

重量鉄骨ラーメン構造の ALC 乾式接合床における歩行振動解析

北倉 友佳 近藤 貴士 西井 康真 山下 仁崇
Tomoka Kitakura, Takahito Kondo, Yasuma Nishii, Yoshitaka Yamashita

概 要

近年、建物用途の多様化に伴って、工業化住宅においても、ロングスパン梁を用いた大空間の実現が望まれている。この実現に向けて、振動障害の発生リスクを適切に評価する必要がある。しかし、梁と床板の接合が乾式接合である工業化住宅では、解析的に床振動を評価する方法が確立されていない。本研究では、乾式接合の ALC 床の FEM モデルによる床振動評価手法の検討を進めている。本報では、重量鉄骨ラーメン構造試作棟の歩行時の振動性状及び測定結果を基にした FEM モデルによる歩行振動解析の精度検証を報告する。振動性状確認試験では、間仕切壁による固有振動数の上昇及び歩行試験における VLT の振動低減効果を確認することができた。一方、振動解析では間仕切壁のない場合の解析モデルの固有振動数と VLT は、試験結果に比べ、やや過小評価となっている。VLT は主に仕上げ材の影響であると考えられる局所的な振動が要因である。ただし、振動レベル波形は高い相関関係にあり、一步毎の振動レベルの最大値や収束状況をよく再現できている。

Walking Vibration Analysis of ALC Floors with Dry Joints in Rigid Steel Frame Structures

Abstract

In recent years, with the diversification of building uses, there has been a growing demand for large spaces in industrialized housing using long-span beams. To realize this, it is essential to appropriately assess the risk of vibration disturbances. However, no established analytical method currently exists for evaluating floor vibrations in industrialized housing with dry beam-floor panel joints.

This study explores an analytical approach using a finite element method (FEM) model to evaluate floor vibrations of ALC floors with dry joints.

This report presents the vibration characteristics during walking observed in a prototype heavy steel frame building and verifies the accuracy of walking vibration analysis using FEM based on those measurements.

In the vibration characteristic verification tests, the presence of partition walls was found to increase the natural frequency and to be effective in reducing vibrations of VLT. On the other hand, in the analytical model without partition walls, both the natural frequency and VLT were slightly underestimated compared with test results. This discrepancy is primarily attributed to localized vibrations considered to be influenced by finishing materials. Nevertheless, the vibration level waveforms showed a high correlation, successfully reproducing the maximum vibration levels and convergence behavior for each step.

キーワード：歩行振動、ALC パネル、乾式接合床、重量鉄骨ラーメン構造、
間仕切壁、FEM 解析

1. はじめに

近年、建物用途の多様化に伴って、工業化住宅においても、ロングスパン梁を用いた大空間の実現が望まれている。この実現に向けては、環境振動（特に歩行振動）による振動障害の発生リスクを適切に評価する必要がある。特に居住用途となる建物は、居住者がリラックスする空間であり、近年の社会情勢を背景とした在宅時間の延伸によって、一層の注意が必要となる。

振動障害の発生リスクの評価には、実棟での検証や解析による検証が行われる。実棟での検証には、時間及び費用を要するため、解析による検証が望まれる。しかし、工業化住宅では、施工性の向上を目的に梁と床板の接合に乾式接合を用いることがあり、湿式接合に比べて梁と床板の固定度が低く、解析的に床振動を評価する方法が確立されていない。

そこで、本研究では、乾式接合の ALC 床の FEM モデルによる解析手法を検討した。既報¹⁾では、梁と床版の接合が乾式接合の模擬床を対象に FEM モデルを用いた解析手法及び解析結果について報告した。本報では、ALC を用いた乾式接合床を有する重量鉄骨ラーメン構造試作棟の歩行時の振動性状を把握し、その測定結果を基に、FEM モデルによる歩行振動解析の精度を検証する。

2 章では、対象室内の間仕切壁の有無による試験結果及び間仕切壁の効果について報告し、3 章では、対象室内の間柱及び間仕切壁が無い場合の FEM モデルを用いた歩行振動解析結果について報告する。

2. 間仕切壁の有無による振動性状の把握

2.1 試作棟について

試験対象は 3 階建て重量鉄骨ラーメン構造の試作棟である（写真 1）。図 1 に対象室の平面図及び梁伏図を示す。

試験時、天井及び内壁はせっこうボードまで、床はフローリングの仕上げ材まで施工済みであり、什器等は設置されていない。ALC 床は幅 0.455m × 長さ 1.82m（一部 0.91m）であり、幅方向の二辺で防振ゴムを介して梁に支持され、接合金物で固定されている（図 2）。なお、間仕切壁による振動低減効果を検証するため、間仕切壁（天井勝ちかつ床勝ち）の有無の両方で試験を実施した。また、間仕切壁を構成するための間柱は間仕切壁の有無にかかわらず存在する。

2.2 試験方法及び分析方法

試験方法は、「固有振動数及び減衰定数の推定を目的とした衝撃力載荷試験」と「人が歩行した際に発生する床の振動を確認するための歩行試験」の 2 種類とした。各試験における試験ケースを表 1 に示す。

計測器は、MEMS 加速度センサー（センサー部：M-A352、セイコーエプソン製、分解能 0.06μG、サンプリング周波数 500Hz、ケース及び通信部：ロジカルプロダクト製）を用いた。



写真 1 試作棟全景

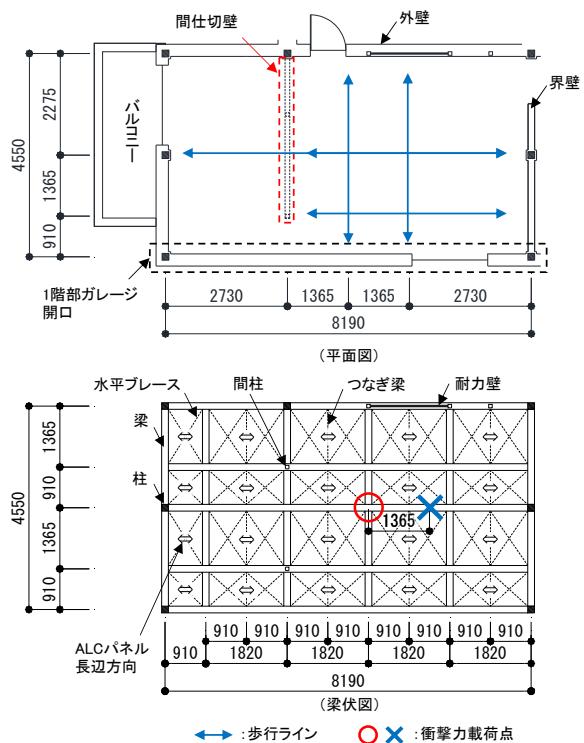


図 1 試作棟平面図及び梁伏図

(2 階、試験対象のみ抜粋)

表 1 試験ケース

試験方法	載荷数	測定点
衝撃力 載荷	2 か所	載荷点毎に 24 か所 計 48 点
歩行	4 ケース	歩行ケース毎に 8 か所 計 32 点

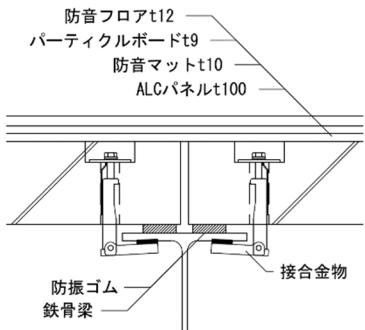


図 2 対象床断面図

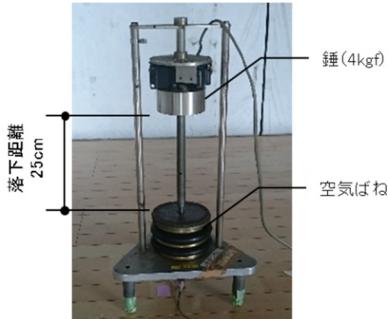


写真 2 衝撃力発生装置

表 2 バンドパスフィルタ特性 (f : 1 次固有振動数)

項目	内容
フィルタ特性	バタワースフィルタ
通過域端周波数[Hz]	$f \times 7/8 \sim f \times 9/8$
阻止域端周波数[Hz]	$f \times 2/3 \sim f \times 4/3$
通過域端最大低減量[dB]	3.0
阻止域端最大低減量[dB]	30.0

衝撃力載荷試験は、4kgf の錘を 25cm の高さから落下させ、一定の衝撃力を与える衝撃力発生装置²⁾を用いた(写真2)。発生する床の加振力は約 637N である。載荷位置を図1に示す(図中○及び×)。載荷は、各載荷点で1回実施した。計測は対象室内を面的に計測できるよう 455mm~910mm メッシュの交点にセンサーを設置して計測した。

1次固有振動数 f (以下、固有振動数) は、加速度波形のフーリエスペクトルの1次のピーク値を示す振動数とした。1次減衰定数 h (以下、減衰定数) は、表2に示すバンドパスフィルタを施し、波形のピーク値から3周期分の波形に対して、カーブフィッティングを用いて推定した。

歩行試験は、各試験ケースにおいて図1内矢印で示す歩行ラインに対して往復3回(計6回)の歩行を実施した。なお、間柱又は間仕切壁がある場合は、それまでの歩行とした。計測は試験ごとに歩行位置から455mm 離れた位置にセンサーを8か所設置して計測した。歩行者及び歩行条件は、男性1名(体重69.2kgf~72.3kgf) 歩調2Hz、歩幅455mmで履物は靴下とした。観測した加速度波形を用いて、VLT(25ms,60dB)による評価³⁾を行った(式(1))。

$$VLT(25ms,60dB) = VL_{max} + 20\log_{10}T^{1/4} \quad (1)$$

VL_{max} : 振動レベル VL の最大値 (dB)

T : VL が 60dB 以上となっている時間の総和 (s)

VLT は「振動レベルの最大値 VL_{max} 」と「振動レベルが知覚限界に近い 60dB 以上となっている時間、すなわち振動の継続時間 T 」で構成される。当物理量は振動感覚及び評価と非常に良い相関を示すことが文献3)などで報告されている。なお、体重60kgfに基準化して評価するために、各試験直前に計測した体重 X kgf を基に、加速度波形に係数(60/X)を乗じている。結果は6回の試験の平均値とした。

2.3 試験結果(衝撃力加振による固有振動数及び減衰定数)

図3及び図4に間仕切壁設置前後の床の固有振動数及び減衰定数を、表3にその平均値を示す。ばらつきはあるものの、間仕切壁を設置することで固有振動数は0.98Hz高くなり、減衰定数は4.6%から6.2%に増加した。

2.4 試験結果(歩行試験によるVLT)

図5及び表3に間仕切壁設置前後のVLTを示す。間仕切壁の設置によりVLTは平均6.2dB小さくなつた。間仕切壁による固有振動数及び減衰定数の変化と歩行長さの違いによる T の変化が要因であると考えられる。なお、 T は平均で間仕切壁なしが1.76秒、間仕切壁ありが1.04秒であり、間仕切壁の有無による差は小さい。よって、間仕切壁によるVLTの変化の主な要因は固有振動数及び減衰定数の変化であると考えられる。

3. 間仕切壁がない場合のFEM解析モデルによる歩行振動解析

本章では、対象室内の間柱及び間仕切壁が無い場合について、FEMモデルを用いた歩行振動解析

表 3 各種試験結果

(固有振動数と減衰定数は平均値)

項目	間仕切壁なし	間仕切壁あり
1 次固有振動数[Hz]	10.62	11.60
1 次減衰定数[%]	4.6	6.2
VLT [dB]	65.6~87.4	62.0~81.2

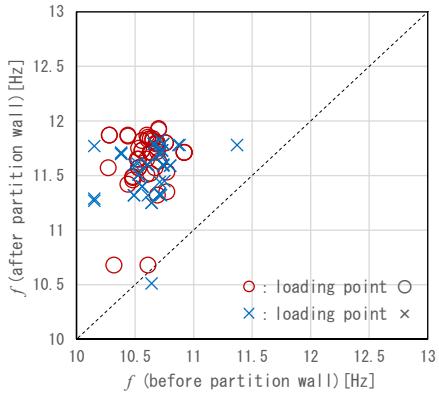


図 3 間仕切壁の有無による 1 次固有振動数の比較

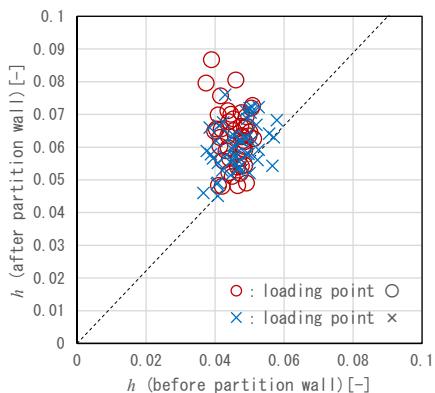


図 4 間仕切壁の有無による 1 次減衰定数の比較

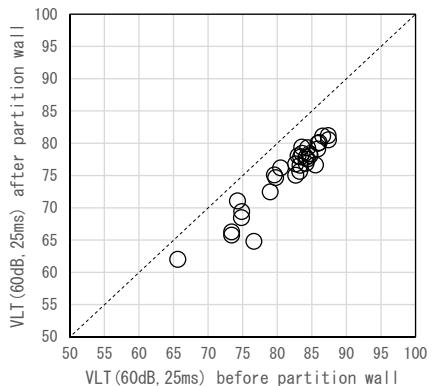


図 5 間仕切壁の有無による VLT の比較

を行い、実測との比較を行う。

3.1 解析手法

解析には Midas iGen を用いる。モデル化の対象は、高さ方向に対象階から上下階の半分とした。柱及び梁、水平プレースを線要素、ALC 床を板要素、外壁及び界壁（内壁を含む）をバネ要素としてモデル化する。なお、ALC 床は 1 枚を 1 つの板要素としてモデル化を行う。外壁及び界壁の重量は等分布荷重（外壁 2,000N/m、界壁 1,300N/m）として付加し、床のパーティクルボード及び仕上げ材は重量のみを考慮する (725N/m^2)。

ALC 床のモデル化については、剛体連結要素を用いて、梁（線要素）の節点と床（板要素）の節点を分ける方法を採用した¹⁾。これにより、長辺の二辺と梁の挙動は分離される。

なお、間柱及び間仕切壁がない試作棟を解析対象とし、間柱及び間仕切壁のモデル化は今後の課題とする。

3.2 解析モデルのパラメータ

本節では、既報¹⁾で実施した模擬床の実挙動と解析結果の固有振動数及び歩行振動解析結果が整合するパラメータを援用する。図 6 に解析モデルの概要図を示す。各要素のパラメータを表 4～表 6 に、柱・バネ支点条件及び梁端部接合条件、ALC 床の境界条件を表 7 及び表 8 に示す。なお、線要素及び板要素のメッシュピッチは 151.67mm とし、減衰定数は、実験結果より全モード一律に 5.6% を与えた。減衰定数は、歩行者本人による減衰を加味した実験結果を用いた。

梁と床の節点間に設定した剛体連結要素の長さは既報¹⁾で採用した 119.7 mm から、128mm に変更した。これは、床上に受振者が存在する場合の減衰定数¹⁾を用いて、模擬床を対象に再同定した値である。

なお、外壁及び界壁は弾性のバネ要素とし、鋼製フレームの座屈を考慮しない圧縮剛性の約 1/10 の剛性とする。これは、固定金物の取り付け位置を考慮した圧縮剛性を参考にパラメトリックスタディを通して、決定した値である。

3.3 解析結果と精度検証

3.3.1 固有振動数

固有値解析により得られた解析モデルの 1 次固有振動数は 12.6Hz であった。試験結果 (10.9Hz) と 1.7Hz の差である。また、別途試験より推定した

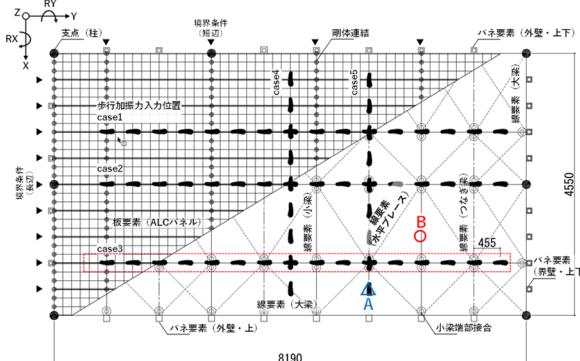


図 6 解析モデル概要及び歩行加振力入力位置

表 4 線要素の物性パラメータ

項目	柱・間柱	大梁・小梁・つなぎ梁	水平ブレース
(鋼材断面)	□150×150 ×12 □80×80×6	H-400×200×8×13 H-250×125×6×9 H-250×125×4.5×6 など	12φ
ヤング係数	205,000 N/mm ²		
せん断変形の考慮	あり		
せん断弾性係数	79,000 N/mm ²		
ポアソン比	0.3		

表 5 板要素の物性パラメータ

項目	ALC 床
ヤング係数	1,910 N/mm ²
せん断変形の考慮	あり
せん断弾性係数	796 N/mm ²
厚み	100 mm
ポアソン比	0.2
単位重量	6.37×10^{-6} N/mm ³

表 6 バネ要素の物性パラメータ

項目	外壁	界壁
復元力特性	弾性	弾性
鉛直バネ剛性	3,000N/mm	2,000N/mm
配置間隔	910mm	455mm

拘：拘束 自：自由

表 7 柱・バネ支点条件及び梁端部接合条件

項目	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
柱・バネ支点	拘	拘	拘	自	自	自
大梁端部接合	拘	拘	拘	拘	拘	拘
小梁端部接合	拘	拘	拘	自	自	自

表 8 ALC 床の境界条件

項目	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
短辺方向	有	有	有	有	有	有
長辺方向	有	有	有	有	無	有

表 9 固有モードの特徴と固有振動数

項目	試験	解析
1 次	梁 1 次 (10.9Hz)	梁 1 次 (12.6Hz)
2 次	梁 2 次 (13.5Hz)	梁 2 次 (18.2Hz)
3 次	床 1 次 (27.2Hz)	床 1 次 (27.0Hz)

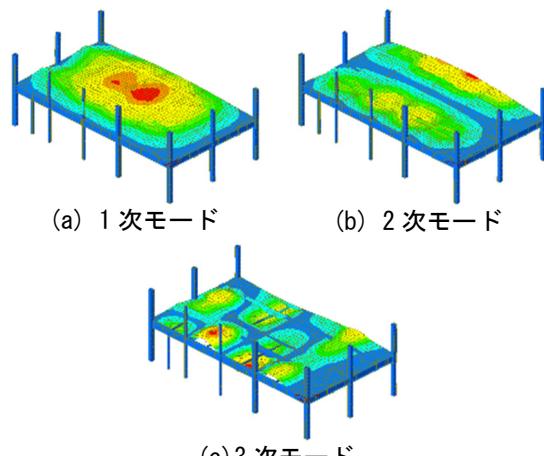


図 7 固有モード（解析）

固有モードと解析モデルの固有モードの特徴が一致している。（表 9 及び図 7）

3.3.2 歩行振動解析

歩行加振力は、実験における歩行者の歩行力を別途計測したものを用いた¹⁾。また、図 6 に示す歩行位置に対して、歩幅 455mm、歩調 2Hz で入力した。なお、試験結果と同様に VLT 算出時に加速度波形に係数 (=60/体重) を乗じることで、体重を 60kgf に基準化した。

図 8 に VLT(25ms, 60dB) の解析結果と実測結果の比較を示す。これによると、VLT の差は -19.6 ~ 1.9dB となっており、全体傾向としては、解析結果が過小評価となっていることがわかる。一方、T(60dB) の差は 0.06 ~ 1.12 秒となっており、概ね一致していることがわかる。これらより、VLT の差は、最大振動レベル VLmax が要因であることがわかる。

次に、図 9 に解析結果と実測結果の VLT が一致している場合（測定点 A）と、一致していない場合（測定点 B）の振動レベル波形の比較を示す。測定点 A (VLT 差 0.98dB) では、一步毎の振動レベルの最大値や収束状況をよく再現できているが、測

定点 B (*VLT* 差 17.95dB) では、局所的に発生している振動レベルの最大値が再現できていない。このような局所的な振動は、主に床仕上げ材の影響であると考えられるが、原因の追究は今後の課題とする。なお、局所的な振動は、梁上計測点で多く発生しているものの同じ歩行位置や測定位置でも、発生する場合としない場合が存在する。

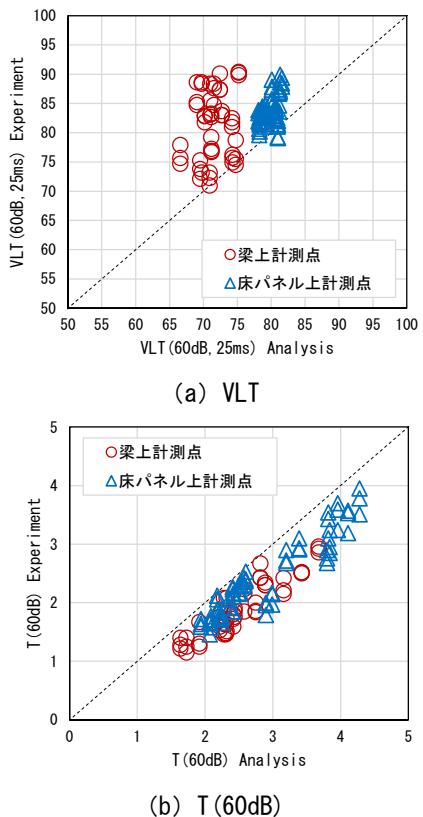


図 8 歩行振動解析結果・試験結果の比較

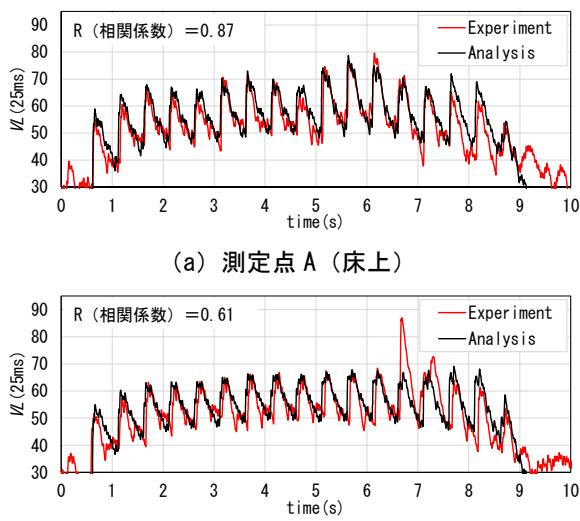


図 9 振動レベル波形
(歩行加振力入力位置:case3)

4. まとめ

本報では、梁と床版の接合が乾式接合の ALC 床における振動特性を把握するため、試作棟を用いて間仕切壁の有無に関する試験を行った。さらに、FEM モデルを用いて、固有値解析及び歩行振動解析を実施し、間柱及び間仕切壁がない試作棟の試験結果との比較を通して、FEM モデルの精度を検証した。以下にそれぞれ結論及び得られた知見を示す。

- (1) 試作棟での試験において、間仕切壁を設置することで、床の 1 次固有振動数は 0.98Hz 高くなり、減衰定数は 1.6% 増加した。歩行時の *VLT* は平均で 6.2dB 小さくなることを確認した。
- (2) 本報で特徴とする剛体連結による分離及び外壁・界壁などのバネ要素パラメータを有する FEM モデルは、固有振動数と歩行振動時の *VLT* 結果において、固有振動数で -1.7Hz の差、*VLT* 差は -19.6~1.9dB となり、過小評価となっていることを確認した。
- (3) 歩行振動時の振動レベルでは、局所的に発生する振動により、試験結果と解析結果の大きな差がみられた。

今後は、局所的に発生する振動の原因追究を課題とし、さらにモデルの精度を向上したい。また、間柱及び間仕切壁がある場合の解析検討を進める。

参考文献

- 1) 西井康真、近藤貴士、北倉友佳、山下仁崇：乾式接合部を有する ALC 模擬床の FEM モデルによる歩行振動解析、大和ハウス技術研究報告、Vol.2, No.1, 2023.
- 2) 上田周明：床衝撃試験方法及び評価方法（JIS 案）、日本建築学会 第 3 回環境振動シンポジウム 環境振動に関する基準及び評価法, pp.9-14, 1985.2
- 3) 松下仁士、長沼俊介、井上竜太、横山裕：種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値、日本建築学会環境系論文集、第 81 卷、第 720 号、pp.153-162, 2016.2

執筆者紹介



北倉 友佳
修士（工学）

ひとこと

『振動』と一口に言っても、建物を揺らす大地震から、人の歩行による微細な振動まで、その種類は多岐にわたります。誰もが快適に過ごせる住宅を提供するためにも、振動に関する研究を今後さらに進めていきたいと考えています。