

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420552

研究課題名(和文) 建築物の耐衝撃設計における人的被害低減と構造安定性維持のためのアプローチ

研究課題名(英文) Research on Shock-Resistant Design on Buildings approaching from Reduction of Human Injury and Protection for Progressive Collapse

研究代表者

向井 洋一 (Mukai, Yoichi)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70252616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：衝突や爆発などの衝撃作用を受ける建築物の挙動の中で、人的被害の直接要因となりうる非構造材破壊や、部分的な構造要素損傷が建物の大部分の破壊を誘発するような連鎖崩壊に着目し、動画解析を用いて、こうした破壊現象の進行過程を定量的に検証することを研究目標とした。主たる研究成果として、多くの建物のファサードの一般的外装材料である板ガラスを扱い、飛来物の衝突実験を実施して、その衝撃破壊挙動を高速カメラで記録し、ガラス破片の飛散過程を動画解析により定量的に評価した。また、実験結果に関するFEMシミュレーションを行い、高速カメラで記録した破壊挙動の解析による再現が十分可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We focus the buildings and their elements' behaviors due to impacting-objects; for example, non-structural elements' damages as causing serious human injury or a progressive collapse over the entire buildings. However, hazardous actions of the buildings or their elements accompanying to the general impulsive accidents have not been evaluated enough quantitatively. Thus emphasis is put on making collapse behaviors of various building elements quantify through data extraction with the video motion capturing. Destructive tests using glazing specimen are executed and the impacting moment of the plate glass versus the flying object are recorded with the high-speed video camera. Scattering motions of broken glass pieces are observed quantitatively with motion extracting analyses. FEM analyses are also carried out. By comparing the simulation and the experimental results, it is assured that the FEM analysis can well-reproduce actual behavior of the breaking glass due to flying object.

研究分野：建築構造

キーワード：衝撃作用 耐衝撃設計 飛来物衝突 非構造材 人的被害 衝突実験 モーションキャプチャ 動画解析

## 1. 研究開始当初の背景

日本では、通常の建築物の構造設計プロセスにおいて衝突・爆発事故など偶発的に発生する衝撃荷重に対する安全検討は行われていない。しかしながら、我々の日常生活の中の比較的身近なシーンでも起こりうる規模の衝突・爆発事故でも、時には甚大な人的被害や建物被害を生じるリスクがある。都市空間の高密度化と重層化、交通・社会・生活環境の高速化と多様化により、そこで生活する人と建物に起こりうる新たな脅威を想定し、構造設計のための新たな「ガイドライン」を提示することが必要であると考えられる。

日本建築学会の耐衝撃性能評価小委員会では、建築構造物を対象とし、自動車・電車車両・小型飛行機の衝突、ヘリコプターの落下衝突、フォークリフトの衝突、建物内部でのガス爆発、火薬工場などでの爆発事故による外部から爆風作用、といった偶発的な事故のシナリオを想定し、これらに付随する衝撃作用に対して、建築物が備えるべき耐衝撃性能を評価する手法をまとめた「建築物の耐衝撃設計の考え方」を出版公表するための準備を進めてきた。

衝突や爆発などの衝撃的な荷重作用下での建築物の挙動については、(1) 構造安全性が確保されていてもガラス窓や扉などの非構造材の破損や飛散が甚大な人的・機能的被害の直接的要因となりうること、(2) 過去の爆発被害の事例を見ると、直接的な構造被害個所が局所的であっても、建物全体の進行性崩壊を誘発した事例があったこと、が特筆される。従って、耐震・耐風設計で考慮されるシナリオとは異なり、こうした耐衝撃設計において考慮すべき特有の付帯事象に対する性能評価ができることが重要である。しかしながら、こうした衝撃作用に特有の付帯問題について設計の過程で検証するためには、現状では、実験や計測に基づく定量的な資料が著しく不足しており、それをいかに補完するかが課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、「建築物の耐衝撃設計の考え方」として、とりまとめと公表の作業を進めてきた、衝撃荷重を受ける建築物の耐衝撃性能評価法のメインフレームを、実際の構造設計プロセスの枠組みに嵌め込んでいくために、衝撃作用に特有の付帯問題についても定量的な検証ができることが重要であると考えている。そこで、設計者が構造性能評価を行う際にその根拠を説明できる「可視化された」資料を備えていく研究の必要性に立脚した。

本研究計画においては、衝撃作用に特有の付帯問題である、人的被害に直接影響する非構造部材の破壊挙動と、想定外作用による建物全体システムに及ぶ崩壊現象の2点に関して、実証的なバックデータの収集・整理、その提供を目的とした。具体的な研究内容とし

ては、(1) 衝撃作用による「ガラスなどの非構造材の破壊状況」の可視化とその評価手法の検討とともに、(2) 実在の建物において災害時に発生した、進行性崩壊や終局的挙動に関する映像記録により、建物全体の終局挙動や終局時の構造特性を定量的に評価するための方法を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、衝撃作用に特有の付帯問題について、その現象を記録し定量化する手法として、動画解析の技術を用いることを念頭に、動画からのモーションキャプチャの精度検証、一般のビデオカメラ映像記録から建物の動的運動データを抽出できる適用範囲の検討、高速カメラによる衝突・破壊現象の記録とその運動解析、記録映像を参照した FEM モデル構築と記録された破壊現象の再現性に関して検証を行うものとした。

本研究期間においては、(1) 非構造材の衝撃破壊現象の定量化、(2) 実在の建物において災害時に偶然に撮影された建物破壊や終局的挙動の定量化、に関連付けて、以下のようなアプローチで研究を実施した。

### (1) 非構造材（ガラス）の衝撃破壊挙動の可視化のための研究：

実際のガラス材料の破壊実験を行う前に、まず、運動解析システムの精度検証を行う。衝突体による衝撃作用を受けて台上より飛び出し落下する物体の運動に対する高速カメラ映像からのモーションキャプチャによる運動の推定値と、変位計・加速度計により観測した実測運動データとの比較を行う。続いて、積み上げたブロック状の試験体に衝撃作用を与え、ブロックの各ピースが分散しながら飛び出し落下する様子について、動画解析による推定変位と実測変位との整合を確認する。

こうした高速カメラによるモーションキャプチャの予備検証結果を踏まえ、構造体に衝撃作用が生じた際に、衝撃作用を受ける部材から周辺部材への応答伝達を高速カメラにより追尾する計測システムの構成とその精度検証を行う。免震構造物を想定した実験用試験体を利用し、免震構造物をストッパーに衝突させる振動台実験を行い、その衝突部の挙動を高速カメラで記録し、衝突部に生じる変位・速度・加速度応答の推定精度検証とともに、必要なデータフィルタ処理について検討する。

これら精度検証のための実験結果を受けて、小面積のガラス窓試験片に衝撃作用を生じた際のガラスの損傷状況を高速カメラで記録するための試験装置を試作し、ガラスの破壊実験に関する予備検証を実施する。その後、実物サイズのサッシガラス窓の試験体への飛来物衝突を想定した衝撃破壊実験を実施する。ガラスの厚み、衝突体の重量と衝突速度をパラメータとして、ガラスの破壊と破

片の飛散状況を高速カメラで撮影し、モーションキャプチャにより破片の飛散速度を定量的に評価する。さらに、ガラス破損～破片の飛散状況を再現できるようなFEM解析モデルを構築し、その解析精度を検証する（研究成果の概要を4章に示す）。

(2) 一般のビデオカメラで撮影された建物の動的挙動の運動データを定量化する研究：

実際の建物が、災害時などに目に見える程の大きな運動や破壊を生じるような場合に、その挙動を撮影したビデオ映像から、動的挙動のデータを抽出するための予備的検証として、まず一般のビデオカメラで撮影された建物の振動について、運動データを抽出する際の精度検証を行う。

実大規模の建物試験体を用いた振動台実験の画像を利用して、その際にセンサで直接計測された実測運動データとビデオ映像による運動解析により再現した運動の推定値との誤差評価を行うとともに、精度向上の手法について検討する。さらに、一般のカメラ（スマートフォン）で偶発的に撮影された建築物の動的な挙動の映像を用いて、建物の運動状態を追尾することを想定し、小型振動模型を用いて、撮影状況の再現実験を行い、対象物の振動特性を評価する手法とその問題点の確認、推定精度の検証を行う。

これらの予備的検証結果を踏まえ、大地震（東北地方太平洋沖地震）の際に建築物が激しく振動する状況を偶然撮影した動画から抽出できる対象物の動的運動データの推定精度、そのデータにより評価できる対象物の動特性の同定精度について検証を行う。動画として記録された建築物の動的挙動をモーションキャプチャにより評価する場合の、運動解析の精度と適用範囲について定量的に明らかにする。

4. 研究成果

本研究課題を通して得られた主な研究成果の概要を示すとともに、研究目的に照らし、得られた成果の有用性、並びに今後の展望について以下に示す。

(1) 飛来物の衝突を想定した板ガラスの衝撃破壊実験とそのFEMシミュレーション：

実大寸法の窓サッシで、板ガラスを用いた衝撃破壊実験を行い、ガラス窓に加わる衝撃作用と破損したガラス破片の飛散挙動との関係を定量的に評価した。また、FEM解析を用い、衝撃破壊実験時におけるガラス窓の損傷挙動を再現し、実験結果との比較検証を行った。

実験装置の概略図を図6に、実験実施時の全体状況を図7(左)に示す。図6の右側にある木製ボックスの発射装置側に設置したW=1120mm、H=1160mmのアルミ製サッシ枠に、厚さ6mmと8mmの2種類の板ガラスを8mmのかかり代をとり、ゴム材を挟んで保持した。

図6の左側には、衝突体を空気圧により発射する装置があり、衝突体をガラス中央部分に向け発射してガラスを破壊する。ガラス破片の飛散状況を記録するため、高速カメラを上及び横方向から撮影するように設置し、ガラス前方の横方向にも衝突体の衝突速度を計測するための高速カメラを設置した。図7(右)に、動画解析に用いる映像記録のための下向き高速カメラの設置状況を示す。

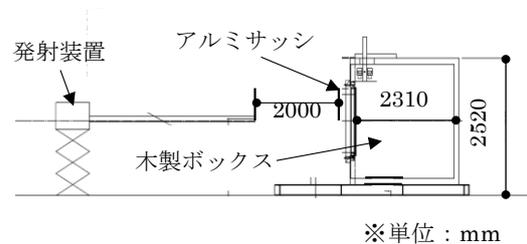


図6 実験装置の概略図



図7 (左) 実験実施時の全体状況 (右) 下向き高速カメラの設置状況



図8 ガラスの破壊形状 (左) 衝突速度 14.2m/s (右) 衝突速度 23.6m/s

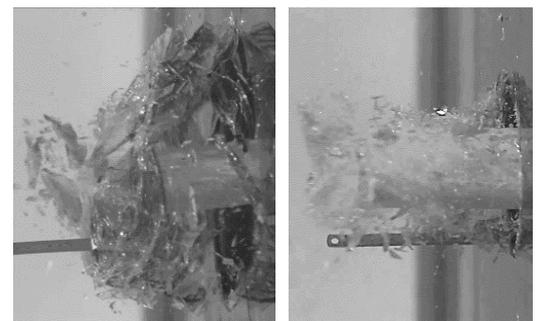


図9 衝突直後の画像 (下向き高速カメラ) (左) 衝突速度 14.2m/s (右) 衝突速度 23.6m/s

図8に衝突体を発射した後にサッシ枠に残存したガラスの破壊形状の一例を示す。0.5kgの重さの円形断面木材を衝突体とし、6mm厚のガラスに衝突させた場合の写真である。左右はそれぞれ衝突速度14.2m/s、23.6m/sの場合の結果である。また、図8と同じ実験条件時の下向き高速カメラによる衝突直後の画像を図9に示す。図8、9より、衝突速度の違いによりガラスの割れ方に相

違が見られ、衝突速度が遅い場合ではガラス板が面外にたわむように割れる性状であるのに対し、衝突速度が速い場合では衝突体が突き抜けるようなヘルツ破壊の性状を示すことが確認できる。

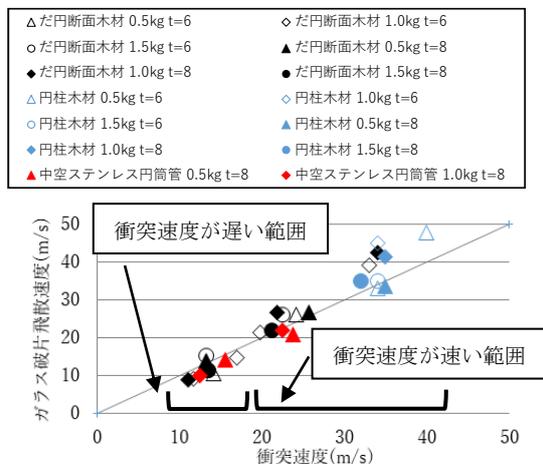


図 10 衝突体の衝突時速度とガラス破片飛散速度の関係

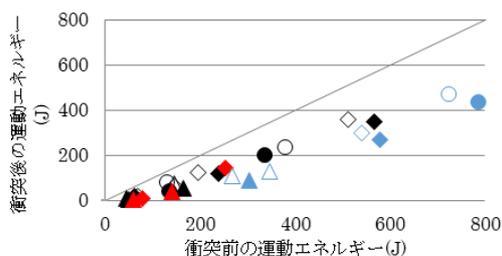


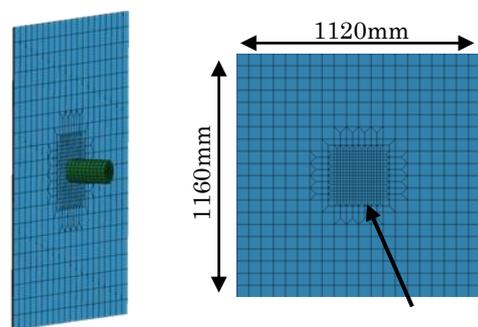
図 11 衝突前後での衝突体の運動エネルギーの変化

撮影した高速カメラ動画に対して動画解析を行い、飛散するガラス破片の変位の時刻歴を算定し、その値を微分することで速度の時刻歴を算出する。速度算定には下向き高速カメラを用いている。撮影条件は、画素数  $1280 \times 800$  pixel、撮影フレーム速度は  $1000$  fps とした。各実験条件毎に、衝突体の衝突時の速度とガラスの破壊後に先行して飛散するガラス破片の速度との関係を図 10 に示した。図 10 より、衝突速度が遅い範囲(概ね  $20$  m/s 以下)においては、ガラス破片の飛散速度は衝突速度よりも遅くなり、衝突体の衝突速度が速い範囲(概ね  $20$  m/s 以上)においては、ガラス破片の飛散速度は衝突速度よりも速くなる傾向が見られた。なお、衝突体質量とガラス破片飛散速度との間には相関がみられないことから、ガラス破片の飛散速度は衝突体の質量よりも衝突速度に依存することが考えられる。

図 11 に衝突体の衝突前後での運動エネルギーの変化を示す。衝突速度が速くなるにつれ、衝突体の運動エネルギーが減少している傾向が見られる。

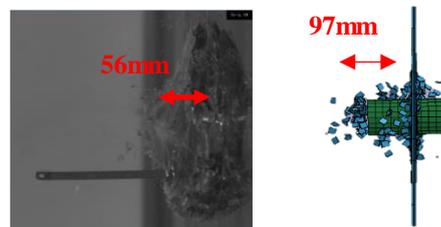
FEM 解析を用いたガラスの破壊モデルを構築し、実験結果の再現を試みた。図 12 に解

析モデルを示す。解析には LS-DYNA を用いる。解析モデルは実大ガラス衝撃破壊実験の試験体寸法に準拠しており、ガラス、衝突体ともにソリッド要素でモデル化した。ガラスの要素サイズは長辺、短辺方向共に  $56$  mm とし、厚み方向は  $2$  mm とした。なお、ガラスの中央部分の領域は解析精度向上のため、要素サイズを  $14$  mm としている。本解析モデルの全要素数及び全節点数はガラス厚  $6$  mm の場合でそれぞれ  $3426$ 、 $19996$  であり、ガラス厚  $8$  mm の場合でそれぞれ  $4218$ 、 $26236$  である。また、ガラスの四辺は完全固定とし、衝突体がガラスに自動接触する設定とした。解析の初期状態では衝突体をガラスとほぼ接する位置に配置し、衝突体に初期速度を与えてガラスに衝突させた。衝突体には剛体モデルを採用した。本解析においては、ガラス破片が飛散する様子を再現するため、ガラスの全要素に対し、節点拘束を行い、相当塑性ひずみが  $0.24$  に達する、または、引張強度が  $60$  MPa を超える時に破断する設定とした。

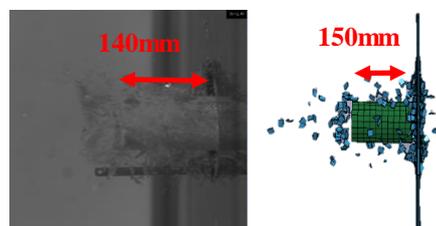


中央部のメッシュサイズを細かく

図 12 FEM 解析モデル



(a) 衝突体質量  $0.5$  kg  
衝突速度  $14.2$  m/s ガラス厚  $6$  mm



(b) 衝突体質量  $0.5$  kg  
衝突速度  $25.3$  m/s ガラス厚  $6$  mm

図 13 解析結果と実験との比較

図 13 に FEM 解析結果と実験結果との比較を示す。  $0.5$  kg のだ円形断面木材を衝突体とし、  $6$  mm 厚のガラスを用いた実験の場合の写真である。共に衝突後  $9$  ms 時の結果を示している。図 13 より、衝突体の貫通長さやガラ

ス破片の飛散距離は解析の方がやや大きくなっていることが分かる。これは、FEM 解析において、ガラスの四辺を完全固定と仮定したことや、衝突体を剛体と仮定したことにより、解析のほうでエネルギー吸収が小さくなったことが原因であると考えられる。ただし、こうした相違を勘案しても、解析では概ね実験結果を再現できたものと考えられる。

## (2) 研究成果の総括

本研究では、高速ビデオカメラ、並びに一般のビデオカメラを利用し、建築物や建築材料の動的運動、あるいは破壊挙動を記録し、記録映像の動画解析により運動の定量的データ抽出を行った。動画解析については、種々の撮影状況を想定した場合の、精度検証実験とともに、実際の建物の建築材料（ガラス）の衝突破壊時の動画記録による実証的研究を行った。

接触式センサが利用できない破壊現象等の計測手法、あるいは、災害時に動画として記録された建物の振動等の映像から対象物の動的挙動を運動データ化する手法、として本研究で行った研究結果は、ビデオモーションキャプチャを運動センサーの代わりとして適用する可能性を検証したものである。

研究成果をまとめると、動画記録された映像から建物等の動特性を同定する手法として、また建築物の部材破壊や極限応答の計測用ツールとして、モーションキャプチャは非常に有用であることを確認された。さらに、衝突や過大な地震作用など、想定外作用を受けた建築物の極限挙動の実験などにおいては、高速カメラを用いた運動計測が非常に有意なセンシング手法であることを確認した。

こうした成果を踏まえ、今後は、様々な建築物や建築材料の衝撃破壊挙動が可視化された映像データを集積するとともに、これらを定量化した運動データとして蓄積し、建物の耐衝撃性能評価のための設計資料とすることで、より信頼性の高い耐衝撃設計が可能となることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 14 件)

服部 翼、向井 洋一、ビデオ動画を用いた動体運動の時刻歴再現に関する基礎的研究、2015 年度日本建築学会大会 (関東)、2015 年 9 月 4 日、東海大学 (神奈川県)

西田 明美、構造部材と非構造部材の設計クライテリア、シンポジウム「建築物を取り巻く衝撃問題—人災 (衝突・爆発)、天災 (津波・竜巻)、テロへの備え—」、2015 年 12 月 1 日、建築会館 (東京都)

向井 洋一、衝突事象 (自動車の建築物への衝突に対する設計事例)、シンポジウム「建築物を取り巻く衝撃問題—人災 (衝突・爆発)、天災 (津波・竜巻)、テロへの備え—」、2015 年 12 月 1 日、建築会館 (東京都)

榎部 淳道、Federal Emergency Management Agency、FEMA 427、Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks の概要、シンポジウム「建築物を取り巻く衝撃問題—人災 (衝突・爆発)、天災 (津波・竜巻)、テロへの備え—」、2015 年 12 月 1 日、建築会館 (東京都)

服部 翼、向井 洋一、地震時に撮影された高層ビルの後揺れの動画活用に関する研究、2016 年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2016 年 6 月 26 日、大阪工業技術専門学校 (大阪府)

服部 翼、向井 洋一、ビデオ動画を用いた動体運動の時刻歴再現に関する基礎的研究—その 2. 高速カメラ動画を用いた免震建築物の衝突時応答のセンシング、2016 年度日本建築学会大会 (九州)、2016 年 8 月 24 日、福岡大学 (福岡県)

向井 洋一、災害時に撮影された建築物の動画活用、第 3 回計算科学連携センター (兵庫県立大学) 学術会議 “自然環境と計算科学” (招待講演)、2016 年 11 月 1 日、兵庫県立大学 (兵庫県)

向井 洋一、服部 翼 他、Data Extraction of Structural Behaviors at the Moment of Earthquake Occurrence from Video Capturing Clips、16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)、2017 年 1 月 12 日、サンチアゴ (チリ)

向井 洋一、西田 明美、濱本 卓司、崎野良比呂 他、Outline of New AIJ Guideline Publication as “Introduction to Shock-Resistant Design of Buildings”、12th International Conference on Shock & Impact Loadson Structures (SI17)、2017 年 6 月 16 日、シンガポール (シンガポール)

井川 望、向井 洋一、西田 明美、濱本 卓司、中村 尚弘 他、Design Loads and Structural Member Modelling to Shock-Resistant Design of Buildings、12th International Conference on Shock & Impact Loadson Structures (SI17)、2017 年 6 月 16 日、シンガポール (シンガポール)

西田 明美、向井 洋一、濱本 卓司、榎部 淳道 他、Criteria for Performance Evaluation and Numerical Verification to Shock-Resistant Design of Buildings、12th

International Conference on Shock & Impact Load on Structures (SI17)、2017年6月16日、シンガポール (シンガポール)

服部 翼、向井 洋一 他、飛来物による衝突作用を受けた板ガラスの破壊挙動の定量化に関する研究、2017年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2016年6月24日、大阪工業技術専門学校 (大阪府)

松本 真樹、服部 翼、向井 洋一 他、飛来物の衝突作用を受ける板ガラスの破壊挙動に関する研究 (その1. 実大ガラス衝撃破壊実験によるガラス破片飛散挙動の定量化)、2017年度日本建築学会大会 (中国) 学術講演会、2017年9月2日、広島工業大学 (広島県)

服部 翼、向井 洋一、松本 真樹 他、飛来物の衝突作用を受ける板ガラスの破壊挙動に関する研究 (その2. FEM解析を用いたガラス破壊挙動の再現)、2017年度日本建築学会大会 (中国) 学術講演会、2017年9月2日、広島工業大学 (広島県)

〔図書〕 (計 2件)

向井 洋一、濱本 卓司、西田 明美、崎野 良比呂、中村 尚弘、櫛部 淳道 他 (日本建築学会編集)、丸善出版、建築物の耐衝撃設計の考え方、2015、226

向井 洋一、濱本 卓司 他 (日本建築学会編書)、シンポジウム「建築物を取り巻く衝撃問題—人災 (衝突・爆発)、天災 (津波・竜巻)、テロへの備え—」、日本建築学会、2015、128

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

向井 洋一 (MUKAI, Yoichi)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70252616

### (2) 研究分担者

濱本 卓司 (HAMAMOTO, Takuji)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号：10228546

西田 明美 (NISHIDA, Akemi)  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹  
研究者番号：40228185

中村 尚弘 (NAKAMURA, Naohiro)  
株式会社竹中工務店・技術研究所・研究員  
研究者番号：50416640

櫛部 淳道 (KUSHIBE, Atsumichi)  
株式会社竹中工務店・技術研究所・研究員  
研究者番号：00416603

崎野 良比呂 (SAKINO, Yoshihiro)  
近畿大学・工学部・准教授  
研究者番号：80273712  
(H26より研究分担者として参画)

### (3) 連携研究者

崎野 良比呂 (SAKINO, Yoshihiro)  
近畿大学・工学部・准教授  
研究者番号：80273712

### (4) 研究協力者

服部 翼 (HATTORI, Tsubasa)  
神戸大学・大学院工学研究科・大学院生

千葉 文彦 (CHIBA, Fumihiko)  
YKK AP株式会社・中央研究所・研究員

堀 慶朗 (HORI, Yoshiro)  
YKK AP株式会社・中央研究所・研究員

菅野 康史 (KANNO, Yasufumi)  
YKK AP株式会社・中央研究所・研究員

松本 真樹 (MATSUMOTO, Masaki)  
YKK AP株式会社・中央研究所・研究員