本制振壁を木質架構に導入することで耐力の劣化を抑えられ、且つ応答を低減していることがわかる。

3. 2. 2　ダンパーの動的挙動の把握

図 17 に本制振壁に取り付けたダンパーの荷重 F_dー変形 u_d 履歴を、図 18 に、BSL 波 45%, 91%の 4set 目、100 %の 2 回目及び KOBE 波 70 %でのダンパーの荷重ー速度履歴を示す。BSL 波ではいずれも本

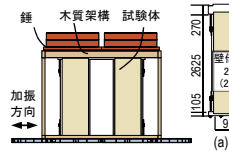
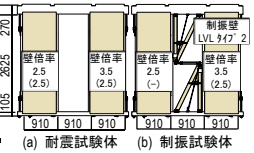


図 12 加振する木質架構



(a) 耐震試験体　(b) 制振試験体

図 13　試験体 ※()内は裏面壁の壁倍率

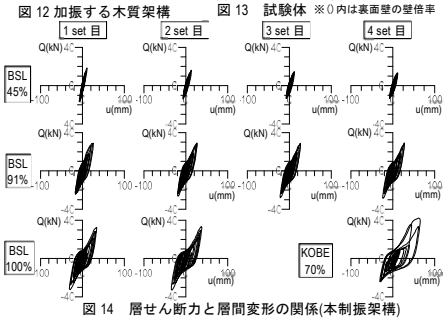


図 14　層せん断力と層間変形の関係(本制振架構)

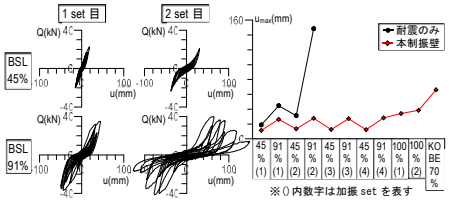


図 15　層せん断力と層間変形の関係(耐震のみ)

図 16　加振毎の最大応答

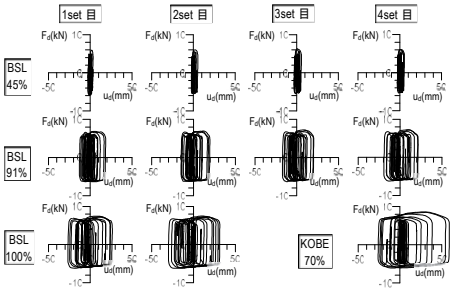


図 17　ﾀﾞﾝﾊﾟｰ荷重ー変形履歴

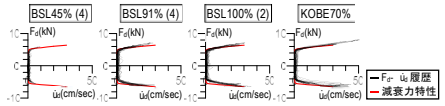


図 18　加振最終 set のダンパーの荷重―速度履歴

ダンパーの荷重は、その想定の最大値 6 kN 以内で推移している。加えて、KOBE 波 70%では F_d は 8kN 以上を示したものの履歴の形状が大きく崩れず、最大荷重以上の荷重に対してもある程度の性能を維持することがわかった。

3．2．3 テンション軸力の把握

図 19 に初期加振前及び各加振終了時の上下のテンション材の軸力を示す。テンション軸力は上下ともに一度約 3 kN 程低下した後、ほぼ一定値を保ち、常に目標値 24kN を上回っていた。

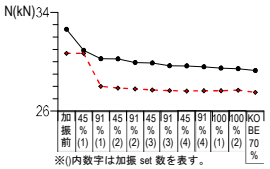


図 19　加振終了時のﾃﾝｼｮﾝ軸力

3．3　最大応答の評価

3．3．1　時刻歴解析による履歴再現

本研究では、図 20 に示すような、バイリニア＋スリップモデル則(後述)に従う主架構と、オイルダンパーと支持材からなる水平バネモデルを対象に検討を行った。

まずは、対象とする架構の復元力特性を設定する。主架構の減衰定数は、耐震試験体の white noise 波での伝達関数のカーブフィッティング [11]から h_0= 0.015 の初期剛性比例減衰とした上で、トリリニアの第一折れ点変位 u_c, 第二折れ点変位(すなわち塑性変位)u_y, および各次剛性 K_{f1}~K_{f3} を，耐震試験体は振動台実験の 45%, 91%の 1set 目の履歴を元に、p_B = 0.10 として試行錯誤的に作成した(図 21)。

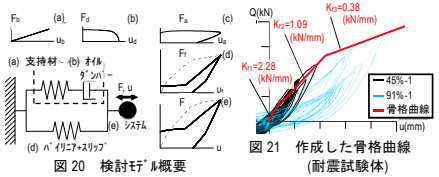


図 20　検討ﾓﾃﾞﾙ概要

図 21　作成した骨格曲線
(耐震試験体)

一方、制振試験体の各次剛性は、先述のように作成した耐震試験体のそれを、架構および合板の単体で別途行われた動的実験の結果から得られた包絡線のエネルギー吸収量の割合を乗じて低減した値を用いた。また、ダンパーの動的特性値は、振動台実験から得たダンパーの荷重－速度関係から作成し、支持材の剛性には、状態 R の 6 kN 以内の荷重－変形関係から得られる剛性を用いた。

図 22 に、BSL 45%, 91%の 1set 目の耐震・制振試験体の層せん断力－層間変形履歴の解析結果と実験結果を示す。制振試験体の解析結果は実験結果を 2 割ほど過大評価しているものの、いずれの試験体も設定した復元力特性によって概ね再現できている。

3．3．2　応答予測法への適用

4 章で後述する手順に則り、耐震・制振試験体について応答予測を行った。全体的な流れとして、①速度によって復元力特性の異なるオイルダンパーを、外乱経験時のエネルギー吸収量が等価な、復元力特性が一様のダンパー(以下、等価リニアダンパー)へと置換す

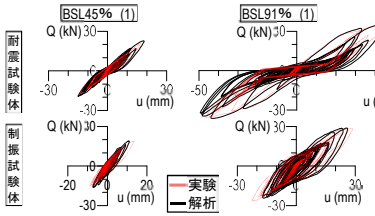
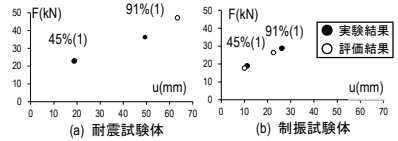


図 22　時刻歴解析結果と実験結果の比較

る。②バイリニア＋スリップ則をもつ主架構に①の等価リニアダンパーを付加した制振システムについて、等価線形化理論を用い、システムの初期減衰定数 h_0, 周期 T_0, 地震動経験時の固有周期 T_{eq}, 平均減衰定数 h_{eq} を求める。③ ②で求めた周期や減衰定数を用いた応答スペクトルに基づいて最大応答を求める、というものである。

図 23 に BSL45%および 91%の 1set 目の各試験体の評価結果を示す。耐震試験体は最大 3 割程度、応答を過大評価しており、制振試験体は最大 15%近く過小評価しているものの、いずれの試験体も最大応答を概ね予測できている。



(a) 耐震試験体　(b) 制振試験体

図 23　最大応答の予測

4．　オイルダンパー制振架構の応答予測法

4．1　弾性構造における減衰や周期の評価

オイルダンパーを用いた制振架構の応答予測法では、バイリニアシステムの最大応答の予測を簡単に行うために、荷重－速度関係がバイリニア型のオイルダンパーをエネルギー吸収量の平均が等価なリニア型のダンパー(以下、等価リニアダンパー)に置換する(図 24)。

まず、等価リニアシステムにおける線形粘性要素 C_{dL} と、バイリニアシステムにおける粘性要素の C_d, 二次粘性係数比 p, ダンパーのリリーフ率 μ_d との間に以下の関係が経験則として得られている [12]。

$$\frac{C_{dL}}{C_d}=\frac{(p\mu_d-p+1)^2+p-1}{p\mu_d^2},\quad \mu_d=\frac{u_{d,\max}}{u_{dy}}\left(=\frac{\dot{u}_{d,\max}}{\dot{u}_{dy}}\right) \tag{1a, b}$$

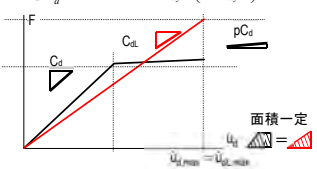


図 24　オイルダンパーの等価リニア化

主架構のみの固有周期 T_{f0}, 初期減衰定数 h_{f0} の時、システムの弾性周期 T_0, 弾性減衰定数 h_0 は次式で表される。

$$T_0=T_{f0}/\sqrt{1+K_{aL}'/K_{f1}} \tag{2}$$

$$h_0=h_{f0}+0.8h_{eqL}',\quad h_{eqL}'=\frac{1}{2}\cdot\frac{K_{dL}''/K_{f1}}{1+\left(1+K_b^*/K_{f1}\right)\left(K_{dL}''/K_b^*\right)^2} \tag{3a, b}$$

ここで、K_b^* : 等価支持材剛性, K_{dL}'' : 等価リニアダンパーの損失剛性, K_{aL}' : 等価リニアダンパーの付加系の貯蔵剛性であり、それぞれ

$$K_b^*=\frac{K_bK_d}{K_b+K_d} \tag{4}$$

$$K_{dL}''=C_{dL}\omega \tag{5}$$

$$K_{aL}'=\frac{\lambda_L^2}{1+\lambda_L^2}K_b^*,\quad \lambda_L=K_{dL}''/K_b^* \tag{6a, b}$$

と表わされる。なお、式(3a)中の係数 0.8 は、ランダム外乱を受けた時の減衰効果の低減を反映した係数である [14]。

4．2　バイリニア＋スリップにおける等価線形化理論

4．2．1　バイリニア＋スリップモデル概要

木質構造の復元力特性を表現しうる履歴則は多数あり、*Takeda* モデル、最大点指向モデルなどが代表される [15]が、本研究ではその中の一つであるバイリニア＋スリップモデル(図 25)を用いる。本履歴則の特徴として、

①非常に簡易で、かつ比較的精度がよい
②構造解析ソフトに組み込まれていることも多く、汎用性が高い
③木質構造における小変形時の高剛性を表現することができる
④定常応答での履歴吸収エネルギーがバイリニアモデルのみで表され、エネルギー吸収量を理解しやすい。

などが挙げられる。

本履歴則は各構成要素の並列体として表せる。定常応答では、バイリニアモデルのみが履歴エネルギーを吸収する(図 25 色塗部)。なお、スリップモデルは振幅拡張時のみ履歴エネルギーを吸収するが、本論文ではこれを考慮しない。バイリニア＋スリップモデルの各剛性 K_{f1}, K_{f2}, K_{f3} は、バイリニアモデルの各剛性 K_{B1}, K_{B2} およびスリップモデルの各剛性 K_{S1}, K_{S2} から次式で求まる。

$$K_{f1}=K_{B1}+K_{S1},\ K_{f2}=K_{B2}+K_{S1}=p_{f1}K_{f1},\ K_{f3}=K_{B2}+K_{S2}=p_{f2}K_{f1}\ (7a\sim c)$$

ここで、p_{f1}, p_{f2} は 2 次剛性比および 3 次剛性比である。

また、トリリニアの第一折れ点変位を u_c, 第二折れ点変位を塑性変位 u_y とし、u_y に対する u_c, u の比として塑性率 μ とひび割れ塑性率 μ_c を以下の式で定義する。

$$\mu=u/u_y,\ \mu_c=u_c/u_y \tag{8a, b}$$

ただし、本論では $u_c<u_y$ かつ $\mu_c<1$ を条件とし、スリップモデルの負勾配 K_{S3} の変形領域を考慮しない。

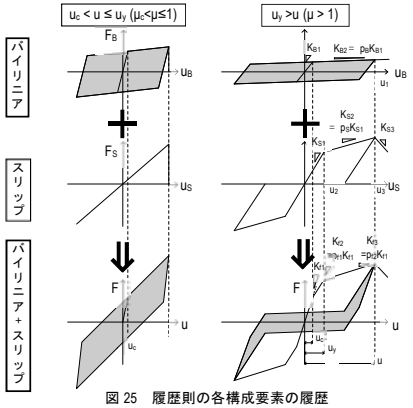


図 25　履歴則の各構成要素の履歴

4．2．2　等価線形化理論

対象とする履歴則に等価線形化理論を適用する。主架構の等価剛性 K_{feq} は、最大変形時の荷重を最大変位で除した値と定義する。ここで、等価剛性と主架構の初期剛性 K_{f1} の比 ρ_f は、塑性率 μ の関数として二次剛性比 p_{f1}, 三次剛性比 p_{f2} を用いて以下にして表される。

$$\rho_f=\begin{cases}f_1(\mu)/\mu,\ f_1(\mu)=\mu_c+p_{f1}(\mu-\mu_c) & (\mu_c<\mu\le 1)\\ f_2(\mu)/\mu,\ f_2(\mu)=\mu_c+p_{f1}(1-\mu_c)+p_{f2}(\mu-1) & (1>\mu)\end{cases} \tag{9}$$

システムの弾性挙動時の固有周期 T_0 および減衰定数 h_0 は 4.1 節の式(2), (3)と同様に求まる。一方、主架構塑性化後のシステムの等価周期 T_{eq} は

$$T_{eq}=T_f/\sqrt{\rho_f+K_{aL}'/K_{f1}} \tag{10}$$

また、この場合の等価な減衰定数は、塑性率 0 から最大塑性率 μ までの様々な振幅を持つ定常履歴により得られた減衰定数を平均化した平均減衰定数 h_{eq} を、下式(19)を用いて評価する。

$$h_{eq}=\frac{1}{\mu}\int_0^{\mu}h_{eq}'(\mu')d\mu'=\frac{1}{\mu}\int_0^{\mu}h_p'(\mu')d\mu'+\frac{1}{\mu}\int_0^{\mu}h_v'(\mu')d\mu'$$
$$=h_p(\mu)+h_v(\mu) \tag{11}$$

ここで、平均履歴減衰定数 $h_p(\mu)$, 平均粘性履歴減衰定数 $h_v(\mu)$はそれぞれ

(i) $\mu\le\mu_c$ の時

$$h_p(\mu)=0$$
$$h_v(\mu)=h_0 \tag{12a}$$

(ii) $\mu_c<\mu\le 1$ の時

$$h_p(\mu)=\frac{2\mu_c}{\pi\mu p_1}\left(\ln\frac{f_1(\mu)\mu_c^{(p_1-1)}}{\mu^{p_1}}\right)$$

$$h_v(\mu)=\frac{h_0}{\mu}\left[\mu_c+\frac{1}{p_1}\left(\sqrt{\mu f_1(\mu)}-\mu_c+\frac{\mu_c(p_1-1)}{\sqrt{p_1}}\ln\frac{\sqrt{p_1\mu}+\sqrt{f_1(\mu)}}{\sqrt{p_1\mu_c}+\sqrt{\mu_c}}\right)\right] \tag{12b}$$

(iii) $1<\mu$ の時

$$h_p(\mu)=\frac{2\mu_c(1-p_1)}{\pi\mu}\left\{\frac{1}{p_1(1-p_1)}\ln\frac{\mu_c^{p_1}f_2(1)}{\mu_c}+\frac{1}{f_2(0)}\left(\frac{f_2(\mu_c)}{p_2}\ln\frac{f_2(\mu)}{f_2(1)}-\mu_c\ln\mu\right)\right\}$$

$$h_v(\mu)=\frac{h_0}{\mu}\left[\mu_c+\frac{1}{p_1\sqrt{p_1}}\left(\sqrt{p_1f_2(1)}+\mu_c\sqrt{p_1}+\mu_c(p_1-1)\ln\frac{\sqrt{p_1}+\sqrt{f_2(1)}}{\sqrt{p_1\mu_c}+\sqrt{\mu_c}}\right)\right.$$
$$\left.+\frac{1}{p_2\sqrt{p_2}}\left(\sqrt{p_2\mu f_2(\mu)}-\sqrt{p_2f_2(1)}-f_2(0)\ln\frac{\sqrt{p_2\mu}+\sqrt{f_2(\mu)}}{\sqrt{p_2}+\sqrt{f_2(1)}}\right)\right] \tag{12c}$$

であり、式(12b, c)中の p_1, p_2 には次式を用いる。

$$p_1(\mu)=(p_{f1}+K_{aL}'/K_{f1})/(1+K_{aL}'/K_{f1}) \tag{13a}$$

$$p_2(\mu)=(p_{f2}+K_{aL}'/K_{f1})/(1+K_{aL}'/K_{f1}) \tag{13b}$$

これは、付加系が持つ貯蔵剛性を主架構の剛性に移すことを意味している [16]。

上記から得たシステム弾性周期 T_0、塑性化後のシステム周期 T_{eq} 等価リニアシステム減衰定数 h_0 を用いて、区間 $T_0\leqq T\leqq T_{eq}$ の範囲で疑似速度応答スペクトル $S_{pv}(T, h_0)$を作成する。

上記 T の区間内で、T について積分することで区間内のスペクト

ルを平均化した、等価速度スペクトル$\bar{S}_{pv}(T, h_0)$が求まる。

$$\bar{S}_{pv}\left(T_{eq},\, h_0\right)=\frac{1}{T_{eq}-T_0}\int_{T_0}^{T_{eq}} S_{pv}\left(T,\, h_0\right)dT \tag{14}$$

減衰の増加による応答低減を考慮するため、$\bar{S}_{pv}(T, h_0)$に、笠井らによる減衰効果係数 D_h[17]を乗じ、T_{eq}, h_{eq}における等価速度スペクトル $\bar{S}_{pv}(T_{eq}, h_{eq})$を得る。

$$\bar{S}_{pv}\left(T_{eq},\, h_{eq}\right)=D_h\cdot\bar{S}_{pv}\left(T_{eq},\, h_0\right) \tag{15}$$

ここに、

$$D_h=\sqrt{\frac{1+\alpha h_0}{1+\alpha h_{eq}}},\quad \alpha=25 \text{ または } 75 \tag{16}$$

最大応答 u_{max}は、式(15), (16)を用いて

$$u_{\max}=\frac{T_{eq}}{2\pi}\bar{S}_{pv}\left(T_{eq},\, h_{eq}\right)=\frac{T_{eq}}{2\pi}\cdot D_h\cdot\bar{S}_{pv}\left(T_{eq},\, h_0\right) \tag{17}$$

と求まる。

4. 3　応答予測の精度検証

本節では、様々な主架構・オイルダンパーのパラメータに対して、4.1 節と 4.2 節で述べた予測法により求まる最大応答と非線形時刻歴解析結果を比較し、その精度を検証する。主架構の諸元として、主架構の弾性減衰定 h_f=0.03, ひび割れ塑性率μ_c=0.25, 二次剛性比 p_{f1}=0.5, 三次剛性比 p_{f2}=0.1, 変形 u_yは「一般の壁高さ 273cm」と「許容層間変形角 1/120 rad」の組み合わせから 2.275cm で固定した上で、主架構の弾性周期 T_{f0}=0.2, 0.3, 0.5(sec)の 3 通り、塑性率μ=1, 1.5, 2, 3, 4 の 5 通りを考慮し、時刻歴応答解析では、これら目標のμを得るように、地震動の加速度倍率を漸増させながら調整する。加えて、時刻歴解析に必要なバイリニア要素とスリップ要素の各自剛性を、3 変数 K_{f1}, p_{f1}, p_{f2}から一意に定めるために p_B=0.05 とした。また、オイルダンパーの諸元として、典型的な値 [12]として二次粘性係数比 p=0.05 を固定し、リリーフ率μ_d= 1, 2, 4, 10, 100 の 5 通り、等価支持材変形日λ=0.5, 1, 2 の 3 通り、オイルダンパーの一次損失剛性比 K''_d/K_{feq}=0.1, 0.3, 1 の 3 通りとした。なお、$\dot{u}_{dy}$を、時刻歴解析のために下式(18)により近似的に決定(：$\dot{u}_{dy,tr}$)する。

$$\dot{u}_{dy,tr}=\frac{K''_d\mu u_y}{C_d\mu_d\sqrt{1+\lambda_e{}^2}} \tag{18}$$

以上 635 通り(3×5×5×3×3)の各要素の諸元の組み合わせに対して、表 3 に示す 10 波の地震波を入力し、総計 6750 通りについて検証を行う。

本予測法の精度検証の際は、上記の時刻歴解析から得た塑性率μおよび$\dot{u}_{dy}$，則ちμ_d (それぞれ, $\dot{u}_{dy,rs}$，$\mu_{d,rs}$)から等価周期 T_{eq}, 等価減衰 h_{eq}を求め、これらと応答スペクトルを用いて最大変位 u_{max}を求め、時刻歴解析のそれと比較する。予測法により得られた u_{max}と時刻歴解析 u_{max}の値が近いほど、本手法の精度が高いことを意味する。これに加え、各パラメータの変化による予測値の誤差の傾向を把握する。ここで、D_hの評価は表 3 の通り、模擬地震動 BCJ-L2 でα=75，これ以外の地震動でα=25 とする。時刻歴解析には汎用解析ソフト PC-ANSR を用いた。

精度検証の結果として、図 26 に予測値と時刻歴解析から得た u_{max}の比率を示す。

全体的に地震動毎にばらつきがみられるものの、平均値は 1.1 となり、概してやや安全側の評価となった。地震動毎に傾向が見られるのは、各地震動の振動特性を考慮していないことが原因の一つとして考えられる。

また、図 26c-e より、ダンパーの諸元の変化によって予測値がほとんど変化しない、則ち本手法では、その精度はダンパーの特性値に依存しないことがわかった。

以上のことから、オイルダンパーの等価リニア化を、バイリニア＋スリップ則を示す主架構に適用した場合でも、精度を持って応答を予測できると言える。

5.　おわりに

本論文では支持材にプレストレスを導入した制振壁の動的・力学的挙動の把握およびこれを包括する、オイルダンパーを付加した、スリップ履歴を示す一質点系制振システムの応答予測法を提案した。以下にまとめる。

[静的載荷実験]

・荷重―変形関係は、ダンパー荷重レベル内でほぼ線形に挙動した。

・状態 R の各試験体について、ダンパー荷重が 6kN の時、支持材の弾性変形、横架材の曲げ変形、支持材の曲げ変形が比較的大きく寄与していた。

[動的実験]

・ダンパー、制振壁ともにスリップのほとんど生じない荷重－変形関係を得た。

[振動台実験]

・制振壁が繰り返し入力による応答の増大を抑制していた。

・テンション材軸力は、実験を通して常に目標値以上の値を示した。

・実験から得た力学的特性を簡易なバネモデルに代入し、それについて行った時刻歴解析により、実験結果を概ね再現できた。

・本研究で提案する応答予測法に上述の力学的特性を用いて予測した最大応答は、実験結果と近い値になった。

[評価法の精度検証]

・時刻歴解析と評価法を比較し、全体的に概ね精度よく評価できていた。バイリニア＋スリップ架構においても、オイルダンパーの等価リニア化が適用できることがわかった。

謝辞

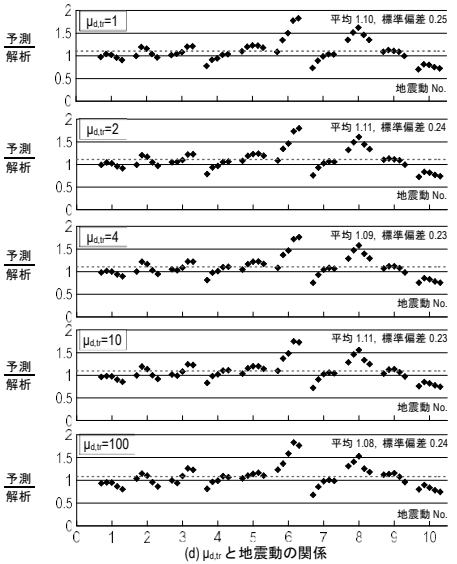
本研究は日本免震構造協会における「免震構造・制振構造に関わる研究助成（代表者：松田和浩)」の補助を受けて行いました。実験に際しては、名城大学建築学科の金森圭馬君，杉本真生羽さん，水野凜さんに協力して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 笠井和彦, 坂田弘安, 和田章, 宮下健：K 型ブレースによるシアリンク制振機構を用いた木質架構の動的挙動, 日本建築学会技術報告集, 第 598 号, pp. 51-59, 2005 年 12 月
2) 佐藤利昭, 永野正行, 井口道雄, 真崎雄一：粘弾性制振装置を付加した木造住宅の地震応答解析－木造制振住宅の耐震設計手法の構築－, 日本建築学会構造系論文集, 第 690 号, pp. 1449-1458, 2013.8
3) 松田和浩, 笠井和彦, 坂田弘安：財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その 39 ダンパーの実験法, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), 2012 年 9 月
4) 宮津裕次, 曽田五月也：方杖型効きオイルダンパを設置した木造軸組の力学モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 660 号, pp.37-46, 2006 年 7 月
5) 篠原昌寿, 五十田博, 石本篤史：オイルダンパー制振壁を持つ 2 層木質架構の地震時応答変位の解析的再現と木造用制振壁の評価値の妥当性, 日本建築学会構造系論文集, 第 648 号, pp.377-384, 2010 年 2 月
6) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 3 版
7) 松田和浩, 笠井和彦： バイリニア＋スリップモデルに粘弾性ダンパーを用いた制振構造の応答制御設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第 716 号, pp.1525-1535, 2015 年 10 月
8) 笠井和彦, 岩崎啓介：様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, 第 605 号, pp.37-46, 2006 年 7 月
9) 笠井和彦, 山崎義弘, 大木洋司, 坂田弘安：方杖型ダンパーを持つ木質架構の動的挙動と簡易評価法，日本建築学会構造系論文集，第 664 号, pp.1109-1118, 2011 年 6 月
10) 日本建築学会,木質構造接合部設計指針事例集
11) 松田和浩, 笠井和彦：東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免振建物の動的挙動に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 704 号, pp.1445-1455, 2014 年 10 月
12) 笠井和彦, 西村忠宗：減衰力が速度にバイリニア的に比例するオイルダンパーをもつ制振構造の等価線形化手法，日本建築学会構造系論文集，第 583 号, pp.47-54, 2004 年 9 月
13) 笠井和彦, 小椋崇之, 西村忠宗：リニア粘性要素とバイリニア粘性要素の制振効果における等価則，日本建築学会構造系論文集，第 611 号, pp29-37, 2007 年 1 月
14) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚：振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度，日本建築学会構造系論文集，第 580 号, pp. 51-59, 2004 年 6 月
15) 五十田博, 河合直人：木造軸組広報住宅に用いる壁の復元力特性モデル，日本建築学会構造系論文集，第 616 号, pp.157-163, 2007 年 6 月
16) 笠井和彦, 蒲武川： 多層スリップ型架構に粘弾性ダンパーを用いた制振構造の応答制御設計法，日本建築学会構造系論文集，第 650 号, pp.781-790, 2010.4
17) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚： 等価線形化手法による一質点系弾塑性構造の最大応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 571 号, pp.53-62, 2003.9

表 3　入力地震動

No	地震動名		加速度 (cm/s²)	入力時間 (s)	α
1	模擬地震動	BCJ-L2	355.7	120.00	75
2	Imperial Valley 1940	El centro NS	341.7	53.74	25
3	十勝沖 1968	八戸 NS	272.1	50.98	
4	兵庫県南部 1995	JMA 神戸 NS	820.6	30.06	
5		JR鷹取駅EW	657.0	40.95	
6	釧路沖 1993	JMA 釧路 N063E	692.8	157.40	
7	Northridge 1994	Sylmar NS	826.8	59.98	
8	Iran 1978	Tabas N344E	919.0	49.98	
9	Kern Country	Taft EW	175.9	54.38	
10	宮城県沖 1978	東北大学	258.0	40.98	



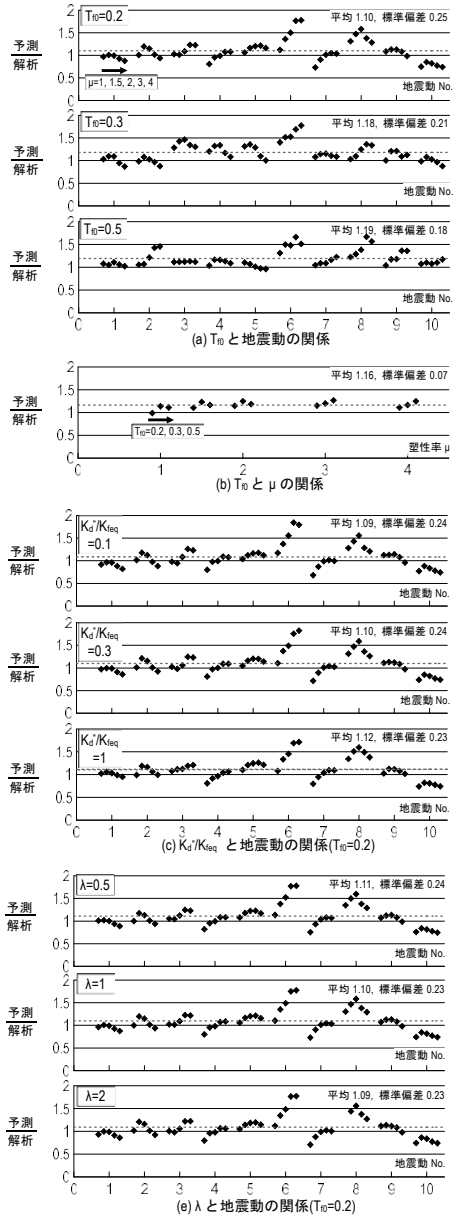


図 26 精度検証結果

名城大学理工学部建築学科
2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

高強度せん断補強筋の重ね継手性能に関する実験

市之瀬研究室　川上巧　190450041

1. はじめに

日本では鉄筋コンクリート構造の高層化・大型化に伴い、高強度せん断補強筋が活躍の場を増やしてきた。また、それとともに基礎梁のサイズも大型化するため基礎梁のせん断補強筋には重ね継手が求められる。しかし、高強度せん断補強筋を用いた重ね継手に関する先行研究は未だ少ない[1]。そこで本研究では昨年度[2)3)]の実験結果をもとに、主にコンクリート強度の違いによる性能のデータを補完する実験を行い、高強度せん断補強筋の重ね継手性能に関する結果と知見を報告する。

2．実験概要

2－1 試験体概要

試験体概要を**表 1** に示す。表にある破壊形式の記号は**図 1, 2** に示すとおりである。t を付さない試験体（**図 1**）は､幅を 300 mm にすることで､せん断補強筋間隔 300 mm の応力状態の再現を意図した。t を付した試験体（**図 2**）は、下記のように考えて補強筋間隔 100 mm の再現を意図した。

・昨年度の実験[2)3)]では，高さ 300 mm×幅 100 mm の長方形断面としたが、フック部分のコンクリートが横に膨らんで破壊してしまった。実際の基礎梁では主筋などの拘束によりこのような膨らみはあり得ない。

・**図 2** のような凸断面とすれば膨らみを防止できる。一方, Ls のひび割れに抵抗するコンクリートの幅は 100 mm であるから、補強筋間隔 100 mm に対応する。

試験体の一例を**図 3** に示す。重ね長さの影響のみを計測できるように、重ね継手区間外の 250mm はプラスチックのシートによりアンボンド処理を施した。

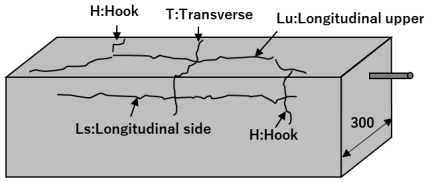


図 1　試験体名末尾に t を付していない試験体のひび割れ種類

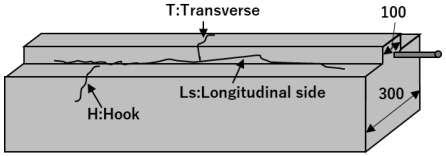
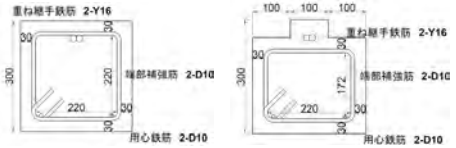


図 2　試験体名末尾に t を付した試験体のひび割れ種類

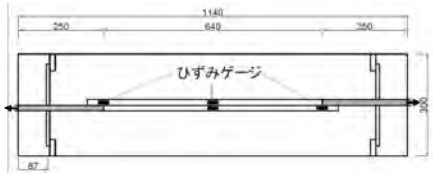
表 1　試験体概要

試験体名	コンクリート強度(N/mm²)	重ね長さ	余長	最大荷重 (kN)	最大応力度 (N/mm²)	破壊形式
20-40-4t	19.7	40d	4d	95	478	T→Ls→H
20-40-4				147	740	Lu→H
20-40-6			6d	143	719	Lu→H
20-50-4		50d	4d	169	849	T→Lu→H
20-50-6			6d	169	852	T→Lu→H
29-40-4t	29.2	40d	4d	127	638	Ls→H
29-40-4				188	948	T→Lu→H
29-40-6			6d	189	952	T→Lu→H
42-30-4	41.6	30d	4d	184	925	Lu→H→Ls
42-40-4t		40d		142	714	Ls→T→H
42-40-4				200	1008	T
42-40-6			6d	200	1008	T→Lu

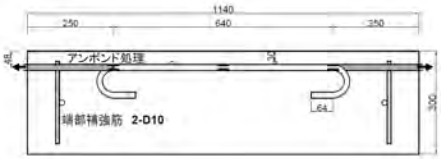
2023 年 2 月 6 日　　主査　名城大学建築学科　市之瀬　敏勝
副査　同　高橋　広人



(a) 間隔 300mm の試験体 (b) 間隔 100mm の試験体



(c) 29-40-4（平面）



(d) 29-40-4（断面）

図 3　試験体　単位：mm

2－2 材料特性

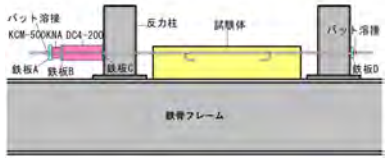
コンクリートの最大骨材寸法は 25mm で、**図 3 (a), (b)** の下方から打設した。材齢 20 日で脱型し、材齢 28 日～36 日で加力した。重ね継手鉄筋には高強度せん断補強筋、呼び名 Y16 を採用した[4)]。材料特性を**表 2** に示す。

表 2　鋼材材料特性 (N/mm²)

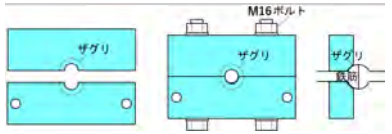
	降伏強度	引張強度
Y16	819	1022

2－3 加力方法

昨年の実験[2)3)]と同様、**図 4** のように鉄骨のフレームに 2 本の反力柱を設置し、その中心に試験体を設置した。**図 4(b)**に示す鉄板 A を介して左側の鉄筋をセンターホールジャッキ(DC4-200)で引っ張った。鉄板 A, D には、**図 4 (b)** のように斜め 45 度のザグリを設け、M16 ボルトで締め上げて一体化した。各鉄筋端部には、長さ 150mm の鉄筋をバット溶接してこぶを作り、ザグリに合わせて 45 度に研磨をした。



(a) 加力装置断面

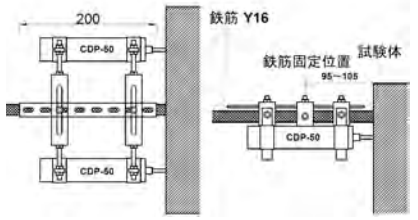


(b) 鉄板 A, D

図 4　加力装置

2－4 測定方法

ロードセルには東京測器製 KCM-500kNA を採用した。鉄筋には、**図 5** のように変位計を設置して鉄筋の引き抜き抜け出し量も測定した。鉄筋ひずみを計測するひずみゲージは**図 6** のように貼り付け、図のように名称を付した。



(a) 平面　　(b) 側面

図 5　抜け出し測定装置



図 6　ひずみゲージ

3. コンクリート強度、重ね長さ、余長の影響

コンクリート強度と鉄筋の最大応力度(最大耐力を公称断面積で除した値)の関係を昨年度の結果とともに**図 7** に示す。コンクリート強度が大きくなると最大応力度も

大きくなった。図中に示している数字は重ね長さであり、昨年度の s のついている試験体、本年度の t のついている試験体は補強筋間隔 100mm を模した試験体である。

図中の破線は 25σ_B と 785N/mm^2 を示す。本年度の試験体は補強筋間隔 100mm を模したものがこの線を下回った。図中の実線は、重ね長さが同一(40d)でコンクリート強度のみが異なる実験結果を結んだものである。コンクリート強度 σ_B が 1.5 倍になった時、最大応力度 σ_{max} は 1.3 倍になった。

σ_B≒20 N/mm^2 の試験体について、重ね長さ /d と最大応力度の関係を**図 8** に示す。重ね長さ L が 1.25 倍になった時、最大応力度 σ_{max} は 1.15 倍になった。

ただし, σ_B≒29 N/mm^2 の試験体は鉄筋が降伏したので、必ずしも重ね長さの影響がコンクリート強度より大きいと言えるわけではない。

余長と最大応力度の関係を**図 9** に示す。余長による最大応力度への影響はほとんど見られなかった。

図 7　コンクリート強度ー最大応力度

図 8　σ_B≒20 の試験体の重ね長さー最大応力度

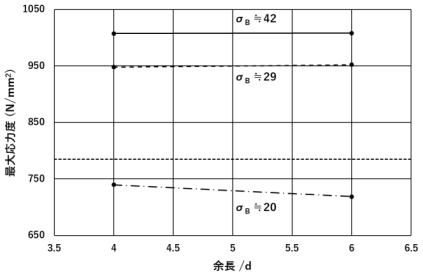


図 9　余長ー最大応力度

4. せん断補強筋間隔の影響

4－1　最大応力度

補強筋間隔−最大応力度関係を**図 10** に示す。補強筋間隔が大きくなると最大応力度が大きくなった。

4－2　破壊形式

表 1 からわかるように補強筋間隔 100mm を模した試験体(t がついたもの)の破壊形式において特徴的な点は**図 1** の Lu のような鉄筋の上面位置にひび割れが起きず、鉄筋の側面位置(**図 2** の Ls)にひび割れが入ることである。

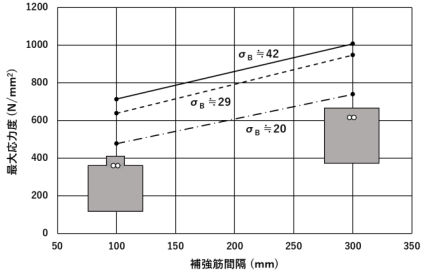


図 10　補強筋間隔ー最大応力度

4－3　抜け出し

図 11 に σ_B≒29 の試験体(29-40-4t, 29-40-4)の抜け出しー応力度関係を示す。抜け出し測定器は図 5 (b)のように試験体から 95～105mm の位置で固定したため、継手始点での抜け出しを $u' = u - L\varepsilon$ で算出した。ここで u は抜け出し測定値、L は前述の 95～105mm とアンボンド区間長さ 250mm の和、ε は 3, 6 ひずみゲージの測定値である。

補強筋間隔 100mm の試験体(29-40-4t)は Ls のひび割れとともに一度応力が下がり、再度上がっていることがわかる。これは鉄筋上部のコンクリートが勢いよく剥離して急に付着を喪失した後、フック部分のみで荷重を受けるようになるからだと考えられる。したがって H のひび割れが入るとともに応力度が小さくなった。

補強筋間隔 300mm の試験体(29-40-4)は T のひび割れが発生すると同時に抜け出しが少し大きくなり、Lu のひび割れ時にも応力度は小さくならず、H のひび割れとともに応力度が小さくなった。

図 11　σ_B≒29 の試験体の抜け出しー応力度

4－4　ひずみ

29-40-4 と 29-40-4t のひずみ度(**図 6** の U, D の平均値)と応力度の関係を**図 12, 13** に示す。

試験体 29-40-4 では T のひび割れとともに重ね継手の中心にある 2, 5 のひずみが大きくなり、付着が減少したことがわかる。また、Lu のひび割れは降伏後の大変形後に生じた。(**図 11** を参照)

試験体 29-40-4t では Ls のひび割れの際に応力度が下がると同時にフック部分にある 1, 4 のひずみが 3, 6 と同程度まで増えたことがわかる。2, 5 も同様である。このことは、直線部の付着が Ls ひび割れによってほぼ喪失したことを意味する。

試験体 29-40-4t では Ls による応力低下の後、1, 4 のひずみは 3, 6 を超えて増加する。これを考察するため、鉄筋上下のゲージ(U, D)のひずみを**図 14** に示す。鉄筋下面のひずみだけが降伏ひずみ ε_y を超えたことがわかった。一方で鉄筋上面のひずみは減少する。ここから Ls のひび割れでコンクリートの付着が喪失し、フック部に急激に力が伝達されたことでフック部に大きな引張力が加わり、フックを開く方向の曲げモーメントが加わったと考えられる。

5. まとめ

高強度せん断補強筋の重ね継手の最大応力度に与える影響はコンクリート強度と重ね長さによるものが大きく、余長による影響はほとんど見られなかった。

また、せん断補強筋間隔の影響も大きかった。間隔 100mm の試験体では鉄筋の側面位置に生じる水平のひび割れによって直線部分の付着が喪失した。

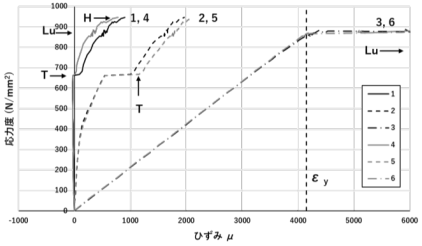


図 12　29-40-4　全ひずみー応力度関係

図 13　29-40-4t　全ひずみー応力度関係

図 14　29-40-4t　1, 4 ひずみー応力度関係

参考文献

1) 益尾潔：785N/mm² 級および 685N/mm² 級高強度せん断補強筋を用いたフック付き重ね継手を有する RC 基礎梁のせん断性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 455-456, 2015. 9

2) 伊藤結飛・市之瀬敏勝・宮田英樹：高強度せん断補強筋の重ね継手性能に関する基礎的実験(その 1, その 2), 日本建築学会東海支部研究報告書, Vol. 60, pp. 69-76, 2022. 2

3) 市之瀬敏勝・宮田英樹・楠原文雄・日比野陽：高強度せん断補強筋の重ね継手性能に関する実験, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造IV, pp. 47-48, 2022. 9

4) 山口鋼業株式会社：アークフープ 785 設計施工指針・同解説, 2020

名城大学理工学部建築学科
2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

高密度地震観測ネットワークへの適応を想定した乗用車の振動特性に関する研究

高橋研究室　　古居　元　　190450121

1.　はじめに

現在、気象庁や防災科学技術研究所などによる地震観測網が整備され、全国の陸地をほぼ均等な密度で覆っている。しかしながら、大きく被災した地域の把握など、目的によってはさらに高密度の観測を必要とすることがある。局所的にはインフラ事業者等による高密度な観測網が存在するが、現状その観測結果は広く一般に公表されるに至っていない。

こうした中、地震観測の媒体として自動車が最も有望なもののひとつと考えられる。自動車は基本的に接地しているため、これを加速度計として利用することでその近傍の被害の推定や計測震度の推定に用いることは十分に可能と考えられる。

本研究では、自動車を地震観測媒体として利用するための基礎的な検討を行う。地動に対する車両の応答特性の把握を目的として振動台による車両の加振実験を行う。

2. 内燃式自動車と電気自動車の振動特性の比較

2.1 計測方法

本研究では電気自動車を用いるため、まず内燃式自動車と電気自動車の振動特性の比較を行った。以降、電気自動車を車両 A、内燃式自動車を車両 B と表記する。

地震動や常時微動の観測に用いられるサーボ加速度計（白山工業製 JU410）を使用して計測した。図 1 に座標系と加速度計の配置を示す。

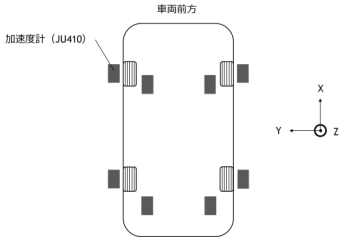


図 1　車両の加速度計の配置

2.2 車体の動きの把握

実験に際して、水平 2 成分・上下 1 成分のセンサーを車両の左前・右前・左後・右後に計 4 台（12 成分）設置するが、車両を剛体と考え、車両の重心における並進 3 成分、回転 3 成分の計 6 成分の運動を次の通り推定する。

x、y、z 各軸方向の並進成分をw_{xi}、w_{yi}、w_{zi}、重心を中心とした各軸回りの回転角をθ_x、θ_y、θ_zとすると車両の動き$\boldsymbol{w}$は式(1)のベクトルで表すことができる。車体に 3 個以上設置したセンサー（今回は 4 個)の動き$\boldsymbol{R}_j(j=1\sim4)$は、微小変位であれば 3 行 6 列の行列$\boldsymbol{T}_j$を用いて式(3)のように表すことができる。$\boldsymbol{\varepsilon}_i$は誤差ベクトルである。すべての成分の誤差は互いに無相関で、同一の正規分布に従って発生するとの仮定のもと最尤法を用いると、重心の動きは式(5)で表される。

$$\boldsymbol{w}_i = \left(w_{xi}, w_{yi}, w_{zi}, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}\right)^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{R}_{ji} = \left(r_{xji}, r_{yji}, r_{zji}\right)^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{R}_i = \boldsymbol{T}\boldsymbol{w}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (3)$$

$$\boldsymbol{R}_i = \begin{pmatrix} \boldsymbol{R}_{1i} \\ \vdots \\ \boldsymbol{R}_{ni} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{w}_i = (\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{T})^{-1}\boldsymbol{T}^T\boldsymbol{R}_i \quad (5)$$

2.3 自動車の人力加振実験

自動車のボディを人力で押す擬似的なインパルス加振と自動車のボディに付けたひもを引いで初期変位を与える方法を試みた。以降前者をケース A、後者をケース B と表記する。図 2 に車両 A を y 方向（左右方向）に加振した際の y 方向の自由振動波形を示す。また表 1 にケース A・B によって得られた自由振動波形から固有周期と減衰定数を推定した結果を示す。表 1 より車両 A と車両 B を比較すると、車両 A のほうがやや固有振動数が高くなっているが、それほどまで大きな差異は見られない。したがって本研究では、内燃式自動車と電気自動車の振動特性は、同等であるもの仮定とする。

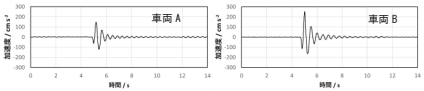


図 2　車両 A・B（ケース B）の加速度波形

表 1　Y 方向加振時の固有振動数・減衰定数

	車両 A		車両 B	
ケース	振動数 / Hz	減衰定数	振動数 / Hz	減衰定数
A	2.68	0.03	2.36	0.03
B	2.66	0.03	2.35	0.04

4. 振動台実験に基づく電気自動車の振動特性

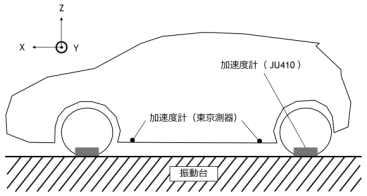
4.1 振動台実験概要

振動台を用いた自動車への入力を制御した加振実験について述べる。実験の目的として下記 6 項目を挙げる。

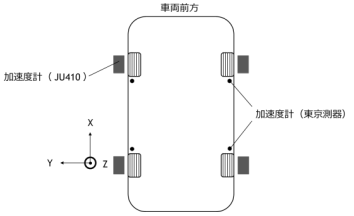
① 地盤 (振動台) からの振動入力時の自動車の応答特性を調べること
② 地盤 (振動台) と自動車 (中のセンサー) の伝達関数を求めること
③ 地震時の自動車の応答を調べること
④ 自動車搭載加速度計の精度を確認すること
⑤ 車両の振動モードを確認すること
⑥ 車両で観測された加速度から震度を推定すること

加振ケースは、ホワイトノイズ加振（加振レベルが 10、30、100、200、300gal）と地震波加振（1995 年兵庫県南部地震（JMA 神戸）(以下、JMA 神戸)、2016 年熊本地震（益城）(以下、熊本地震益城)、2011 年東北地方太平洋沖地震（築館）(以下、東北沖築館)）について行った。

なお、使用した車両は人力加振実験で用いた車両と同じ車種のものを用いた。図 3 に座標系と加速度計の配置を示す。



（1）立面図



（2）平面図

図 3　振動台と車両の加速度センサーの配置

4.2 伝達関数推定法に基づく車両の振動特性

入出力間の関係を詳細に把握するため、x、y、z方向それぞれ個別にホワイトノイズ加振を行ったときの加速度記録から振動台の動きを入力、車体の動きを出力する伝達関数を Hv 推定法により算出した。なお算出にあたっては、ホワイトノイズ加振記録の切り出し時間 125s の記録から長さ 20.48s のサンプルを 11 個取り出して重合した。サンプル抽出の際には区間を 50%ずつオーバーラップさせながら切り出し、各サンプル区間で基線補正を行った後、ハニングウィンドウを施した。図 4 に伝達関数行列の各成分の振幅比を示す。

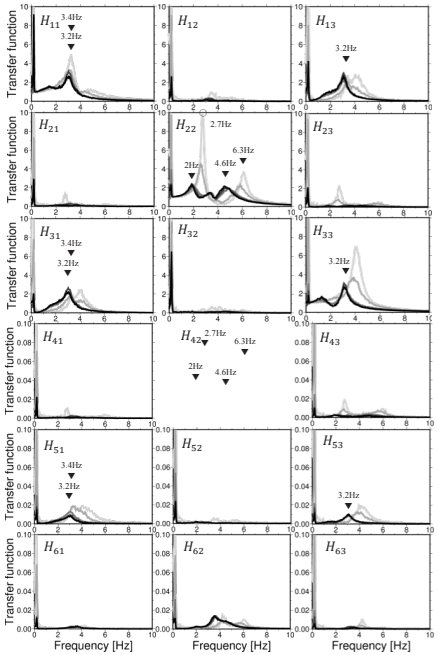


図 4　伝達関数の振幅比

加振レベルによる伝達関数の違いに着目すると、大きく 10gal、30gal、100gal 入力以上の 3 つに分けることができる。10gal 入力では、振幅比のピーク振動数が明瞭で鋭い。30gal 入力では振幅比のピーク振動数は 10gal 入力の場合とほぼ同じ、あるいはやや低振動数側に移っているが、ピーク値は半分程度に低下している。100gal 以上の入力の場合は振幅比、位相差ともほぼ同等であり、10gal 入力の場合と比べてピーク振動数は低振動数側に移り、ピーク値もさらに低下している。

ピーク値が低下することは、$1/\sqrt{2}$ 法[1)] の考え方に基づくと、減衰が大きくなることに相当する。図 4 の結果は加振レベルの増大に伴い、自動車の減衰が増したと解釈できる。また、卓越振動数が低振動数側に移動することは、振動システムとしてのバネ定数が低下したことに相当する。10gal 入力及び 30gal 入力と 100gal 入力以上の場合で卓越振動数が大きく変化していることは、加振レベルに応じて振動システムにサスペンションやダンパーの効果が働いたことが要因と予想される。

4.3 FDD 法に基づく車両の振動

ホワイトノイズ 3 軸同時加振の加速度記録から、FDD 法[2)] を用いて振動モードを求めた。なお比例減衰とした

2023 年 2 月 6 日　　主査　名城大学建築学科　高橋　広人
副査　同　松田　和浩

場合、非比例減衰を仮定した場合の２通りについて同定を行った。手順は次の通りである。

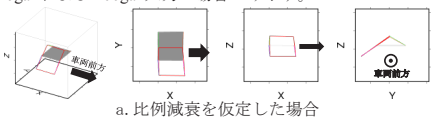
①車両のタイヤ脇に設置した 4 点の振動記録から重心位置の並進・回転成分の 6 成分の振動波形を推定する。

②車両に設置した 4 点の振動記録と①で求めた重心位置の並進成分との差動より 4 点の相対加速度波形を求める。

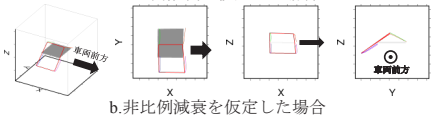
③②で求めた 4 点×3 成分の計 12 成分の相対加速度波形を用いてすべての組み合わせ（12×12＝144 通り）のクロススペクトルを求める。

④③で求めたクロススペクトル行列の固有値問題をヤコビ法を用いて、固有値および固有モードを求める。

図 4 に▼を付けた振動数における固有値に対応する固有ベクトルを用いて、車上のセンサーの座標からの振動モードを図 5~10 に示す。なお 200gal・300gal 入力の振動モード、30gal の振動モードを確認し、前者は 100gal 入力、後者は 10gal 入力の場合と同様の結果であったため、10gal および 100gal 入力の場合のみ示す。

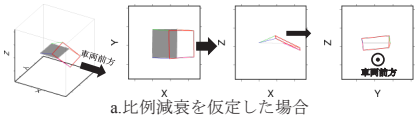


a. 比例減衰を仮定した場合

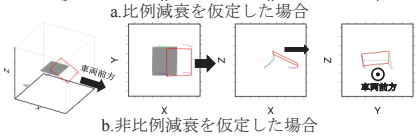


b.非比例減衰を仮定した場合

図 5　10gal 入力の場合のモード(2.7Hz)

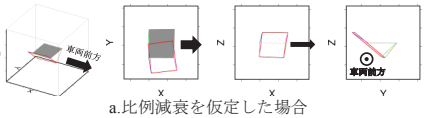


a.比例減衰を仮定した場合

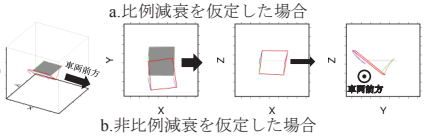


b.非比例減衰を仮定した場合

図 6　10gal 入力の場合のモード(3.4Hz)

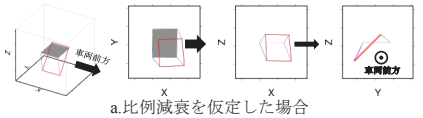


a.比例減衰を仮定した場合

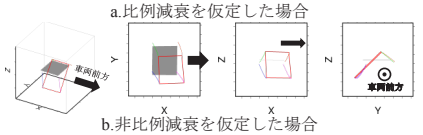


b.非比例減衰を仮定した場合

図 7　10gal 入力の場合のモード(6.3Hz)

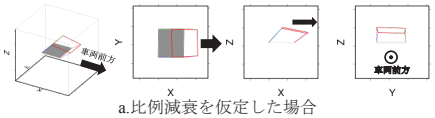


a.比例減衰を仮定した場合

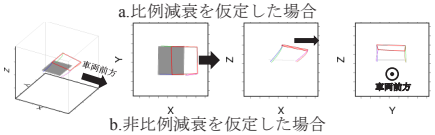


b.非比例減衰を仮定した場合

図 8　100gal 入力の場合のモード(2Hz)

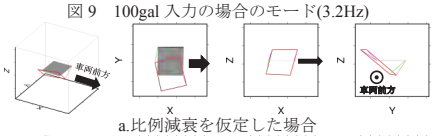


a.比例減衰を仮定した場合

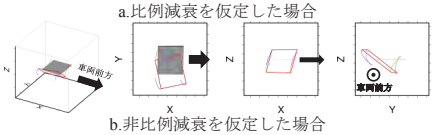


b.非比例減衰を仮定した場合

図 9　100gal 入力の場合のモード(3.2Hz)



a.比例減衰を仮定した場合



b.非比例減衰を仮定した場合

図 10　100gal 入力の場合のモード(4.6Hz)

なお、比例減衰ではクロススペクトルの実部のみ、非比例減衰では複素数として固有値問題を解いた。

図 5、図 6、図 7 より 2.7Hz、6.3Hz のモードはy方向並進とx軸回りの回転動が連成したものであり、H_{22}、H_{42}の成分に対応する。図 4 より 3.4Hz はH_{11}、H_{31}、H_{51}が連成するとしているが、x方向並進、z方向並進、y軸回りの回転動が連成しており対応した結果が得られている。また 100gal 入力の場合のモードは、2Hz では主にy方向並進とx軸回りの回転成分が連成しており、H_{22}、H_{42}の成分に対応する。3.2Hz のモードはx方向並進とy軸回りの回転成分が連成しているように見える。これは図 4 の伝達関数と合わせてみるとH_{11}、H_{31}、H_{13}、H_{33}、H_{51}、H_{53}が連成していると考えるのがよいと思われる。4.6Hz ではy方向並進とx軸回りの回転成分に加え、z軸回りの回転成分が連成したモードに見える。

以上より、伝達関数と併せて見ることでモードが伝達関数におけるどの成分の組み合わせで連成しているか確認できた。

また図 5~10 からわかるように、比例減衰の場合はモードの軌跡が直線的、非比例減衰は曲線を描いて推移していることが確認できる。伝達関数でも確認したように、自動車の振動成分には回転成分の影響が含まれる。このため振動モードを考えた場合、回転成分が反映される非比例減衰のほうが妥当であると考えられる。

4.4 車両の振動より確認される震度

車上で記録された加速度記録に基づいて震度を推定した。なお本研究では計測震度と境・他[3]による震度の２通りの方法を用いて震度を算出した。以降、前者の最大震度を計測震度、後者を境震度と表記する。

表 2 に入力動に用いた地震動及び振動台と車上の最大の計測震度を示す。通常、計測震度は少数第 1 位まで記すが、ここではより詳細に比較するため少数第 2 位まで示した。また図 11 に入力動に用いた地震波の水平 2 成分の速度応答スペクトルを示す。図 11 より JMA 神戸は周期が 0.8 秒、熊本地震益城は周期 1.1 秒、東北沖築館は 0.25 秒が卓越する地震動である。

図 12 に 2 つの震度算出法により求めた振動台の震度と車上の震度を比較して示す。図 12 よりいずれの震度の場合も JMA 神戸と熊本地震益城は振動台の震度と車上の震度は同じ直線上に載る関係に見えるが、東北沖築館は若干傾向が異なる。計測震度を用いるほうが傾向の違いは顕著で、境震度のほうが振動台の震度と車上の震度の対応はよい。境震度のほうが振動台の震度と車上の震度の対応がよいのは、境震度の計算法が 1 質点の弾性応答値に基づくためと考えられる。一方で計測震度はフィルター処理を施した 3 成分合成波形の加速度振幅に基づくもので、弾性応答とは関係ない指標である。また、自動車の振動特性は加振レベルにより特性が変わる。一方で、境震度も地震動の大きさに応じて、対象周期を変化させている。自動車の卓越振動数と境震度で対応する周期範囲は一致しないが、地の大きさに応じて低振動数側（長周期側）の特性を反映させている点は共通している。

振動台と車両の計測震度の差は-0.5~0.5、境震度の差は-0.2~0.4 となっている。これより車上の震度から地動の震度を換算する考え方に則ると境震度を直接用いるのが妥当である。ただし、境震度は計測震度とは異なる指標である。現行の計測震度を換算するためには、さらなる検討が必要である。

5 まとめ

本研究では、自動車搭載加速度センサーを高密度地震動観測に用いることを想定して、自動車の振動特性把握のための加振実験を行った。以下に得られた知見を示す。

・人力加振実験の結果より、内燃式自動車と電気自動車の振動特性は、大きな差異が無いことを確認した。

・振動台を用いたホワイトノイズ加振の結果から、車両の動きは加振レベルによって振動特性が変化することが分かった。

・振動実験の結果を用いて、車上と振動台の加速度記録から計測震度と境震度を比較し、ともに±0.5 程度以内の誤差であった。

以上の結果より、自動車を媒体として 震度観測を行うことは十分に可能であると考えられる。

参考文献

1) 福和伸夫・飛田潤・平井敬：耐震工学　教養から基礎・応用へ，講談社，2019.

2) 飯山かほり・栗田哲：近接モードを考慮したスペクトル分解による FDD 法の理論的背景、日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 684 号，pp.271-279，2013.2

3) 境有紀・神野達夫・纐纈一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 585 号，pp.71-76，2004.11

図 11　入力動に用いた地震波の速度応答スペクトル
(左から JMA 神戸、熊本地震益城、東北沖築館)

図 12　振動台と車上の震度の比較

表 2　振動台と車両の計測震度および境震度の一覧

加振波形	振幅倍率	振動台 計測震度	振動台 境震度	車上 計測震度	車上 境震度
JMA 神戸	3 %	3.30	3.41	3.65	3.72
JMA 神戸	10 %	4.42	4.45	4.76	4.77
JMA 神戸	30 %	5.38	5.37	5.64	5.41
JMA 神戸	50 %	5.81	5.62	6.06	5.70
JMA 神戸	50 %	5.80	5.62	6.11	5.68
JMA 神戸	50 %	5.82	5.62	6.03	5.69
JMA 神戸	60 %	5.98	5.63	6.20	5.88
JMA 神戸	70 %	6.11	5.77	6.42	6.07
熊本地震益城	3 %	3.45	3.51	3.88	3.88
熊本地震益城	10 %	4.49	4.56	4.93	4.91
熊本地震益城	30 %	5.45	5.47	5.73	5.60
熊本地震益城	50 %	5.90	5.63	6.18	5.98
熊本地震益城	60 %	6.08	5.80	6.38	6.18
熊本地震益城	70 %	6.19	5.95	6.53	6.29
東北沖築館	3 %	3.46	3.31	3.76	3.55
東北沖築館	10 %	4.69	4.42	4.70	4.47
東北沖築館	30 %	5.61	5.33	5.31	5.18
東北沖築館	50 %	6.02	5.32	5.70	5.18
東北沖築館	70 %	6.31	5.60	5.90	5.44
東北沖築館	100 %	6.58	5.87	6.17	5.75

建築学科　系紹介
―設計・計画系―

最適な建築空間を創造する

人間をとりまく社会動向や、人間の行動・意識の法則など、様々な視点より最適な建築空間について考えます。建築デザインには、そこに至るプロセスも重視されます。

専門科目としては、建築成立の社会背景、空間構成原理、環境や人への影響を理解し、責任ある建築家、技術者として行動できる能力を身に着ける『建築計画概論』、建築のことば図面表現の基礎を学び、手のトレーニングとスケール感を養う『デザイン基礎Ⅰ』などがあります。

設計・計画系の研究活動

設計・計画系の研究では、建物やまちの使われ方を調べる研究活動と、それら使われ方の知見に基づいてより良い建築をデザインする設計活動を行います。

研究活動では、すでに社会に存在している建物やまちのことを調べます。まちに出て建物や街並みなどを調べる「実測調査」「フィールドワーク」、建物がどのように使われているのかを検証する「行動観察」などの手法により、現状を正しく把握します。

また、建物には使う人がいます。使う人がどういう意識を持っているのかを利用者や運営者にきく「アンケート調査」「ヒアリング調査」などを通して、人と建物の関係を把握します。

設計活動では、いま社会に必要な建物はどういったものなのか、美しい空間はどのようなものなのか、といった探求を繰り返します。また、計画系の研究室では、建築的思考をめぐらせ様々なデザイン行為を行う、社会と連携したプロジェクトなども実践されています。

設計・計画系の研究テーマ

研究テーマは、研究室の教員とディスカッションをしながら、各々が主体的に研究テーマを設定します。

社会で起きている興味深い事象を見つけてその理由を探求するものや、現代社会の課題をデザインを通して改善するもの、街を丹念に観察して、個性豊かな建築に昇華させるようなものなどがテーマとして設定されます。

（文責 / 計画系教員 佐藤布武）



卒業設計審査会の様子

●論文一覧

○修士論文

－市瀬智之｜地方都市におけるワーケーションとワークプレイスの施設・運用実態に関する研究
－長谷川将規｜ Park-PFI における公募対象公園施設と利用者実態に関する研究
－福井俊介｜水族館における運営戦略的施設更新の実態に関する研究
－山田侑希｜補助制度を利用した空き家の共用利用施設への転用事例にみる改修・運営の特徴
－楊萌｜シェアハウスにおける共有空間の空間構成と運営管理に関する研究－多国籍入居者による多文化共生型シェアハウスを対象として－

○卒業論文

－伊藤有哉｜古民家改修による分散型ホテルの事業プロセスに関する研究
－加藤静流｜公的宿泊施設の有効利用に関する研究－用途変更事例の現状と課題－
－中村蒼裕｜住宅リフォーム会社の業種別特性と集客方法に関する研究
－橋本莉奈｜大学生のサードプレイスに対するニーズに関する研究
－洞口拓海｜超高層集合住宅の共用空間・施設の変化と大規模災害への対応に関する研究　―首都圏の事例を対象としたヒアリング調査を通して―
－矢野龍生｜閉店した商業施設の閉店要因と有効活用に関する研究
－山内俊人｜空き家ウェブサイトの特性と空き家問題に対する役割に関する研究
－清水美里｜やまへおかえり - 空き家を活用した生き物観察を促進する設計 -
－水谷一幸｜災害伝承碑から考える防災意識の醸成に向けた空間づくりの提案
－市原大輝｜ヒトノマチ - 住まいのソトの設えからみる暮らしの領域に関する調査とヒトが住まうまち空間のエリアリノベーション
－上野杏実｜内陸部に位置する空港を活かした、3 市 1 町を巡る提案
－大嶋唯花｜コミュニティセンターのリデザイン - 既存建築から考えるまちの集いの場 -
－小西翼｜白鳥貯木場跡地における古材貯木を用いた水辺木質空間の提案
－中原萌々子｜あしあとのまじわるところー子どもの気づきを誘う小さな築きー
－羽場駿也｜鶴舞古書店街の線的再構築
－早津菜央｜やさしい四日 " 市 "- 歴史ある市場の在り方を問い直す -
－福井萌夏｜プレーパークにおける子どもの遊び方と子どもが求める居場所について
－前田篤謙｜タイル産地を形成する施設の実態とその連関
－前津玲奈｜商店街におけるマーケットの出店配置から見た地場の人々と外部者との関係性に関する研究一大垣駅前商店街のまちなかスクエアガーデンを中心に 3 つの事例を比較して一
－松本留侑｜都市部における犬との共生環境の提案
－横井実のり｜仏壇産地の未来とは
－天野春果｜生活の質 (Quality Of Life) を上げるオフィスビルの提案
－牛田結理｜水の視点から建築をつくる
－内田翔太｜地方都市更新の手引き　- 既存を活かした問屋街の開発 -
－大脇花絵｜廃校を拠点とした林業復興
－柴山晴登｜遊牧都市ノ未来予想図
－鈴木真生｜都市公園を考え直す　- 禁止事項のない公園へ -
－髙橋佑奈｜エネルギーから考える自立共生的な暮らし
－林稜悟｜ホームレスが社会へ参加する手段を増やす装置の開発
－原和希｜集合住宅の再考　- 住みこなしによる新しい生活の提案 -
－佐村拓海｜ジャズの街「岡崎」に音楽の溜まり場
－新井花奈｜ウガンダ Kantaga 地区を対象としたスラム自立更新システム
－伊藤葵｜亀崎木密地域における狭隘道路再構
－種田季林｜ ON SUMIDA TOILET - 公衆トイレによる防災都市づくり -
－神谷尚輝｜庁舎建築再考　- 町の拠点としての区役所の在り方 -
－草野しおり｜私のマチのより道　- 小学校通学路における子どもの遊び場 -
－西野侑花｜金山総合駅連絡通路橋における人々のよりどころの提案
－西本帆乃加｜住まいと商いの井戸端コンデンサー　- 帰ってきたい場所として存在する、都市の住まい方の提案 -
－松井宏樹｜循環する都市の履歴　- 街のインフラとしての廃線高架のあり方 -

地方都市におけるワーケーションとワークプレイスの施設・運用実態に関する研究

STUDY ON THE ACTUAL OPERATIONS OF WORK-CATION AND WORKPLACE FACILITIES IN LOCAL CITIES

市瀬　智之 ――― *1

Tomoyuki ICHINOSE ――― *1

キーワード：
ワーケーション, コワーキング, 都市農村交流 , 地方再生 , 運営実態 , 利用実態

主査　生田京子　教授
副査　鈴木博志　教授
副査　佐藤布武　助教

第１章　研究の背景と目的

１－１．はじめに

昨今、働き方改革の潮流や新型コロナウイルスの感染拡大によって　フリーランサーや多拠点ワーカーが増加し企業や組織に縛られない自由な働き方や、働きながら余暇を楽しむワーケーションが登場している。ワーケーション先となる各地域においても、定住・交流・関係人口の増加を促すため、今後益々コワーキングスペースやサテライトオフィス等の整備を実施していくことが必要になってくると考えられる。

１－２．既往研究

ワーケーションに関する研究は主に社会学の側面で研究が行われており、田中ら(2020)[1]による企業で導入し得る日本型ワーケーションの効果を検証した研究や、小林ら(2022)[2]による地域活性化に向けたワーケーション事業についての研究がある。

建築学の側面においては、地域における働く場に関するものとして、三木ら（2015）[3]による働く場と地域コミュニティ形成に着目した研究や、高屋ら（2019）[4]によるサテライトオフィスにおける働き手の健康度と地域の関係性について論じた研究などは見られた一方、建築学とワーケーションを直接関連させて論じた研究は確認できなかった。

ワーケーションの定義については、自治体、専門誌などの各種資料の中でそれぞれ表1-1のように定義されている。

多くの資料において、ワーケーションとは仕事(Work)と休暇(Vacation)を組み合わせた概念として位置付けられているが、さらに地方活性化におけるワーケーションの可能性についての言及もされている。

１－３．研究の目的

本研究では、地方においてワーケーション事業の一環として整備されるワークプレイスを対象に、行政や運営者へのインタビュー調査によってワーケーションに対する方針や施設整備内容、さらには利用者へのインタビュー・行動観察調査によって作業や交流、ニーズとの結び付きについて分析・考察することで、今後働く場でありながら、地域事業や交流を発生させたいと考える行政、施設運営者や計画者への一次設計資料とすることを目的とする。

表1-1. 各文献におけるワーケーションの定義・概要

引用元	内容（抜粋）
日本航空株式会社プレスリリース資料（2017）(注1)	**「ワーケーションとは仕事(work)と休暇(vacation)を組み合わせた造語**で、国内外リゾート地や帰省先、地方などでテレワークを実施します。休暇先(旅先)で仕事をするという新たな働き方により、早朝や夕方以降の時間を社員が自由に過ごすことで、業務への活力につなげることが狙いである。(中略)**さらに地方で開催されるイベントなどに積極的に参加することで地域の活性化の一助としていく。**
トラベルジャーナル（2017年9/25号）	**「普段の『Work』に『Vacation』をプラスする、余白を楽しみながら遊ぶように働く**新たなワークスタイルです。」「リゾート地などに出向いて仕事をするという旅行アドオン型のワークスタイルに留まらず、**地域に根付いた『場』での交流によって生まれる気づきを大切にしています。**」
国土交通省白書（2018）(注2)	**「ワーケーション」とは、ワーク(仕事)とバケーション(休暇)のことを言い、**長期滞在先でパソコンなどを使って仕事をすることを指します。(中略)働く場所を変えることで心身ともにリフレッシュができ、業務の生産性を上げながらも**地方活性化に貢献できるワーケーションは、新しい働き方として期待されています。**
ワーケーション自治体協議会（2019）	ワーケーションとは、テレワークを活用し、**普段の職場から離れ、リゾート地等の地域で、普段の仕事を継続しつつ、その地域ならではの活動を行うこと**であり、令和の時代の新しい生き方・働き方として、全国に急速に広がっている取組み。
JTB総合研究所（注3）	**英語のWork(仕事)とVacation(休暇)の合成語。**リゾート地や地方部など、普段の職場とは異なる場所で働きながら休暇取得を行うこと。あるいは休暇と併用し、旅先で業務を組み合わせる滞在のこと。(中略)一方、受け入れ側の地域にとっては、来訪者の拡大、ワーケーション参加者との交流による新たな産業創出など、**長期的な関係人口創出により地域コミュニティの活性化が期待できる。**

第２章　調査概要

２－１．調査方法（表2-1）

本研究では、先進的にワーケーションを実施している地方自治体として、国土交通省にてワーケーションの先進事例として紹介[5) 6)]されている、新潟県妙高市、和歌山県白浜町、静岡県下田市、北海道北見市、長崎県五島市、埼玉県横瀬町の６つの地方自治体を対象に調査を実施した（図2-1）。

２－２．分析方法

第３章では各自治体にオンライン形式で実施したヒアリング調査をもとに、地域特性や課題に対するハード・ソフト事業の取組を把握し、自治体ごとのワーケーションへの目的とワーケーション向けの施設の整備実態を分析・考察する。

第４章では、施設運営者へオンライン形式でヒアリングを調査をもとに、施設の概要、周辺環境、運営主体、面積規模、運営方針、整備の内容などを把握し、施設の立地特性や運用実態を分析・考察する。

第５章では、行動観察調査をもとに、利用者と運営者の座席での作業内容、交流の有無を確認する。さらに、滞在時間や移動先なども同時に確認することで、施設内における利用者と運営者の行動実態について分析・考察する。

第６章では、利用者へのヒアリング調査をもとに、利用者属性(利用目的、作業内容など)とワーケーションにおける施設や地域へのニーズ、交流の在り方を分類し、施設内・外における利用者視点での施設評価について分析・考察を行う。

表2-1. 各文献におけるワーケーションの定義・概要

A）地方自治体へのヒアリング調査

【質問内容】
ワーケーションに対する方針、施設整備・運用への取組、利用者への取組み
【対象選定】
国道交通省においてワーケーション先進事例として紹介されている自治体

調査対象	調査日	調査時間	調査人数	回答者数
和歌山県白浜町	2022/7/10	11:00～12:00	1人	1人
静岡県下田市	2022/7/27	16:00～17:00	1人	1人
新潟県妙高市	2022/7/28	15:00～16:00	1人	2人
北海道北見市	2022/8/1	10:00～11:00	1人	2人
長崎県五島市	2022/9/2	11:00～12:00	1人	1人
埼玉県横瀬町	2022/11/20	12:00～13:00	1人	1人

調査期間
2022年7月～11月
《Zoomで実施》

B）施設運営者へのヒアリング調査

【質問内容】
施設概要、立地、運営主体、面積規模、運営方針、整備内容
【対象選定】
各自治体におけるワーケーション関連施設で調査許可を得られたもの

調査対象	自治体	調査日	調査時間	調査人数	回答者数
施設A	和歌山県	2022/10/15	17:00～18:00	1人	1人
施設B	白浜町	2022/10/17	10:00～11:00	1人	1人
施設C	新潟県妙高市	2022/10/3	15:00～16:00	1人	1人
施設D	静岡県下田市	2022/11/8	10:00～11:00	1人	1人
施設E	埼玉県横瀬町	2022/11/29	13:00～14:00	1人	1人

調査期間
2022年8月～11月
《Zoomで実施》

C）利用者・運営者の行動観察調査

【調査内容】
施設内での移動、または利用内容の変化

調査対象	調査日	調査時間	調査人数	実利用人数
施設2	2022/11/25	9:00～19:00 (10h)	1人	81人
施設3	2022/11/8	9:00～18:00 (9h)	1人	17人
施設4	2022/11/28	9:00～20:00 (11h)	2人	13人
施設5	2022/12/9	9:00～18:00 (10h)	2人	45人

調査期間
2022年11月～12月
《現地/対面で実施》

D）利用者へのヒアリング調査

【質問内容】
年代・性別・職業、ワーケーションの経緯と目的、ライフスタイル、交流

調査対象	調査日	調査時間	調査人数	実利用人数
施設2	2022/11/25	9:00～19:00 (10h)	1人	3人
施設3	2022/11/8	9:00～18:00 (9h)	1人	1人
施設4	2022/11/28	9:00～20:00 (11h)	1人	5人
施設5	2022/12/9	9:00～18:00 (10h)	1人	10人

調査期間
2022年11月～12月
《現地/対面で実施》

第３章　各自治体のワーケーション実施実態

３－１．ソフト面での事業実態

自治体へのヒアリング調査の結果、各自治体で優先して解決したい地域課題が存在し、それに対するターゲットや事業が展開されていることが把握できた（表3-1. 参照）。

・和歌山県白浜町は、人口減少の課題に対し2004年という早期からIT企業の誘致に一貫した事業を展開し、企業受入を積極的にサポートする事業を実施している。

・新潟県妙高市は、地域のITリテラシー不足によるインフラ整備が遅れており、それを打開するため都市部企業と積極的に課題解決事業を提案・実施している。

・静岡県下田市は、地域産業の低迷に際し、地元事業者と協力・補助をし、都市部の事業者とのビジネスマッチングを通した産業の活性化を目指している。

・北海道北見市は、地元出身者の流出という課題の解決を目指す事業を展開し、地元大学と協力しながら地元出身者と就職先のIT企業を支援・誘致することで、地元人材回帰に取り組んでいる。

・長崎県五島市は、人口減少が深刻な課題となり、それを打破するため離島ならではの豊かな生活をアピールに、主に個人のワーケーション利用者を対象に密接な関係を構築することをねらっている。

・埼玉県横瀬町は、消滅可能性都市に指定されたことから、より強固な関係人口創出を目標に、行政が民間事業者に対しオープンな姿勢をとり、積極的に地域課題解決事業を提案する環境を整備している。

３－２．ハードの整備実態

自治体が補助金等で整備に関与した施設から、ワーケーション向けに整備される施設の傾向を把握した。

３－２－１．ハード整備の全体の傾向

図3-1.より、全体として民設民営の割合が72%と多く、さらに運営主体に着目すると公営より民営の施設が多い（86%）。施設業態に関しては、ゲストハウスが最も多い（56%）。これらから、ワーケーション施設の傾向として「民間運営のゲストハウス」が多く整備されていることがわかり、宿泊も兼ねたワークスペースが多く計画されていると考えられる。

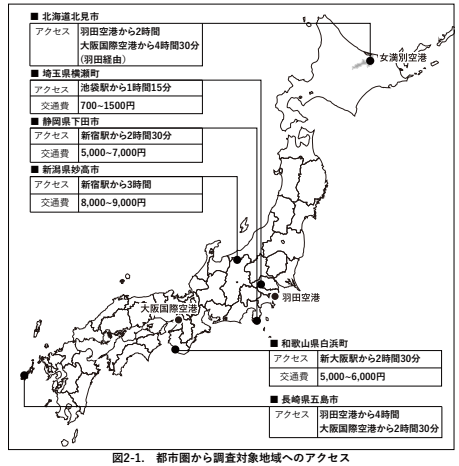


図2-1.　都市圏から調査対象地域へのアクセス

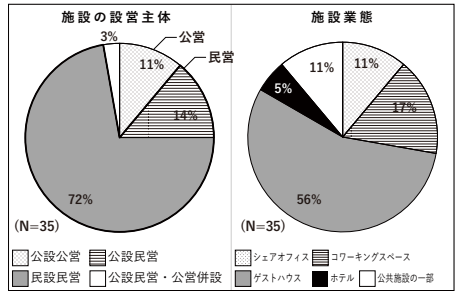


図3-1.　都市圏から調査対象地域へのアクセス

表3-1.　都市圏から調査対象地域へのアクセス

			和歌山県白浜町	新潟県妙高市	静岡県下田市	北海道北見市	長崎県五島市	埼玉県横瀬町	
背景	地域課題	共通課題	人口減少、少子高齢化、観光・地域産業や地域経済の低迷						
		優先課題	新規人材の移住促進	地域のデジタルリテラシーの向上	地域産業の活性化	地元出身者の流出防止	消滅可能性都市の脱却	消滅可能性都市の脱却	
	ワーケーション誘致開始		2004年	2019年9月	2020年7月	2013年	2019年5月	2021年10月	
	ターゲット		IT企業	IT企業	企業・個人問わず	IT企業＋地元出身者	個人	企業・個人問わず	
	目的		IT企業の誘致	観光活性化 関係人口増加	地域ビジネスの発掘	地域人材の回帰	移住定住促進	関係人口増加	
ソフト事業	独自事業		Wakayama Workation Networks	みょうこう ミライ会議	下田ワーケーション研究会	サケモデル プロジェクト	五島ワーケーション チャレンジ	よこらぼ	
	事業内容		ワーケーションを導入する企業の要望に応じて、視察プランの作成や農業体験などを企業ごとにコーディネートする	都市部企業、市内団体・企業、妙高市の三者による協働チームを組成し、地域課題に対する解決事業を提案する	地域のステークホルダーと協力し調査研究・情報発信・事業企画を行い、官民協働の受入体制構築と交流機会を支援	地元大学と連携し、地元出身者と所属するIT企業に働きかけを行い人材回帰を促す	都市在住者が地域体験を通じて自身のライフスタイルを見つめ直す機会をイベントとして提供	横瀬町の資源や遊休資産を利用し、企業・団体・個人を問わず実施したい事業をサポートする官民連携プロジェクト	
	ソフト事業に対する自治体のねらい		・IT企業に地域視察、体験を通して地域を知ってもらい、オフィス開設を目指す	・IT企業と組んで地域のICT,IoT等の地域課題を解決を目指す ・リモートで地域外から関係性を継続する「越境人材」の創出	・地域の事業者と都市部の事業者をマッチングさせ、地域産業を活性化を目指す	・地元の若者に回帰を促しつつ、所属するIT企業の誘致を行う	・地元住民とワーケーション利用者の交流機会を設け、移住定住を促す	・新規事業者にチャレンジする場を設けることで、継続的な関係人口増加を目指す	
ハード事業	施設タイプ								合計
		シェアオフィス	4（公設公営2,公設民営2）						4
		コワーキングスペース		1（公設民営）	2（すべて民設民営）	1（公設民営）	2（すべて民設民営）		6
		ゲストハウス	1（民設民営）		17（すべて民設民営）		1（民設民営）	1（公設,民営・公営併設）	20
		ホテル	1（民設民営）				1（民設民営）		2
		公共施設の一部			2（すべて公設公営）		1（民設民営）		4
	改修整備された施設		5	0	19	1	5	1	30
	宿泊機能を有する施設		2	0	17	1	2	1	23
	整備総数		6	1	21	1	5	1	35
	施設整備に対する自治体のねらい		・サテライトオフィスの開設を積極的に行い企業を受け入れる ・個人利用者受入は民間に委ねる	・豊富な自然環境を体験・通信設備強化をアピール するため、新設で一点集中的に施設を計画	・民間宿泊業者支援を多数行う ・受入先整備は民間に委ねる	・都市圏に就職した地元出身者がリモートワーク可能な環境整備	・民間宿泊業者支援を行い、受入先整備は民間に委ねる	・一つの施設に民営・公営のワークスペースを併設し、官民のコミュニケーションを積極的に行う	
ワーケーション事業における地域の特徴			IT企業誘致を優先した事業を展開	豊富な自然資源を生かすリモートワークを推進	地元事業の補助と地域内・外のビジネスマッチング	地域人材回帰に特化	利用者のQOL向上に特化した事業	官民連携・近接で事業提案する場の整備	

*1　名城大学大学院理工学研究科建築学専攻　修士前期課程

＊＊＊＊

3－2－2．特徴的な自治体の整備事例

次に各自治体ごとの施設整備に対する特徴を把握した。特にソフト事業に対するハード整備の結びつきが特徴的だった事例として、以下の自治体が挙げられる。

・和歌山県白浜町は主に行政が主体となってサテライトオフィス開設に尽力し、IT企業の受入整備を進めている。

・新潟県妙高市は豊富な自然環境を生かした施設立地と、都市圏のリモートワーカー向けに通信設備強化をアピールするため、新設で一点集中的に施設の整備を行っている。

・静岡県下田市は民間事業者への補助金を整備することで、最も多数のワーケーション関連施設を整備している。

・埼玉県横瀬町は、一つの施設に民営・公営のワークスペースを併設し、官民のコミュニケーションを積極的に行うことで、ソフト事業で展開している官民連携プロジェクトをより活性化させたい狙いが見られる。

3－3．小結

本章では、ワーケーションに対する自治体のねらいと、それに対するソフト事業とハード事業を確認し、全体の傾向として自治体は民間の補助を行いつつ宿泊に特化したワークスペースを整備していることが確認された。さらに、各々の自治体の地域課題・特性に合わせて独自のハード整備が実施されており、立地や運営方針などの条件によって各施設ごとに柔軟に計画・運営していると考えられる。

第４章　施設の立地特性・運用実態

本章では、第３章にて把握した自治体が整備に関わった施設の運営者に対しオンライン形式でヒアリング調査を実施した。調査協力を得たシェアオフィス１施設、コワーキングスペース１施設、ホテル１施設、ゲストハウス２施設を対象とし、立地特性・運用実態・平面分析を行う。

4－1．施設の立地特性

対象とした施設が立地する周辺の施設や地域の用途等について分析をおこなう。

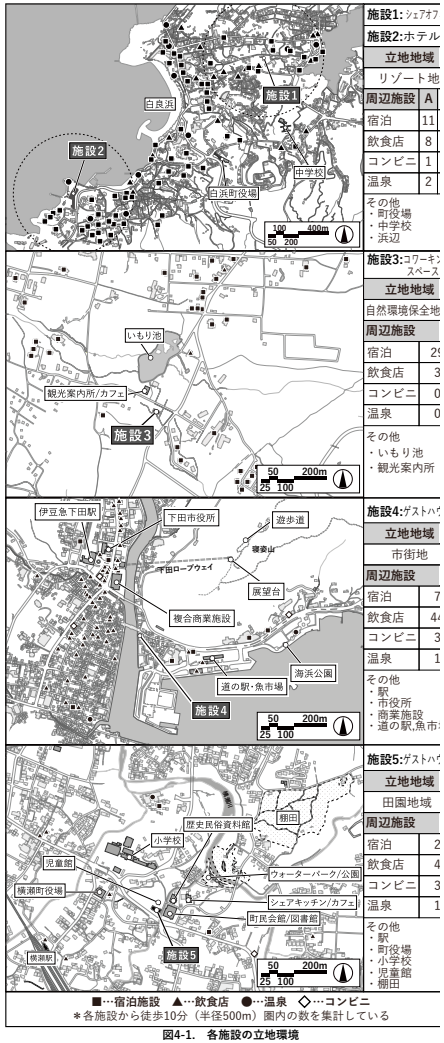
施設３以外はすべて学校や役場、駅などが立ち並ぶ中心地域に立地していることが大きな特徴として挙げられる。特に施設１，２（白浜町）の立地する地域は、海に面し周辺に宿泊施設・飲食店が多数点在するリゾート地としての側面が強い土地であることがわかる。一方、同じく海に面する施設４（下田市）だが、宿泊施設は比較的少なく飲食店が多数立地しており、観光より市街地としての側面が強い。施設５は横瀬町の中心地に立地する一方で周辺の飲食店や宿泊施設は少なく、田畑が多く点在する点で田園地域としての側面が強い。施設３に関しては妙高市の自然公園の中に立地する点が特徴的で、周辺に宿泊施設や観光拠点が点在するなど、エコツーリズム的な側面の強い地域である。

以上のように、ワーケーション施設の立地タイプとして、観光に特化したものとそうでないものが存在することが考えられる。特に今回調査対象とした地域においては、観光に特化した地域でも「リゾート地域」（施設1,2）、「自然環境保全地域」（施設3）、「市街地」（施設4）に分類でき、観光に特化していない地域として「田園地域」（施設5）というような立地特性に分類した。

4－2．施設の運用実態

次に、対象とした施設の運営者に対し実施したヒアリング調査から各施設の運用実態を把握する。施設運営者に対する質問内容は、施設基本情報、ワーケーションへの方針、利用者像、効果・事業性に関する事項とした（表4-1参照）。

まずワーケーションに対する運営のねらいについて、公設の施設に関しては自治体がより密接に整備に関わっていることから、自治体のワーケーション方針とほとんど一致した内容で運用されている。調査対象の中で唯一民設の施設２に関しては、行政は補助金のみ関与し民間が整備を行っており、ワーケーションの機運の高まりと耐震改修時期が合致したことでワークスペースの整備が行われている。施設１について



■…宿泊施設　▲…飲食店　●…温泉　◇…コンビニ
＊各施設から徒歩10分（半径500m）圏内の数を集計している

図4-1．各施設の立地環境

は、常時シェアオフィスとしての運用のみであり、ドロップイン等の一時利用を実施していない。また運営者も基本的に在中しておらず、施設内を利用するのは施設に入居した企業のみとなっていた。施設３は、調査対象のうち一般利用可能な施設の中で唯一宿泊機能が存在しない施設であり、周辺の宿泊施設と連携しながら利用者の受入体制を整備していることがわかった。施設４，５は複数の運営者が役割分担をしながら施設の整備を行っており、特に施設５に関しては、民営と公営のワークスペースが併設しており、別々の運営者が協力しながらワーケーション利用者と地域利用者ほとんどのを繋げていることがわかった。

事業採算性については、ほとんどの施設が求めていないと回答し、ワーケーション利用による関係人口増加など二次的な効果に期待していることが明らかになった。

第５章　施設の平面特性と利用・行動実態

本章では４章で運営者ヒアリングを実施した施設の内、行動観察調査の調査協力を得た４施設（施設１は一般利用不可能なため、調査対象外）を対象に、施設内の平面特性と、行動観察による利用実態を明らかにする。

5－1．各施設の平面分析

運営者ヒアリングをもとに、各施設内においてワーケーション利用者が日常的に利用する空間のうち、作業を行うエリアと交流を行うエリアの分布を平面図に表した（図5-1.）。

各施設において、主に作業に集中するための領域、主に交流のみの領域、さらに作業しながら交流もできる領域の３タイプが存在することが確認できる。利用者は施設を利用する際に、これらの領域を横断し、各自作業時間と交流時間の配分を調節しながらワーケーションを実施していると考えられる。また、施設3, 4, 5についてはロビーを中心として３つの領域が構成されることなどから、図5-1のように施設構成を分類できる。施設構成において外部空間との接続箇所となるロビーの位置付けは、ワーケーション利用者と地域住民との交流を創出する上で重要となってくると考えられる。

これらの実態を行動観察調査を用いて明らかにしていく。

表4-1．各施設の運営実態

各カテゴリー	●：該当▲：一部該当	施設１	施設２	施設３	施設４	施設５
運営実態	施設タイプ	シェアオフィス	ホテル	コワーキングスペース	ゲストハウス	ゲストハウス＋地域交流施設
	施設内での運営者数	0 人	10 人以上（ホテルマン含む）	3 人（カフェ運営含む）	2 人	2 人
	運営者在中		▲	●	●	●
	運営者の兼業の有無			●	●	●
	宿泊機能		●		●	●
	事業採算性			▲		
	運営構造	白浜町 運営委託 不動産会社 本社大阪 運営 施設A IT企業が入居、運営者は不在	施設B ホテル運営会社 運営 1Fラウンジの一部を無料開放 ラウンジ利用者	妙高市 運営委託 妙高リゾートマネジメント 地方創生事業を扱う 運営 施設C 運営者は地方創生事業をしながら管理	施設D 運営をサポート ハード整備 ソフト整備 ラウンジ利用者 協力 マッチング 地元の工務店 地元事業者	官民の組織が共存 公営側整備 民営側整備 役場管理 役場職員 地域住民 交流 横瀬町役場 地元住民 ラウンジ利用者
整備内容	ワーケーションへのねらい	企業に第２のオフィスとして利用してほしい	観光客のみならずビジネスマンも受け入れたい	都市部からリモートワーカーを受け入れたい	地域事業者とワーケーション利用者を繋げたい	地域内・外の利用者が自由に交流・議論してほしい
	ワーケーションへの施設方針 改修・新設	改修	改修	新設	改修	改修
	従前用途	銀行　保養所	ホテル（耐震改修）	―	造船会社の寮	JA 支所
	ターゲット	IT 企業	個人	IT 企業・個人	個人	個人
	施設利用費	賃貸	無料	一部有料	有料	有料（民営）、無料（公営）
利用実態	利用者像	・入居企業 ・イベント参加者	・観光客 ・会社員（出張） ・ドロップイン	・観光客 ・シェアオフィス契約者 ・ドロップイン	・一時宿泊利用 ・会員利用 ・地域住民 ・ドロップイン	・一時宿泊利用 ・会員利用 ・地域住民 ・ドロップイン ・行政職員
	周辺施設との連携	特になし	特になし	・宿泊施設 ・観光交流施設	特になし	・学童保育施設 ・公民館 ・シェアキッチン

施設	施設2:ホテル	施設3:ｺﾜｰｷﾝｸﾞｽﾍﾟｰｽ	施設4:ゲストハウス	施設5:ゲストハウス
所在地	和歌山県白浜町	新潟県妙高市	静岡県下田市	埼玉県横瀬町
立地	リゾート地域	自然環境保全地域	市街地	田園地域
設立	1968年	2022年	2020年	2022年
改修	2018年	----	2019年	2021年
従前用途	ホテル（耐震改修）	無し（新設）	寮（内部を改装）	JA支店（内部を改装）
構造	RC造	木造	RC造	RC造
運営	民間企業	一般社団法人	民間企業	民間企業、一部行政
席数	49席	55席	31席	47席
面積	1913.2(㎡)	206.1(㎡)	266.2(㎡)	453.9(㎡)

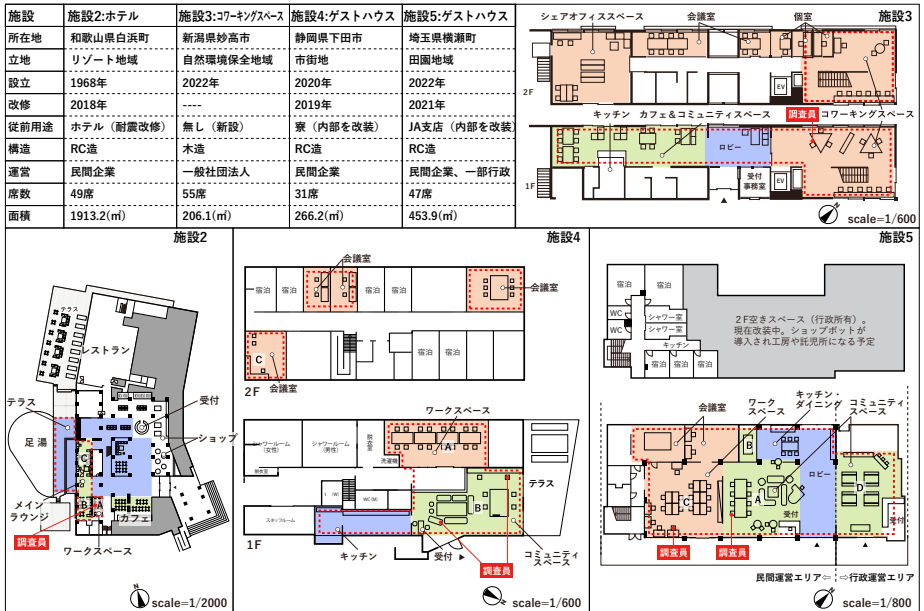
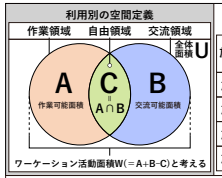


図4-2．各施設の平面構成

表5-1.　各施設の数値集計



施設名	作業と交流が行われる面積 面積 U(㎡)	作業面積 A-C(㎡)	交流面積 B-C(㎡)	自由利用面積 C(㎡)	ワーケーション活動面積 W(㎡)	各領域が占める空間の割合 ワーケーション活動域 W/U(%)	Uに対する割合 作業領域 A-C/U(%)	Uに対する割合 交流領域 B-C/U(%)	Uに対する割合 自由領域 C/U(%)	Wに対する割合 作業領域 A-C/W(%)	Wに対する割合 交流領域 B-C/W(%)	Wに対する割合 自由領域 C/W(%)
施設2	1913.2	32.5	1293.7	384.6	1710.8	89.4	1.7	67.6	20.1	1.9	75.6	22.5
施設3	206.1	62.0	20.4	44.3	126.7	61.1	30.1	9.9	21.5	48.9	16.1	35.0
施設4	266.2	38.3	22.6	51.1	112.0	42.1	14.4	8.5	19.2	34.2	45.6	20.2
施設5	453.9	135.3	143.0	84.9	363.2	80.0	29.8	31.5	18.7	37.3	39.4	23.3

【参考】■ワーケーション活動面積W(A+B-C) ‥‥施設内でワーケーションで利用される場所の面積.　■作業面積(A-C)‥‥施設全体で主に作業のみが行われる場所の面積.
■ワーケーション活動域(W/U)‥‥施設全体でワーケーションで利用される領域の割合.　■交流面積(B-C)‥‥施設全体で主に交流のみが行われる場所の面積.
■自由利用面積(C)‥‥施設全体で作業・交流が自由に行われる場所の面積.

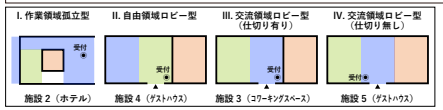


図5-2.　各施設の領域構成タイプ

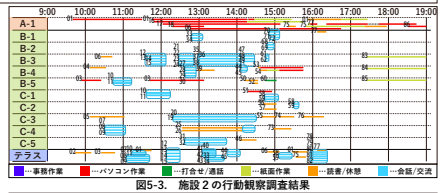


図5-3.　施設２の行動観察調査結果

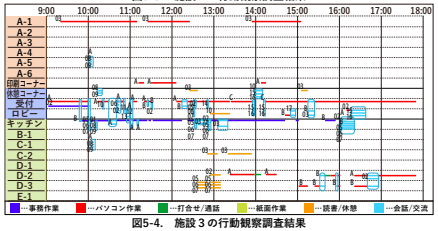


図5-4.　施設３の行動観察調査結果

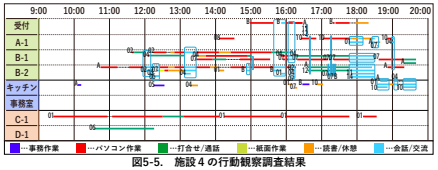


図5-5.　施設４の行動観察調査結果

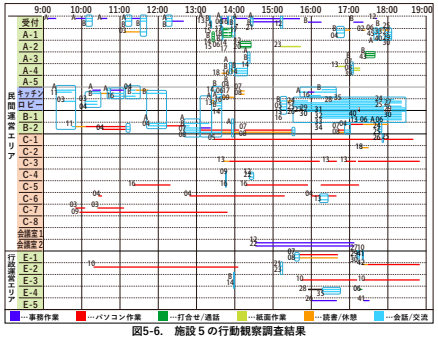


図5-6.　施設５の行動観察調査結果

表5-2.　行動観察調査で確認できた利用者の内訳

	運営者	ワーケーション利用者 ドロップイン利用者	ワーケーション利用者 シェアオフィス契約者	ワーケーション利用者 月額会員	地域住民 行政職員	地域住民 移住者	地域住民 住民(大人)	地域住民 住民(子供)	観光客	合計
施設２（白浜町）	0	8	0	0	不明	不明	不明	4	不明	81＊
施設３（妙高市）	4	1	1	0	5	0	1	0	12	17
施設４（下田市）	3	0	0	7	0	0	2	1	0	13
施設５（横瀬町）	2	0	0	11	3	4	13	12	0	45

＊具体的な利用者の経歴等はほとんど把握できなかった、確認できなかった利用者の多くは観光客と思われる。

5－2．各施設平面の数値集計（表5-1.）

施設内で作業・交流が行われるエリアの種類から、主に作業のみが行われる領域を「①作業領域」、主に交流のみが行われる領域を「②交流領域」、作業と交流が自由に行われる領域を「③自由領域」と分類した。ここで①②③の3つを合わせた領域内でワーケーションが展開されると考察し、これを「ワーケーション活動域」とする。これらの各領域が、各施設全体でどれだけの面積比を占めているかを算出した。各施設の算出結果を比較すると、施設2はもっともワーケーション活動面積が広いが、施設全体に対しての作業領域の割合が小さい。対照的に、施設5はワーケーション活動域、作業領域、交流領域のすべてにおいて他の施設よりも広く、施設全体に対する割合も大きい。

以上のように、ワーケーションを実施する上で各施設の整備体制が把握できる。

5－3．利用者・運営者の行動実態（図 5-3～6.）

各施設の行動観察調査の結果を(図 5-3～6.）に示す。縦軸は（図4-2.）中の各座席のナンバリング（入り口に近い座席から上部に記載）を示し、横軸は時刻に示す。また、図中の数字は利用者を、英字は運営者及びスタッフを示す。調査において確認できた利用者の内訳は図5-3.の通りであるが、施設2については81人という多くの利用者を確認できた一方、大半の利用者に関する詳細な情報は得られなかった。行動観察を参照（図5-3.）すると、他の施設に比べて3～4人による断続的な交流が多数行われており、このことから施設2で確認できなかった利用者の大半は団体の観光客などと考えられる。

全体の傾向としては、「作業領域」ではどの施設においてもほとんどPC作業のみが行われていた。

「交流領域」ではどの施設においても多数交流が行われているが、特に施設3, 5は図5-2.の通りロビーが「交流領域」となっており、その中に運営者の受付があることで、観光客や地域住民が受付を基点として交流領域内で運営者と交流する様子が観察された。

「自由領域」においては、各施設で傾向の違いが見られた。施設2は前述した通り、団体観光客と見られる利用者による交流が多い。施設3は観光客や周辺で作業する行政職員などが昼休憩に利用したり、運営者が作業する場としても利用されている。施設4, 5はどちらも交流が多数行われている点で共通するが、施設4は「作業領域」よりも「自由領域」の方が作業している利用者の数と時間が大きい。また施設構成としてロビーが自由領域となっているが、施設3, 5同様に運営者がロビーで地域住民と交流する様子も観察された。施設5は民間の「自由領域」はほとんど交流の場として利用され、行政側の「自由領域」は地域住民の作業場所としての利用側面が強かった。

以上のように、施設構成としてロビーの位置・役割が施設外との交流を促す上で重要で有り、また仕事をしつつも他者との交流が可能な「自由領域」の配置や位置付けによって、ワーケーションにおける地域との関わり方の違いが現れると考えられる。

表5-3.　各施設の利用者と運営者の作業・交流度

施設名	各施設の混雑状況 利用人数(人)	席数(席)	最長利用時間(h)	最小利用時間(h)	平均滞在時間(分)	のべ調査時間(h)	利用者の活動・交流 移動頻度	外出頻度	交流頻度	利用者間	運営者の活動 移動頻度	交流頻度	単位面積あたりの交流利用率(%)	領域別の利用率 作業領域利用率(%)	交流領域利用率(%)	自由領域利用率(%)	自由領域利用比（作業：交流）
施設2	81	49	9.28	0.08	60	10	1.35	0.99	0.31		---	---	0.04	29.4	15.0	55.6	5：13
施設3	17	55	5.83	0.03	64	9	6.20	1.79	1.91	0.48	1.77	1.46	0.25	15.2	38.8	45.9	2：7
施設4	13	31	9.88	0.32	201	11	1.93	0.66	0.58	0.13	1.67	1.58	0.20	20.9	7.7	71.3	9：5
施設5	45	47	7.22	0.02	126	10	2.01	0.55	0.55	0.20	3.34	2.18	0.14	26.0	17.9	56.1	5：17

【参考】■移動頻度＝利用者が施設内での移動回数/利用者の合計滞在時間.　■交流頻度＝利用者・運営者が交流した回数/利用者の合計滞在時間.
■外出頻度＝利用者が施設を外出した回数/利用者の合計滞在時間.　■単位面積あたりの交流利用率＝利用者・運営者が交流した回数/施設面積

5－4．利用者と運営者の活動・交流度の関連分析(表 5-3.)

行動観察結果から、各利用者と運営者の滞在時間、席移動回数、移動先、交流回数を読み取り、そこから平均滞在時間、移動頻度、外出頻度、作業・交流・自由領域の各エリアにおける利用率を算出した(表5-3.)。以下では、表5-1.のハードに関する集計と表5-3.の活動に関する集計を照らし合わせ、施設構成（図5-2.）ごとの作業と交流における特徴を記す。

①作業領域孤立型である施設２は、自由領域において多くの観光客が交流していた。一方で、作業利用者は作業領域に篭って作業しており、空間別に利用者が使いわけている様子が観察された。

②自由領域ロビー型である施設４は、一定の利用者による滞在時間が長く、自由領域の利用率が高いことが確認でき、他の施設に比べて利用者・運営者間で交流が密接であり、かつ比較的作業と交流がバランス良く行われているといえる。

③交流領域ロビー（仕切り有り）型である施設３は、施設全体に対して作業領域が広いが、その利用率は低い。一方で、ロビーのある交流領域において利用率が高い。さらに利用者の移動・外出頻度等が多いことから、ロビー周辺で多く活動されていることが伺える。これは、施設にやってくる観光客による影響だと考えられる。

④交流領域ロビー（仕切り無し）型である施設５では、全施設の中で最も利用者の滞在時間が長く、かつ運営者の活動量が大きい。一方で、領域別の利用率としては、自由領域の利用率が最も高いが、施設4に比べると作業・交流・自由領域にあまり偏りがなく、施設全体を通して作業と交流が活発に行われていると言える。

次に全体を通しての活動・施設利用について考察する。活動内容に関しては、作業より交流に重きをおいて活動している傾向が見られた。また利用者間の交流が少なく、運営者を介することで交流が発生する傾向があることが確認できた。これらから、ワーケーション利用者と地域間のコミュニケーションを創出するうえで運営者の役割が重要であることが考えられる。

施設利用に関しては、各領域の面積の広さに対する活動量の相関は見られなかったが、施設構成タイプでロビーの位置に特徴がある施設3, 4, 5において交流頻度が高い傾向が見られた。つまり交流を促すうえでロビー空間が重要で有り、さらに交流領域ロビー型において施設内外の交流が盛んであった。

第６章　利用者のワーケーション実施実態

６－１．利用者像について　（図6-1～3.）

ヒアリングを行った利用者の情報は図6-1.の通りである。

調査の結果、ワーケーションを行う利用者像として、大半は20～30代でフリーランスで活動し、かつ決まった居住地を持たないアドレスホッパーであることがわかった。また利用形態として、定額制宿泊サービスに契約し、提携する施設・地域を拠点にワーケーションを実施していることがわかった。職業内容については、IT関連の職種や、ノートPCやスマートフォン一台で仕事が成立する利用者が大半を占めていた。さらに利用者の主な移動方法として、ほとんどが電車を利用してワーケーション先へ移動しており、施設の立地として駅からの近さが重要であることが考えられる。

ワーケーションを行うに至った経緯としては、多くの利用者において、新型コロナをきっかけとする生活や仕事の変化が影響していた。「その他」の回答内には、「都会の生活に疲れ」て、「自然がある場所を求めた」などの回答が多数あった。ワーケーションを行う目的としては、「新たな出会い」、「仕事のアイデア創出」、「ストレス軽減」の順で回答数が多かった。

以上のように、新型コロナをはじめとする社会情勢の変化に伴い、既存の生活に対するストレス増大が起因して、自然や新たな出会いを求めてワーケーションを実施している利用者像が明らかとなった。

６－２．利用者のライフスタイルについて　（図6-4～6.）

ワーケーションを行う際に生活面で利用する施設としては、コンビニ、スーパーなど、最低限の生活環境が整っていれば良いと答える人が多かった（図6-4.）。余暇時に利用する施設や場所としては、８割近くの利用者が「自然景観を求め」ていると答えており、また地元の飲食店や温泉施設などに行く人が多かった。一方で、具体的に「観光をする」と回答した人はほとんどいなかった（図6-5.）。また行動観察調査とは別でヒアリングした、利用者に施設外での活動を含めた1日の流れ（図6-6.）によると、ほとんどの利用者が１日の大半を施設内に滞在し業務に当てており、施設外の活動としては、業務の気分転換として散歩に出かける程度の人が多かった。

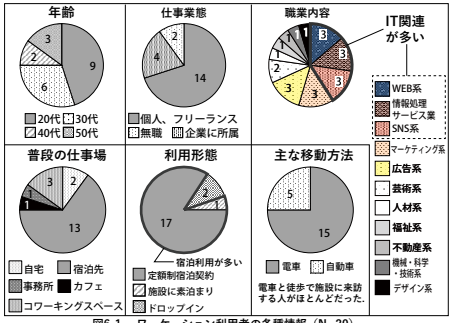


図6-1.　ワーケーション利用者の各種情報（N=20）

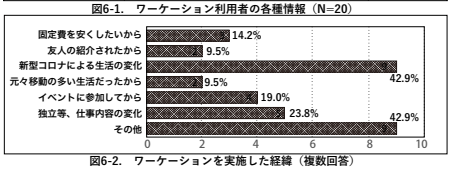


図6-2.　ワーケーションを実施した経緯（複数回答）

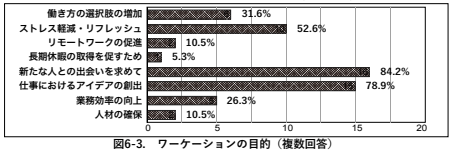


図6-3.　ワーケーションの目的（複数回答）

以上より、利用者のワーケーションにおける活動内容として、余暇（バケーション）より仕事（ワーク）に重きをおいて活動している実態が明らかとなった。

6－3．他者との交流について （図6-4～6.）

利用者がワーケーション先で交流を行う場所を施設内外を問わず質問したところ、ほとんどが施設内で交流を行うと回答した（図6-7.）。施設内における交流相手を質問したところ、特に施設4,5において満遍なくさまざまな人と交流していることがわかり、その中でも運営者とはより多くの交流をしていることがわかった（図6-8.）。加えて、交流の内容を質問したところ、特に施設4,5においては、「食事を共にする」「遊びに出かける」など、より密接な交流を行っていることがわかった（図6-9.）。施設4,5は、４章で言及した通り、運営者2人が役割を分担しながら常駐しており、５章で分析された通り、より密接な交流を促す上で運営者の役割が大きいことが確認できた。

第７章　総括

７－１．まとめ

本研究は、現在日本においてワーケーションが展開されるワークプレイスの実態を、地方行政の方針、施設運営の実態、施設利用実態という順を追って確認した。

行政については、地域によって方針が異なり、これは都市部からのアクセスの容易さによってターゲットや目標が変化していると考えられる。また施設整備の傾向として、民設民営が多く、ワークスペースに宿泊施設を伴うものが多い。

施設立地特性としては、「リゾート地域」,「自然環境保全地域」,「市街地」,「田園地域」に分類され、必ずしも観光に特化しない地域もあることがわかり、また全体として役所や学校が施設近隣にある事例も多く見られた。

施設運営実態に関しては、行政の方針に即してターゲットを明確にしつつも、運営者が利用者と相互に関係しながら運を行っており、時に行政と利用者の仲介する役割を担うと考えられる。また、事業採算性よりも関係人口増加などを重視している傾向がみられた。

平面特性としては、「作業領域孤立型」,「自由領域ロビー型」,「交流領域ロビー型（仕切り有り/無し）」の４つに分類し、さらに利用者・運営者の行動実態から、「交流領域ロビー（仕切り無し）型」では、観光客・地域住民が気軽に訪問できるロビー空間が整っており、かつ作業領域との仕切りがすくないことから、ロビーにおいて、運営者が仲介した地域内外の利用者による交流が多数行われていた。

またワーケーションの利用者像として、20ー30代でフリーランス、IT関連の職に就き居住地なしで宿泊利用、かつ電車で移動する利用者が多く、地域ならではの飲食物・店や都市にはない自然環境、新たな出会い・交流を求めてワーケーションを実施している人が多かった。

以上より、地域課題解決を目的としたワーケーションとは、主に関係人口創出が目指されており、そのためには地方行政・住民とワーケーション利用者の関係性構築が必要であると考えられ、その仲介者として施設運営者が存在する構図が、円滑な地域・利用者間交流を促すと考えられる。その上で施設計画としては、「交流領域ロビー（仕切り無し）型」のように気軽に交流できる空間と運営者受付が施設入口付近に存在し、かつ作業空間とゆるやかに区切られている計画が望ましいといえる。さらに施設の立地として、地域ならではの人・自然・飲食を経験できる周辺環境が望ましいと言える。

７－２．今後の課題

本研究で対象とした自治体・施設は、あくまで国交相の資料からワーケーション先進事例として抽出したものであり、なおかつ比較的都市圏に近い施設事例を取り扱っている。今後は長崎県五島市など、都市圏から遠方の地域も含めたワーケーション実態に関する調査を行うことで、より包括的にワーケーションと施設の関係性を追求することが課題である。

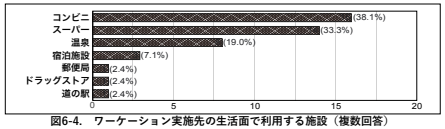


図6-4. ワーケーション実施先の生活面で利用する施設（複数回答）

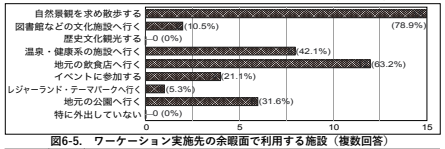


図6-5. ワーケーション実施先の余暇面で利用する施設（複数回答）

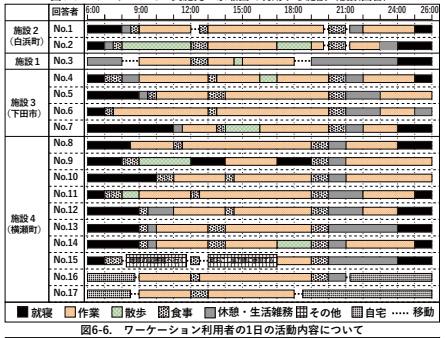


図6-6. ワーケーション利用者の1日の活動内容について

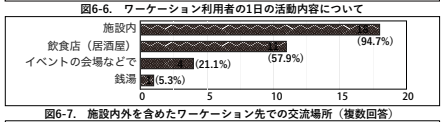


図6-7. 施設内外を含めたワーケーション先での交流場所（複数回答）

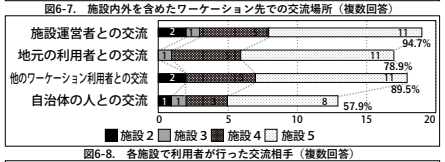


図6-8. 各施設で利用者が行った交流相手（複数回答）

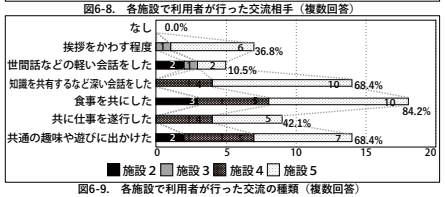


図6-9. 各施設で利用者が行った交流の種類（複数回答）

参考資料

1) 田中敦, 石山恒貴:「日本型ワーケーションの効果と課題 ―定義と分類、およびステークホルダーへの影響―」, 日本国際観光学会論文集 27巻 pp. 113-122 (2020. 05)

2) 小林達矢, 後藤将人, 高野伸彦, 降幡尚泰, 山下雅史:「地域活性化に向けたワーケーション事業のポイント ―ワーケーションはウィズコロナの地域社会に活力をもたらすか―」, 東洋大学PPP研究センター紀要14　pp. 1-17 (2022. 04)

3) 三木優子・三輪康一・栗山尚子「コワーキングスペースのコミュニティ形成に関する研究　利用者間および地域との関わりに着目して」, 日本建築学会近畿支部研究会発表 pp. 497-500 (2015)

4) 田中瑞希・塚本夏芽・松本裕司・仲隆介「都市における宿泊施設併設型コワーキングスペースに関する研究　ワーカー視点の価値と課題」, 日本建築学会近畿支部研究会発表 pp. 27-28 (2021)

注

注 1) 日本航空株式会社 プレスリリース資料
https://press.jal.co.jp/ja/release/201707/004350.html

注 2) 平成29年度　国土交通省白書
https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h29/index.html

注 3) JTB総合研究所HP 観光用語集
https://www.tourism.jp/tourism-database/glossary/workation/

補助制度を利用した空き家の共用利用施設への転用事例にみる改修・運営の特徴

Characteristic of Vacant House Renovation to Common Usage Facility Using the Subsidy

山田　侑希　――*1

Yuki YAMADA　――*1

キーワード；
補助金 , 空き家 , 転用 , 改修 , 運営 , まちづくり

Keyword:
Subsidy, Vacant House, Conversion, Renovation, Management, Town Planning,

The purpose of this study is to clarify the characteristics of renovation and management. Focusing on the conversion of vacant houses to common usage facilities using the subsidy, we will analyze in three steps.
First, we analyzed the characteristics of each municipality's subsidy.Next, we clarified the characteristics by analyzing the actual situation of renovation and management of the use cases. Finally, by grasping the usage, the way of effective renovation was shown.

第１章　はじめに

研究の背景・目的

近年、増加し続けている空き家[注1)]の利活用は、人口減少が進む日本において、重要な社会課題となっている。こうした状況の中、平成 22 年に埼玉県所沢市において、強制力を持つ条例[注2)]が制定された。また、平成 26 年には国により「空家対策の推進に関する特別措置法」が制定された。その結果、崩壊などの危険性や衛生環境悪化の原因になる空き家に対して、除去などの措置を国の指針のもと市町村が空き家所有者に働きかけられるようになった。一方で、空き家の活用に向けた動きも確認できる。各市町村では、空き家活用を促進する政策も施行されている。具体的には、日本各地の市町村で空き家バンクの設立や移住者等を対象にした空き家の利用促進が行われ、住宅ストックの活用に向けた制度も設置されている。中でも注目すべき動きとして、地域活性化に資するまちづくり拠点や店舗としての活用に対して補助金を交付する市町村の存在が指摘できる。個人の専用住宅としての空き家活用だけでなく、居住者以外も利用できる施設として活用するこのような事例は、今後の住宅ストックの活用に向けた可能性を示すものと考えている。以上の背景から、本研究では、改修の際に市町村が施行する補助金制度を利用し、空き家を非住宅利用の共用利用施設（以下「共用利用施設」という）へ転用した事例に着目する。

空き家活用に関する研究蓄積としては、秋山ら[1)]や西浦ら[2)]、清水ら[3)]のように、空き家が多い現状の分析と今後の空き家発生について把握を試みた研究が挙げられる。また、立神ら[4)]のように、行政による空き家対策メニューについての研究も報告されている。更に、活用については、中村ら[5)]や塚田[6)]のように、特定の活動を行う際の空き家活用についての研究が挙げられる。また、空き家に限らず、中園ら[7)]や中田ら[8)]、小松ら[9)]のように既存建築を転用し活用している事例についての実態や傾向を明らかにした研究が報告されている。白木ら[10)]は、転用がまちづくりへ及ぼす影響を明らかにしている。更に、中園[11)]や山本ら[12)]により補助制度を利用した事例についての研究が行なわれている。

以上のように、さまざまな観点により空き家に関する研究が蓄積されてきた一方で、近年各地で確認されるような非個人利用に着目した研究は充分とはいえない。今後、人口が減少し空き家が増加するのは避けられない社会状況のなか、新たな空き家の活用方法が必要とされているのではないか。

そこで本研究では、補助金制度を利用した空き家活用における共用利用施設への転用事例に着目する。補助金制度の実態を把握した上で、各事例の改修内容や運営方法の分析を行うことで、空き家を共用利用施設へ転用する際の改修・運営特徴を明らかにすることを目的とする。更に、活用事例の利用実態の把握を行う。

対象地とした中部地方は、３大都市圏の関東地方、近畿地方と比べ空き家率が高い。また、東海、中央高地、北陸と異なる自然環境での事例が確認されたことから、さまざまな共用利用施設の改修手法を把握することができるものと考え、中部地方を対象に選定した。

対象の選定方法

本研究では、まず、市町村が施行している補助金制度の調査を行い、その後、補助金制度を活用した空き家改修事例を抽出した。補助金制度は、本研究の対象とする中部地方 316 市町村の公式ホームページより抽出した。市町村公式ホームページ内の「暮らし」「事業者の方へ」「行政情報」等のページから、住宅に関する補助金制度の抽出を行った。その後、取得時や除去時、耐震工事等を除く、建物の改修や整備の費用を対象に含むものを抽出し、共用利用施設に対する改修費補助をする制度を選定した。表１に結果を示す。33 件が選定され、そのうち、空き家への交付実績のある制度は 17 件であった。その中で、調査の許可を得られた 14 事例を本研究の現地調査対象とした。

研究方法

調査日程を表２に示す。本研究では、電話インタビュー調査、現地実測調査、事業者へのヒアリングとアンケートを実施した。第２章では各市町村担当者への電話問い合わせにより、補助金制度の実を把握した。第３章及び第４章では、共用利用施設の実測調査と営者へのヒアリング調査を実施することで、改修費用や改修内容、営実態を把握した。第５章では、運営者へアンケート調査を行い、施設の利用のされ方を把握した。14 事例にアンケート調査を実施、回収率は 57% であった。

２章　補助金制度の実態

本章では補助金制度を施行している市町村の傾向と制度自体の特徴把握する。

1. 制度施行市町村の特徴

制度を施行する市町村について（1）面積及び土地利用（2）都市画（3）空き家率の視点から、分析した。

）面積及び土地利用

図１に制度施行市町村の総面積[注3)]と森林率[注4)]の関係を示す。度を施行する市町村は、東海、中央高地、北陸の太平洋側から日本側にかけて、どの地域にもほぼ同数確認され、立地に伴う傾向は確されなかった。総面積をみると、小さいものから大きいものまで広分布していた。また、森林率では大きいものと小さいものに大別さ、大部分は総面積が小さい市町村であった。また、図２に示すように、口規模[注5)]をみると、約４割が約１万人以下の町村であることが認された。

）都市計画

更に、制度施行市町村の都市計画に着目すると、図３に示すように、市計画区域の策定を行っている市町村[注6)]が多く確認された。また、４に示すように、用途地域の内訳をみると、住居系の割合が５割超える市町村が多数確認された。

）空き家率

図５に示すように、用途地域における住居系の割合と空き家率[注7)]みると、大きなまとまりが確認された。一方で、用途地域における住居系の割合が高く宅地が多いが、空き家率も高くなっている地域確認された。

2-2. 補助金制度の特徴

補助金制度の特徴を把握するため、（1）制度施行目的（2）補助度額と申請資格から、分析した。

（1）制度施行目的

誰を対象にして、どのような影響を生むのか、「①移住促進：地外の人が地域内に住むことを促進する」、「②関係人口の創出：地域の人の訪れる地域内の場所を増やすことを促進する」、「③賑わい出：地域内の人が訪れる地域内の場所を増やすことを促進する」のつに分類した。結果を図６に示す。地域内の人々が訪れる場所をやす「③賑わいの創出」が多いことが把握された。また、財源にては、「市町村の単費」、「国の補助事業」、「民間の補助事業」の３に整理した。各市町村の一般財源を利用し用途が自由な「市町村の費」は 12 件であった。また、制約が多いが補助金の 1/2 の額など補助が国より受けられる「国の補助事業」は 14 件であった。一方MINTO 機構を利用した「民間の補助事業」は３件となっており、町村の単費」と「国の補助事業」が多く確認された。

（2）補助限度額と申請資格

補助限度額は最低額 30 万円から最高額 5000 万円まで広く確認

表1　制度選定結果と交付状況

共用利用施設に対して改修費を補助する制度		33 件
補助金交付状況	空き家改修への交付実績あり	17 件
	空き家以外の改修への交付実績あり	4 件
	交付実績なし	10 件
	回答なし	2 件

表2　調査日程一覧

調査内容	対象件数	調査日程
電話インタビュー調査	33件	2022.3.22、2022.10.7
実測調査・ヒアリング調査	１４事例	2022.10.29、2022.3.24-29、2022.10.17-20
アンケート調査	8事例（回収率57%）	2022.12.18-2023.1.13

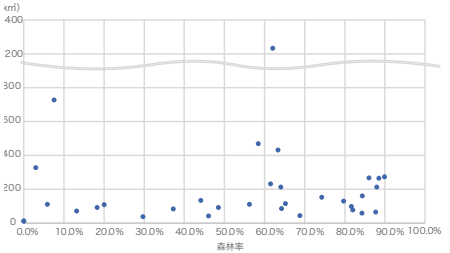


図1　制度施行市町村の総面積と森林率の関係

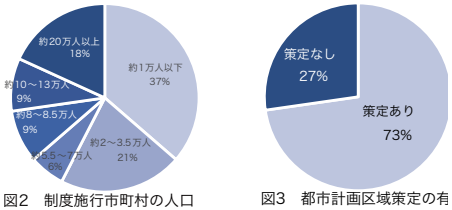


図2　制度施行市町村の人口

図3　都市計画区域策定の有

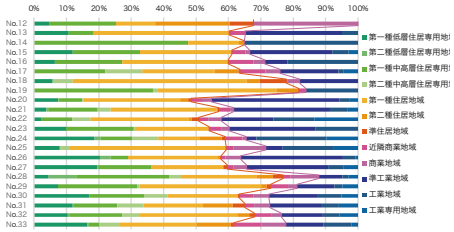


図4　用途地域の面積内訳

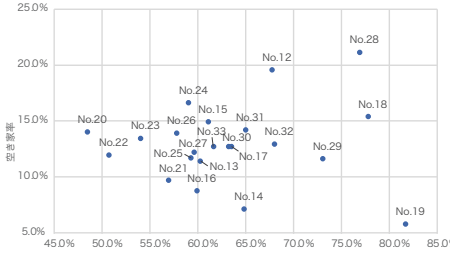


図5　用途地域における住居系の割合と空き家率の関係

*1　名城大学院理工学研究科建築学専攻　修士課程
（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501）

*1　Grad. student, Grad. S. of Sci. and Eng., Meijo Univ.

、まとまりがみられた金額帯を図 7 に整理した。その結果、90 ～
0 万円が最も多く約 4 割を占めていた。また、250 万円以下の制
が 76% を占めていることが確認された。更に、250 万円以下の制
の財源をみると、「市町村の単費」が 14 件、「国の補助事業」が 8
、「民間の補助事業」1 件、回答なしが 2 件となっており、「市町村
単費」が多くを占めていた。申請対象者の資格については、法人格
有無は求めていない傾向が確認された。共用利用施設として活用す
人々に対し、補助金を広く交付する制度とする傾向があることが把
された。続いて、図 8 に示すように、活用規定年数に着目すると、
くの制度が 10 年や 5 年といった長期間を設定していた。

3. 補助金制度の施行に関する考察

以上より、空き家を共用利用施設へ転用する際の改修への補助金制
は、小規模な市町村に多く確認された。また、用途地域内の半分以
を住居系としている市町村や空き家率が高い地域も確認された。更
、補助金制度は、空き家を共用利用施設として活用する地域の人々
広く補助金を交付するものとなっており、住民と協働のまちづくり
ひとつであることが明らかとなった。

3 章　空き家を転用した共用利用施設の改修特徴

本章では、改修費用と改修内容から、補助金交付実績のある 13 団
14 事例の分析を行う。

1. 改修費用の特徴

図 9 に示すように、改修費用は少額、中間額、高額に分けられた。
た、図 10 に示すように内訳を見ると、内部仕上げや水回りの改修
比較的どの事例でも行われているが、躯体や窓サッシなどを行った
例は限られていた。また、少額な事例ほど改修箇所が少なく、高額
事例ほど改修箇所が多い傾向が確認された。

2. 改修内容の特徴

各事例の改修の傾向を捉えるため、(1) 物件情報 (2) 改修箇所 (3)
間規模の拡張 (4) 設備の更新の順に分析を行う。

) 物件情報

図 11 に示すように、木造が最も多く確認され、延べ床面積が
0m² 前後の木造の建物が活用される傾向にあった。築年数をみる
、築 40 ～ 80 年の建物が利用されており、戦後に建てられた住宅
活用されやすいことが把握された。

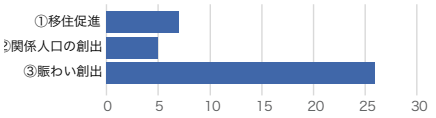
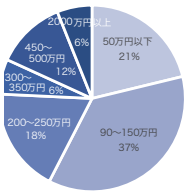


図6　設問別回答数



7　補助金制度の補助限度額

図 8　活用規定年数の指定

(2) 改修箇所

改修による共用空間の仕上げの変化を「a. 変更：既存の素材と
異なる素材で仕上げる」、「b. 補修：既存の素材と同じ種類の素材
仕上げ直す」、「c. 改修なし：既存の状態のまま改修を行わない」と
壁面、床面、天井面をそれぞれ、表 3、表 4、表 5 に整理した。壁
や床面は仕上げの変更や補修が行われているが、天井面については
修が行われない場合が多い。また、仕上げ材の変更を行う場合、木
や土など自然の素材を利用した改修が行われる傾向にあることが確
された。

(3) 空間規模の拡張

続いて、共用空間の空間規模の変化を「空間規模の拡張：解体
どにより 1 室を大きくした変化」、「空間規模の縮小：内壁の増設
どのより 1 室を小さくした変化」「空間規模変化なし」とし、平面
向、断面方向から表 5 に整理した。空間規模を拡張させる改修で
内壁の撤去（図 11）や天井の撤去、小上がりの撤去などが確認さ
た。空間規模を縮小させる改修では、内壁の増設や小上がりの増設
12）が確認された。

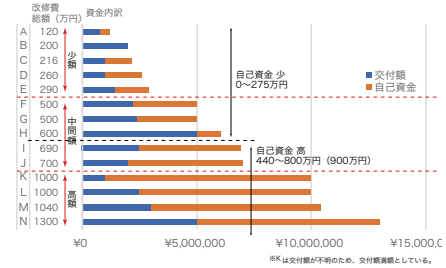


図9　改修費総額と資金内訳

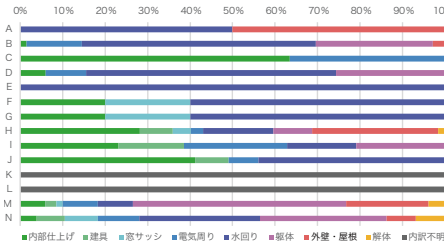


図10　改修費用の内訳

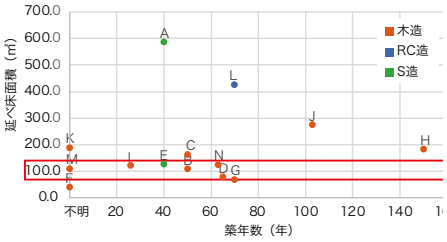


図11　物件情報の整理

(4) 設備の更新

改修における設備の更新を把握した。空き家を共用利用施設へ転用
する際にはトイレやキッチン・厨房など、日中の生活に必要な設備が
更新される傾向にある。また、それら設備の改修は改修費用が中間額
や高額な事例に多く確認された。

3-3. 空き家の共用利用施設への転用に関する考察

空き家を共用利用施設へ転用する際の改修費用は、少額なものから
高額なものまで確認され、高額なほど改修箇所が多くなっていた。表
7 に示すように、少額の事例では、空間規模の拡張や仕上げの変更な
どの共用空間の改修のみを行っているものと、共用空間の改修を補修
程度に留めて設備の更新に注力しているものが確認された。中間額や
高額では設備の更新も居室の改修も行われていたものの、空間規模や
仕上げが全て変化しているものは確認されなかった。また、改修箇所
は、来訪者が滞在する共用空間や日中に必要な設備に多く確認された。
共用利用施設は、主に日中に利用され、さまざまな人に利用され得る
施設であるため、改修が必要な部分と改修が必要のない部分の選択が
可能であると考えられる。また、改修内容を選択することで、限りあ
る予算状況の中でも、空き家の共用利用施設への転用が可能となって
いると考えられる。

第 4 章　空き家を転用した共用利用施設の運営特徴

本章では空き家を転用した共用利用施設の運営面に着目し、活用経
緯や運営形態、事業内容を把握する。

4-1. 各事例の活用経緯

各事例の活用経緯を把握した。自主的に設立された事業体による運
営が多く確認された一方で、行政の働きかけから設立に至ったものも

表3　壁面における仕上げの改修の仕方と仕上げ材の種類の整理

仕上げ材の種類 ＼ 仕上げの改修の仕方	a.変更	b.補修	c.変化なし
土	C		
漆喰		B J	K N
漆喰＋木材		G H	
木材	F M	D	
クロス		E I L	
石膏ボード			A

表4　床面における仕上げの改修の仕方と仕上げ材の種類の整理

素材の種類 ＼ 仕上げの改修の仕方	a.変更	b.補修	a.変更＋b.補修	c.変化なし
畳		B		K
畳＋木材			D H N	
木材		G J		
木材＋モルタル			L	
モルタル		C	I	A
その他	M		F	E

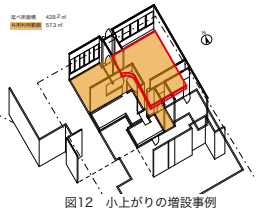
表5　天井面における仕上げの改修の仕方と仕上げ材の種類の整理

仕上げ材の種類 ＼ 仕上げの改修の仕方	a.変更	b.補修	c.変化なし
木材	C F G	D	B H I J K N
クロス		L	E
吸音天井材			M
その他			A

表6　空間規模の変化

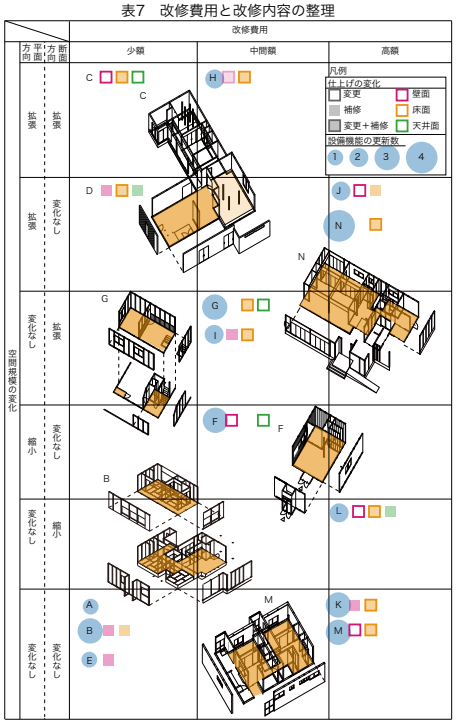
断面方向の変化 ＼ 平面方向の変化	拡張	縮小	なし
拡張	C H		G I
縮小			L
なし	D J N	F	A B E K M


図11　内壁の撤去事例


図12　小上がりの増設事例

確認された。また、補助金制度の認知のきっかけは、行政などから案
内を受けた事例が 9 件、知人などから聞いて知った事例が 4 件、不
明が 1 件であった。空き家利用の動機は、事業や活動の拠点に利用
できたためや、空き家で事業をするため、思い入れのある空き家を活
用するためなどが確認された。自主的な設立の事例 H と行政による
働きかけから設立に至った事例 B の活用経緯例を図 13 に示す。事例
H では、知人や行政から直接補助金活用の案内があり、空き家の活用
が目的で団体が結成された。一方で、事例 B では、行政主催のまち
の将来を議題とした住民説明会に招待されたことがきっかけで団体が

表7　改修費用と改修内容の整理



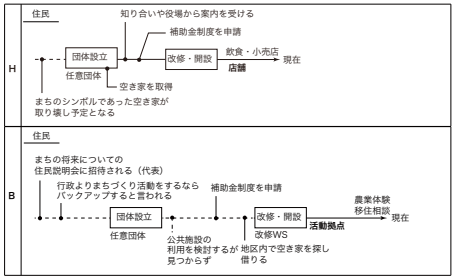


図13　活用経緯

設立され、空き家の利用開始とともに、拠点として活用していた。施設の開設時期と事業の開始時期の関係をみると、12 事例中 8 事例が事業を始める際に共用利用施設へ転用していた。以上のように、空き家の再生がまちづくりの担い手を生む要因になっていることが把握された。

4-2. 施設運営の概要

各事例の事業体の形態と構成員数を、図 14 に整理した。事業体の形態としては、任意団体と個人事業主が多く確認され、構成員数などに違いが確認された。また、表 8 に示すように、開設日をみると、任意団体の場合、多くの人が本業を別にもちボランティアで運営されることが多く、事例ごとに開設日が大きく異なっていた。一方で、個人事業主は週 5 日開設していた。

4-3. 事業の特徴

空き家を転用した共用利用施設では、表 9 に示すように、福祉サービスや地域活性化事業、飲食サービスなどが行われており、さまざまな事業が複合されている事例も確認された。

また、事業のプログラム数を、「A. なし：利用に関するプログラムなし（工房での自主練習など）」、「B.1 種：1 種類のプログラム提供を行う（飲食の提供など）」、「C.2 種以上：2 種類以上プログラムの提供を行う (機能訓練や入浴介助など)」に分類した。サービス度合いについては、「a. 場所のみでサービス提供なし：工房での自主練習など」、「b. 必要時のみのサービス提供：飲食の提供など」、「c. 必要に応じたサービス提供：フリースクールなど」、「d. 常時サービス提供：デイサービスなど」に分類した。以上の結果を表 10 に示す。事業体ごとにみると、個人事業主や合同会社、一般社団法人はサービス度合いにまとまりが確認された。一方で、任意団体や NPO 法人はサービス度合いが低いものから高いものまであり、柔軟性が高いことが推察された。

4-4. 空き家を転用した共用利用施設の運営に関する考察

改修費用と事業体を表 11 に、改修費用と事業の特徴を表 12 に整理した。少額な事例では任意団体や小売を行う個人事業主が多く、サービス度合いは広く確認できた。中間額では、任意団体と個人事業主により運営が行われている事例が多く、サービス度合いは低い範囲にまとまっていた。一方で、高額では法人格を有する団体による運営が多く、サービス度合いも高くなっていた。

以上より、空き家の共用利用施設としての活用は、まちづくりの担い手を生む要因になっていることが把握された。また、空き家を転用した共用利用施設の運営は、事業体の状況に合わせた改修や運営方法となっており、運営者にとって大きな負担にしないことで、本業を別に持っていたとしても、継続できるようになっていると考えられる。

第 5 章　空き家を転用した共用利用施設の利用実態

本章では、空き家を転用した共用利用施設の利用者層と屋内外の利用状況について、アンケートとヒアリング調査により把握した。

5-1. 利用者の概要

図 15 に利用者の属性を整理した。地域内(市町村内)のみ、地域外(市町村外）のみ、地域内外からなどと利用者の居住地や年代が、事例ごとに異なっていた。また、図 16 に示すように、開設時間における平均滞在時間の割合でみると開設時間の約 5 分の 1 以下の時間のみの利用が半数確認された。

5-2. 外部空間の利用のされ方

外部空間の利用のされ方を図 17 に整理した。外部空間における来訪者の利用範囲に着目すると、外部空間のほぼ全面を利用する広範囲のものと、限定された場所のみを利用する部分的なものの 2 つが確認された。更に、来訪者の利用範囲が広範囲の場合、屋外活動や滞在場所としての利用が確認され、集まって過ごす場所として利用されていた。一方で、来訪者の利用範囲が部分的な場合、人数規模に関わらず植物の育成場所として利用されていた。また、どの事例でも、大人数の利用では、自然に近い環境の場が選択されていた。

5-3. 内部空間の利用のされ方

本節では、内部空間の利用状況を（1）建物全体の利用のされ方（2）共用空間の利用方法（3）共用割合と来訪者の利用方法から分析する。

（1）建物全体の利用のされ方

延べ床面積における共用利用範囲の割合を共用割合とし、図 18 に各事例の結果を示す。共用割合は事例ごとに異なるが、50% 以上を共用として利用する傾向が確認された。また、共用割合が高い住居空間を持つ事例では一時的に住居空間を開放することにより共用空間を増やしていることが確認された。

（2）共用空間の利用方法

共用空間の利用のされ方について図 19 に整理した。共用空間は飲食や商品、展示の鑑賞、ワークショップ、創作活動などさまざまな活動に利用されており、複数の利用方法を持つ事例が多く確認された。少人数の利用は飲食等や創作活動、大人数の利用はワークショップや教室の活動時に多く確認された。

（3）共用割合と来訪者の利用方法の関係

表 13 に各事例の共用割合と共用空間の利用方法を整理した。共用割合が小さい事例では、共用空間内で行われる利用方法の種類も少なくなっていた。一方で、共用割合が大きい事例では、共用空間内にお

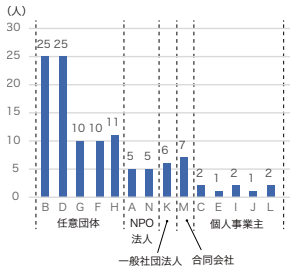


図14　各事例の団体構成人数

表8　開設日の整理

毎日	A F G
週5	E I J L M N
週3	H
週1	C D
～月1	B K

任意団体　NPO法人　一般社団法人　合同会社　個人事業主

表9　事業内容の整理

	福祉サービス		地域活性化	教育・体験		技術習得支援		飲食サービス	小売	
主な事業	生活介護 就労支援	デイサービス	地域拠点	フリースクール	農業体験	陶芸工房	長期宿泊	飲食店	小売店（食品）	小売店（布）
	M	N	K	D	B	A	F G	H I J L	E	C

その他の事業		移住相談	WS・教室			飲食提供	小売・ギャラリー
		B	C J			D	H J

表10　事業体の主な事業におけるサービス度合い

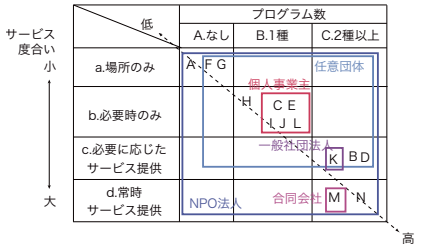
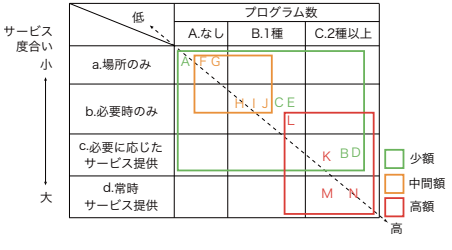


表11　各事例における改修費用と事業体の整理

改修費用	事業体				
	任意団体	NPO法人	一般社団法人	合同会社	個人事業主
少額	B D	A			C E
中間額	G F H				I J
高額		N	K	M	L

表12　改修費用からみた主な事業におけるサービス度合い



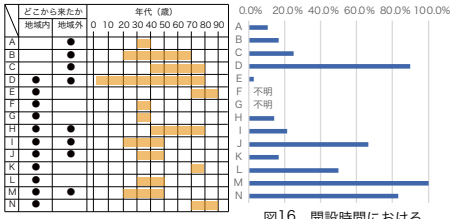


図15　利用者の属性

図16　開設時間における平均滞在時間の割合

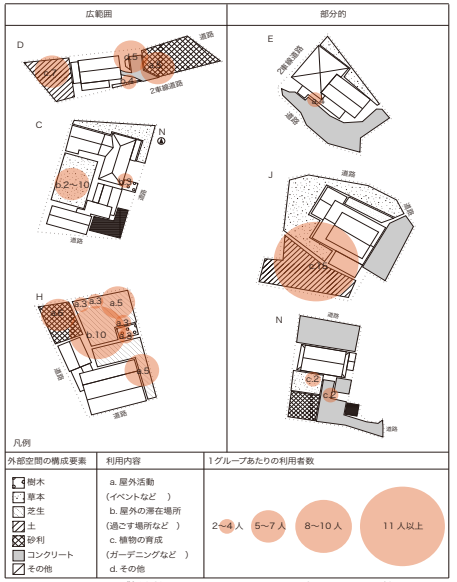


図17　敷地状況からみた利用のされ方についての整理

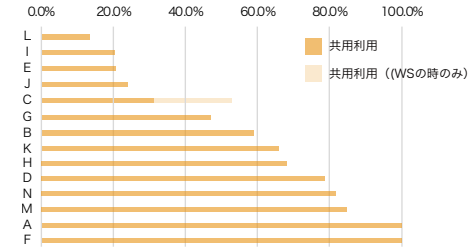


図18　共用割合

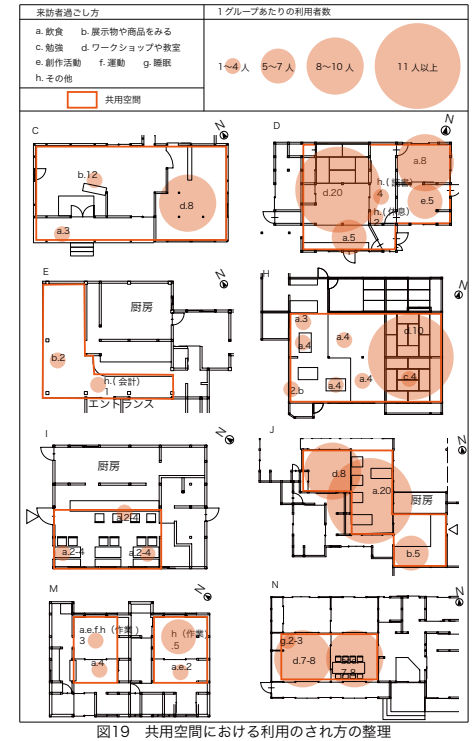


図19　共用空間における利用のされ方の整理

いて、複数の利用方法が確認され、共用割合が高いほどより多様な活動が行われていることが把握された。

5-4. 空き家を転用した共用利用施設の利用のされ方に関する考察

本節では、共用空間の利用実態と改修の関係を（1）各事例の利用実態と改修（2）利用のされ方とその場の改修の関係から分析する。

（1）各事例の利用実態と改修

はじめに、各事例の利用実態と改修実態をみる。共用空間の利用方法が 3 種類以上ある 5 事例のうち、4 事例で平面方向の拡張が行われた場の活用が確認できた。また、滞在時の利用者人数に着目すると、「少人数：少人数に分かれて滞在しているもの」、「大小：人数規模に差が確認されるもの」、「大人数：どのグループも大人数で滞在しているもの」に分けられた。結果を図 20 に示す。「大小」や「大人数」では平面方向に拡張された場が活用されていた。更に、滞在場所をみると、平面方向に拡張された事例において、2 室を跨いだ位置での滞在が確認され、特に大人数での滞在時に確認できた。

（2）利用のされ方とその場の改修の関係

続いて、共用空間の利用方法と人数規模、その場の改修内容を表 14 に整理した。勉強やワークショップなどの利用方法では、平面方向に拡張された場が活用されており、床面が畳や木材で仕上げられていた。また、少人数の飲食では、断面方向に拡張されており、仕上げが変更された場が活用されていた。一方で、5 人以上の飲食では、補修か変化なしとなっていた。

以上より、空き家を転用した共用利用施設における共用空間では、さまざまな利用方法により来訪者が滞在していることが把握された。また、空間規模が拡張された場が多くの利用者の滞在に利用されていることも把握された。その結果、空き家を転用した共用利用施設では、住宅の居室規模より大きい空間が利用されやすく、改修の際には、空間規模の拡張が効果的であると考えられる。

表 13　共用割合と利用方法の整理

共用割合	a	b	c	d	e	f	g	h
小 20.3%(I)	●							
小 20.5%(E)		●						●
小 24.0%(J)	●	●		●				
小 31.3%(C)		●		●				
大 68.2%(H)	●	●	●	●				
大 78.7%(D)	●			●	●			●
大 82.8%(N)	●		●	●	●		●	
大 84.9%(M)	●				●	●		●

a.飲食
b.展示物や商品をみる
c.勉強
d.ワークショップや教室
e.創作活動
f.運動
g.睡眠
h.その他

表 14　共用空間の利用方法と人数規模及びその場の改修内容の整理

利用方法		人数	改修内容 壁面 拡張	壁面 仕上げ変更	壁面 仕上げ補修	床面 拡張	床面 仕上げ変更	床面 仕上げ補修	変化なし	その他
飲食		2			クロス	小上がりの撤去	モルタル			
					クロス			モルタル	●	
		3		木材			その他			
		4	内壁の撤去		塗喰		木材			
					塗喰	床レベルの変更	木材			
		5							●	
		7~8	建具の撤去		塗喰			木材		
		8								その後
									●	
		20	内壁の撤去		塗喰			木材		
展示物や商品を見る		2	内壁の撤去	土				モルタル		
			内壁の撤去		塗喰		木材			
		5							●	
勉強		4	建具の撤去		塗喰			畳		
		7~8	建具の撤去		塗喰			木材		
ワークショップや教室		7~8	建具の撤去		塗喰			畳		
		8	建具の撤去		塗喰			木材		
		20	内壁の撤去	木材				木材・畳		
			建具の撤去		塗喰			畳		
創作活動		3		木材			その他			
		7~8	建具の撤去		塗喰			木材		
		8							●	
運動		3		木材			その他			
睡眠		2~3			塗喰			畳		
読書		2			木材			木材		
休息		4			木材			木材		
会計		3			木材		その他			

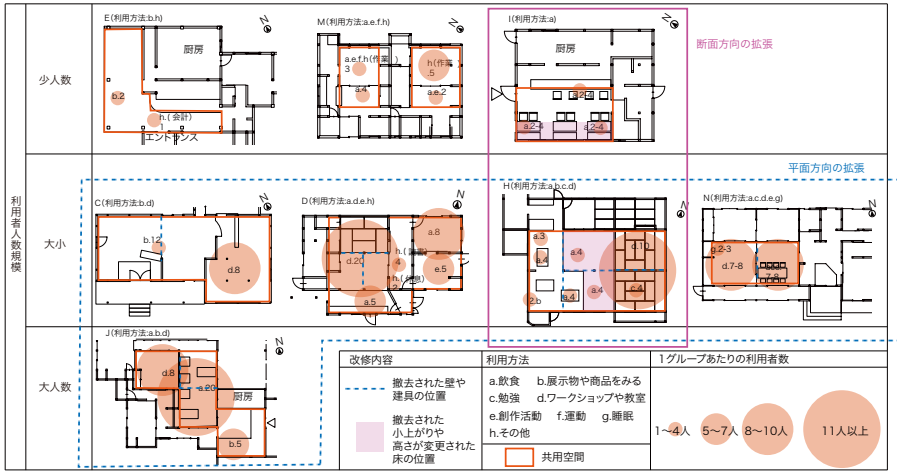


図 20　各事例の利用方法と改修の整理

第 6 章　空き家を転用した共用利用施設に関する考察

空き家を転用した共用利用施設について、改修や運営、利用の実態を明らかにした。必要な部分のみの改修とすることや、スタッフに大きな負担をかけず運営することなど、事業体の状況に合わせた手法が確認された。また、表 15 に示すように、サービス度合いと利用方法の種類数をみると、サービス度合いが高くなくとも利用方法が多いものが確認された。それらは、空いている空間をギャラリーや教室として貸し出すものなど、運営者にとって少ない負担のものであった。

以上より、空き家の共用利用施設への転用は人口減少が進む現代において、空き家対策としても、人々の居場所としても、有効な活用方法のひとつであると考えられる。また、改修内容や運営方法の工夫は、特に任意団体による運営で確認され、本業を別にもちボランティアで構成されている事業体により運営されていた。このような、空き家を転用した共用利用施設は、人口減少が進み建物を使用する人が減る今後の空き家活用の知見となり得ると考えられる。

第 7 章　おわりに

本研究では、共用利用施設としての空き家活用に向けて、補助金制度や活用事例の改修・運営実態の把握から、特徴を明らかにした。その後、活用事例の利用のされ方から、空き家を転用した共用利用施設の利用実態を明らかにした。

本研究を通してまちの歴史と結びつきのある空き家の改修が地域一丸となって行われていた事例や、改修を行い共用利用施設として活用することでさまざまな人の居場所となっている事例も確認でき、さまざまな人が関わる施設として再び利用されている多くの事例が把握された。本論が、そのような、人と人、人と建物をつなぐ共用利用施設としての空き家活用の促進に向けた一助となれば幸いである。

表15　利用方法からみる主な事業におけるサービス度合い

サービス度合い	プログラム数 A.なし	B.1種	C.2種以上
a.場所のみ	A F G		
b.必要時のみ		H C E I J L	
c.必要に応じたサービス提供			K B D
d.常時サービス提供			M N

凡例　利用方法：2以下　利用方法：3以上

注

注 1)　総務省統計局「平成 30 年住宅・土地統計調査」より引用
注 2)　所沢市空き家等の適正管理に関する条例
注 3)　国土交通省国土地理院「令和 3 年全国都道府県市区町村別面積調」より引用
注 4)　農林水産省「2020 年農林業センサス」より引用
注 5)　各市町村 HP より引用
注 6)　国土交通省「都市計画区域、市街化区域、地域地区の決定状」より引用
注 7)　1.5 万人以上の市町村は総務省統計局「平成 30 年住宅・土地統計調査」より引用。1.5 万人未満の市町村は、各市町村の「空家対策計画」もしくは、総務省統計局「平成 30 年住宅・土地統計調査」より、市町村の属する県の空き家率を引用した。

参考文献

1) 秋山祐樹、馬場弘樹、大野佳哉、高岡英生：機械学習による空き家分布把握手法の更なる高度化自治体の公共データを活用した空き家の分布把握手法に関する研究 (その 3)、日本建築学会計画系論文集 , 86 巻 , No786, PP.2136-2146, 2021.8
2) 西浦定継、小林利夫：地域要因からみる空き家発生リスクの試算に関する研究 - 東京都日野市の空き家調査データを事例に -、日本建築学会計画系論文集 , 82 巻 , No.740, PP.2629-2635, 2017.10
3) 清水陽子、客野尚志：都市部における空き家分布と住民意識に関する研究京都市東山区今熊野・一橋地区を事例として、日本建築学会計画系論文集 , 84 巻 , No.760, PP.1401-1410, 2019.6
4) 立神靖久、横山俊祐、徳尾野徹：全国自治体における空き家対策の評価と質的対応の可能性、日本建築学会計画系論文集 , 85 巻 , No.768, PP.393-403, 2020.2
5) 中村美安子、大原一興、藤岡泰寛：空き家活用による住民福祉活動拠点の確保に関する研究−生活支援に取り組む住民福祉活動拠点に適した空き家の条件−、日本建築学会計画系論文集 , 84 巻 , No.758, pp.839-848, 2019.4
6) 塚田由佳里、小伊藤亜希子：学童保育における民家等活用プロセスと施設整備の実態大阪市のケーススタディ、日本建築学会計画系論文集 , 83 巻 , No.750, pp.1425-1435, 2018.8
7) 中園眞人、山本幸子、村上和司、加登田恵子：民間団体による既存建築を再利用した地域福祉施設整備と運営形態−総合・循環型福祉サービス推進モデル事業の事例研究−、日本建築学会計画系論文集 , 73 巻 , No.624, pp.407-414, 2008.2
8) 中田悟、金田綾佳、勝又英明：関東地方を中心とした 1 都 9 県における古民家の転用に関する研究−地域資源としての古民家の公共的利活用に関する研究−、日本建築学会計画系論文集 , No.606, pp.79-84, 2006.8
9) 小松尚、辻真菜美、洪有美：地域住民の居場所となる交流の場の空間・運営・支援体制の状況−地域住民が主体的に設立・運営する交流の場に関する研究その 1−、日本建築学会計画系論文集 , 74 巻 , No.611, pp.67-74, 2007.1
10) 白木里恵子、久保勝、大垣直明：歴史的建造物の転用とまちづくりへの波及に関する研究：北海道における 10 事例を対象として、日本建築学会計画系論文集 , 73 巻 , No.625, pp.601-609, 2008.3
11) 中園眞人、山本幸子：「ふるさと島根定住財団」の空き家活用助成制度を利用した民家改修事例−農村地域における空き家活用システムに関する研究−、日本建築学会計画系論文集 , No.620, pp.111-118, 2007.10
12) 山本幸子、中園眞人：島根県西ノ島町の中高齢世帯移住促進事業による空き家活用事例−農村地域における空き家活用システムに関する研究−、日本建築学会計画系論文集 , 73 巻 , No.629, pp.1485-1492, 2008.7

名城大学理工学部建築学科
2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

超高層集合住宅の共用空間・施設の変化と大規模災害への対応に関する研究
―首都圏の事例を対象としたヒアリング調査を通して―

高井研究室　　○洞口拓海　　190450125

1．研究背景

首都圏の超高層集合住宅は、土地の高度利用を目的とした建築高層化に関わる規制緩和等を契機に 2000 年以降都市部で建設が進み、現在まで約 20 年が経過している。また、プライバシー志向の高さやそれに応えた設計により居住者の生活は孤立しやすく、災害時に不可欠な近隣コミュニティや共助意識が低下している。このような状況下で、孤独死や災害時の脆弱性などの「孤立居住問題」が懸念されており、そこで重要となるのが共用空間・施設である。共用施設は居住者コミュニティ形成の場であると共に、災害時対応の拠点となり得る集合住宅において不可欠な場所である。しかし、2019 年に発生した新型コロナウイルスの影響によって、共用空間・施設の利用制限を受けることとなり、コミュニティ形成の場としての機能を果たせていない状況となっている。

2．研究目的

本研究では、首都圏で 2000 年代前半に販売された超高層集合住宅 85 事例と 2015 年から 2019 年の 5 年間に販売された 73 事例を対象に、竣工後の利用状況や居住者ニーズを踏まえた共用空間・施設の用途変更、大規模災害や新型コロナウイルスを契機とした利用方法の変更を明らかにし、超高層集合住宅におけるこれからの共用空間・施設活用のあり方を考察する。またこれらの変更を検討し、共用施設を管理する管理組合の体制や取り組みの実態についても明らかにする。

3．研究方法

本研究では、地上 20 階以上の区分所有の集合住宅「超高層集合住宅」として扱う。

1）調査 A：アンケート調査（先行研究）

本研究は藤村（2021）[1] の継続研究である。藤村により、2003 年当時に共用空間・施設の存在が確認できた 85 事例を対象としたアンケート調査が行われ、竣工から約 20 年の間で変化した共用空間・施設の内容や要因、大規模災害や新型コロナウイルスに対する取り組みを調査した。なお回答数は 33 件、回収率は 38.8%となった。

2）調査 B：ヒアリング調査

調査 A の回答事例から充実した共用空間・施設を持つ 13 事例を抽出し、調査を行う。調査 A の設問に加えて管理組合の体制・運営方法をヒアリングし、共用空間・施設の変化の詳細や大規模災害に対する取り組みの状況を把握する。

また本研究の分析を進めるために、管理組合の運営管理等に関わる知見の収集を目的として RJC48（マンション管理組合理事長勉強会）の代表にヒアリング調査を行った。

3）調査 C：アンケート調査

超高層マンション資料集 [2] より 2015 年から 2019 年の間に販売された 73 事例を抽出し、管理担当者を介してアンケート調査を行う。調査 A の調査票を基に共用空間・施設の変化、管理組合の取り組みを把握し、販売の年代による違いを比較する。なお回答数は 9 件、回収率は 12.3%となった。

4）調査 D：ヒアリング調査

調査 C の回答事例から充実した共用空間・施設を持つ 2 事例を抽出し、調査を行う。調査 C の設問を基にその詳細や状況を把握する。

5．管理組合の取り組み

1）大規模災害の対策

災害時の要支援者や支援協力者といった居住者把握が進められているが、特に後者はプライバシーの課題から実施率が低い。災害対策は総戸数の多いほうが実施率は高く、非常時の効率的対応への危機感が強いと考えられる。

具体的事例の詳細（表 1）として、理事の任期は 2 年が多い。規模が大きく意思決定に時間を要するため 2 年任期（半数交代）は有利である。また「防災関係の部会等」の設置率の高さから防災意識の高さが分かる。特に事例 D では災害協力隊を設立し、円滑な避難支援体制の構築や独自の防災マップを作成している。その他特色のある部会等には、外国籍居住者の多い事例 D の「環境・マナー」など事例ごとの状況に合わせて組織し、柔軟に対応していた。

2）コミュニティ活性化の方策

「季節イベント」を実施している事例が多く、超高層集合住宅のスケールメリットを生かした特徴である。一方で地域との連携・協力は実施率が低く、セキュリティの問題が懸念されたと考えられる。

具体的事例の詳細（表 1）としては、様々な活動が見られた。事例 F ではコミュニティの形成が資産価値を向上させると考え、コロナ禍でも開催できる「散歩会」等が企画されていた。また事例 B’ではイベントの集客力を活用して避難所としての共用空間・施設の収容人数を測定していた。地域との連携・協力では、周囲に連携する価値のある同規模の組織が乏しいとの声もあった。一方で事例 A’では町会と人員や施設を共有して高齢者グループの活動を運営していた。また事例 B’では隣接する超高層集合住宅と規模や管理会社等の共通点の多さを生かして積極的な連携が行われていた。

6．共用空間・施設の変化の実態

調査 A、C 共に竣工当時と現在で保有する共用空間・施設に大きな変化は見られなかった。特に調査 C では利用方法の変更で居住者ニーズに対応する傾向が強い。

ロビー・ラウンジは可変性を備えており、またマンションの顔となる空間のため廃止など大きな経年変化は見られない。また集会室等も多様な用途に利用可能であり、必要になった施設を補完したり、不要になった施設が多目的室に変わったりするなど経年変化の受け皿となっている。

託児所は子どもの成長に伴う利用者減や、それに伴う経営上の採算性から 5 年程で廃止されることが多い。

ライブラリー・スタディルームはテレワークのニーズに対応して Wi-Fi の設置や個室化が検討されていた。

店舗は経営的に厳しい事例が多く管理会社が兼業する形態が現実的であろう。RJC48 からは継続的運営には総戸数 1000 戸を超える大規模であること、居住者以外も利用できることが重要であるとの意見を得た。

また全体的に自家用車の保有率低下に伴う空き駐車場の増加があり、メンテナンスコスト低減のために機械式駐車場の撤去・平面化および外部へのサブリースがある。前者の事例は増えているが、後者はセキュリティの問題で躊躇している事例がある。

表 1　具体的事例における管理組合の取り組み

		A	B	C	D	E	F	G	H
建築概要	所在地	神奈川	東京	神奈川	神奈川	神奈川	東京	千葉	東京
	竣工年	2004	2004	2003	2003	2004	2004	2003	2002
	総戸数(*1)	100	200	250	300	350	350	450	450
	最高階数(*2)	30	20	25	20	30	35	30	30
管理組合	理事任期	●1年	※	●1年	■2年	●2年	●1年	■2年	●■2年
（特）特別委員会または諮問委員会	防災関係の部会等		※	○(特)	○	○	○(特)	○(特)	○
	コミュニティ活動の部会等		※		○		○		○
	共用施設活用の部会等		※						
	その他特色のある部会等		※	○	○	○	○		
	その他								
大規模災害時の体制・活動	対策本部の設置と損編成			○	○	○	○	○	
	大規模災害時マニュアル作り			○		○	○	○	○
居住者把握	要支援者				○	○	○	○	
	支援協力者					○	○		
コミュニティ活性化の方策	季節イベント等		○		○	○	○	○	○
	公認サークル活動						○	○	
	子ども会等								
	高齢者グループ			△			○	○	
地域との連携・協力	地域イベント参加								
	大規模災害時の共用施設開放				○			○	
	地域の防災訓練への参加							○	

		I	J	K	L(*3)	M	A'	B'	
建築概要	所在地	東京	東京	東京	東京	埼玉	神奈川	東京	【事例名】調査B：A～M　調査D：A'，B'
	竣工年	2005	2005	2004	2004	2001	2015	2016	
	総戸数(*1)	500	600	850	1150	300	300	850	【注】*1:100戸単位で四捨五入　*2:5F単位で四捨五入
	最高階数(*2)	30	40	20	55	30	25	50	
管理組合	理事任期	■2年	●2年	●1年	■2年	2年■	●1年	■2年	
（特）特別委員会または諮問委員会	防災関係の部会等	○(特)	○	○(特)	○災害協力隊	○	○	○	●再認可　■半数交代　○竣工時から設置　△過去に設置　※未確認　A～M
	コミュニティ活動の部会等		○					○	
	共用施設活用の部会等		○			△		○	
	その他特色のある部会等		○	○				○	【凡例：変更状況】
	その他	○			○	○	○	○	
大規模災害時の体制・活動	対策本部の設置と損編成	○	○	○	○	○	○	○	
	大規模災害時マニュアル作り	○	○	○	○	○	○	○	
居住者把握	要支援者	○			○	○	○	○	
	支援協力者				○	○			
コミュニティ活性化の方策	季節イベント等	○	○	○	○	○	○	○	
	公認サークル活動	○		○	○	○		○	
	子ども会等			○		○	○	○	
	高齢者グループ		○	○		○	○		
地域との連携・協力	地域イベント参加		○			○	○	○	
	大規模災害時の共用施設開放				○			○	
	地域の防災訓練への参加	○		○			○	○	

7．結論

1）管理組合の継続的活動

各事例で災害対応や共用空間・施設の活用状況は様々であり管理組合の方針が大きく影響していた。しかし大規模性から管理組合の扱う課題は検討に時間を要するため、継続的活動が求められており 2 年任期（半数交代）が適している。またコミュニティ活動は高層性から不足しがちな交流機会の創出だけでなく、理事の人材発掘の側面も持っており管理組合の継続的活動を支えている。超高層集合住宅の特徴として投資目的で購入される事が多く、管理組合の継続的活動による資産価値の向上が求められている。

2）共用空間・施設の活用

以上の管理組合活動の受け皿として共用空間・施設は社会や居住者ニーズの変化に対応しながら活用されている。そのため計画面では多目的室のように可変性の高い施設は変化の許容に必要であり、また AV ルームのように目的性の強い施設はその時々の活動の幅を広げ、居住者に更なるサービスを提供する上で必要だと言える。一方、運用面では目的性の強い施設は受益者が限定されることから、存続が議論されやすく、有償化等の工夫を行う必要がある。

これらの活動によって共用空間・施設の継続的な有効活用の実現が可能となる。

表 2　具体的事例における共用空間・施設の変化の実態

	A	B	C	D	E	F	G	H
1) ロビー・ラウンジ	○1				○1	○1	○1 ○1	●1
2) 集会室・多目的室・余裕室・和室	○3	○1	○B	●1W-F設置	○1	○1(2室)	●1階高実験室 ○1	●1
3) キッズルーム（会社名称）				●1退具の撤去	●1		○1	■1託児所⇒キッズルーム
4) ライブラリー・スタディルーム					○1			
5) AVルーム		△1修理待ち	○B			○1	○1	○1
6) フィットネススタジオ	○3	△3修理待ち	●⑥トマシン充実		○1	○1		
7) スパ・プール		△3R過去に一時的な利用時間変更	△3修理待ち					
8) パーティールーム						○3	○1	
9) 展望ラウンジ		○3	○3	●3床材変更	○	○2	×3R	●3床材変更
10) 屋上庭園		●3R芝置き張り		○3R				
11) ゲストルーム		○1	○1	○1	○1	○1	○2	○3
12) 店舗	○1外			○1外		○1		
13) その他		○1	★リサイクル図書コーナー	★防災倉庫	■8駐車場、バイク置き場⇒トランクルーム			

	I	J	K	L(*3)	M	A'	B'	
1) ロビー・ラウンジ	○1	○1	○1	○E3／W1	○1, 2, 3	○1	○2	【注】 *1:50戸単位で四捨五入 *2:5F単位で四捨五入 *3:主要棟, W西棟
2) 集会室・多目的室・余裕室・和室	■2AVルーム⇒多目的室	×2 ○2 ■1多目的室	■1託児所⇒多目的室	●E1型室ブース、W一時避難 ×W1	○1(2室)		○2 ○3B	
3) キッズルーム（会社名称）			×1	●E1改修	●2 新退具設置 ●3 退具撤去	×1	○2	【凡例：変更状況】 ■用途変更で改修
4) ライブラリー・スタディルーム		○1	○1	●W1 会議室⇒ライブラリー、Wi-Fi設置	○1, 2		○2	●：一部機能/仕様変更 ★：増設
5) AVルーム	×2		○1				○2	◎利用ルール変更
6) フィットネススタジオ		●1トレーニングルームとリラクゼーションルームに分割	○1	●W1			○2	○竣工当時と同じ △：その他 ×：廃止 ◇：変更検討
7) スパ・プール			○⇒1		△B販売会社⇒居住者が運営			※未確認
8) パーティールーム	●2防災スピーカー設置	×2	○1	○E3／W3	○3(2室)		○2	【凡例：共用施設の設置箇】 例：場外
9) 展望ラウンジ	○3	○2 ★2家具ラウンジ設置		×ES3F／W3F	○1, 2(2か所), 3(2か所)		○30	3：住棟2, 3記の棟 2：住棟1/ラ2,3 1：住棟1/3未満の棟
10) 屋上庭園			○3外		○1R			外：外周に接する敷地下階
11) ゲストルーム	○2	○1 ○1	○1(2室)	○E3／W3 ■E3／W3 展望ラウンジ⇒ゲストルーム	○3(パーティールーム兼用)		◎⇒30 ×2	
12) 店舗	●1個人宅	○1外	○1			×1	○2	
13) その他		○1 ■2防災管理室スケーション設置 ★		●E1ゴルフレンジシュミレーター増設 ○E3 ●E4 自転車置場設置	○1, 2(2か所), 3 ★	△B コインランドリー販売会社⇒管理組合が運営 ○B	○2	

＜参考文献＞
1）藤村類：超高層集合住宅の共用空間・施設の経年変化と災害への対応に関する研究－首都圏の事例を対象に－、名城大学卒業論文（2021）
2）株式会社不動産経済研究所：超高層マンション資料集（2019）
3）水戸俊伸：首都圏の超高層集合住宅の共用空間・施設に関する研究、三重大学卒業論文（2013 年）

2022 年 2 月 6 日　　主査　名城大学建築学科　高井　宏之
副査　　同　　生田　京子

建築学科　系紹介
―材料・生産系―

建物に用いられる材料と建物の作り方を学ぶ

建物を作るにはまず材料が必要です。その性質をしっかりと把握し、適材適所で材料を使用していく必要があります。また、その材料を使用して実際に建物を作るためには、どのようにな作り方で行うかを計画し、段取りを組んで行っていく必要があります。また、近年では完成後の維持保全も重要になっており、劣化が進んだ建物をどのように診断し、どのように補修・補強を行うかを考える必要が出てきています。このように材料・生産系は、建物を作る際に用いられる材料や、実際の作り方、さらにその維持保全の方法を学びます。材料・生産系の専門科目には、建物を形作っている様々な材料について、その性質や特徴を知り、その上で選択できるよう、建築材料全般について学ぶ『建築材料概論』、実際に建物を作る際にどのように作っているのか、その設計から着工までの流れ、さらに各工事の方法を学ぶ『建築生産概論』などがあります。

材料・生産系の研究活動

材料・生産系の研究では、主に実験を通じて材料の性質を把握し、そのメカニズムを検討することを行っていきます。材料の研究では、実験室で実験を多く行います。セメントと水と細骨材、粗骨材を計量して、ミキサーで練り混ぜる。生コンの研究なら練ったらすぐその性質を測定します。硬化コンクリートの研究なら、型枠に打設して硬化を待ち、脱型後しばらくしてから硬化したコンクリートの圧縮試験などをやってその性質を測定します。これら測定した性質が、狙った通りにできているか、というのがまず重要ですが、それ以上に、何が原因でそのような性質になったのか、そのメカニズムを検討することが重要です。そのメカニズムがわかれば、その性質を再現することも、さらにその性質を変化させることもどのようにやればよいのか予想がつきやすくなります。そして、それを理論や解析にすることで、材料を作るときの傾向や対策が蓄積されていくのです。

材料・生産系の研究テーマ

［寺西研］建設用 3D プリンティング技術に関する研究、建築物の劣化調査・診断技術に関する研究、コンクリート工事の品質向上技術に関する研究、建築物のエイジングの最適化に関する研究ほか
［平岩研］硬化コンクリートの破壊挙動に関する実験的・解析的研究、ポーラスコンクリートに関する研究、建築材料・施工関連の教育資料の作成

（文責 / 材料・生産系教員 平岩陸）



コンクリート実験の様子

● 論文一覧

○ 修士論文

– 長谷川周平｜建設 3D プリンティングに使用するためのモルタルに関する研究

○ 卒業論文

– 織部蓮｜乾燥方法が木材の乾燥状況および搬出時の荷重に与える影響（その 1）
– 勝河桂登｜乾燥方法が木材の乾燥状況および搬出時の荷重に与える影響（その 2）
– 田中雅樹｜乾燥方法が木材の乾燥状況および搬出時の荷重に与える影響（その 3）
– 今枝翼｜ 3D プリンティング用モルタルの繊維混入による引張強度向上に関する研究（その 1．画像相関法による割裂引張試験方法の検討）
– 河北夏流｜ 3D プリンティング用モルタルの繊維混入による引張強度向上に関する研究（その 2．種々の繊維を混入したモルタルの強度の検討）
– 駒沢賢哉｜生コン工場から排出される高アルカリ水による水素生成に関する研究（その 1）
– 鈴村伊知朗｜生コン工場から排出される高アルカリ水による水素生成に関する研究(その 2)
– 李晨｜ 3D プリントされたモルタル積層体の層間付着強度の向上および耐久性に関する研究（その 1．層間付着強度に対する積層条件の影響の検討）
– 丛启宾｜ 3D プリントされたモルタル積層体の層間付着強度の向上および耐久性に関する研究（その 2．耐久性に対する積層条件の影響の検討）
– 生野雅弥｜ 3D プリントされたモルタル積層体の層間付着強度の向上および耐久性に関する研究（その 3．層間付着強度の向上に関する検討）
– 中谷朱里｜透気法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する研究（その 1）
– 吉川来音｜透気法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する研究（その 2）
– 並木陽平｜ 3D プリンティングのためのモルタルの開発（その 1．ダイユータンガムがモルタルのチクソトロピー性に及ぼす影響の検討）
– 室田真子｜ 3D プリンティングのためのモルタルの開発（その 2．短繊維がモルタルのチクソトロピー性に及ぼす影響の検討）
– 西洸聖｜海水・海砂がコンクリートの諸性状に与える影響（その 1）
– 西真樹｜海水・海砂がコンクリートの諸性状に与える影響（その 2）
– 根本翔生｜海水・海砂がコンクリートの諸性状に与える影響（その 3）
– 岡野克彦｜チキソトロピー性を有する流体の力学モデルに関する研究
– 安田涼馬｜生地に関する材料資料集の作成

名城大学理工学部建築学科
2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

チキソトロピー性を有する流体の力学モデルに関する研究

寺西研究室　　岡野 克彦　　160450026

1. はじめに

日本で建設用 3D プリンタを導入するためには、チキソトロピー性の高い材料が必要である。また、Qian ら [1]は、チキソトロピー性の高いモルタルの流動曲線（せん断応力―せん断速度関係）の極小せん断速度領域には、せん断応力が下降に転ずる負の勾配が発現すると報告しており、Qian らはこの負の勾配の y 切片のことを静的降伏応力と定義した。また、昨年度の吉牟田 [2]の卒業研究では静的降伏応力を発現する材料の開発を行った。その結果から、チキソトロピック剤であるダイユータンガム(DG)を添加したセメントペーストを回転粘度計でベーン型スピンドルを用いて測定した場合に、静的降伏応力が発現することが確認された。また、静的降伏応力は厳密には y 切片ではないこと、ベーン型のスピンドルを使用すると、一定せん断速度を与えたときの立ち上がりのせん断応力が流体の種類に関係なく大きくなってしまうということが明らかにされた。そこで、本研究では、静的降伏応力が本質的にどういった値かについて検討した。

2. 静的降伏応力に関する考察および仮説

2.1　静的降伏応力に関する考察

図 - 1 に、吉牟田の卒業研究における、流動曲線に静的降伏応力が発現した、DG を添加したセメントペーストをベーン型スピンドルで測定した場合の、せん断応力の測定値の推移を示す。図 - 1 から、一定せん断速度を与えた時のせん断応力の測定値の推移は、図 - 2 に示す 4 種類に区分されるといえる。せん断速度 0.02(1/s)および 0.03(1/s)のせん断応力の推移はモデル①、せん断速度 0.06(1/s)および 0.12(1/s)はモデル②、せん断速度 0.62(1/s)はモデル③、それ以降のせん断速度はモデル④がそれぞれ該当し、番号の順に遷移する。

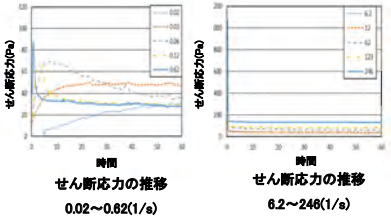


図-1　昨年度の卒業研究の結果

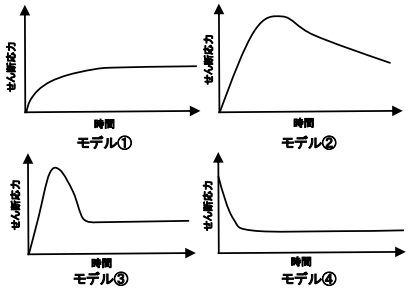


図-2　せん断応力の推移のモデル

ここで、各せん断応力の推移のモデルにおける、流体の粘度および流体中の粒子の状態について考える。図 - 3 に各モデルの流体の粘度の推移を示す。モデル①は極小せん断速度領域に対するモデルであり、流体がチキソトロピー性を有しているのにも関わらず、この領域においてせん断応力が低下しない理由は、加わるせん断速度が小さすぎることによって、流体の粒子の凝集が解消されるのに必要な最低限の応力が加わっていないため、粒子が凝集している状態、すなわち粘度がその流体における最大になっているからと考えられる。モデル②では、一定のせん断速度を与え続けることにより、せん断応力がピークを迎えた後に低下していることから、粘度が最大の状態から、粒子の凝集が解消され始めることで、粘度が段々と低下していっていると考えられる。モデル③では、一定のせん断速度を与え続けることにより、せん断応力がピークを迎えて低下していき、最終的に一定になっていることから、粘度が最大の状態から、粒子の凝集が解消されていき、最終的に解消されきることで、粘度がその流体における最小で一定になっていると考えられる。モデル④では、一定のせん断速度を与え続けることにより、せん断応力が急激に低下し、一定になっていることから、粘度が最大の状態から、粒子の凝集が急激に解消され、最終的に凝集が解消されきり、粘度がその流体における最小で一定になっていると考えられる。なお、せん断応力の推移のモデル①～③から考えると、図に示した粘度は初めに徐々に大きくなっていくことになるが、この流体はダイラタンシー流体でないことから、これは流体の性質ではなく測定上の特性によるものだと考え、ここでは、粘度は初めから最大と見なしている。

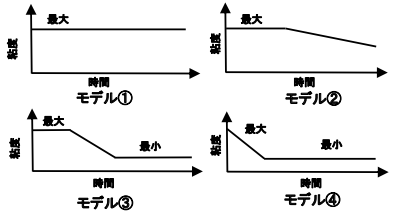


図-3　各モデルの粘度の推移

図 - 4 に負の勾配が発現した流動曲線を模式的に表したもの、および流動曲線の各点におけるせん断応力の推移のモデルを示す。流動曲線の a 点(原点～b 点の間の区間)のせん断応力の推移は、図 - 2 におけるモデル①の形をしており、流体の粒子は凝集している状態である。b 点のせん断応力の推移は、モデル①から②に遷移する直前の状態である。この時のせん断応力はモデル①の範囲で最大となり、流体の粒子の凝集が解消される直前の状態である。c 点(b 点～d 点の間の区間)のせん断応力の推移は、モデル②の形であり、粒子の状態は、モデル②の説明の通りである。d 点のせん断応力の推移は、モデル②から③に遷移する直前の状態である。粒子の状態は、初めは凝集されている状態から、すぐにせん断応力のピークを迎え、段々と凝集が解消されていき、最終的に凝集が解消されきった直後の状態である。e 点(d 点以降の区間)のせん断応力の推移は、モデル③または④の形であり、粒子の状態は、それぞれの説明の通りである。また、モデル④のせん断応力のピークは 1 章で述べた、ベーン型のスピンドルを使用すると、立ち上がりのせん断応力が流体の種類に関係なく大きくなるということが起きている。

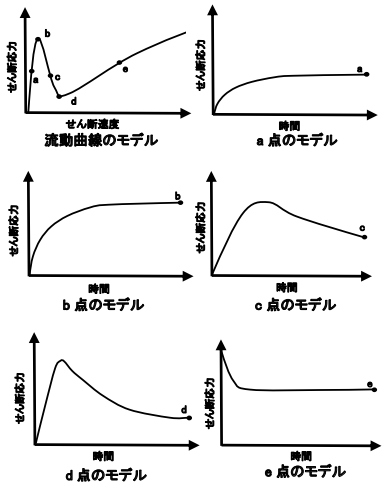


図-4　流動曲線の各点におけるせん断応力の推移のモデル

2.2　静的降伏応力に関する仮説

2.1 の考察から、静的降伏応力の値は、図 - 4 における b 点のせん断応力の値とすることが適当と考えられる。この点を超えるとせん断応力の低下、すなわち粒子の凝集の解消が始まることから、静的降伏応力は、流体の粒子の凝集を解消するのに必要な応力といえる。これをもとに考えるとチキソトロピー性を有する流体は、力を与えると粘度の低下、すなわち粒子の凝集の解消が起こることから、必ず静的降伏応力が存在しているといえ、流動曲線上に負の勾配が発現しない流体にも存在すると考えられる。また、これ以降は、流動曲線の y 切片と定義される静的降伏応力と区別するために、流体の粒子の凝集を解消するのに必要な応力のことを、静的降伏応力(仮)と呼称する。

3. 静的降伏応力の検討

3.1　検討目的

本章では第 2 章で述べた静的降伏応力の仮説の妥当性について検討した。すなわち、測定に供する試料を大きなせん断速度事前撹拌し、チキソトロピー性のもととなる粒子の凝集を解消させても、せん断応力の推移に静的降伏応力(仮)と考えられるピークが存在するかを確認した。また、事前撹拌によって粒子の凝集が解消されるかを確認するため、撹拌後のヒステリシスループを測定した。

3.2　実験概要

(1)試料

本実験では、擬塑性流体であるマヨネーズ、ビンガム流体である練りハミガキ、DG を添加したセメントペースト、および DG を添加していないセメントペーストの計 4 種類を試料とした。また、表 - 1 にセメントペーストの使用材料を示す。水セメント比は 50%とし、試料に対して、DG を C×0.12%または 0%、消泡剤を C×0.1%、凝結遅延剤を C×0.3%添加した。それぞれの調合は吉牟田の卒業研究で最も顕著に静的降伏応力が発現したものと、それと水セメント比は同じだが DG を添加していないものである。

表-1　セメントペーストの仕様材料

材料	仕様
水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント(密度：3.16 g / ㎤、比表面積：3320 ㎠ / g)
チキソトロピック剤	ダイユータンガム（DG）
凝結遅延剤	ポリヒドロキシカルボン酸複合体
消泡剤	非イオン系界面活性剤

(2)試験方法

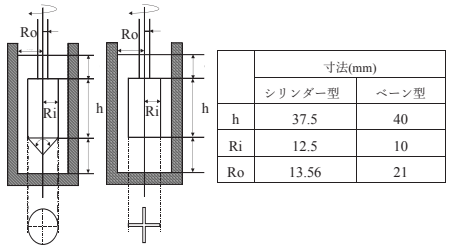
①試験手順

回転粘度計によって、ヒステリシスループ測定とレオロジー特性の測定を行った。

2023 年 2 月 6 日　　主査　名城大学建築学科　寺西　浩司
副査　　同　　平岩　陸

②スピンドル

図 - 5 に、回転粘度計のスピンドルおよび測定カップを示す。本実験では、シリンダー型とベーン型の 2 種類のスピンドルを使用した。



	寸法(mm)	
	シリンダー型	ベーン型
h	37.5	40
Ri	12.5	10
Ro	13.56	21

図-5　スピンドルおよび測定カップ

③測定プログラム

図 - 6 に、回転粘度計の測定プログラムを示す。ヒステリシスループ測定は、事前撹拌なしとありのケースに対して行った。応力緩和曲線測定では、各試料に 5 種類の極小一定せん断速度を与え、応答のせん断応力をそれぞれ測定し、その結果から流動曲線を作成した。さらに、その結果をもとに、任意のせん断速度を与えたケースと、それに事前撹拌を施したケースの測定を行った。なお、各測定プログラムの間の休止時間は、チキソトロピー性による粘度の回復を十分にさせるために、3 分以上にした。

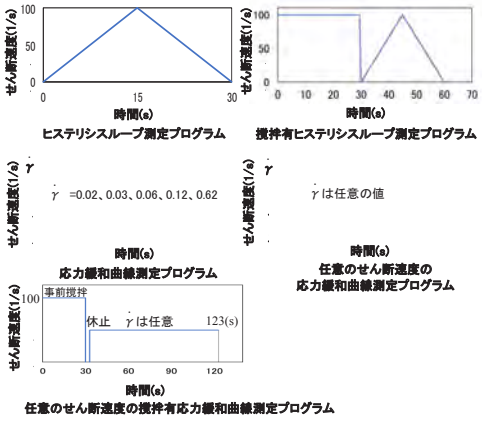


図-6　測定プログラム

3.3　実験結果および考察

(1)マヨネーズ

図 - 7 に、マヨネーズの測定結果の一部を示す。実験結果はすべてシリンダー型スピンドルの場合であり、事前撹拌有ヒステリシスループは上昇曲線と下降曲線が同一の履歴をたどっており、チキソトロピー性を確認できない。これは、事前撹拌によってマヨネーズの粒子の凝集が解消されきった状態になったためだと考えられる。流動曲線から、静的降伏応力が発現しなかったことを確認できる。せん断応力の推移には、せん断速度が 0.3(1/s)以降に静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークを確認できる。それに対し、事前撹拌有のせん断応力の推移では、事前撹拌を行うことにより、せん断応力のピークがなくなったことを確認できる。

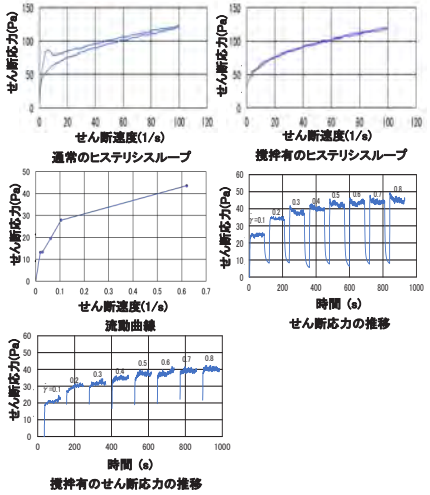
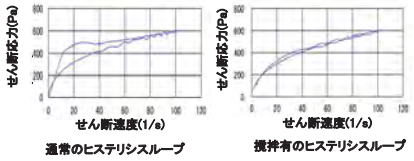


図-7　マヨネーズの測定結果

(2)練りハミガキ

図 - 8 に、練りハミガキの測定結果の一部を示す。実験結果はすべてベーン型スピンドルの場合であり、事前撹拌有のヒステリシスループにはチキソトロピー性を確認できない。これはマヨネーズと同様の理由であると考えられる。また、流動曲線から、静的降伏応力は発現しなかったことを確認できる。さらに、せん断応力の推移には、せん断速度が 0.4(1/s)以降に、静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークが見られるのに対し、事前撹拌有のせん断応力の推移では、せん断応力のピークがなくなったことを確認できる。



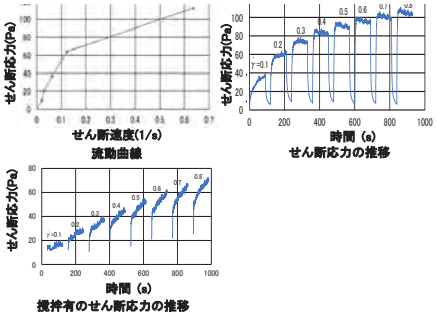


図-8　練りハミガキの測定結果

(3)セメントペースト(DG0%)

図 - 9 に、セメントペースト(DG0%)の測定結果の一部を示す。実験結果はすべてシリンダー型スピンドルの場合であり、ヒステリシスループから、事前撹拌の有無に関わらず、大きなチキソトロピー性は確認できない。また、流動曲線から、静的降伏応力が発現しなかったことを確認できる。さらに、せん断応力の推移には、静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークは確認できない。一方、事前撹拌有のせん断応力の推移では、いずれのせん断速度の場合も、事前撹拌後のせん断応力が少しだけ低下していることから、チキソトロピー性はほとんどないが存在すると考えられる。

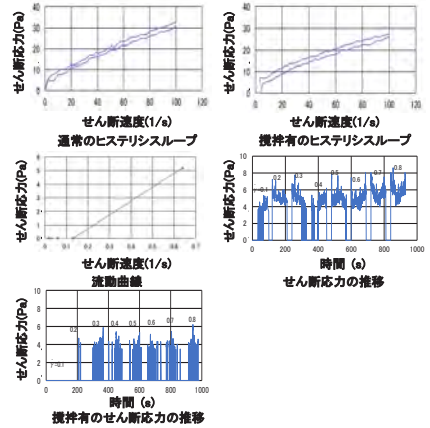


図-9　セメントペースト(DG0%)の測定結果

(4)セメントペースト(DG0.12%)

図 - 10 に、セメントペースト(DG0.12%)の測定結果の一部を示す。ヒステリシスループはシリンダー型スピンドルの場合であり、事前撹拌有のケースではチキソトロピー性を確認できない。これは他の試料と同様の理由であると考えられる。流動曲線はベーン型スピンドルの場合であり、静的降伏応力が発現したことを確認できる。また、せん断応力の推移の図に着目すると、静的降伏応力(仮)のピークはせん断速度が 0.01(1/s)と 0.02(1/s)の間に出現し、その値は 120Pa 程度になると推測される。一方、流動曲線における静的降伏応力は 90Pa 程度となっており、流動曲線を作成する際に、静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークから値をとれてないと、流動曲線の静的降伏応力は静的降伏応力(仮)より小さな値になってしまうと考えられる。事前撹拌有のせん断応力の推移では、事前撹拌によって静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークがなくなったことを確認できる。

以上の結果から、すべての試料の静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークが事前撹拌を行って、粒子の凝集が解消された状態になると消失することから、静的降伏応力は粒子の凝集を解消するのに必要な応力であるといえる。

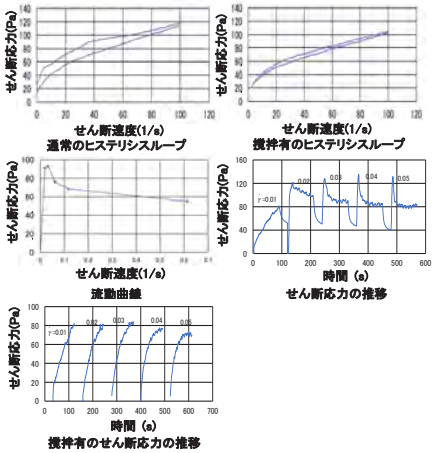


図-10　セメントペースト(DG0.12%)の測定結果

4.　まとめ

(1) すべての試料の静的降伏応力と考えられるせん断応力のピークは、事前撹拌を行って、粒子の凝集が解消された状態になると消失することから、静的降伏応力は粒子の凝集を解消するのに必要な応力であるといえる。

(2) 流動曲線の作成に使う値が、静的降伏応力(仮)と考えられるせん断応力のピークをとれないと流動曲線上の静的降伏応力は本来の値より小さくなる。

参考文献

1) Qian,Y.and Kawashima,S.: Distinguishing Dynamic and Static Yield Stress of Fresh Cement Mortars through Thixotropy, Cement and Concrete Composities, Vol.86,pp.65-66,1983

2) 吉牟田千晴：3D プリンターのための高いチクソトロピー性を有するモルタルの開発, 名城大学理工学部建築学科令和 3 年度卒業論文

建築学科　系紹介
―環境・設備系―

快適な空間を創出し建物を維持する

光・音・熱・空気・水を適切にコントロールすることで初めて快適な空間が創造できます。ただし、そのための環境負荷を最小限にするための知恵と努力が必要です。専門科目では次のような科目を通して、理解を深めます。『建築環境概論』では、建築空間の熱・空気・光・音環境の基礎を学び、建築における環境計画の重要性を認識します。『建築設備概論』では、空調・給排水・電気設備の必要性とそれぞれの専門分野に必要な基礎知識を修得します。

環境・設備系の研究手法

環境・設備系の研究は，建築や都市を安全・安心，そして快適な空間に設計，あるいは維持管理するために行われています。そして，省エネルギーや低酸素化など持続可能な社会へ向けて貢献することも環境・設備系の研究には求められています。主な研究手法には，フィールド調査，実験室実験，シミュレーションによる解析があります。フィールド調査は実在する建築や都市を対象に調査を実施して，その実態を把握します。実験室実験は，建築や都市の多様な環境要素から単純なモデルを実験室で再現して，着目した要素の特性や関係性を明らかにします。計画中の建築や都市の分析・評価，あるいは様々なケースの比較など再現が不可能，困難なテーマではシミュレーションにより解析を行います。研究の視点としては，建築や都市の機能や性能などモノを主な対象とする研究，建築や都市を利用するヒトとの繋がりを主な対象とする研究があります。

環境・設備系の研究テーマ

・建築室内と屋外における音響設計・予測・評価・制御に関する研究
・音響計画・建築環境教育に関する研究
・建築や都市の温熱環境評価，温熱環境や光環境の人体生理・心理反応に関する研究
・建築と都市の省エネ・低炭素化を目的とした建築環境・建築設備に関する研究

（文責 / 環境・設備系教員 石井仁）



名城大学ホールでの室内音響測定

●論文一覧

○修士論文

－金子知可｜空気熱源モジュールヒートポンプを併用した地中熱利用ヒートポンプシステムの長期運転性能の検証
－坪井智一｜道路交通騒音の予測及び精度検証に関する研究－日本と欧州の音源モデルによる数値計算に基づく検討－
－西木栄策｜トイレブースの構成要素が時間評価ならびに印象評価に及ぼす影響－ヘッドマウントディスプレイを用いた仮想空間による検討－

○卒業論文

－後藤敦｜建築施設の半屋外空間における残響・伝達特性調査－その 1 地上階における多点測定結果－
－早川修平｜建築施設の半屋外空間における残響・伝達特性調査－その 2 地上から上階方向に対する測定結果－
－鈴木海来｜長期間の気象データを用いた空気の音響吸収の計算
－河口貴哉｜夏期におけるベビーカーの温熱環境の実測調査　その 1
－田澤健大｜夏期におけるベビーカーの温熱環境の実測調査　その 2
－坂井健太｜全熱交換器を有する第一種換気方式を用いた高気密高断熱住宅の空調時の空気質に関する分析
－林和哉｜ COVID-19 対策下における室内温熱環境と空調熱負荷の変化に関する分析
－犬飼悠｜我が国における風力発電事業に係る騒音予測評価の事例調査－その 1 施設稼働に伴う風車騒音の影響－
－石黒颯｜我が国における風力発電事業に係る騒音予測評価の事例調査－その 2 工事用車両と建設工事に伴う騒音の影響－
－山田健太｜エコー検知限の周波数特性に関する基礎的研究―ハミング短音を用いた主観評価実験―
－小久保龍太郎｜室内空間における観賞魚の動画視聴によるストレス緩和効果 その 1
－岡村謙｜室内空間における観賞魚の動画視聴によるストレス緩和効果 その 2
－林志穂｜既存建物の昼光利用と空調負荷削減方法の検討
－藤岡優希｜名城大学八事キャンパスにおける BEMS データに基づく空調用エネルギーの分析
－平田千沙都｜内倒し窓からの漏洩音対策に着目した 3 次元幾何音響解析－その 1 天井面の吸音範囲の数値検討結果－
－林完奈｜内倒し窓からの漏洩音対策に着目した 3 次元幾何音響解析－その 2 天井面の吸音効果に関する検証実験と課題－
－山門大輝｜室内空間に生じるエコーの検知限に関する基礎的研究 - 4 音節単語の試験音を用いた主観評価実験 -
－葉山惇｜仮想空間によるトイレブースの色彩が時間評価ならびに印象評価に及ぼす影響　その 1
－矢口　諒｜仮想空間によるトイレブースの色彩が時間評価ならびに印象評価に及ぼす影響　その 2
－伏見梨花｜ 3D 都市モデルを利用した太陽光利用適地の分析手法に関する研究
－青山悦之｜気流解析を用いた吹出口と吸込口の位置が室内温熱環境に及ぼす影響の分析
－江口菜々実｜天井懐空間の排水横主管から放射される音響振動計測－その 1 地上階における多点測定結果－
－尾島梨紗｜天井懐空間の排水横主管から放射される音響振動計測－その 2 地上から上階方向に対する測定結果－
－秦康人｜高周波音の伝搬に及ぼす空気の音響吸収の影響 ―年間の気象観測データを用いたモスキート音及び小動物撃退音に関する検討―
－中島悠太｜屋外ベンチの利用実態ならびに熱環境の調査
－湊高紀｜奄美大島の高倉、対馬のコヤにおける温熱環境
－川﨑丞｜日本型パッシブハウスの設計ガイドライン作成　その 1. 温暖湿潤地域におけるパッシブハウスの課題整理
－山岡莉子｜日本型パッシブハウスの設計ガイドライン作成 その 2. 日本に建設されたパッシブハウス認定住宅の分析と WUFI Plus による熱負荷シミュレーション
－木村嘉人｜日本型パッシブハウスの設計ガイドライン作成 その 3.PHIUS の認証基準の整理と普及型パッシブハウスのコスト検討

道路交通騒音の予測及び精度検証に関する研究
―日本と欧州の音源モデルによる数値計算に基づく検討―

PREDICTION AND ACCURACY OF ROAD TRAFFIC NOISE PROPAGATION: NUMERICAL STUDY USING SOUND EMISSION MODELS IN JAPAN AND EUROPEAN REGION

坪井智一 ―― *1

Tomokazu Tsuboi ―― *1

キーワード：
騒音予測，周波数特性，速度依存性，地面反射，回折，予測精度

Keywords:
Noise Prediction, Frequency Characteristics, Speed Dependence, Ground Reflection, Diffraction, Prediction Accuracy

主査　岡田恭明　教授
副査　石井　仁　教授
副査　吉永美香　教授

1. はじめに

1.1. 研究背景

交通網が発達した現代において，特に自動車交通は我々の日常生活において必要不可欠であるが，それに伴い，道路交通騒音は沿道地域における大きな社会問題の一つとなっている。このような騒音問題から快適な住環境を確保するために，建築物の遮音設計や防音壁の配置計画などの対策がなされている。その対策を正確かつ効率的に行うためには，事前に騒音の程度を予測する必要がある。その予測法として，我が国では日本では日本音響学会が提案する ASJ RTN-Model 2018 [1] が広く用いられている。また，欧州においても CNOSSOS-EU をはじめとした多くの予測法が提案されており，予測法の開発は国際的に進められている [2-9]。一方，独自の予測法を保有していない東南アジアを中心に，都市開発事業に伴う環境影響評価にて，ASJ RTN-Model が活用される事例もみられる [10,11]。

1.2. 目的

本研究では，いくつかの国で用いられている ASJ RTN-Model の有効性を検証するために，予測の基本となる音響パワーレベル L_{WA} を欧州の主要な音源モデルから求めたそれらと比較した。また，予測点に到達する騒音レベルを周波数ごとに計算する場合，L_{WA} と共に，その周波数特性である音響パワースペクトル $L_{WA}(f)$ も重要となる。そのため，平坦な地表面上での騒音の伝搬を想定した単発騒音レベル L_{EA} の計算を行い，各モデルの $L_{WA}(f)$ の違いに着目した検討を行った。さらに，予測精度に寄与する要因の一つとして，個々の車両の走行速度のばらつきも考えられる。そこで，実道路での騒音測定データ [12] を基に，交通状況を考慮した際の等価騒音レベル L_{Aeq} の計算結果の変化を確認した。

表 1　密粒舗装における L_{WA} 式の係数 a

Classification	Steady*1	Non-steady*2
Light vehicles	45.8	82.3
Medium-heavy vehicles	51.4	87.1
Heavy vehicles	54.4	90.0

*1 Steady running: $b = 30$（$40 \le V \le 140$ km/h）
*2 Non-steady running: $b = 10$（$10 \le V \le 60$ km/h）

2. 道路交通騒音の音源モデル

2.1. ASJ RTN-Model 2018

ASJ RTN-Model 2018（以下，RTN-Model と称す）では，L_{WA} の大小関係が車種によって異なるため，小型・中型・大型車の 3 車種分類を基本とし，密粒・排水性舗装などの舗装種別にそれぞれ設定されている。今回，対象とした密粒舗装での L_{WA} は，走行速度 V と道路の縦断勾配等に関する補正量 C から，式(1)で算出される。

$$L_{WA} = a + b \lg V + C \tag{1}$$

$$L_{WA}(f) = L_{WA} + \Delta L_{WA}(f) \tag{2}$$

ここで，係数 a は表 1 のように車種別に与えられ，速度依存性を表す係数 b は，定常走行時が 30，非定常走行時は 10 である。$L_{WA}(f)$は，周波数 f の A 特性バンドパワーレベルであり，L_{WA} と道路交通騒音の代表的な周波数特性 $\Delta L_{WA}(f)$から算出する。

表 2　L_{WA} 式の係数 B_R, B_P の例（CNOSSOS-EU）

f[Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
(a) Light vehicles								
B_R	30.0	41.5	38.9	25.7	32.5	37.2	39.0	40.0
B_P	-1.3	7.2	7.7	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
(b) Medium-heavy vehicles								
B_R	30.0	35.8	32.6	23.8	30.1	36.2	38.3	40.1
B_P	-1.9	4.7	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
(c) Heavy vehicles								
B_R	30.0	33.5	31.3	25.4	31.8	37.1	38.6	40.6
B_P	0.0	3.0	4.6	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

*1 名城大学大学院理工学研究科建築学専攻　修士課程

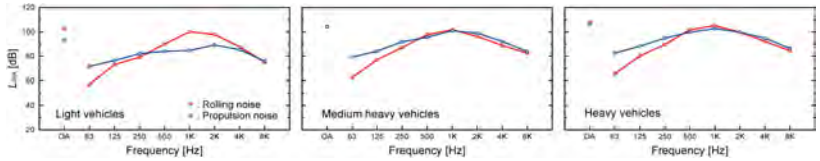


図 1　基準速度 V_{ref} における小型・中型・大型車の定数 A_R, A_P（音源別の A 特性パワースペクトル）

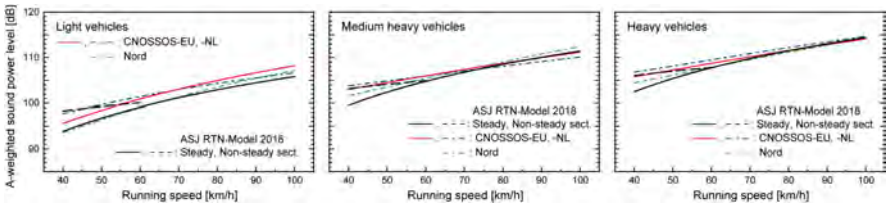


図 2　車種別の L_{WA} の速度依存性（RTN-Model, CNOSSOS-EU, -NL, Nord）

2.2. 欧州の音源モデル

RTN-Model との比較に用いた欧州における音源モデルは，次の 6 つの予測法である。

- CNOSSOS-EU [2)]
- CNOSSOS-NL [3,4)]
- CNOSSOS-FR [5-7)]
- sonROAD [8)]
- Nord [9)]
- Harmonoise [9)]

車種分類は，RTN-Model と同様，小型・中型・大型車を基本としているが，sonROAD では 10 車種分類を採用し，中型車の設定は無い。これらのモデルの $L_W(f)$は，タイヤ路面騒音 L_{WR}（rolling noise）とエンジン駆動系騒音 L_{WP}（propulsion noise）のエネルギー合成から周波数別に計算され，RTN-Model とは異なる。

$$L_W(f) = 10 \lg\left(10^{L_{WR}(f)/10} + 10^{L_{WP}(f)/10}\right) \tag{3}$$

$$L_{WR}(f) = A_R + B_R \lg\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) + C_R \tag{4}$$

$$L_{WP}(f) = A_P + B_P \left(\frac{V - V_{ref}}{V_{ref}}\right) + C_P \tag{5}$$

ここで，式中の係数 A, B は，1/1 又は 1/3 オクターブバンドごとに与えられており，図 1 は CNOSSOS-EU の係数 A_R, A_Pから得られる基準速度 V_{ref}(70 km/h)時の $L_{WA}(f)$ である。中型・大型車の $L_{WA}(f)$は，小型車に比べてエンジン駆動系騒音（●）が支配的になるよう設定されている。係数 B_R, B_P は，表 2 に示すように車種と周波数で異なるため，$L_{WA}(f)$の形状は，走行速度で変化する。この点も RTN-Model とは異なる。

3. 自動車走行騒音の音源特性

図 2 に速度 40～100 km/h に対する各車種の L_{WA} を比較した例を示す。図中の黒の実線と破線は，RTN-Model の定常・非定常走行時の L_{WA} である。小型車の L_{WA} は，モデルにより大小関係は様々であるが，その速度依存性は RTN-Model の定常走行時と似ている。一方，中型・大型車においては，速度 60 km/h 以上では良く似た傾向であるが，60 km/h 以下は L_{WA} の差が大きく，定常走行時よりも非定常走行時が良い対応にあることがわかる。

図 3 は，5 km/h 間隔（$V = 40 - 100$ km/h）の L_{WA} を比較した結果で，横軸は RTN-Model の L_{WA}，縦軸は欧州のモデルのそれである。RTN-Model との差が 3 dB 以上になる場合（$V = 40, 45$ km/h 時）もみられるが，それらの平均レベル差 ΔL_{WA} は，小型・大型車の場合は 0.6 dB，中型車の場合は 0.8 dB であった。

図 4 は，RTN-Model における各車種の A 特性相対バンドパワーレベル $\Delta L_{WA}(f)$と CNOSSOS-NL, -FR 及び Nord のそれら（$V = 40 - 80$ km/h）とを比較したものである。なお，欧州のモデルは，先に述べたように走行速度に依存することから，速度 60 km/h に対するレベル差も下段に併せて示す。

RTN-Model では，代表的な一つの $\Delta L_{WA}(f)$を設定しているが，欧州のモデルは，小型車の場合には周波数 500 Hz 以下で，大型車の場合は 250 Hz 以下で変化する特性になっている。例えば，63 Hz における 40～80 km/h 時のレベル変化は，小型車が 4.8～9.8 dB，大型車は 4.8～6.9 dB であった。ただし，卓越する 500 Hz～2 kHz の相対音圧レベルは，各モデルとも概ね同じ傾向にある。

4. 各種条件を想定した伝搬シミュレーション

4.1. 地表面による超過減衰に着目した検討

予測結果には RTN-Model と欧州の音源モデルから求めた L_{WA} と $L_{WA}(f)$の違いが共に含まれてくる。そこで，各モデルの $L_{WA}(f)$による計算結果の違いをみるために，一様で平坦な地表面上での音の伝搬を想定した単発騒音暴露レベル L_{EA} の計算を行った。地表面による超過減

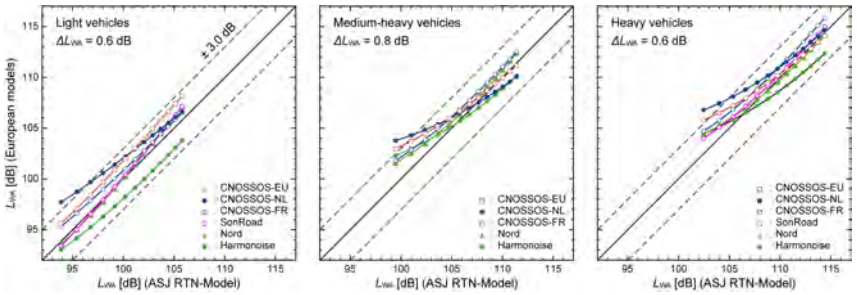


図 3　欧州の音源モデルとの L_{WA} の比較（走行速度 V : 40－100 km/h, 5 km/h 間隔）

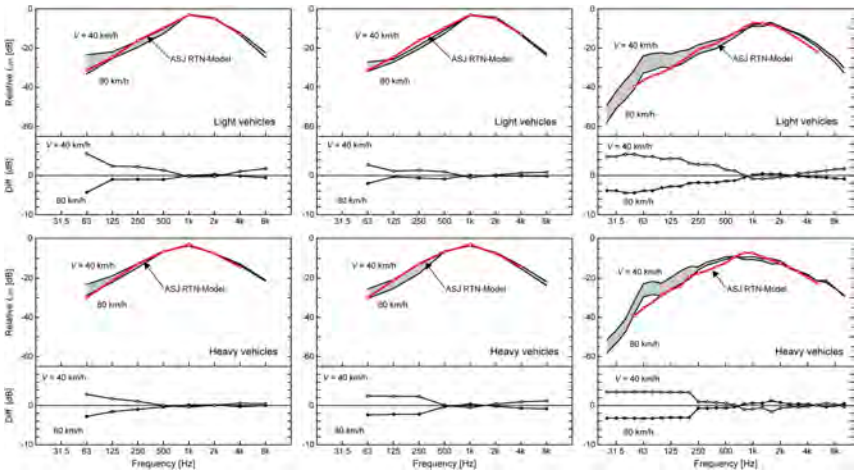


図 4　欧州の音源モデルの $\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性（小型・大型車, CNOSSOS-EU, -NL, Nord, V : 40－80 km/h）

衰は，RTN-Model 1993 でも示されている複素音圧反射係数を用いた計算式から求めた [13,14]。

予測点に到達する周波数 f の A 特性音圧レベル $L_A(f)$ は，図 5 (a) のように，音源からの直達音成分 ϕ_1 と反射音成分 ϕ_2 との和で，その L_{EA} は，離散的に配置した点音源 i の騒音レベル $L_{A,i}(f)$ と走行速度 V から次式で与えられる。

$$L_{EA}(f) = 10\lg\frac{\Delta T}{T_0}\sum_i 10^{L_{A,i}(f)/10} \quad (6)$$

$$L_{A,i}(f) = 10\lg\left(10^{L_{WA}(f)/10}\cdot\frac{|\phi_1+\phi_2|^2}{4\pi}\right) \quad (7)$$

$$\phi_1 = \frac{e^{ikR_1}}{R_1}, \qquad \phi_2 = Q_g\frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (8)$$

$$\Delta T = 3.6\,\frac{\Delta x}{V}, \quad T_0 = 1 \quad (9)$$

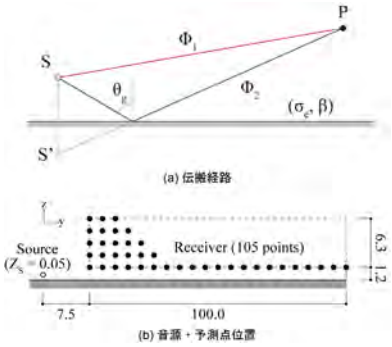


図 5　地表面による超過減衰を考慮した伝搬計算

表 3　地表面の実効的流れ抵抗 σ_e

地表面の種類	σ_e [kPa・s/m^2]
コンクリート，アスファルト	20,000
固い地面，排水性舗装路面	1,250
芝生，田圃，草地	300
表面の柔らかい畑地，耕田	75

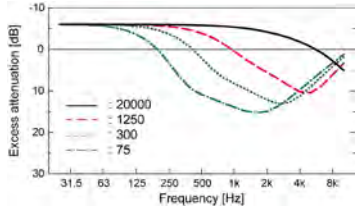


図 6　点音源群に対する超過減衰の例
（予測点 Pyz: 22.5, 1.2 m）

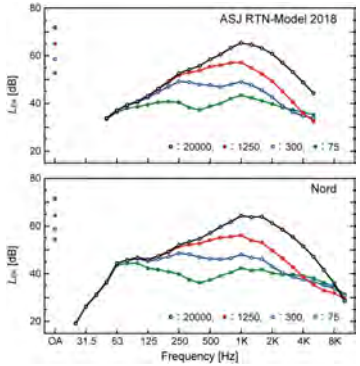


図 7　L_{EA} の計算例
（小型車，走行速度: 60 km/h, Pyz: 22.5, 1.2 m）

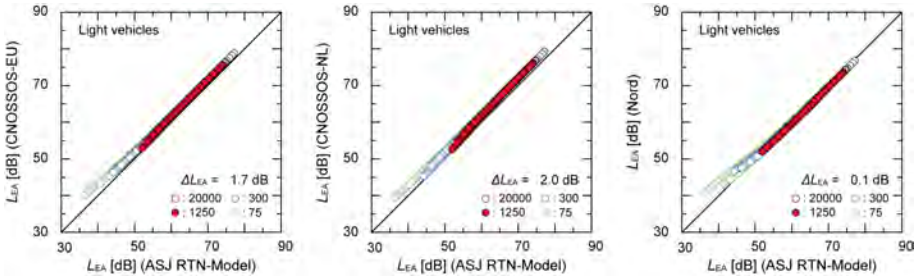
ここで，R_1, R_2 は，直達及び反射経路長であり，複素音圧反射係数 Q_g は川井が示した式を，比音響アドミッタンス β は幹による修正式を用いて算出した [15,16]。表 3 は，Q_g の計算に用いた地表面の実効的流れ抵抗 σ_e である。20,000～75 kPa･s/m^2 の 4 種類とし，反射性と吸音性地面による減衰の違いに留意しながら，各モデルの計算値 L_{EA} を比較した。予測点 (y, z) は，図 5 (b) に示すように，水平距離 7.5 m の点から 5 m 間隔に 100 m まで，高さ 1.2, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5 m に計 105 点設定した。音源の高さは 0.05 m とし，x 軸上に 5 m 間隔で配置した。

4. 1. 1.　単発騒音暴露レベル L_{EA} の比較

図 6 は，水平距離 22.5 m，高さ 1.2m の予測点における，点音源群に対する超過減衰を計算した例である。流れ抵抗 σ_e が小さくなるほど，大きな減衰が生じるディップの位置が周波数 500 Hz 付近まで広がり，その程度も増大する。図 7 は，RTN-Model 及び Nord の小型車の $L_{WA}(f)$を例に，図 6 と同じ点での $L_{EA}(f)$を求めた結果で，走行速度は 60 km/h とした。σ_e が 1,250 kPa･s/m^2 以上の場合，1 kHz 前後の帯域が支配的で両モデルのスペクトルも良く似ている。一方，75 kPa･s/m^2 になると，中音域まで減衰が広がるため（図 6），双峰型に近い周波数特性となり，63～125 Hz の低音域でのレベルの違いが L_{EA} に現れてくる。

次に，欧州の音源モデルの $L_{WA}(f)$を用いて全 105 点の L_{EA} を計算し，RTN-Model のそれらと比較した。図 8 は，CNOSSOS-EU, -NL, Nord の計算値を縦軸にそれぞれ整理した，小型・大型車の例である。RTN-Model と他のモデルから求めた L_{EA} の差異は，予測点の位置に寄らず良好な対応で，その平均値 ΔL_{EA} は 2 dB 以下であった。なお，75 kPa･s/m^2 として計算した場合には，遠方の地表付近（L_{EA}＝35－50 dB）で，RTN-Model との差が大きくなる傾向がみられる。これは，図 7 で述べた低音域での $L_{WA}(f)$の違いによるものである。

表 4 は，RTN-Model の計算値とのレベル差 ΔL_{EA} を σ_e ごとに整理した結果（105 点の算術平均値）で，パワーレベル自体の差 ΔL_{WA} も併せて示す。吸音性地面（σ_e ≤



(a) CNOSSOS-EU　(b) CNOSSOS-NL　(c) Nord

図 8　欧州の音源モデルから求めた L_{EA} との比較（小型車，走行速度: 60 km/h）

表 4　RTN-Model とのレベル差 ΔL_{EA} 及び ΔL_{WA}（小型・大型車）

	ΔL_{EA} [dB]				ΔL_{WA}
	75	300	1250	20000	[dB]
(a) Light vehicles					
CNOSSOS-EU	2.2	1.7	1.4	1.6	1.7
CNOSSOS-NL	2.4	1.7	1.7	2.1	2.3
CNOSSOS-FR	2.4	2.6	2.2	1.2	0.9
sonROAD	0.3	0.2	0.0	0.1	0.1
Nord	1.1	0.2	-0.4	-0.4	-0.1
Harmonoise	0.5	-0.5	-1.5	-2.0	-1.9
(b) Heavy vehicles					
CNOSSOS-EU	1.8	1.2	1.1	0.9	1.0
CNOSSOS-NL	1.9	1.4	1.6	1.6	1.7
CNOSSOS-FR	1.8	1.5	1.3	1.1	1.2
sonROAD	0.4	0.0	0.2	0.4	0.4
Nord	2.1	1.6	1.2	0.2	0.1
Harmonoise	2.0	1.5	0.8	-0.4	-0.5

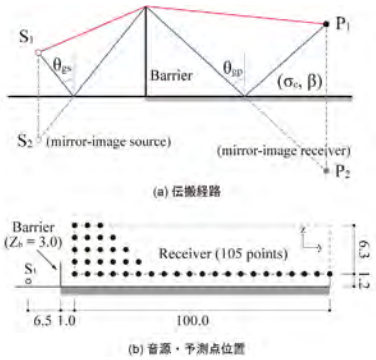


図 10　障壁による超過減衰を考慮した伝搬計算

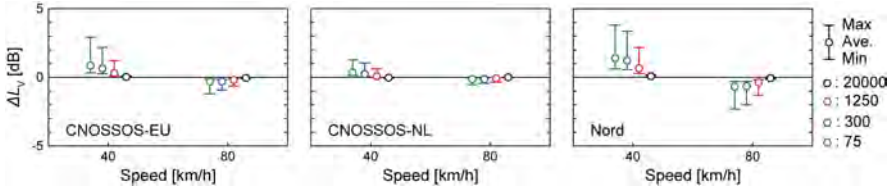


図 9　$\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性に起因する L_{EA} のレベル変化（小型車，基準速度: 60 km/h）

300）とした場合 RTN-Model との違い ΔL_{EA} は大きくなる。一方，反射性地面（$\sigma_e \geq 1{,}250$）とした場合は ΔL_{WA} と概ね同じで，その差は約 1 dB 以下であった。

4. 1. 2.　走行速度に伴う L_{EA} のレベル変化

欧州の音源モデルで用いられている $\Delta L_{WA}(f)$は，図 4 のとおり，速度と共に変化する。この $\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性が L_{EA} の計算結果にどの程度現れてくるのかを求めてみた。図 9 はその結果で，CNOSSOS-EU, -NL 及び Nord の小型車の場合である。これらは，40, 80 km/h 時の L_{EA} に対して，それぞれ 60 km/h 時の $\Delta L_{WA}(f)$を用いて計算したそれとの差 ΔL_V（全 105 点での平均値，最大・最小値）を求めたものである。

これより，$\Delta L_{WA}(f)$の低音成分が相対的に大きくなる 40 km/h 時の ΔL_V は増加し，逆に小さくなる 80 km/h 時は低下する傾向が確認できる。即ち，速度による $\Delta L_{WA}(f)$の変化を考慮した場合，その差が L_{EA} の計算値に現れてくる。しかしながら，その差が顕著になるのは吸音性地面（$\sigma_e \leq 300$）の場合で，通常の予測条件で想定される反射性地面（$\sigma_e \geq 1{,}250$）での ΔL_V は最大で±3 dB，平均では±1 dB 以下と僅かであった。

4. 2.　障壁と地表面による超過減衰に着目した検討

次に，地表面に加えて障壁による回折効果を考慮した L_{EA} を計算し，各モデルの $L_{WA}(f)$の違いに着目した検討を行った。

図 10 に示すように，平坦な地形に高さ 3 m の障壁が設置されていると想定し，予測点 P_1 に到達する音圧レベル $L_A(f)$を 4 つの回折経路から成る音場ϕ_1～ϕ_4の和で，その $L_{EA}(f)$は式(6)より求めた [13,17]。

$$L_{A,i}(f) = 10\lg\left(10^{L_{WA}(f)/10} \cdot \frac{\left|\sum_{n=1}^{4}\phi_n\right|^2}{4\pi}\right) \quad (10)$$

$$\phi_1 = D_1\frac{e^{ikR_1}}{R_1}, \qquad \phi_2 = D_2 Q_{gp}\frac{e^{ikR_2}}{R_2} \quad (11)$$

$$\phi_3 = D_3 Q_{gs}\frac{e^{ikR_3}}{R_3}, \qquad \phi_4 = D_4 Q_{gs} Q_{gp}\frac{e^{ikR_4}}{R_4} \quad (12)$$

式中の D_1～D_4 は，障壁の頂点における回折係数で Kouyoumjian の漸近解から求め，音源・受音点側の地面による音圧反射係数Q_{gs}，Q_{gp}の計算は，先の検討と同様である。音源側の地表面の σ_eは 20,000 kPa･s/m^2，受音点側は 4 種類（20,000－75 kPa･s/m^2）とした。

4. 2. 1.　単発騒音暴露レベル L_{EA} の比較

図 6 と同条件で計算した超過減衰と，それから求めた RTN-Model の小型車の L_{EA} の結果を図 11 に示す。超過減衰は，回折効果により周波数と共に増大し，地表面効果の違いは 125～500 Hz 付近に現れる。したがって，各モデルから求めた L_{EA} の差は，低音から中音域での $L_{WA}(f)$の違いによるものと考えられる。

図 12 は，RTN-Model の各車種の $L_{WA}(f)$から求めた

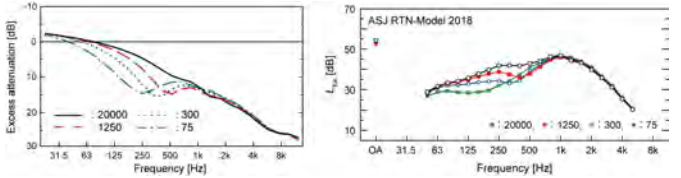


図 11　超過減衰及び小型車の L_{EA} の計算例（予測点 Pyz: 22.5, 1.2 m）

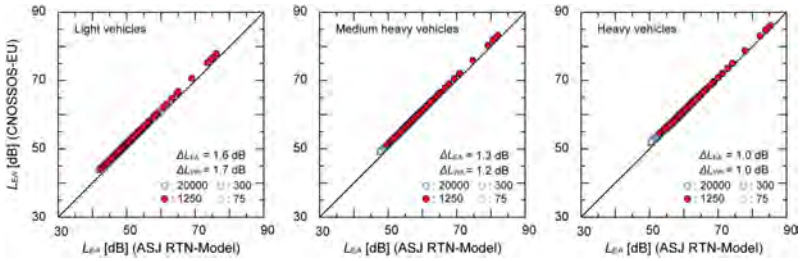


図 12　車種別の L_{EA} の比較（CNOSSOS-EU，小型・中型・大型車，走行速度: 60 km/h）

105 点での L_{EA}（V = 60 km/h）と CNOSSOS-EU によるそれらとを比較した結果であり，ΔL_{WA} も併せて示す。障壁がある場合には，回折効果の影響が支配的になることから，地表面の種類による L_{EA} の差は小さい。また，RTN-Model との平均レベル差 ΔL_{EA} は 1.0～1.6 dB と僅かであり，ΔL_{WA} とも変わらない。

4. 2. 2.　走行速度に伴う L_{EA} のレベル変化

CNOSSOS-EU の小型車を例に，$\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性による L_{EA} の変化を算出した。図 13 は，図 9 と同様，速度 60 km/h 時の $\Delta L_{WA}(f)$を基準にして 40, 80 km/h 時のそれらとの違いによる ΔL_V を求めた結果である。障壁と地表面による超過減衰を考慮した場合，図 9 に比べ，$\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性による L_{EA} の変化は全体的に小さく，その程度は最大でも±2 dB であった。

以上，平坦な地表面上での騒音伝搬を想定したシミュレーション計算から，L_{WA} の差は計算結果 L_{EA} のそれと概ね一致する。即ち，RTN-Model で採用されている音源の周波数特性 $\Delta L_{WA}(f)$は，欧州のモデルのそれと比較しても大きな乖離はなく，有効な音源モデルの一つであると言える。

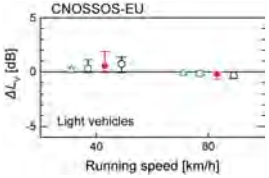


図 13　$\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性に起因する L_{EA} のレベル変化（小型車，基準速度: 60 km/h）

5.　予測精度に寄与する影響要因

5. 1.　実測データに基づく考察

表 5 は，50 台以上測定できた 37 か所での平均速度 V_A と標準偏差 V_σ を求めた例である。測定は主に片側 1 車線道で行われ，全体の平均値は V_A が 47.9 km/h，V_σ は 6.8 km/h であった。また，図 14 は実測データの累積確率分布で，正規確率のそれと比較して示す。正規性が認められた箇所（例：R22）は全体の 4 割で，その他は認められなかった（R27）。なお，今回の検討では，走行速度は正規分布に従うと想定して，V_A = 50 km/h，V_σ = 7.0 km/h とした等価騒音レベル L_{Aeq}（交通量 1,000 台/h）の計算を行うこととした。

5. 2.　走行速度分布を考慮した予測計算

伝搬計算は 4.1 と同様に地表面の超過減衰を考慮し，高さ 1.2 m の点（水平距離 y = 7.5－107.5 m）での L_{Aeq} を，欧州の音源モデルの $\Delta L_{WA}(f)$を用いて計算した。

図 15 は，走行速度による $\Delta L_{WA}(f)$の変化を考慮した 1 台当たりの $L_{EA,S}$ と，各速度の走行台数が正規分布に従うとした場合の $L_{EA,M}$ である。これらは，Nord の音源モデルを用いて σ_eを 300 kPa･s/m^2 として計算した例（y = 47.5 m）である。また，図中の破線は，$\Delta L_{WA}(f)$の変化を無視し，平均速度 50 km/h 時のそれを用いた値である。先に述べたように，1 台当たりの $L_{EA,S}$ は，$\Delta L_{WA}(f)$の低音成分が相対的に大きくなる低速時は破線に比べて増加し，高速時は逆に低下する。一方，速度ごとの交通量（V_σ = 7.0 km/h）を考慮した $L_{EA,M}$ は，V_A の前後で逆転することで，吸音性地面の場合でも L_{Aeq} の違いは 0.1 dB（= ΔL_{Aeq}）であった。即ち，$\Delta L_{WA}(f)$の速度依存性は，単独車両の $L_{EA,S}$ の結果には現れるが，各速度の交通量から求めた L_{Aeq} では無視できる程度である。

表 5　平均速度 V_A 及び標準偏差 V_σ の実測例 (測定箇所を V_σ で降順, n:測定台数)

Site	n	V_A [km/h]	V_σ [km/h]	Site	n	V_A [km/h]	V_σ [km/h]	Site	n	V_A [km/h]	V_σ [km/h]
R37	56	54.1	9.6	R30	94	44.5	7.0	R03	189	46.3	6.2
R28	65	59.3	9.5	R22	124	48.8	6.7	R08	184	50.5	6.1
R23	86	56.8	7.8	R12	176	42.7	6.8	R07	197	49.0	5.9
R36	108	47.1	7.5	R04	332	50.4	6.8	R13	120	43.0	5.9
R27	60	49.9	7.4	R19	66	48.3	6.7	R11	77	44.8	5.8
R01	105	50.5	7.4	R02	153	50.2	6.5	R20	105	42.0	5.6
R24	170	48.0	7.4	R39	129	49.8	6.5	R16	55	41.7	5.5
R31	173	46.2	7.3	R21	113	46.8	6.5				
R18	84	47.7	7.2	R09	160	48.9	6.4	Ave.	110.9	47.9	6.8

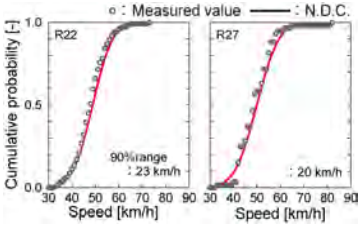


図 14　走行速度の累積確率

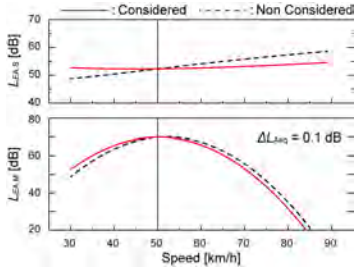


図 15　$\Delta L_W(f)$ の速度依存による L_{EA} の変化
(Nord, σ_e = 300 kPa·s/m², y, z = 47.5, 1.2 m)

表 6　速度分布を考慮した L_{Aeq} と平均速度 V_A で計算したそれとのレベル差 (1,000 台/h)

	ΔL_{Aeq}			
	75	300	1250	20000
CNOSSOS-EU	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
CNOSSOS-NL	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.0	≤ 0.0
CNOSSOS-FR	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
sonROAD	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.2
Nord	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.2
Harmonoise	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1

また，表 6 に，速度分布を考慮した L_{Aeq} と一律平均速度 50 km/h で走行するとした場合のそれとのレベル差 ΔL_{Aeq} を示す。この前提においても，ΔL_{Aeq} は 0.2 dB 以下で，14 km/h（=2V_σ）程度のばらつきが予測結果に及ぼす影響は小さことがわかる。

6. まとめ

我が国における道路交通騒音の予測法である RTN-Model で用いられている車種別の A 特性音響パワーレベル L_{WA} と欧州の予測法におけるそれらとを比較すると共に，地表面や障壁による超過減衰を考慮した単発騒音暴露レベル L_{EA} を計算結果し，パワースペクトル $L_{WA}(f)$の違いも検討した。さらに，実道路での騒音測定データを基に，実際の交通状況を考慮した際の等価騒音レベル L_{Aeq} の変化を確認した。これらの検討から，次のことを明らかにした。

1) RTN-Model の L_{WA} は，欧州のモデルのそれに比べ，各車種とも平均で 1 dB 程度低く，速度 50 km/h 以下の場合には最大で 3 dB の差が生じる。

2) 地表面による減衰を考慮した場合，吸音性地表面を想定した遠方での計算結果 L_{EA} は，$\Delta L_{WA}(f)$の違いによって約 4 dB 変化する点には注意が必要である。一方で，市街地などの反射性地面を想定した場合には，$\Delta L_{WA}(f)$の変化による影響は僅かであり，各モデルの L_{WA} の差が計算結果 L_{EA} に現れる。

3) 障壁を想定した場合，回折効果による影響が支配的になるため，L_{EA} の計算結果は L_{WA} 自体の差とほぼ同じで，地表面の種類によらず，各モデルの $\Delta L_{WA}(f)$ の違いは無視できる程度であった。

4) 実際に走行する車両の走行速度のばらつきは 7 km/h 程度であることが確認でき，それによる L_{Aeq} への影響は 0.1 dB 以下と僅かであった。

参考文献

1) 道路交通騒音調査研究委員会，“道路交通騒音の予測モデル “ASJ RTN-Model 2018”，” 音響学会誌, 75, 188-250 (2019).
2) S. Kephalopoulos et al., “JRC Reference report on Common Noise Assessment Methods in EU,” (2012).
3) B. Peeters et al., “Correcting the CNOSSOS-EU road noise emission values,” Proc of Euronoise 2018 (2018).
4) オランダ政府 (Overheid,nl), https://wetten.overheid.nl/BWBR0031722/2019-01-01#BijlageVII (2023.01 参照).
5) M. A. Pallas et al., “Matching noise emission from French medium-heavy vehicles and CNOSSOS models, ” Proc of ICA2019 (2019).
6) G. Dutilleuxa et al., “Matching directive 2015/996/EC (CNOSSO-EU) and the French emission model for road pavements”. Proc of Euronoise 2018 (2018).
7) フランス政府 (legifrance.gouv.fr), http://www.legifrance.gouvfr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037130717&cataegorieLien=id (2020.07 参照).
8) K. Heutschi et al., “sonRoad18: Swiss Implementation of the CNOSSOS-EU Road Traffic Noise Emission Model,” ACTA ACUSTICA, 104 (2018).
9) H. G. Jonasson, “Acoustical Source Modelling of Road Vehicles,” ACTA ACUSTICA, 93 (2007).
10) The Ministry of Transport and Communications and the Asian Development Bank, “Presidente Nicolau Lobato International Airport Expansion Project, Environmental Impact Assessment,” (2021.7.22).
11) Directorate General of Sea Transportation, “ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT REPORT OF NEW PORT DEVELOPMENT PROJECT IN EASTERN METROPOLITAN AREA (PATIMBAN),” (2017.2).
12) 岡田恭明 他，“一般道路における自動車走行騒音の音響パワーレベル－全国各地の密粒舗装での測定データに基づく検討－，” 音響学会騒音・振動研資, N-2019-13 (2019).
13) 高木興一 他，“道路交通騒音予測における伝搬計算方法，”音響学会誌, 50(3), 240-249 (1994).
14) 佐々木寛 他，“日本音響学会・道路交通騒音調査研究委員会報告，”音響学会騒音・振動研資, N-1990-16 (1990.6).
15) 川井孝雄，“Locally reacting な境界面上の音の伝搬に関する考察”，音響学会誌, 39(6), 374-379 (1983).
16) Y. Miki, “Acoustical properties of porous materials – Modifications of Delany-Bazley models”, J. Acoust. Soc.Jpn.(E), 11(1), 19-24 (1994).
17) 福島昭則，“遮音壁の回折補正量の近似計算モデル，” 音響学会騒音・振動研資, N-2014-05 (2014).

トイレブースの構成要素が時間評価ならびに印象評価に及ぼす影響

―ヘッドマウントディスプレイを用いた仮想空間による検討―

EFFECTS OF COMPONENTS OF TOILET STALL ON SENSE OF TIME AND IMPRESSION:

EXAMINATION BY VIRTUAL SPACE WITH HEAD MOUNTED DISPLAY

西木　栄策
Eisaku NISHIKI

1　研究背景

日常生活において、公共施設や商業施設、オフィスなどの住宅以外の公共の空間にあるトイレ（以後、公共トイレと記す）を利用する機会は多い。近年、公共トイレに対する認識は大きく変化している。従来のトイレブースは単なる排せつ目的の空間であったが、近年ではトイレブースの洋式化や衛生性、快適性の向上により多目的利用が容易となっている。そのため、近年のトイレブースは排せつだけでなく、スマートフォンの使用、リラックス、気分転換や着替え、といったような排せつ以外の多様な行為にも利用されている。このことにより、特に排せつ目的以外でのトイレブースの利用時間が長くなり待ち時間が増加することが問題視されている。

従来の公共トイレ空間の設備設計であれば、「SHASES206-2019 給排水衛生設備規準・同解説」[1]にある待ち時間を評価基準としたサービスレベルを用いて衛生器具の適正個数の検討を行うことがある。しかし、排せつ以外の行為により長時間利用される現状では、サービスレベルの基準を満たしていてもトイレが混雑することが増えている。また、排せつ以外の行為による混雑を考慮したトイレブースを設置するには、建築計画や経済的側面から困難であり設置個数が制限されることもある。

こうしたトイレブースの待ち時間の増加に対して実際に、扉に開閉センサーを設置し IoT 技術を用いて、ブース内に設置されたディスプレイに利用時間を表示し、利用時間を適正値に誘導する方法が開発されている。木下ら[2]の研究では、利用時間を適正値に誘導する方法として、トイレブース内に利用時間の増加を啓発するようなポスターや、ポスターに加えて利用時間に応じて LED が点灯または点滅する機器を設置し、その効果について検討した。結果として、ポスター掲示のみでは効果は小さかったが、利用時間に応じて点灯する LED を組み込んだポスターは男子トイレで平均 1.5 分程度利用時間を短縮できることが示された。

2　研究目的

設置個数を増やすことや IoT 技術、ポスター等によって利用時間の増加を直接的に喚起すること以外に待ち時間を短縮する方法として、本研究では人間の主観的な経過時間に着目した。同じ時間を過ごしても人によって感じ方が変わったり、同じ人でも何らかの要因によって時間が長く感じられたり、あっという間に感じたりすることが経験的に知られている。このような感じられる時間の長さの問題を心理学では「時間評価」という。例えば、実際の経過時間が 3 分間経ったのに、主観的な経過時間は 4 分間経過したと感じたとする。このとき、3 分間経ったと知らされると、「まだ 3 分しか経っていない」、と感じることになる。[3]このように実際の経過時間より主観的な経過時間を長く感じるようなトイレブースの構成要素を明らかにして、その要素を変更することにより主に排せつ行為以外の利用時間の増加を緩和させることが考えられる。永留ら[4]や堀田ら[5]の研究では建築空間の構成要素の色彩や表面仕上げといった視覚的要因の操作によって時間評価が変化されることが示されている。ただし、構成要素の操作により時間評価を変化させることができてもトイレブースにおいては落ち着いて利用できることが前提であり、印象や快適性を損なわないことについても検討する必要がある。また、トイレブースの研究を行うにあたって実際のトイレブースを用いて実験を行うと、条件を揃えることは難しく、臭いや音などの視覚的要因以外が実験結果に影響を与えてしまうことが予想される。そこで、ヘッドマウントディスプレイ（以下，HMD と記す）による VR 技術を用い、トイレブースを仮想空間で再現し実験参加者に提示することで、視覚的要因のみの評価が可能となる。

本研究ではトイレブースの構成要素として、実験 1 ではトイレブースの寸法、扉の位置・扉の隙間について、実験 2 では色相と明度について着目し、それらが時間評価ならびに印象評価に与える影響を明らかにすることを目的とする。

3　実験計画

3.1　実験概要

全ての実験参加者には 12 時から 18 時の時間帯に実験を実施した。実験 1 回にかかる時間は約 30 分で、同一の実験参加者が同じ日に実験を行う場合は 2 時間以上時間を空け、一日に 2 回までとした。食事、睡眠直後の実験は控えるようにした。本実験の実施にあたり、名城大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認（承認番号 2021-19）を事前に得ている。実験は名城大学研究実験棟Ⅱ環境実験室 3(R2-445)内の気温 25℃、湿度 50%に設定した人工気象室に腰掛便器(Panasonic,　CH1101UZ)を設置して実施した。

トイレブースの仮想空間を提示する HMD に HTC 社製 VIVE PRO2、HMD 装着時の位置センサーに HTC 社製 SteamVR Base Station2.0 を使用した。HMD の仕様を表 1 に示す。
トイレブースの 3 次元モデルの作成には Trimble 社製 Sketch Up Pro、仮想空間作成には Epic Games 社製 Twinmotion を使用した。

表 1　HMD の仕様

スクリーン	デュアル RGB 低残光性 LCD
解像度	片眼　2448 × 2448 ピクセル (両眼 4896 x 2448 ピクセル)
リフレッシュレート	90/120 Hz
視野角	最高 120° (水平)

3.2　測定項目

本実験では、時間評価ならびに印象評価の測定を行った。時間評価の測定には産出法と言語的見積もり法の 2 種類を用いた。[3]印象評価では SD 法を用いた。評価後、分散分析による検討を行った。

時間評価の測定では、どちらの測定方法でも実験参加者が時間を心の中で刻まないよう教示する。また、各実験の測定結果も全条件が終了するまで実験参加者にはフィードバックをしない。産出法は、あらかじめ提示された課題時間が経過したと感じるまでの時間を産出する方法である(以下、この産出された時間を産出時間とする)。本実験では課題時間を 180 秒とした。実験参加者にストップウォッチを持ってもらい実験者の「スタート」の合図でスタートボタンを押してもらい、実験参加者が 180 秒経過したと感じた時にストップボタンを押してもらうことで主観的な経過時間（時間評価）を測定する。課題時間より産出時間が短い場合、実際の経過時間より主観的な経過時間を長く感じたといえる。言語的見積もり法は、何らかの課題を実施した後、その課題に要した時間の長さを秒、分、時間などの単位で答える方法である。本実験では課題時間を 150 秒、160 秒、170 秒、180 秒、190 秒、200 秒、210 秒から無作為に抽出して実験参加者に回答させた。課題時間は実験条件ごとに変えて行う。回答時間が課題時間よりも長い場合，実際の経過時間より主観的な経過時間を長く感じたといえる。

印象評価は SD 法を用いて測定する。19 項目の形容詞対を使用して、7 段階の評価尺度により測定する。

全ての実験条件は被験者内計画により実施し、産出法の分析では、実験条件ごとの実験参加者の産出時間の平均値を算出し、分散分析を行った。言語的見積もり法の分析では、実験ごとに実験参加者に提示する時間が異なるため、実験参加者が評価した回答時間と課題時間との差の平均値を用いた。印象評価の分析では、SD 法によって得られた形容詞対ごとの得点の平均値を用いた。データ分析には統計処理ソフトウェア R を用いた。

実験 1 では、実験条件が時間評価及び、印象評価に与える影響を検討するため、三元配置分散分析を用いた。寸法条件、扉の位置、扉の隙間のそれぞれ項目から主効果、1 次の交互作用、2 次の交互作用について求め、1 次の交互作用について有意であったものは単純主効果の検定を行った。実験 2 では、一元配置分散分析を用いた。色相条件と明度条件のそれぞれ項目から主効果について求め、主効果について有意であったものは Bonferroni の方法による多重比較を行った。

両実験において、有意水準は 5%として検討し、効果量の指標としてη_p^2(偏イータ 2 乗)を用いた。

3.3　実験手順

実験参加者には HMD 装着前に初回の実験時のみ実験手順の説明をし、名城大学研究実験棟Ⅱ環境実験室 3 （R2-445)にて 5 分間ほど安静にしてもらった。その後、人工気象室（気温 25℃、湿度 50%に設定）に設置した便器に座り、トイレブースの仮想空間を表示させた HMD を実験参加者に装着して 5 分間安静にしてもらう。その後時間評価として、産出法による 180 秒間の測定を行い、続けて言語的見積もり法による測定を行う。評価後、HMD を外してもらいすぐに印象評価調査用紙に記入をしてもらい、実験を終了した。

4　実験 1　寸法・扉の位置・扉の隙間

4.1　実験条件

実験 1 では、トイレブース寸法、便器に対しての扉の位置、扉の上端下端の隙間の各 2 条件を組み合わせた計 8 条件とした。順序効果による影響を取り除くために、提示する実験条件の順序は実験参加者ごとに変更した。表 2 に実験条件を示す。ブース寸法は標準寸法を幅 900mm × 奥行き 1500mm，狭小寸法を幅 800mm × 奥行き 1300mm とした。扉寸法は幅 600mm×高さ 1800mm とし、位置は便座に座ったときに前方または側方(右側)、上端下端の隙間 100mm または 300mm とした。全ての条件で壁厚は 40mm、ブースの高さは 2200mm に統一した。図 1 と図 2 に実験条件 1 と実験条件 8 のトイレブースの仮想空間を一例として示す。

表 2　実験 1　実験条件

	寸法条件	扉の位置	扉の隙間
1	標準寸法	前方	上端あき 300mm
2	標準寸法	前方	下端あき 300mm
3	標準寸法	側方	上端あき 300mm
4	標準寸法	側方	下端あき 300mm
5	狭小寸法	前方	上端あき 300mm
6	狭小寸法	前方	下端あき 300mm
7	狭小寸法	側方	上端あき 300mm
8	狭小寸法	側方	下端あき 300mm



図 1　実験条件 1　標準寸法、前方、上端あき



図 2　実験条件 8　狭小寸法、側方、下端あき

.2　実験参加者

実験参加者は 21 歳から 22 歳の若年男性 8 名、若年女性 5 名の計 3 名とした。

.3　実験期間

実験期間は、令和 3 年 10 月 11 日から 12 月 1 日の期間に、22 歳の若年男性 5 名、若年女性 5 名の計 10 名を対象とした実験を 19 日間行った。追加実験として、令和 4 年 3 月 29 日から 5 月 31 日の期間に 21 歳の若年男性 3 名を対象とした実験を 14 日間実施した。同一の実験参加者が 2 期間をまたいで実験を行うことはなかった。

.4　実験結果

.4.1　時間評価・言語的見積もり法

寸法条件における実験参加者全員の回答時間と課題時間の差の平均値は、標準寸法は-12.3 秒、狭小は 0.33 秒で標準寸法の方が差は大きかった。三元配置分散分析の結果、寸法条件による主効果は有意であった（$F(1, 12) = 8.3077$, $p = 0.0138$, $\eta_p^2 = 0.4091$）。寸法条件と扉の隙間の交互作用は有意であった（$F(1, 12) = 5.2536$, $p = 0.0408$, $\eta_p^2 = 0.3045$）。そこで寸法条件と扉の隙間で単純主効果の検定を行った。その結果、図 3 に示すように、上端あきにおいて寸法条件間に有意差が認められた（$F(1, 12) = 23.1201$, $p = 0.0004$, $\eta_p^2 = 0.6583$）。言語的見積もり法の分析結果からは、扉の隙間上端あき条件において狭小寸法は標準寸法のトイレブースに比べ実際の経過時間より主観的な経過時間を長く感じることが示された。

4.4.2　印象評価「快適な・不快な」

図 4 に「快適な-不快な」に対する評価の平均値と標準偏差を示す寸法条件における実験参加者全員の「快適な・不快な」に対する評の平均値は、標準寸法は 3.77、狭小は 4.52 で狭小寸法のほうが「快な」側に評価された。三元配置分散分析の結果、寸法条件による効果は有意であった（$F(1, 12) = 10.8000$, $p = 0.0065$, $\eta_p^2 = 0.4737$「快適な・不快な」に対する印象評価の分析結果から、寸法条件の効果より狭小寸法は標準寸法のトイレブースに比べ不快であると価された。これらのことから寸法は「快適な・不快な」の評価に影を与えていると示された。

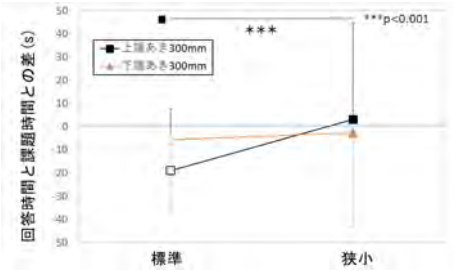


図 3　上端あきにおいて寸法条件間の回答時間と課題時間との差（言語的見積もり法）

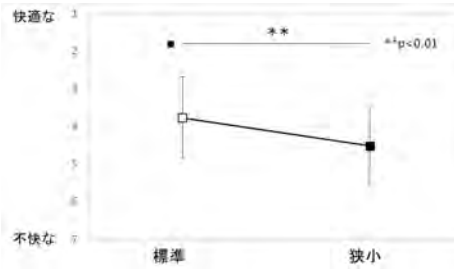


図 4　寸法条件間の「快適な・不快な」の平均値と標準偏差

4.4.3　印象評価「鮮やかな・くすんだ」

図 5 に「鮮やかな・くすんだ」に対する評価の平均値と標準偏差を示す。扉の位置条件では、前方は 3.85、側方は 3.58 で扉側方のほうが「くすんだ」側に評価された。三元配置分散分析の結果、扉の位置による主効果は有意であった（$F(1, 12) = 7.2809$, $p = 0.0194$, $\eta_p^2 = 0.3776$）。「鮮やかな・くすんだ」に対する印象評価の分析結果から、扉の位置条件による主効果より扉位置側方は扉位置前方のトイレブースに比べくすんでいると評価された。これらのことから扉の位置は「鮮やかな・くすんだ」の評価に影響を与えていると示された。

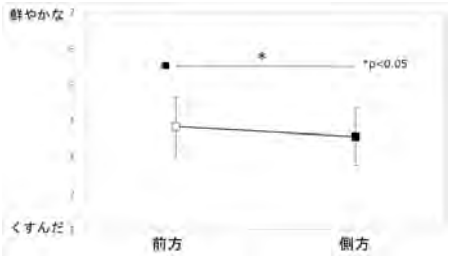


図 5　扉の位置条件間の「鮮やかな・くすんだ」の平均値と標準偏差

5　実験 2　色相・明度

5.1　実験条件

本実験 2 では、トイレブースの壁・扉、床面、天井の色相を変化させた 3 条件の空間と明度を変化させた 5 条件の空間の計 8 条件とした。順序効果による影響を取り除くために、提示する実験条件の順序は実験参加者ごとに変更した。色相条件を表 3 に示す。トイレブースの壁・扉、床面、天井全てが赤(RGB : 255, 0, 0)、青(RGB : 0, 0, 255)、緑(RGB : 0, 255, 0)の空間、全 3 条件とした。明度条件を表 4 に示す。トイレブースの壁・扉、床面、天井全てが白色(RGB:255, 255, 255)(以下白)、全てが黒色(RGB: 0, 0, 0) (以下黒)、床のみ黒色(以下床黒)、天井のみ黒色(以下天井黒)、 壁・扉のみ黒色(以下壁・扉黒)の空間、全 5 条件とした。図 6 と図 7 に緑と天井黒のトイレブースの仮想空間を一例として示す。

5.2 実験参加者

実験参加者は 22 歳の若年男性 8 名、若年女性 2 名の計 10 名とした。

5.3　実験期間

実験は令和 4 年 6 月 30 日から 11 月 14 日の期間に 34 日間実施した。

5.4　実験結果

5.4.1　時間評価・言語的見積もり法

図 8 に言語的見積もり法による回答時間と課題時間との差の平均値と標準偏差を色相ごとに示す。色相条件における参加者全員の回答時間と課題時間との差の平均値は、赤色は最も負の値に大きい-11.6 秒、青色は最も正の値に大きい 33.6 秒、緑色は 15.7 秒であった。一元配置の分散分析の結果、色相条件による主効果は有意であった

表 3　実験 2　実験条件(色相)

	色相
1	赤(RGB : 255, 0, 0)
2	青(RGB : 0, 0, 255)
3	緑(RGB : 0, 255, 0)

表 4　実験 2　実験条件(明度)

	壁・扉	床面	天井
1.白	白 (RGB:255, 255, 255)	白	白
2.床黒	白	黒 (RGB:0, 0, 0)	白
3.天井黒	白	白	黒
4.壁・扉黒	黒	白	白
5.黒	黒	黒	黒



図 6　色相条件　緑



図 7　明度条件　天井黒

(F(2, 18) = 4.2974, p = 0.0298, η_p^2 = 0.3232)。そこで色相間での多重比較を行った結果、赤色と青色の条件間で有意差が認められた(red < blue, p = 0.0364)。赤色と緑色の条件間では有意差は認められなかったが、有意確率が 10%未満であった(red = green, p = 0.0676)。言語的見積もり法の分析結果から、青色は赤色のトイレブースに比べ主観的な経過時間が長くなることが示された。このことから、色相条件は時間評価に影響を与えていると示された。

図 9 に言語的見積もり法による回答時間と課題時間との差の平均と標準偏差を明度ごとに示す。明度条件における実験参加者全員の回答時間と課題時間との差の平均は、白の条件では最も正の値に大きい 34 秒、床黒の条件では最も正の値に小さい 8 秒、天井黒の条件では 17 秒、壁・扉黒の条件では 25 秒、黒の条件では 13 秒であった。一元配置分散分析の結果、明度条件による主効果は有意であるとは言えなかった(F(4, 9) = 1.1818, p = 0.3352)。言語的見積もり法の分析結果から、明度条件は時間評価に影響を与えていないと示された。

5.4.2　印象評価「さわやかな・うっとうしい」

図 10 に「さわやかな・うっとうしい」に対する評価の平均値と標準偏差を色相ごとに示す。色相条件における実験参加者全員の「さわやかな・うっとうしい」に対する評価の平均値は、赤色は 2、青色は 3、緑色は 4.1 で緑色が最も「さわやかな」側に、赤色が最も「うっとうしい」側に評価された。一元配置分散分析の結果、色相による主効果は有意であった(F(2, 18) = 4.8916, p = 0.0201)。そこで色相間での多重比較を行った結果、赤色と緑色の条件間で有意差が認められた(red < green, p = 0.0073)。「鮮やかな・くすんだ」に対する印象評価の分析結果から、赤色は緑色のトイレブースに比べ有意にうっとうしい印象を与えていると示された。これらのことから、色相条件は「さわやかな・うっとうしい」の評価に影響を与えていると示された。

図 11 に「さわやかな・うっとうしい」に対する評価の平均値と標準偏差を明度ごとに示す。明度条件における実験参加者全員の「さわやかな・うっとうしい」に対する評価の平均値は、白は 4.8、床黒は 4.9、天井黒は 4.8、壁・扉黒は 4、黒は 3.5 で床黒が最も「さわやかな」側に、黒が最も「うっとうしい」側に評価された。一元配置分散分析の結果、明度による主効果は有意であった(F(4, 36) = 3.4478, p = 0.0175, η_p^2 = 0.2770)。そこで明度間の多重比較を行った結果、白と黒、天井黒と黒の条件間で有意差が認められた
(順に white > black, p = 0.0037、ceiling > black, p = 0.0063)。「さわやかな・うっとうしい」に対する印象評価の分析結果から、黒は白、床白のトイレブースに比べ有意にうっとうしい印象を与えていると示された。このことから、明度条件は「さわやかな・うっとうしい」の評価に影響を与えていないと示された。

5.4.3　印象評価「広い・狭い」

図 12 に「広い・狭い」に対する評価の平均値と標準偏差を色相ごとに示す。色相条件における実験参加者全員の「広い・狭い」に対する評価の平均値は、赤色は 3.2、青色は 2.6、緑色は 3.7 で緑色が最も「広い」側に、青色が最も「狭い」側に評価された。一元配置分散分析の結果、色相による主効果は有意であるとは言えなかったが、有意確率は 10％未満であった(F(2, 18) = 3.4268, p = 0.0548, η_p^2 = 0.2758)。このことから、色相条件は「広い・狭い」の評価に影響を与えていないと示された。

図 13 に「広い・狭い」に対する評価の平均値と標準偏差を明度ごとに示す。明度条件における実験参加者全員の「広い・狭い」に対する評価の平均値は、白は 4.3、床黒は 4.5、天井黒は 3.7、壁・扉黒は 3.7、黒は 2.2 で床黒が最も「広い」側に、黒が最も「狭い」側に評価された。明度による一元配置分散分析の結果、明度による主効果は有意であった(F(4, 36) = 5.5872, p = 0.0013, η_p^2 = 0.3830)。そこで明度間での多重比較を行った結果、白と黒、床黒と黒、天井黒と黒、壁・扉黒と黒の条件間で有意差が認められた(順に floor > black, p = 0.0421、ceiling > black, p = 0.0041、wall > black, p = 0.0279、white > black, p = 0.0279)。「広い・狭い」に対する印象評価の分析結果から、黒は他の 4 条件のトイレブースに比べ有意に狭い印象を与えていると示された。また、床黒は白のトイレブースのほうが有意に広い印象を与えていると示された。これらのことから、色相条件は「広い・狭い」の評価に影響を与えていると示された。

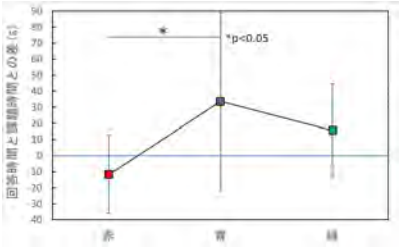


図 8　色相条件間の回答時間と課題時間との差
(言語的見積もり法)

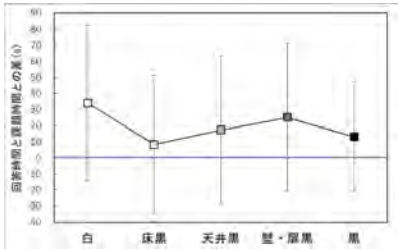


図 9　明度条件間の回答時間と課題時間との差
(言語的見積もり法)

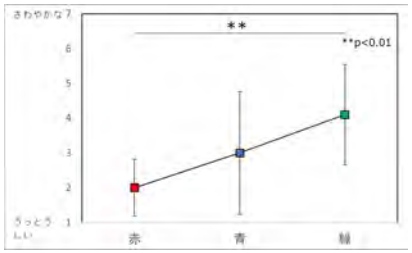


図 10　色相条件間の「さわやかな・うっとうしい」の平均値と標準偏差

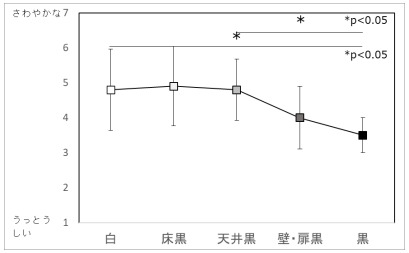


図 11　明度条件間の「さわやかな・うっとうしい」の平均値と標準偏差

6　まとめ

6.1　総括

本研究ではトイレブースの構成要素として、実験 1 ではトイレブースの寸法、扉の位置・扉の隙間について、実験 2 では色相と明度について着目し、それらが時間評価ならびに印象評価に与える影響を明らかにすることを目的とした。

実験 1 では、時間評価の観点からは、寸法条件では、トイレブースの寸法が狭くなるほど主観的な経過時間が長くなることが示された。石井の研究[4]では、トイレブースの広い寸法（幅 1200mm × 奥行き 1800mm）は主観的な経過時間を短く感じることを示した。この結果と本研究から、トイレブースの寸法が狭くなるほど主観的な経過時間は長くなることが示唆された。時間評価の観点から言うと、寸法条件では、トイレブースの寸法が狭くなるほど主観的な経過時間が長くなることが考えられる。扉の位置条件では、主効果、交互作用ともに有意差は見られなかったため、時間評価に影響を与えていないと示された。また、扉の隙間が時間評価に与える可能性も示唆された。印象評価の観点からは、寸法条件では、トイレブースの寸法が狭くなるほど肯定的な印象は得られないことが示された。これらのことから、待ち時間を短縮させる目的としてはトイレブースの寸法は狭くするほうが好ましいが、印象を損ねてしまう可能性があるため、寸法においては標準寸法相当の大きさにするのが望ましいと考えられる。

実験 2 では、時間評価の観点からは、色相条件では、青色のトイレブースでは実際の経過時間より主観的な経過時間が長くなることが示された。永留らの研究[4]では、青色壁面は赤色壁面に比べて主観的な経過時間が長くなることが示されている。本研究でもトイレブースにおいて、同様の結果が示された。明度条件では、主効果による有意差は見られなかったため、時間評価に影響を与えていないと示された。印象評価の観点からは、色相条件では、緑色は肯定的な印象が得られることが示された。逆に赤色は否定的な印象を多く得た。青色は肯定的な印象も否定的な印象も得られないことが示された。明度条件では、白や床黒条件は広さ感・明るさ感に関して肯定的な印象が得られることが示された。逆に黒は広さ感・明るさ感に関して否定的な印象が得られることが示された。これらのことから、待ち時間を短縮させる目的としてはトイレブースの色相は青色が好ましく、印象面においても悪い印象は得られないため、色相においては青色にするのが望ましいと考えられる。

本研究の二つの実験からは、寸法は狭くしすぎず、青色の空間にすることが、印象評価を損ねず主観的な経過時間を長く感じさせ、トイレブースの待ち時間の短縮に繋がることが考えられる。

6.2　今後の展望

本研究においては、性差や季節差、具体的な公共施設の想定、利用者側の要因（荷物の量やトイレブース内での行動）については研究の対象にしていない。また、HMD を使用した実験であることから実空間ではなくスクリーンを見ることによって色相や明度の感じ方が実空間と異なることが考えられる。今回の問題点を解決するために、今後は条件ごとの分析だけはなく、実験参加者側の要因や HMD を使用することの妥当性に関しても検討していく必要がある。

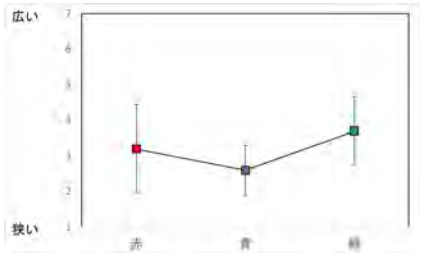


図 12　色相条件間の「広い・狭い」の平均値と標準偏差

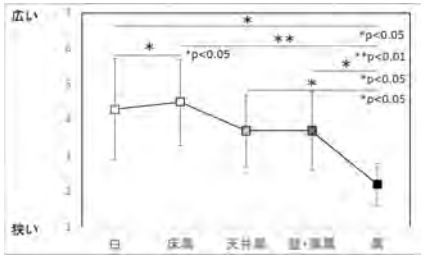


図 13　明度条件間の「広い・狭い」の平均値と標準偏差

参考文献

1) SHASE-S 206-2019 給排水衛生設備規準・同解説 pp.213-228
2) 木下芳郎，疋田篤史，高橋未樹子：「公共トイレにおける衛生器具適正数検討に関する研究　その 6：長期化しているトイレブース占有時間を適正値に誘導する方法の開発」，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.231-232(2022.9)
3) 辻正二 監修：時間学概論，恒星社厚生閣，pp.121-141(2008)
4) 永留芙美, 大井尚行, 高橋浩伸：「異なる壁面色が及ぼす感覚時間の変化」，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.57-58(2010.9)
5) 堀田修吾，苅谷健司，杉山真樹，恒次祐子：「待合室を想定した木質空間における時間評価について」，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.199-200(2019.9)
6) 石井仁：「トイレブースの内装色と寸法の違いが感覚時間ならびに印象評価に及ぼす影響 ヘッドマウントディスプレイを用いた仮想空間による検討」，第 44 回人間−生活環境系シンポジウム報告集,pp. 127-128(2020)

空気熱源モジュールヒートポンプを併用した地中熱利用ヒートポンプシステムの長期運転性能の検証

Commissioning of a Ground Source Heat Pump System Combined with Air Source Modular Heat Pumps Based on Long-Term Operating Data

金子 知可*1

Chika KANEKO

With the urgent need to achieve carbon neutrality, there are growing expectations for ground source heat pump (GSHP) systems. This study analyzed the long-term operational performance of a GSHP in combination with a modular-type ground source heat pump (ASHP) installed at a university in a warmer region of Japan. As results, in warmer regions, as the cooling load tends to be greater than the heating load and the electrical consumption heat from the GSHP is added to the rejection heat to the ground, the ground heat balance is more likely to be unbalanced than it would be in colder regions. Predominant rejection into the ground for extraction from the ground resulted in an increase in ground temperature and a decrease in the SCOP of the GSHP during cooling periods. However, a decrease in the cooling load in one season considerably reduced the ground temperature during cooling in the following season. Because the module-type ASHP was able to quickly control its thermal output, it unexpectedly reacted HVAC load fluctuations before the GSHP output control. This lowered the load factor of the GSHP and caused the ASHP to start and stop repeatedly at extremely low loads. TRNSYS simulations were conducted to propose improvements in the operation of GSHP at the target site and to identify points to be considered when designing the system. When the control system was introduced to prioritize the lower heat sink/source temperature among GSHP and ASHP of the same performance, the combined system was more energy efficient than the ASHP alone.

Keywords : *Ground source heat pump, Air source heat pump, Energy balance, Long-term analysis, Warm region climate*
地中熱利用ヒートポンプチラー, 空気熱源ヒートポンプチラー, エネルギーバランス, 長期分析, 温暖地域

1. はじめに

1.1. 研究背景

気候変動の深刻化に伴い、カーボンニュートラルの早期実現が急務となっている中、再生可能エネルギーとして地中熱利用ヒートポンプ(GSHP)システムに対する期待が高まっている。地中温度は年間を通して外気よりも温度が安定している。GSHP システムは、地中をヒートシンクまたはヒートソースとして、圧縮冷凍サイクルを行うシステムである。GSHP は、使用する外部熱交換器の種類により、いくつかに分類される[1]。例えば、クローズドループの配管システムをボーリング孔に埋設する地中熱ヒートポンプ(Ground-Coupled Heat Pumps : GCHP)、オープンループの井戸を介して地下水や帯水層を利用する地下水熱ヒートポンプ(Ground Water Heat Pumps : GWHP)[2–4]、クローズドループまたはオープンループシステムで湖や川に接続する表層水熱ポンプ(SWHP)[5,6]などである。GSHP は、地中温度の特性を活かして、蒸発温度を高く、凝縮温度を低くすることで、従来の空気熱源ヒートポンプ(ASHP)よりも高いエネルギー効率で運転でき、そのライフサイクルにおける環境負荷も低減される[7–9]。

2000 年代以降 GSHP による地中熱利用が増加している[10]。特に外気温度が氷点下となり、ASHP での暖房ができない寒冷地域で GSHP の導入が進んできた[11]。一例として、Safa ら[12]は、カナダのオンタリオ州に建設されたモデルハウスに水平型地中熱交換器を設置し、GSHP の性能データを解析した TRNSYS シミュレーションの結果を報告している。

その一方で、近年、温暖な地域での GSHP を解析した研究報告が増えている。Karabacak ら[13]はトルコのデニズリで約 5 ヶ月間 GSHP をモニタリングし、その冷房性能を実験的に検証している。Pulat らもトルコのブルサで GSHP の性能を実験的に検証し、様々なシステムパラメータを考慮し、暖房時と冷房時の性能係数(COP)値を算出している[14,15]。また, Kim ら[16]は, 韓国・釜山の大学に設置された GSHP について、約 18 ヶ月間の性能分析を行った。

しかし、温暖な地域での長期間の運転解析の事例は少ない。Michopoulos らは、ギリシャのテッサロニキの市庁舎に設置された垂直型地中熱交換器と GSHP の約 7 年半の運転データを分析した。彼らは、暖房負荷に対して冷房負荷が過大であるために地中温度が時間とともに上昇し、COP が冷房期間中に低下し、暖房期間中に上昇することを発見した[17,18]。同様に、Luo ら[19]は, ドイツ・ニュルンベルクのオフィスビルに設置した GSHP システムの約 3 年半のモニタリング結果を報告し、冷房と暖房負荷のアンバランスによる効率の低下を指摘している。

暖房負荷が冷房負荷を上回る寒冷地では、このアンバランスの解決策として、ソーラーアシスト[20,21]や燃焼式補助熱源の設置[22]などの方法が挙げられる。しかし、冷房負荷が暖房負荷を上回るような温暖な気候では、追加のヒートシンクを設ける必要がある。GSHP システムに、空冷式または水冷式のラジエーターを追加で組み込むことも可能である[17,18,23]。しかし、こうしたシステムは、特に冷房負荷と暖房負荷の差が大きい場合、過度に複雑化する傾向がある。

さらに、寒冷地であれ温暖地であれ、大規模な建物のすべての暖房、換気、空調(HVAC)負荷を GSHP で賄うことは、地中の熱ポテンシャルと初期コストの面で非現実的であり、そのような場合、熱源機器と GSHP を分離した方がシンプルとなる。Vanhoudt ら[2]は、GSHP の補助熱源としてボイラーを導入したベルギーの病院の事例を報告している。彼らの研究では、ボイラーの使用時間と GSHP の使用時間が明確に分けられており、相互の影響については検討されていない。Urchueguia ら[24,25]は、GSHP の補助熱源として ASHP を設置した事例を報告している。しかし、GSHP と ASHP を使い分けており、組み合わせたシステムの性能は不明であった[9]。

1.2. 研究目的

日本でも GSHP の導入が進んでおり，2019 年度時点で累計 3,000 台近くの GSHP 導入が報告されている[26]。しかし、それらを取り巻く研究の多くは事例研究やシステムシミュレーションにとどまっており、GSHP と補助熱源の複合システムを長期間の実測データで検証した報告は非常に少ない。

若山ら[27–29]は、GWHP の補助熱源としてスクリューチラー、吸収式冷凍機、ボイラーを用いた自治体ビルと補助熱源として ASHP を用いた病院の設計段階でのシミュレーションを実施している。坂本は、GSHP と ASHP を併設して小規模な会議室を担当することで、GSHP の優位性をアピールしている。このシステムでは、熱交換器は異なるものの、両システムに同じタイプのヒートポンプを使用し、GSHP の優位性を実証している[30]。しかし、熱源の制御方法については触れられていない。

また、堀池らと金田一らは、温暖地である福岡県の商業施設において、モジュラー型 ASHP を補助熱源とする GSHP システムの約 1 年間の運転結果[31]と約 3 年間の運転結果[32]を報告している。これらの報告では、GSHP のシステム性能係数（SCOP）が ASHP より高いことが示されているが、ASHP の SCOP が定格値より低いままであることについては触れられていない。後者の報告書では、冷房負荷が暖房負荷より大きいために、採放熱のバランスが崩れ、地中温度が上昇したことが指摘されている。

日本の温暖な地域で GSHP と補助熱源システムを組み合わせる場合、独立した熱源装置、特に普及していて経済的なモジュール式 ASHP を採用する可能性が高い。しかし、前述のように、GSHP とモジュール式 ASHP を組み合わせたシステムにおいて、機器や制御技術の相互影響に関する研究はほとんどない。さらに、長期間の運転データを調査した研究もほとんどない。

そこで本研究では、日本の温暖な地域の大学施設に設置された GSHP とモジュール式 ASHP を組み合わせたシステムの長期運転性能を分析し、システムの問題点を明らかにすることを目的とする。さらに、TRNSYS シミュレーションによって、GSHP システムと ASHP との運転制御手法の最適化を行う。

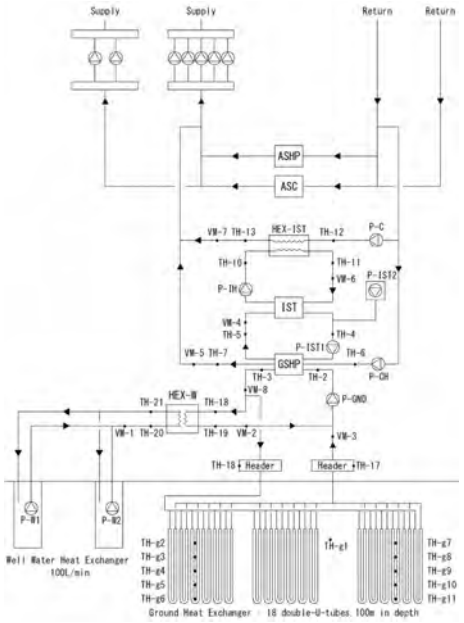


図 1　システム系統図

表 1　熱源機器表

記号	名称	運転モード	出力 [kW]	一次側 温度[℃] 入口温度	一次側 温度[℃] 出口温度	一次側 流量 [ℓ/min]	二次側 温度[℃] 入口温度	二次側 温度[℃] 出口温度	二次側 流量 [ℓ/min]	動力 [kW]	COP [-]	SCOP [-]
GSHP	地中熱利用ヒートポンプチラー	追いかけ運転	162	28.0	33.0	565	17.0	7.0	232.0	59.4	2.73	2.22
		暖房運転	186	10.0	5.0	379	35.0	45.0	266.0	59.4	3.13	2.57
		氷蓄熱運転	110	28.0	33.0	409	-2.0	-5.0	525.0	59.4	1.85	1.44
ASHP	空気熱源ヒートポンプチラー	冷房運転	1800	-	-	-	17.0	7.0	2754	492	3.66	3.66
		暖房運転	1800	-	-	-	35.0	45.0	2754	492	3.66	3.66
ASC	空気熱源チラー	冷房運転	450	-	-	-	17.0	7.0	644	123	3.66	3.66

2. 対象建物

＊1 名城大学理工学研究科建築専攻　修士課程

主査：吉永　美香
副査：岡田　恭明
副査：石井　仁

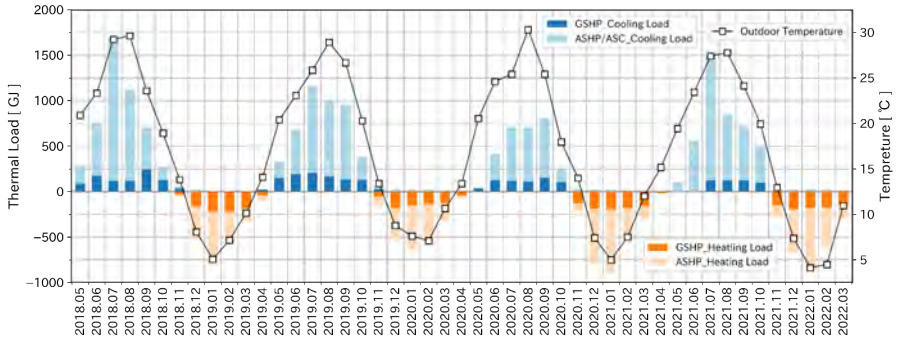


図 2　月別の建物負荷と外気温度

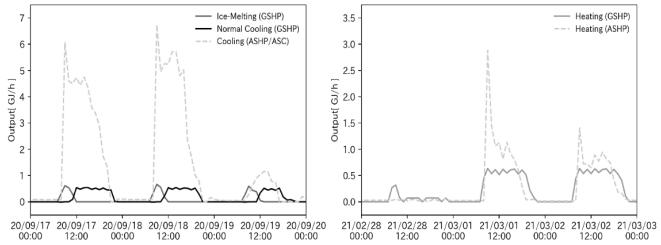


図 3　GSHP と ASHP/ASC の冷房と暖房の出力

2.1.　対象システム

対象建物は、愛知県名古屋市に建つ名城大学ナゴヤドーム前キャンパスとする。2016 年に竣工し、建築面積は 17,937 ㎡、延床面積は 32,667 ㎡である。キャンパスは 4 棟が建ち、主に文系の学部・研究科で使用されている。教育施設の主な利用時間は 9 時から 19 時までだが、北棟 1 階にあるレストランと売店は 21 時まで営業している。

図 1 にシステムの概要、表 1 に熱源機の機器表を示す。熱源機として地中熱ヒートポンプチラー(GSHP)、モジュール型空気源ヒートポンプチラー(ASHP)、モジュール型空気源チラー(ASC)が設置されている。

GSHP システムには、井水熱交換器と土壌熱交換器がある。前者は 2 本の井戸で構成され、一方は集水井で地下水を汲上げ、熱交換後にもう一方の放水井で放水する。集水井と放水井は定期的に入れ替えられる。後者は、有効深さ約 100m の二重 U 字管 18 本で構成され、井水熱交換器と土壌熱交換器の回路は並列に配置されている。また、井水熱と土壌熱の 2 つを使い分ける制御は組み込まれておらず、成り行きで各回路の流量が決まっている。

また、GSHP には冷房時のみ使用される氷蓄熱システムが搭載されている。GSHP の冷房運転モードは、氷蓄熱運転、氷蓄熱の放熱運転、追いかけ運転に分類される。氷蓄熱運転は、安価な夜間電力を利用し、夜 22 時から翌朝 8 時まで稼働している。昼間の冷房は、追いかけ運転よりも氷蓄熱運転を優先させている。暖房時は、温水を作る通常の暖房運転のみである。GSHP に冷水、温水、氷蓄熱ブライン、地上の熱交換器水を送るポンプ P-CH、P-IST1、P-GND は、いずれも定流量である。

ASHP と ASC は、補助熱源として使用するモジュール型の空気熱源ヒートポンプチラーと空気熱源チラーである。これらは、特に部分に切り替えて、冷房と暖房の両方の運転が可能である。ASC は、ASHP とほぼ同じ性能だが、冷房運転しかできない。

負荷条件下での COP が高く、設置面積が小さいため、日本の温暖な地域で建物の規模に関係なく広く使われている。ASHP は季節ごとに切り替えて、冷房と暖房の両方の運転が可能である。ASC は、ASHP とほぼ同じ性能で、冷房専用である。

ASHP/ASC の増段は、2 次側流量で行っている。二次側はインバータを搭載した 5 台の二次側ポンプで吐出圧一定制御で運転されている。

2.2.　評価指標・分析データ・分析期間

また、表 1 には、熱源機器の各モードにおける定格 COP と、ポンプの消費電力を考慮した熱源システムとしての定格 SCOP を示した。エネルギー効率の評価には、以下に定義する SCOP を用いた。ASHP はポンプを内蔵しているため、本研究では COP と SCOP は同じ値とみなす。SCOP は以下のように算出した。

ここで、Q は熱出力(kJ)、Whp は GSHP 単体の消費電力(kWh)、Wp は熱水力機器の消費電力(kWh)である。

分析対象となる主なデータソースは、建物のエネルギー管理システム(BEMS)と、オプションで GSHP の監視システムである。前者は主に、GSHP、氷蓄熱槽、または ASHP/ASC と建物間の温度、流量、熱量、消費電力を計測している。BEMS の記録間隔は 1 時間である。

後者は、主に GSHP と地上の熱交換器に関する温度と流量を計測すし、記録間隔は 1 分である。これらに加え、名古屋地方気象台で 1 時間ごとに記録された外気温度も使用した [33]。

分析対象期間は、施設が安定稼働を開始した 2018 年 5 月から 2022 年 3 月までの約 4 年間である。

3.　データ分析

3.1.　GSHP の COP の経年変化

図 2 に、月別の冷暖房負荷と平均外気温度の推移を示す。原則として夏期は冷房モード、冬期は暖房モードで運転していたが、サーバルームの冷房のため、冬期も少量の冷房負荷があった。冬季の冷房は ASC から供給された。春期と秋期の冷房が不要な期間はそれぞれ 1 ヶ月未満と短かった。分析期間中の平均冷房負荷は 362GJ/月、暖房負荷は 218GJ/月であり、冷房負荷は暖房負荷の 1.7 倍であった。ただし、年単位で見ると、冷房負荷と暖房負荷の比率は年によって大きく変動していた。2018 年、2019 年は 2.1 倍、2020 年は 1.1 倍、2021 年は 1.6 倍と大きくなった。背景には、2020 年に COVID-19 の影響で施設の稼働率が大幅に低下し、2021 年には運転条件を変更して一部稼働を再開したことが挙げられる。また、GSHP は冷房負荷の 17.9%、暖房負荷の 32.0%を供給していた。建物負荷のうち GSHP が占める割合が、冷房時よりも暖房時の方が高いのは、暖房負荷の方が少なく、かつ、GSHP の運転が優先されるためである。

図 3 に、典型的な 3 日間の GSHP と ASHP/ASC の冷房と暖房の出力を示す。冷房時は、GSHP の出力が不足したため、ASHP/ASC が GSHP の放熱運転とほぼ同時に運転を開始した。放熱運転が終了すると、追いかけ運転はと移行し、施設の閉館時間である 19 時または 21 時まで継続された。暖房期間では、朝の動作は冷房期間と同様であったが、暖房負荷の少ない夕方の時間帯は GSHP が単独で運転した。

図 4 に、GSHP のエネルギー収支を示す。GSHP の平均出力は、冷房 621GJ/年、暖房 737GJ/年で、暖房出力が冷房出力より 18%以上大きいことがわかる。冷房出力は、氷蓄熱モードで 215GJ/年、通常冷房モードで 378GJ/年であり、約 1:2 の割合となった。

しかし、冷房運転の放熱量は 791GJ/年(氷蓄熱運転 293GJ/年、追いかけ運転 498GJ/年)、暖房時の採熱量は 460GJ/年であり、放熱量は採熱量の 1.7 倍であった。つまり、冷房時と暖房時で建物負荷と地中熱交換量の大小関係が逆転していることがわかる。これは、冷房時の放熱量は熱出力と投入電力の和になるのに対し、暖房時の採熱量は熱出力と投入電力の差になるためである。このことから、建物負荷でている。しかし、放熱量は、2018 年から 2021 年まで毎年、それぞれ 582.1、498.9、648.6、611.1GJ/年と比較的一定している。

図 5 の下段に、2018 年の SCOP とそれ以降の各年度の SCOP の差を示す。2018 年の月平均地中温度は、夏に最高 27.8℃、冬に最低 13.2℃となった。地中熱交換がない場合、地中温度の年平均値は、この地域の平均外気温度である約 16℃とほぼ同じになる。このことから、2018 年以前の GSHP の運転により、2018 年の地中温度はすでに平年よりかなり高くなっていたことがわかる。さらに、2019 年の夏は前年よりも放熱量が大きかったため、最高地中温度は 29.3℃まで上昇した。このため、2019 年の冷房期間の SCOP は、前年より 0.1 以上低くなった。また、地中温度が上昇したにもかかわらず、2019 年の暖房期間の SCOP は前年度より約 0.1 低くなった。これは、2～3 月に井戸ポンプの故障が発生し、井戸の熱交換が減少し、結果的にボアホールへの放熱が増加したためである。

2019 年以降は放熱量が年々減少したため、最高地中温度は 2020 年に 26.6℃、2021 年に 24.2℃と順調に低下していった。これに伴い、冷却時の SCOP は 2020 年に 2018 年相当まで回復し、2021 年にはさらに 0.1 以上改善された。最低外気温度は、2019 年に 13.4℃、2020 年に 14.4℃、2021 年に 14.5℃と緩やかに上昇した。しかし、最低気温の変化は最高気温の変化より小さく、暖房 SCOP に顕著な影響はなかった。

採放熱量の年間比率は、2018 年、2019 年は放熱量が採熱量の約 2 倍であったが、2020 年、2021 年はほぼ等しくなった。2020 年と 2021 年は地中温度が安定する適切な比率だったが、それ以前の運用は、GSHP の冷房による放熱量が暖房による採熱量よりはるかに大きく、土壌の高温化を招くという点で不適切であったと言える。

採放熱のアンバランスが数年続くと、冷房時の SCOP が暖房時の SCOP に比べて低下することはいくつかの研究で報告されている [17-19,32] が、当該年度以前の放熱量によって冷房時の SCOP が変化することはほとんど報告されていない。本研究では、冷房負荷が変化し、採熱量と放熱量の差が小さくなるにつれて冷房時の期間平均 SCOP が経年的に改善されることを確認した。

3.2.　GSHP と ASHP/ASC の効率比較

図 6 に、GSHP と ASHP/ASC の各運転モードにおける年間平均 SCOP を示す。冷房時の GSHP の SCOP（氷蓄熱運転と追いかけ運転）は 2.5～2.7 で、ASHP/ASC の 4.2～4.4 より低い値になっている。暖房時の SCOP は、GSHP が 2.9～3.0、ASHP が 3.1～3.3 であったが、ASHP の方が高い SCOP を維持した。冷房時、暖房時ともに ASHP は GSHP より高い SCOP を維持していることから、本研究のシステムでは GSHP は ASHP/ASC よりエネルギー効率が悪いと結論づけられる。

その理由として 2 つ挙げられる。1 つは、熱源機そのものの定格 COP の違いである。GSHP の定格 SCOP は、氷蓄熱モードが 1.44、通常の冷房モードが 2.22、通常の暖房モードが 2.57 であるのに対し、ASHP/ASC は冷房・暖房モードともに 3.66 である。日本では、

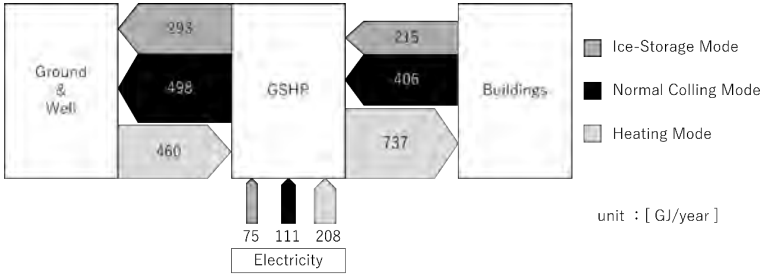


図 4　GSHP のエネルギーバランス

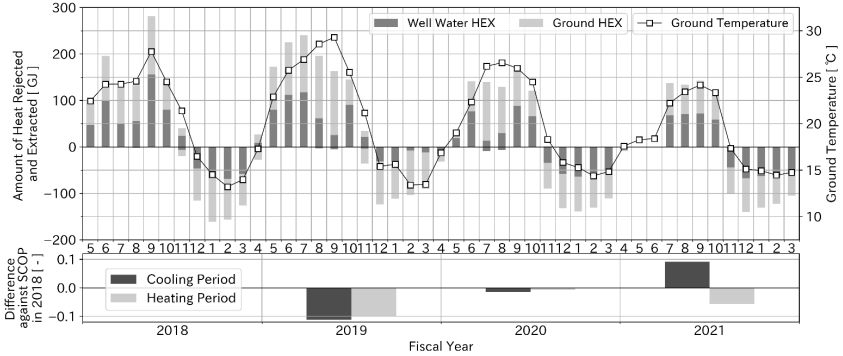


図 5　GSHP の採熱量・放熱量と SCOP への影響

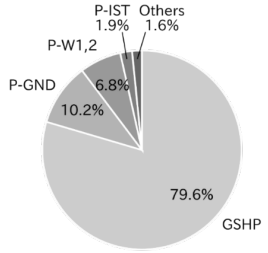


図 6　運転モード別の期間平均 SCOP

図 7　GSHP システムの消費電力量の内訳

は GSHP よりも高くなることがある。対象システムも同様であった。しかし、導入した GSHP の定格 COP が ASHP より低いというのは、省エネの観点からは間違った機器選定であったと言える。対象建物の建設に当たり、地中熱利用設備に対する国の補助金によってイニシャルコストがかなり削減された。エネルギー効率よりも経済的な観点が優先されたと考えられる。

2 つ目の理由は、GSHP が熱輸送のために相当量の電力を消費していたことである。図 7 に GSHP システムの消費電力量の内訳を示す。GSHP 本体が 79.6%、残り 18.9%は搬送系で消費している。最も経路の長いポンプ P-GND の消費電力が最も大きく、次いで井戸の開放回路であるポンプ P-W1,2 であった。氷蓄熱運転時だけでエネルギー消費の内訳を確認すると、P-IST1 が P-W1,2 よりも大きくなっていた。

図 5,6 と表 1 より、2018 年、2019 年の SCOP は、冷房時の地中温度が高いため、2020 年、2021 年に比べ低くなっていることがわかる。また、氷蓄熱運転や追いかけ運転でも、定格値より高い SCOP が

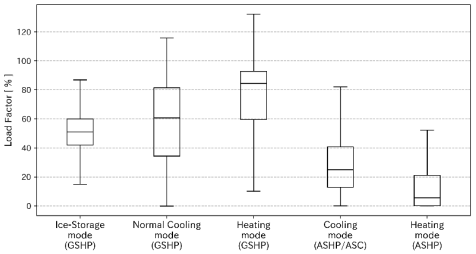


図 8　運転モード別の負荷率

図 9　ASHP/ASC の負荷率と SCOP の分布

図 10　ボアホールの出入口温度と平均地中温度



図 11　外気温度と地中からの還温度の関係

得られている。そこで、図 8 に GSHP と ASHP/ASC の運転モードによる負荷率を示す。箱の上端と下端はそれぞれ 75%値と 25%値を表し、ひげの上端と下端はそれぞれ最大値と最小値を表す。箱の中の横線は中央値を表す。GSHP の結果から、冷房運転時の平均負荷率は約 50～60%と非常に低いことが分かった。さらに、氷蓄熱運転では GSHP の出力が定格出力に達することはなかった。運転時間の 4 分の 1 は、追いかけ運転で約 0～34%という低負荷率での稼働に費やされていた。原因究明のため、機器と BEMS の制御設定をすべて調査した。その結果、冷水とブラインの出口温度の設定ミスや、それぞれの流量の調整不良が見つかった。これらの問題は、本研究の解析期間終了後に解決された。結論として、冷房時に蒸発器出口温度を誤って高く設定したことが、GSHP の負荷率を下げ、SCOP の改善に寄与したことがわかった。

3.3.　GSHP と ASHP/ASC の切り替え時の不具合

図 8 の ASHP/ASC では、75 パーセンタイルが 50%を下回っており、GSHP よりもさらに低い負荷率であることが確認された。特に重大な問題として、極端に低い負荷率(10%以下)の頻度が異常に高いことであった。図 9 に、日別の ASHP/ASC の冷房時と暖房時の負荷率および SCOP の分布を示す。ASHP/ASC の場合、負荷率 10%以上で

響しないというモジュール式ASHP/ASCの製品特性と一致している。しかし、冷房と暖房の定格 SCOP は同じ 3.66 であるが、冷房時の方が高いことが確認できる。これは、一部の施設が夜間まで使用されていたことに起因すると考えられる。夜間の外気温度が低いため、冷房時の SCOP が高くなり、暖房時の SCOP が低くなった。

図 8, 9 は、冷暖房時ともに負荷率 10%以下での運転があったことを示している。冷房期間では、負荷率 10%（LF10%）以下で運転していた時間が 19%、LF1%以下で運転している時間が 7%であった。暖房時はさらに多く、LF10%以下が 58%、LF1%以下が 37%であった。原因究明の結果、主熱源である GSHP と補助熱源である ASHP/ASC の運転制御方法が不適切であると判断された。不適切な点として、以下の 3 点が挙げられる。

1 つ目は、GSHP の負荷への追従速度が遅いことである。特に、地中温度が高くなった 2018 年、2019 年に顕著であったと考えられる。建物負荷が増加し、GSHP がこれに追従して出力するのに時間を要している間に、ASHP/ASC が稼働し始めてしまっている。GSHP は、地中熱交換器の還温度を感知しながら、圧縮機の出力を細かく調整する必要があり、この調整作業は、熱容量の小さい燃焼式熱源機や空気熱源機であれば素早く行うことができるが、GSHP の地中熱交換回路のように経路長が長く、熱容量が大きい機器では、調整に少なくとも 3～5 分はかかる。一方で ASHP/ASC はモジュール式で、通常の ASHP よりもむしろ速い速度で負荷変動に追従することができる特徴を持つ熱源機である。GSHP の負荷追従速度の遅さに加え、モジュール式 ASHP/ASC の負荷追従速度の速さが相互に影響したと考えられる。

2 つ目に、GSHP の冷水出口温度が誤って高く設定されていたため、負荷追従に要する時間がさらに長くなっていた。解析期間終了後、設定値を修正し、流量を再調整した。

3 つ目に ASHP/ASC の増減段の間に動作隙間がなかったことが挙げられる。中央監視システムは、GSHP と ASHP/ASC の両方の熱出力を感知し、バッファーをもって適切な起動タイミングを指示すべきであった。しかし、そのような制御は行われていなかったため、GSHP より早く需要増に反応する ASHP/ASC は、数分後に GSHP の出力が十分となったときや冷房負荷が少し低下したときに速やかに停止してしまった。このことが、極短時間で低負荷の運転動作に繋がったといえる。冷房期は、放熱運転が GSHP や ASHP/ASC のバッファーとして機能するため、暖房期よりも非常に低い負荷で運転する割合が少なかった。このような極端に低い負荷で ASHP/ASC を運転することは、SCOP を低下させるだけでなく、機器の寿命を低下させる可能性もあり、避けなければならない。

これらの知見は、GSHP を ASHP と併用する場合には特別な専門知識が必要であり、設計および運転段階において慎重な試運転プロセスを踏まなければならないことを示している。

3.4. 運転制御の簡易指標

図 10 は、図 3 と同じ 3 日間の、井戸とボアホールからなる地中熱交換器の入口温度と出口温度、平均地温、外気温度の推移を示したものである。GSHP が通常冷房モードで冷房運転を続けている間、地中停止し、ASHP のみを運転する方が、エネルギー効率は良かったと言える。さらに、夜間は GSHP が氷蓄熱運転していたものの、外気温は地中温度より低かった。同様に暖房時にも、外気温度が地温より高く、GSHP より ASHP の効率の方が良い時間帯があった。

そこで、本節では、GSHP が ASHP/ASC と同じ COP で動作することを前提に、地上と空気源の利用を切り替えるタイミングを検討することにした。熱源の切り替えは、地中からの還温度と外気温度の両方を感知することが直接的かつ最善の策であるが、より経済的で簡易的な手法として、外気温度のみを指標とすることも可能である。

図 11 に、外気温度に対するボアホールと井戸の地中熱交換器からの還温度の関係を示す。このシステムの GSHP と ASHP の定格 COP が同じであれば、冷房期間中は斜め 45 度の線の右下側で、暖房期間中は左上側で GSHP が ASHP よりも効率よく運転できることになる。ボアホール、井戸とも、暖房時はほとんど有効範囲内で運転できたが、冷房時は約半分の時間しか運転できなかった。

期間毎にグラフに線を引き、GSHP と ASHP の使用切り替えのおおよその時間を推定した。その結果、ボアホール系統では、外気温度が 25.7℃以上であれば GSHP による冷房が有効であり、外気温度が 16.7℃以下であれば GSHP による暖房が有効であることが示された。井戸系統では、GSHP による冷房は外気温度が 24.5℃以上、GSHP による暖房は外気温度が 15.5 ℃以下の場合に有効であった。

4. 不具合改修

4.1. 不具合事例

表 2 に施設管理者へのヒアリングより得られた故障等に起因する GSHP システムの運転停止期間とその理由を示す。運転停止期間①,②は井水系統が開放回路であるため、P-W1,2 が不純物によりつまりを起こしていた。運転停止期間③では目視で井水系統管の腐食による漏水が確認された。運転停止期間④では、P-CH(冷温水ポンプ)のカップリングボルト取付け不具合に起因する騒音・振動等の発生があり、GSHP システムの運転を停止した。運転停止期間⑤では、ブライン液が減少し、P-IST2(氷蓄熱加圧ポンプ)の吸い込み口からエアーを吸ってしまう可能性があったため運転を停止した。

表 2　運転停止期間とその理由

	運転停止期間			理由
①	2019年7月31日	～	2019年10月1日	井水系統のつまりによりP-W1,2を停止
②	2020年1月21日	～	2020年3月26日	井水系統のつまりによりP-W1,2を停止
③	2020年7月6日	～	2020年8月20日	井水系統の漏水によりP-W1,2を停止
④	2020年10月15日	～	2020年11月9日	P-CHの不具合により 昼間の追いかけ運転を停止
⑤	2021年5月10日	～	2021年7月9日	P-IST2のブライン液の減少により GSHPシステムの稼働を停止

また、データ分析の結果、竣工後から 2022 年度に改修・改善を行うまで、いくつかの不具合が継続していたことも確認した。主な不具合を以下に記す。

(a)　図 8 より氷蓄熱・追いかけ・暖房運転のいずれにおいても、稼働していたことが判明した。

(c)　氷蓄熱・追いかけ運転時の出口温度が不適切であった。図 12 にそれぞれの温度推移を示す。氷蓄熱運転時では製氷用ブラインの出口温度が定格値-5℃に対して、-1～1℃程度であった。追いかけ運転時の冷水出口温度は、定格 7℃に対して 11～13℃程度で推移していた。

(d)　各測定点での流量が、定格流量に対して過大・過少となっていた。VM-2,5,6,7,8 でこの不具合が確認された。

(e)　氷蓄熱槽の定格容量 4000MJ に対して、蓄熱量が 5～6 割程度で常に満蓄にならなかった。図 13 に代表日の氷蓄熱量・解氷熱量・放熱量を示す。また、氷蓄熱槽に残蓄があるのにもかからず、放熱運転が停止していたことが判明した。解氷熱量が極端に小さくなっていて、解氷流量(VM-6)の測定に何らかの不具合があると考えられた。

4.2. 対応

運転停止期間①,②では、P-W1,2 の清掃を行い通常運転を再開した。運転停止期間③では、水質検査の結果、井水に硫黄還元細菌が含まれている可能性が高いことがわかった。これを受け、鋼管から PE 管への井水系配管の交換と HEX-W(井水熱用プレート熱交換器)の洗浄を実施するため、井水系統のみを停止した。運転停止④は P-CH のカップリングボルトの交換及び芯出しの調節を行った。運転停止期間⑤では、ブライン液の充填後 GSHP システムの運転を再稼働させた。

また、(a)～(e)の不具合についての対応を以下に示す。

(a')　原因として、熱源機の台数制御の不具合、または、GSHP そのものの不具合のいずれかを考えられた。熱源機の台数制御の不具合について、設計図書と異なり、ASHP が熱量ではなく二次側流量で稼働を開始する制御となっていた。しかし、GSHP の冷水出口温度が設定値に至っていなかったことも関係し、ASHP が早く稼働を開始していた。このため、熱源ベースで増段閾値を決定できるように BEMS の設定を変更し、GSHP の定格出力値を増段閾値とした。また、GSHP そのものの不具合について、凝縮器・蒸発器のいずれにおいても直交流となるケーシング内熱源水配管の切り替え装置が必要であったが、未導入であったことが発覚した。増段閾値の変更後、改修工事を行い、これを導入した。

(b')　未対応

(c')　氷蓄熱運転の圧縮機制御目標が-7℃とするはずが、7℃としていたことが判明したため、設定を変更した。追いかけ運転時には圧縮機の台数制御とインバータ制御によって冷水出口温度を 7℃で保つように、プログラミングを実施した。

(d')　搬送ポンプの流量制御が未導入であったため、これを導入した。

(e')　GSHP の冷熱出力不足が原因と判明した。製氷用ブラインの出口温度の設定ミスの修正(対応(c'))と解氷流量の流量調節(対応(d'))：VM-6)によって改善を期待した。また、解氷流量が極端に小さかったのは測定のレンジに誤りがあったためとわかった。

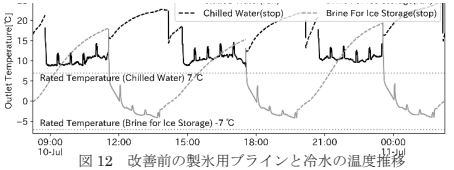


図 12　改善前の製氷用ブラインと冷水の温度推移

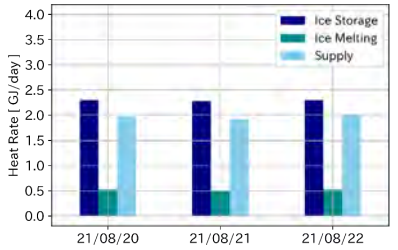


図 13　改善前の氷蓄熱量・解氷熱量・放熱量

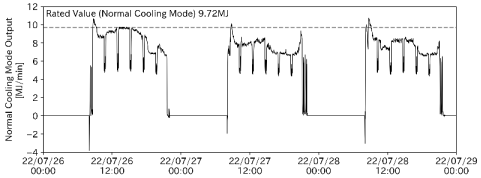


図 14　改善後の GSHP の追いかけ運転出力

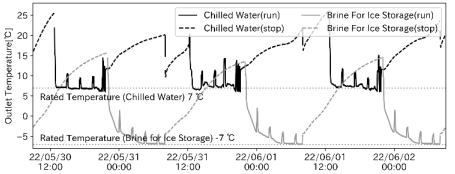


図 15　改善後の製氷用ブラインと冷水の温度推移

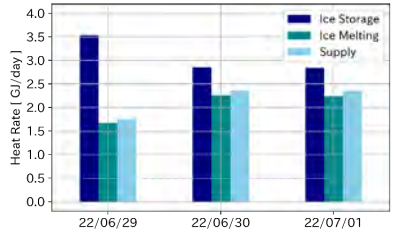


図 16　改善後の氷蓄熱量・解氷熱量・放熱量

4.3. 改修後の分析

不具合対応(a')～(e')後のそれぞれの状況について以下に記す。

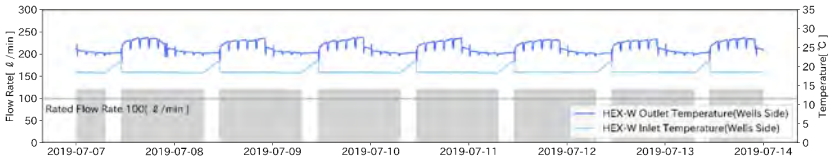


図 17　正常時の HEX-W 井戸側の流量と出入口温度

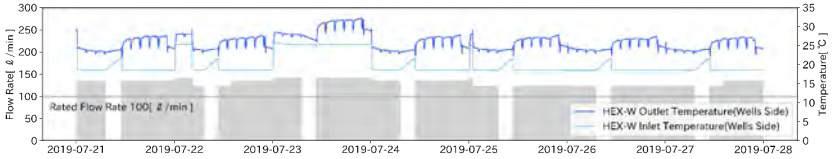


図 18　運転停止直前の HEX-W 井戸側の流量と出入口温度

にとどまった。その後ケーシング内熱源水配管工事を行った。図 14 に工事後の GSHP の追いかけ運転出力を示す。ASHP・ASC の増段前には定格値に達していることが確認できた。しかし、その後は建物負荷の増加に伴い ASHP/ASC が稼働すると部分負荷運転に戻っていた。これは、GSHP が自身の還温度を見て出口温度を緩和するためだとわかった。先述の通り、ASHP/ASC の負荷追従速度が早く、負荷変動に対応しているため、GSHP の還温度が上昇しないため出口温度を緩和している。つまり、最優先で稼働するベース熱源機としては内部制御が不適切だと判明し、対応を終了した。

(b") 未対応

(c") 運転時には製氷用ブラインが-7～0℃、冷水出口温度が 7℃付近になることを確認した。図 15 に改善後のそれぞれの温度推移を示す。

(d") VM-2,5,7,8 の流量が定格値となったことを確認した。VM-6 は定格流量に達していなかったため、その後、ストレーナー清掃を実施した。しかし、それでも定格値には届かなかったが、これ以上の変更はポンプの吐出圧を超えるため、対応を終了した。

(e") 図 16 に代表日の氷蓄熱用・解氷熱量・放熱量を示す。氷蓄熱槽の残蓄がない状態(2022 年 6 月 29 日)だと、氷蓄熱量(製氷量)が定格容量の 9 割程度となることが確認された。しかし、その翌日以降は定格の 6 割程度となっていた。解氷がうまく出来ていないことが主原因だと考えられる。

4.4.　考察

井水系統は、開放回路であるためポンプのつまりが頻発したり、配管に鋼管を使用していたため、硫黄還元細菌の影響により腐食が進んだりと故障や不具合が度々繰り返されている。配管材料の選択や水質検査の実施等計画・設計段階での考慮すべき点への配慮に不足があったと言える。

図に運転停止期間①の直前の期間と正常運転時の HEX-W の井戸側の流量(VM-1)と往還温度(TH-20,21)の 1 分毎の推移を示す。正常時には流量は約 120ℓ/min で常時一定となっていた。しかし、運転停止前の 7 月 21 日からはおよそ 130～140ℓ/min となる時間が頻発し、HEX-W への井水入口温度が不安定になっていることが確認できる。早期にこれらのシグナルに気が付くことで、計画的な修理交換計画や関連機器の故障を防止できる可能性がある。また、運転停止期間③の直前の GSHP 二次側流量 VM-5 と往還温度 TH-6,7 を確認したところ、ポンプが完全に停止している日があることが判明した。

これらから、記録データを可視化することで早期発見の可能性があることがわかった。しかし、管理者が常にデータを監視することは不可能であり、データのリアルタイム処理や管理について、自動化を進める必要があるといえる。

5.　シミュレーション

5.1.　計算条件

GSHP の更に高効率となる運転提案のため、GSHP と ASHP の使い分け制御について TRNSYS18 によるシミュレーションを行った。図 19 に構築モデルのシステム図を示す。図中、Q は出力、T は温度、m は流量である。3.2 で言及したとおり、GSHP と ASHP の定格機器特性の違いは運転制御以上に大きな効率差を生むため、本章では熱源温度が同じときの定格 COP を同値と仮定した。また、GSHP と ASHP の部分負荷特性は BEST-P 特性 [34] を使用し、いずれも Equations で機器モデルを構築した。GSHP の地中熱交換器(Ground Heat Exchanger)は、井戸は用いず、ボアホールを実システムの 2 倍の 36 本とした。ボアホールは TESS ライブラリより Type557 を用い、土壌特性は実測データを再現するように事前に調整をして決定した。また、3.2 で言及したとおり氷蓄熱運転の運転効率が低いことを考慮し、GSHP の氷蓄熱設備は除外した。また冷暖房は 8～21 時までの稼働とし、境界条件として二次側供給熱量と二次側還温度の 2018 年 5 月～2019 年 4 月の実測データを 5 サイクル与え、疑似的に 5 年分のデータとした。シミュレーションのタイムステップは 1 分である。その他の与条件は表 3 に示す。

分析では熱源制御の異なる 3 つのケーススタディを行った。Case1 が GSHP を優先稼働させた場合、Case2 が ASHP のみで運転を行った場合、Case3 が GSHP と ASHP の使い分け制御を行った場合である。使い分け制御は、冷房時には、GSHP の熱源水入口温度(T_in_ghex)が ASHP の熱源入口温度(T_air_in)、つまり外気温度よりも低い場合にのみ GSHP を稼働するものとする。暖房時は、GSHP の熱源入口温度が外気温度よりも高い場合に稼働する。Case1 と Case3 では GSHP の出力が不足した場合に ASHP が増段運転する。いずれも、土壌の初期温度を 11℃と 16℃の二通りで検討する。

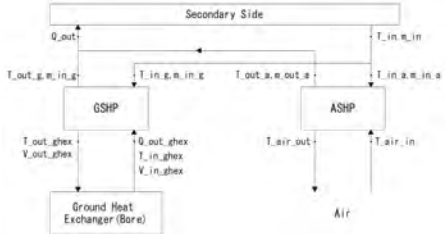


図 19　TRNSYS 構築モデル

表 3　シミュレーション与条件

GSHP	定格COP 冷温水出口温度(T_out_g)	冷房時：2.73 冷房時：7℃	暖房時：3.13 暖房時：45℃
ASHP	定格COP 冷温水出口温度(T_out_a)	冷房時：2.73 冷房時：7℃	暖房時：3.13 暖房時：45℃
二次側	熱出力(Q_out) 冷温水入口温度(T_in)	実測値(8～21時) 実測値	
一次側	外気温度	実測値	

5.2.　シミュレーション結果と考察

図 20 に土壌の初期温度が 11℃の時の各ケースの COP を示す。Case1 のグラフより地中温度が十分に低い場合、GSHP を優先稼働させても ASHP よりも GSHP の COP が高いことがわかった。Case1 と 3 を比較すると、Case3 の冷房時の COP が Case1 よりも高く、年々COP が高くなっていることが確認できる。これは Case1 では冷房による排熱が暖房による採熱を上回るため地中温度が上昇を続けたことによると考えられる。また、Case1 の地中温度の方が高いため、暖房時の COP は逆転した。

図 21 に地中温度の初期温度が 16℃の場合の各ケースの COP を示す。Case1 では、GSHP と ASHP の COP の差は殆ど見られないが、2018～2021 年度の冷房期間は 0.1 程度 GSHP の方が高いことがわかる。一方で、Case3 では、初年度の冷房時の COP は同等であったが、経年的に上昇し、2022 年度には 2018 年度と比較して、値が 0.2 大きくなった。また、土壌の初期温度が 11℃の場合でも、16℃の場合でも、1 年間のシステム全体の COP は Case3 が最も高いことがわかった。

本シミュレーションによって、同じ定格性能の GSHP と ASHP を用いた場合、熱源温度を考慮した適切な GSHP と ASHP の使い分け制御を行うことで ASHP 単体よりも高いエネルギー性能となることが分かった。運転開始時の地中温度によって GSHP の有用性が変わることも示されており、運転開始時の地中温度を把握して GSHP を設計し、運転開始することが理想的だが、使い分け制御を行うことによって、ASHP のみよりも悪い条件で GSHP を使用することを避けることができると考えられる。

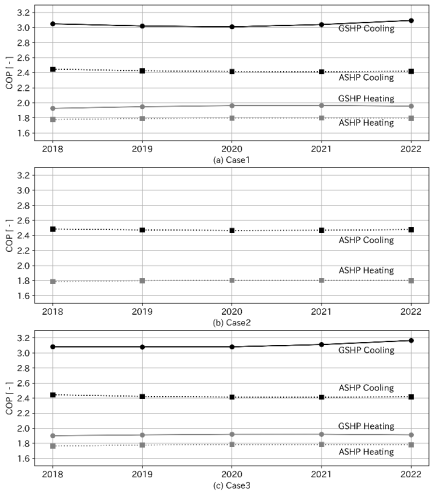


図 20　土壌の初期温度 11℃の各ケースの COP

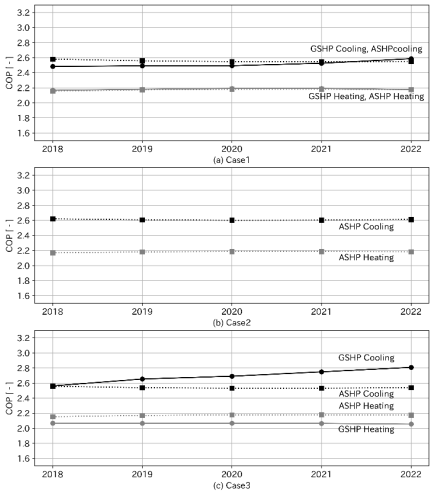


図 21　土壌の初期温度 16℃の各ケースの COP

6.　まとめ

国内温暖地域の大学に設置された、モジュール型 ASHP を併用した GSHP システムの長期運用性能の分析を行い、システムの問題点を明らかにした。

- 温暖地域では放熱量が採熱量より大きくなり、さらに GSHP の電力消費が放熱に加わるため、寒冷地に比べて、地中熱収支がアンバランスになりやすい。対象建物においては、放熱量は採熱量の約 1.7 倍であった。
- 2018,2019 年度冷房期間での比較から、放熱量の増加に伴い地中温度が上昇し、GSHP の SCOP が 0.1 以上減少した。2020 年度以降に冷房負荷が減少すると、SCOP の改善を確認した。
- GSHP の年平均 SCOP は ASHP より冷房時、暖房時ともに低かった。ASHP と比較して定格 SCOP が低いことと、搬送動力が大きいことが主な原因である。
- モジュール式 ASHP/ASC は、熱出力を素早く制御できるため、GSHP の出力制御よりも先に空調負荷の変動に反応していた。このため、GSHP の負荷率が低下し、極端に低い負荷で ASHP が起動・停止を繰り返すことになった。
- 地中からの熱源水の還温度が外気温度より高くても、低い SCOP で冷房運転を継続する時期があった。

また、対象建物において熱源システムに不具合が認められた。原因の解明とともに、一部可能なものについては改善を行った。

さらに、対象地での GSHP の運転改善提案、設計時の留意点の抽出のため TRNSYS シミュレーションを行った。

- 定格性能差のない GSHP と ASHP との熱源水の還温度と外気温度との比較によって使い分け制御を導入すると、GSHP を優先稼働する併用システム、ASHP のみのシステムよりもシステム全体で省エネルギーとなった。
- 冷房負荷が暖房負荷よりも大きい対象建物では、同性能の GSHP と ASHP を併用しても、運転開始時の地中温度が低いほど GSHP の有用性が高いことがわかった。

本研究で得られた知見の限界は，以下の 2 点である。1 つは、負荷変動に対する GSHP の応答率については、メーカーから開示されたデータが少なく、研究事例も少ないため、さらなる検討が必要である。2 つ目は、冷房時の放熱量と暖房時の採熱量のアンバランスは、地下水の流れによって改善することができるが、今回の事例では地下水の効果を検証していない。

参考文献

1. Kavanaugh S, Rafferty K. *Heat Pump Systems Heating and Cooling Design of Ground-Source Heat Pump Systems*.; 2014.
2. Vanhoudt D, Desmedt J, Van Bael J, Robeyn N, Hoes H. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. *Energy Build*. 2011;43:3657-3665. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.040
3. Cho Y, Yun R. A raw water source heat pump air-conditioning system. *Energy Build*. 2011;43:3068-3073. doi:10.1016/j.enbuild.2011.07.028
4. Russo S Lo, Taddia G, Baccino G, Verda V. Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: Impact on subsurface and primary energy consumption. *Energy Build*. 2011;43:347-357. doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.026
5. Chen X, Zhang G, Peng J, Lin X, Liu T. The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China. *Appl Therm Eng*. 2006;26:2255-2261. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.03.009
6. Kindaichi S, Nishina D, Wen L, Kannaka T. Potential for using water reservoirs as heat sources in heat pump systems. *Appl Therm Eng*. 2015;76:47-53. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.091
7. Lohani SP, Schmidt D. Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system. *Renew Energy*. 2010;35:1275-1282. doi:10.1016/j.renene.2009.10.002
8. Violante AC, Donato F, Guidi G, Proposito M. Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump. *Renew Energy*. 2022;188:1029-1037. doi:10.1016/j.renene.2022.02.075
9. Urchueguía JF, Zacarés M, Corberán JM, Montero Á, Martos J, Witte H. Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. *Energy Convers Manag*. 2008;49:2917-2923. doi:10.1016/j.enconman.2008.03.001
10. Lund JW, Boyd TL. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*. 2016;60:66-93. doi:10.1016/j.geothermics.2015.11.004
11. Lund JW, Toth AN. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*. 2021;90:101915. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101915
12. Safa AA, Fung AS, Kumar R. Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation. *Renew Energy*. 2015;83:565-575. doi:10.1016/j.renene.2015.05.008
13. Karabacak R, Güven Acar S, Kumsar H, Gökgöz A, Kaya M, Tülek Y. Experimental investigation of the cooling performance of a ground source heat pump system in Denizli, Turkey. *Int J Refrig*. 2011;34:454-465. doi:10.1016/j.ijrefrig.2010.10.009
14. Coskun S, E. Pulat, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental performance investigation of a horizontal ground source compression refrigeration machine. *Int J ENERGY Res*. 2008;32:44-56. doi:10.1002/er
15. Pulat E, Coskun S, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. *Energy*. 2009;34:1284-1295. doi:10.1016/j.energy.2009.05.001
16. Kim E, Lee J, Jeong Y, Hwang Y, Lee S, Park N. Performance evaluation under the actual operating condition of a vertical ground source heat pump system in a school building. *Energy Build*. 2012;50:1-6. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.006
17. Michopoulos A, Bozis D, Kikidis P, Papakostas K, Kyriakis NA. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece. *Energy Build*. 2007;39:328-334. doi:10.1016/j.enbuild.2006.08.002
18. Michopoulos A, Zachariadis T, Kyriakis N. Operation characteristics and experience of a ground source heat pump system with a vertical ground heat exchanger. *Energy*. 2013;51:349-357. doi:10.1016/j.energy.2012.11.042
19. Luo J, Rohn J, Bayer M, Priess A, Wilkmann L, Xiang W. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics*. 2015;53:57-66. doi:10.1016/j.geothermics.2014.04.004
20. Zhang X, Wang E, Liu L, Qi C, Zhen J, Meng Y. Analysis of the operation performance of a hybrid solar ground-source heat pump system. *Energy Build*. 2022;268:112218. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112218
21. Xi C, Hongxing Y, Lin L, Jinggang W, Wei L. Experimental studies on a ground coupled heat pump with solar thermal collectors for space heating. *Energy*. 2011;36:5292-5300. doi:10.1016/j.energy.2011.06.037
22. Naicker SS, Rees SJ. Performance analysis of a large geothermal heating and cooling system. *Renew Energy*. 2018;122:429-442. doi:10.1016/j.renene.2018.01.099
23. Jeon J, Lee S, Hong D, Kim Y. Performance evaluation and modeling of a hybrid cooling system combining a screw water chiller with a ground source heat pump in a building. *Energy*. 2010;35(5):2006-2012. doi:10.1016/j.energy.2010.01.016
24. Magraner T, Montero Á, Quilis S, Urchueguía JF. Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation. *Energy Build*. 2010;42(9):1394-1401. doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.008
25. Montagud C, Corberán JM, Montero Á, Urchueguía JF. Analysis of the energy performance of a ground source heat pump system after five years of operation. *Energy Build*. 2011;43:3618-3626. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.036
26. Ministry of the Environmenet. Results of the 2020 Geothermal Heat Utilization Survey. Accessed October 24, 2022. https://www.env.go.jp/press/109367.html
27. Wakayama H, Sakabe T. The outline of the heat source system that is combined with the ground source heat pump system and the aquifer thermal energy storage in the Sakata city hall. *AIJ J Technol Des*. 2016;22(51):627-630. doi:10.3130/aijt.22.627
28. Wakayama H, Nagano K, Kindaichi S. STUDY OF THE MOST SUITABLE OPERATION OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM FOR TOTALLY ELECTRIFIED HEATING AND COOLING SYSTEM - A practical example in a hospital -. *AIJ J Technol Des*. 2009;15(31):823-826. doi:10.3130/aijt.15.823
29. Wakayama H, Nagano K, Katsura T, Kindaichi S, Sato N. Study on Ground Source Heat Pump System applying PHC Foundation Piles and Short Term Thermal Energy Storage. *Trans Soc Heating, Air-conditioning Sanit*. 2010;163.
30. Sakamoto Y. EXPERIMENTAL STUDY ON THE GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM WITH STEEL PIPE PILES. *Trans AIJ J Environ Eng*. 2015;80(715):785-794.
31. Horiike S, Nagano K. DESIGN AND EVALUATION OF ONE OF THE LARGEST GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS IN A LARGE-SCALE RETAIL STORE. *Trans AIJ J Environ Eng*. 2015;80(709):249-258.
32. Kindaichi S, Nishina D. Simple index for onsite operation management of ground source heat pump systems in cooling-dominant regions. *Renew Energy*. 2018;127:182-194. doi:10.1016/j.renene.2018.04.065
33. Japan Meteorological Agen. Download historical weather data. Accessed September 15, 2022. https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php
34. Institute for Built Environment and Carbon Neutral for SDGs. BEST-P Equipment Characteristics Manual. Accessed February 6, 2023. https://www.ibec.or.jp/best//files/tec_info/m_131_kikitokusei_200909.pdf

（2023 年 2 月 7 日）

建築学科　系紹介
―歴史・意匠系―

建築の創造は歴史にある

建築は、つねに経験（歴史）に基づいて発展を繰り返しています。建築の創造の歴史は、同時に建築の歴史に学ぶという歴史です。この分野は次の専門科目を通して知識と見方を深めます。『建築史概論』では文明の変遷と建築表現の相関を学び、『日本建築史』『西洋建築史』で異なる文化それぞれの変遷を理解します。『近代建築史』は近代の発展過程を理解し、『アジア建築史』では、知られていないアジア建築の変遷を学びます。

歴史・意匠系の研究手法

歴史意匠系の研究は、歴史的な建物はもちろん、都市や集落、庭園、大工やその技術、建築家とその作品・言説、世界遺産や文化財の制度・保存活用、建築とは何かという哲学的な問いまでその対象は様々です。

そのため研究手法も多岐にわたります。代表的なものに、建造物の実測などの「現地調査」と、文書や絵図･書物などを扱う「資料･文献調査」があります。「現地調査」では建物やまちなみを実測、記録することでその設計理念・形成過程を把握したり、多くの実例を見ることで全体の傾向や背景の原理・文化を見出したりします。「資料・文献調査」では、種々の資料を組み合わせ、深く読み込むことで、建物そのものからは見えてこない物事や空間の特質を探求します。他にも、図面や模型、映像作品を用いた近現代建築の研究や、他系の実験・計測の手法を応用・援用した研究などもあります。資料の発見や研究手法の工夫も歴史意匠系の研究の面白さの１つです。

歴史意匠系の研究テーマ

歴史意匠系では建築に関わる全ての要素が研究対象になります。そこには、歴史的な視点や原理を求める眼差し、建築にまつわる事象の「なぜ」への探求があり、時代に流されず、俯瞰する視点でテーマを設定します。各自の研究テーマは基本的に各々の興味によって決め、指導教員とのやりとりを通して、具体化していきます。

（文責 / 計画系教員 米澤貴紀）



実測調査の様子

●論文一覧

○卒業論文

- 稲井零｜ガソリンスタンドの跡地活用～残された副産物～
- 後藤優磨｜ハウスメーカーの生き残り戦略
- 鈴木風賀｜首都圏に多くある水族館の集客への戦略
- 髙井琉斗｜ウッドショックが日本建築業界に与える影響
- 新美凌｜木質内装材が人間に与える影響
- 萩原淳平｜最近の小規模世帯の集合住宅の間取りに関する研究
- 牧野滉平｜真清田神社と熱田神宮に見る尾張造の釣殿と名古屋東照宮の関連
- 石川真望｜日本庭園にみる独自の文化形成と発展について～日・中・西洋の文化の比較から～
- 土屋涼花｜鳥居の現代的価値の考察～鳥居の地域差と特徴について～
- 築城芽生｜屋根瓦の装飾における動物～大垣市歴史文化遺産大橋家住宅の瓦について～
- 新井佐知｜現代人の和室感覚～ハウスメーカー各社からみる和室の構成要素の変化～
- 小松原春香｜歴史的建造物の利活用とそれらの今後と提案～現代建築の訴求力とデジタルアートの関連性・明治村を題材として～
- 中村紗月｜猫カフェの空間づくりに関する研究～猫と人双方にとって快適な理想の空間～
- 福山真衣｜小説における空間描写の分析～堀川アサコ作品：幻想シリーズから見る空間～
- 古川耕平｜三次元データを利用した文化財の保存活用に関する研究～真長寺枯山水庭園において～
- 川部綺乃｜子育て支援施設の利用実態から考える適切な配置と設備の検討～南知多町を例にして～
- 大林幹奈｜純喫茶リバイバル - 現代風純喫茶「ネオ喫茶」の現代風デザインとは何か -
- 城戸美穂｜近世城郭における移築城門の形態変化、及び保存・活用の変遷
- 新美澄佳｜三州瓦と住宅建築の関係
- 中村優輔｜東海地方における内海トラフ地震と神社～神社の安全性と現代での検討～
- 河村　直紀｜手水舎の境内配置と屋根意匠～総本社と分社の比較を通して～
- 長谷川瑶子｜『尾張名所図会』からみる、尾張造の特徴について

名城大学理工学部建築学科
2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

三次元データを利用した文化財の保存活用に関する研究
真長寺枯山水庭園において

三浦研究室　　古川耕平　　190450122

1．研究背景
近年は、文化財建造物を単に維持保全するのではなく、登録有形文化財のように地域や住民による幅広い利活用および補修や復元技術体系の確立が重視されるようになった。三次元計測などのデジタル技術を利用した建造物の計測や保存修理の効率化、ネットワークや最新機器を利用した情報の公開や展示をするなどの利活用が求められるようになり、今後の学術的な進展が期待されている。

2．研究目的
日本庭園の研究の歴史は長いが、一方でこうしたデジタル技術を活かした記録保存、文化財保存技術への適用は未だ充分ではない。そこで本研究では、実証研究として岐阜市指定名勝の真長寺客殿南庭を例に、三次元計測のよるデジタルアーカイブの作成、取得したデータを用いた作業の効率化や効果的な利活用の方法について考察する。対象となる庭園は平庭式枯山水庭園の様式で、全体的に小ぶりな石で構成されている。三次元メッシュデータを用いることにより、それぞれの石の形や配列の特徴を客観的に分析することが可能となり、そこから設計趣旨を明らかにするなど、新たな視点での庭園研究へと繋げていくことを目的とする。

3．研究方法
⑴ 三次元レーザースキャナによる対象庭園の計測を行う。スキャナーは、本研究室が所有しているもの（カナダ CREAFORM 社製セルフポジショニング携帯型３次元ハンディスキャナー・REVSCAN）を使用する。
⑵ 計測したデータの編集処理を行う。モデリングソフトを使用してメッシュの処理や、主なものでも 8 個以上ある庭石の計測データを統合して、一つの立体情報とする作業の必要性が予測される。
⑶ 編集した計測データを 3DCAD 図面に落とし込み、対象庭園のある一定範囲の 3DCG モデルを作成する。CAD は AUTODESK 社製 AUTOCAD を使用する。
⑷ 3D プリンターを用いて、3D 模型を作成する。
⑸ 以上の結果から、文化財庭園における三次元計測による記録や、形状分析等の有効な活用方法を考察する。

4．実践結果
第 1 次調査は、2021 年 12 月から 2022 年 1 月にかけ、二日間にわたり平板測量を実施し（写真１）、客殿南庭の実測平面図を作成した（図１）。続いて、2022 年 10 月から 11 月にかけての約４日間にわたり、第 2 次調査を行い、図１に示す主な庭石 8 石の 3 次元計測を行った（写真１）。



写真１(左)　平板測量の実施風景
(右)　３次元計測の実施風景

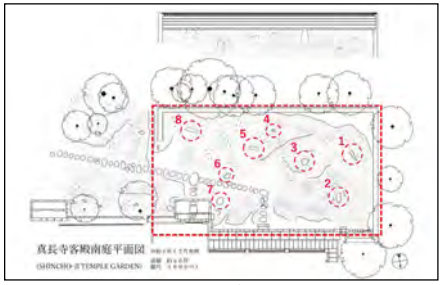


図１　真長寺客殿南庭の主な８石

今回使用したハンディスキャナーによる計測手法では、１つの自然石を分割して複数回の計測を行う必要があり、データを合成処理する時間を要した。実際には機材トラブルなどもあり 3D モデルの作成までに多少時間を要してしまった。それゆえに、当初の計測作業の効率化という目的を達成したとは言えないものの、庭石については非常に高精細な 3D モデルを作成することが出来た（図２）。



図２　庭石の 3D-CG モデル

次に、測定データの変換（GWF→DXF→DWG）を施して、AUTOCAD の 3D-CAD 図面に落とし込み、真長寺客殿南庭の図１における赤線範囲の 3D モデルを作成した（図３）。

最後に外注とはなるが、3D プリントにより、個々の庭石の縮尺 20 分の１の粉末造形および、塀に囲まれた区域の 100 分の１の敷地模型を製作した（図４，５）。

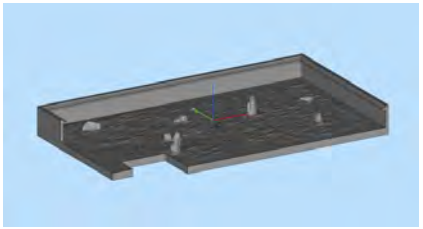


図３　真長寺客殿南庭の 3D モデル

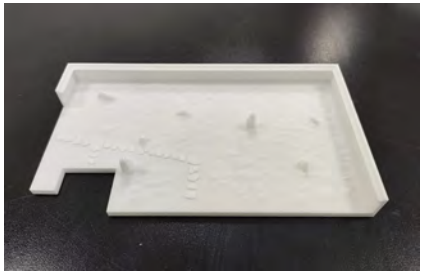


図４　真長寺客殿南庭の模型（1/100）

5．結論
本論文では、ハンディスキャナーを用いた 3 次元計測を行い、真長寺客殿南庭の枯山水庭園における主要な 8 つの庭石を含む範囲の 3D-CG モデルの作成、及び 3D プリンターによる模型作成までの流れを実践した。

上記の結果より、文化財の保存活用の観点において、3 次元計測による 3D-CG モデルを活用するには、まだまだ課題が残ると考えられる。

本庭園のように、石のみで構成される典型的な枯山水のもつ「抽象美」を表現するには、庭石の表面にみられる細かい皺にいたる形状を高精細に計測する必要があると考えたためにハンディスキャナーを用いたが、計測作業と 3D モデル作成の効率性については課題が残った。また、近年の土木工事の測量などに使用されている、広範囲を一度に計測できる設置型のスキャナーは、効率性が非常に高いが、機材コストも増大する。そして、大量の画像データから 3D モデルを作成するフォトグラメトリという手法が近年話題になっているが、天候や撮影条件によってモデル作成の精密に関して課題が残ると思われる。

また、3D プリンターを用いた模型作成に関しても、精密な模型を作るためには少なくないコストがかかるため、今後の 3D に関する技術の向上、それに伴うコストの低下と 3D 活用の普及が必要だと考える。



図５　庭石の縮小模型（1/20）

6．今後の課題と展望
本研究では、3D モデルの作成に時間を要したために、3D 模型作成までのフローとその分析にとどまったが、今後この 3D モデルと模型を使用して、それぞれの石の形や配列の特徴を客観的に分析することが可能である。

枯山水庭園においては、石組みの平面配置の幾何学的特性、視界内に於ける石組みの占める比率・角度等が重要な要素となってくる。特に、枯山水庭園の場合、建物内を縁側に沿って並行移動する視点、座っている視点、立っている視点というように、観察者の実際の視点を想定した作庭がなされていると考えられ、各場面における透視図的分析による幾何学特性および数値化を探る必要がある。そこから、庭園の抽象美を数学的根拠に基づいて明らかにするなど、新たな視点での庭園研究へと繋がり進展していくことを期待する。

また、真長寺においては住職の方を始め、真長寺文化財保存会による利活用の活動が精力的になされているが、そのような手が回らない地域の事物は現在進行形で形を失いつつある状態だと考えられる。上記の通り、3D などのデジタル技術をより一層の活用が出来るようになり、文化財の保存活用が発展していくことを望む。

＜参考文献＞
1)静岡大学 原瑠璃彦他,「日本庭園の総合的アーカイヴの開発をめぐる研究」, Incomplete Niwa Archives , 2021
2)デジタル文化財創出機構著,「デジタル文化革命」東京書籍, 2016
3)時実象一著,「デジタル・アーカイブの最前線 : 知識・文化・感性を消滅させないために」講談社 , 2015
4)彬子女王編,「文化財の現在 過去・未来」宮帯出版社 , 2013
5)名城大学　三浦彩子他,「精緻な三次元情報活用による新しい石庭設計手法の開発」, 日本建築学会技術報告集第 38 号&44 号, 2012-2014

2023 年 2 月 6 日　　指導教員　名城大学建築学科　三浦　彩子
副査　　同　　米澤　貴紀

2022 年度　卒業研究・卒業制作最終報告書

近世城郭における移築城門の形態変化、及び保存・活用の変遷

米澤研究室　　城戸美穂　　190450048

1 研究背景・目的

近年、城郭建築物の復元、再移築が行われおり、特に、城門は多く移築されている。また、オーセンティシティの観点から日本独自の移築文化が認識・評価されつつある。そこで本論文は、城門の移築後の形態変化、移築の意味するところを分析し、近世城郭の移築城門の保存、活用の変遷を明らかにする。

2　研究対象・方法

対象は内田和伸、「移築された近世城郭建築遺構の保存に関する研究」(『ランドスケープ研究』、1997)、および内田和伸、「近世城郭建築遺構の社寺への移築について」、(『同』、1998)、に記載されている城門全 46 棟とした(以下この 2 つの研究を内田氏研究と呼ぶ)。ただし、陣屋門、屋敷門、城門名または位置が不明であるもの、私有地に建つものは除き、明治時代以降に移築されているものに限っている。また、1998 年以降に移築された 3 件を追加した。なお、複数回移築されたものはそれぞれ延べで数えたため、扱う移築件数としては全 54 件となる。また、変更内容は修理されることの多い、屋根材、瓦紋、意匠に絞り、調査した。

移築の種類と検討項目については、藤井恵介「移築研究の目的と意味―建築の移築に関する研究(その 1)」(『日本建築学会大会学術講演梗概集』、2001)に示されたものに則り分析を行う。分析にあたっては、移築の動きと社会の転換期を目安に、明治初期～中期、明治中期～昭和 20 年、昭和 21 年～現在の３つに時代を区分し、それぞれについて検討した。

3　既往研究

先行研究は先掲の内田氏研究に加え、以下がある。

・徐旺佑「近世城郭の文化財保護と保存・活用の変遷に関する考察」、『日本建築学会計画系論文集』第 74 巻、第 643 号、pp.2133-2138、日本建築学会、2009.9

・木下直之「近代日本の城について」、『近代画説』、明治美術学会、pp.80-99、2000.9

これらは、城郭全体、特に天守や敷地を対象としている。また、内田氏研究は移築建築物に対する所有者の意識や保存のための留意点を示したもので、形態に対して言及は少なく、保存・活用の変遷は明らかにされていない。本論文ではそれらを示しており、独自性を持つ。

4　第 1 章　移築後の形態変化

表 1　対象となる移築城門の分布

		門形式	
		櫓門	その他の門
時代区分	明治初期～中期	9 件(公共地 0 件)	30件(５件)
	明治中期～昭和 20年	2 件(0件)	4件(1件)
	昭和21年～現在	1 件(0件)	8件(8件)

全対象について、移築後の形態変化を検討し、以下の 2 つを明らかにした。

⑴　櫓門は他の門に比べて、形態の変化が起こりやすい。

櫓門全 9 件の内、4 件は櫓門から他の門形式へと改修され、2 件は鉄砲狭間が外観上なくなるなどの意匠面の変更がある。また掛川城大手二の門は 2 回改修されている。この理由は、門としての機能があれば良い場合、火災等で上層部分を失うとそこは不要とみなされ再建されなかったことや、基本 2 層である櫓門は移築先に対して格式が高すぎると判断されたことが挙げられる。また、鉄砲狭間などの攻撃設備は山門として不適切と判断されたことが考えられる。一方、薬医門、高麗門等は、瓦紋や葺材の変化が主であり、門形式や意匠が大幅に変更されることは少なく、当時の形態を維持している事例は 16 件(35%)あり、内 15 件は櫓門以外の門である。

⑵　公共地に移築された城門の形態は、安定している。

公共地への移築事例は延べ 14 件が該当する。屋根葺材を変更した可能性があるものが 2 例あるが、それ以外、大きく改変された事例はなかった。また、社寺等から城門が再移築される場合、公共地の中でも城郭跡地に立地することが多く、移築の際に城門時の形態に復原されるため、城郭跡に立地している間は、形態の変更が殆どされないと考えられる。また、(1)で述べた櫓門が、公共地に移築、再移築された例は見当たらなかった。

5　第 2 章　時代区分ごとの移築時の形態変化

城郭の保存体制は時代により変わってきた。そこで、形態変化に時代区分ごとに特徴がみられるか、分析した。

⑴　明治初期～明治中期

大幅な形態の変更は次の時代区分と比較して少ない。移築先の立地に最も相応しい形にするのではなく、違和良く、修理する必要がなかったためであろう。

また、元の所有者の存在が移築先においても形態に影響するか分析した。藩主から寄贈された場合とそれ以外、次に戊辰戦争時、旧幕府側の藩とそれ以外を比較したが、差異は見られなかった。

⑵　明治中期～昭和 20 年

大幅な形態の変更が前時代区分と比べて行われている。修理例も含めた全事例 10 件中、改修例が 4 件あった。寺の門として環境に適合し、屋根材を変えるなど管理が容易となるように改変されている。一方で、福岡城本丸表門と花巻城円通寺門は「保存」のために移築し、積極的に形態を保存する動きが新たにみられた。

⑶　昭和 21 年～現在

移築した事例 9 件全てに当初の形態に復す動きがみられた。また、社寺にある城門 33 件中 8 件は当初の姿に復原された一方で、9 件は改変されていた。火災等で当初材を失っていることや、由緒が明確でないことが改変の原因であるとわかった。また、2 件は当初の姿ではないが、旧藩主の紋を大棟に用いる変更が行われていた。これは、かつての城との繋がりを示す意図があると考える。

6　第 3 章　移築城門の保存・活用の変遷

前章にて、時代により形態の変化に違いがみられることを示した。これはその時代特有の社会的、文化的な要因が形態に影響を及ぼしているためと考えられる。したがって、時代区分ごとに移築の経緯、用途、社会的要素、移築目的・価値をみた。前章も踏まえ、移築城門の保存・活用の状況を調べた。

⑴　明治初期～明治中期

この時期に該当する事例はすべて城門から社寺の門等に、すべて用途変更していた。

これらの城門は元所有者にとって不要であるが、建物は使用でき、かつ引き受け先があったために、払下げ、寄贈等によって移築が行われた。その上で、払い下げる側は収益という目的が、受ける側は利用価値及び名誉と格式の象徴という価値があった。

⑵　明治中期～昭和 20 年

この時期の例は城門から他の門への用途変更はされていない。2 回目以降の移築が多いことが原因である。

政府は大正 13 年に古社寺保存法によって、膳所城移築城門の 3 棟を特別保護建造物に指定した。移築城門が文化財指定された初例である。

移築目的は明治初期と同じであるが、受け取る側の付加的な目的は、「保存」へと変わっていく。ただし、この時代の保存する価値とは、現在の文化財的価値ではなく、

⑶　昭和 21 年～現在

戦後の事例をみると、9 件中 5 件は観光資源としての城門へと用途変更された。門の機能が失われ展示物となる例や、校門、駐車場門等、用途は様々であった。また、復元・復原された城門は指定文化財等に指定されていることが多く、昭和 25 年に制定された「文化財保護法」の影響がみられる。

移築目的は元所有、現所有者どちらも「保存」となる。殆ど当初材の残っていない門や、部分的な移築例もみられ、門の本来の機能は失ったが、文化財、観光資源としての新たな価値を持つことで移築が行われていた。加えて、昭和期は元所有者の寄贈が移築のきっかけとなるが、平成以降は寄贈と同時に都市再生整備計画、街づくりの一環として移築が行われている。機能面及び魅力的な景観の一部として門を活用するため、移築を行う際、由緒、史実ともに外観と周辺地域の一体性も重要視されており、今後もこの流れが続くことが予想される。

7　結論

以上の論考で明らかにしたことをまとめる。

移築された櫓門は形態の変化が起こりやすく、また、公共地に移築した城門は形態を変えることは殆どない。加えて城郭跡地に再移築する場合は城門時の形態に復元・復原するため、移築後も形態が安定していた。

時代に沿って形態の変化をみると、明治初期に移築した城門は立地に合わせた、違和感のない形へと変更が行われていた。大正期は、城門時の姿から改変された移築、修理がみられた。昭和 25 年以降は文化財保護法によって移築城門が指定文化財に指定となり、城門時の姿へと復す動きがある一方、改変もあった。改変理由は火災等で当初材を失っていることや、由緒が不明瞭であることがわかった。また、当初の形態ではないが、屋根大棟に旧藩主の家紋を使用した例がみられた。

形態の変化に時代ごとの違いがみられたため、時代背景・移築目的を分析した。明治初期は主に元所有者にとって不要であるが、建物は使用できるために、移築が行われ、払い下げる側は収益という目的が、受ける側は利用価値及び名誉と格式の象徴という価値があった。しかし、明治後期以降、一部は「保存」目的で移築され、戦後は、単に保存するだけでなく、文化財、観光資源という新たな価値・目的を持って移築が行われた。平成以降は都市再生整備計画等の自治体事業に伴っており、門の活用及び外観と周辺地域の一体性が重要視されていた。今後もこの流れが続くことが予想される。

2023 年 2 月 6 日　　主査　名城大学建築学科　米澤　貴紀
副査　　同　　鈴木　博志