

令和元年6月26日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02275

研究課題名(和文)大振幅地震動に対する伝統木造住宅の倒壊挙動の解明と耐震安全余裕度の定量化

研究課題名(英文) Collapse behavior analysis and quantification of safety margin if traditional timber buildings against excessive earthquake ground motions

研究代表者

林 康裕 (HAYASHI, YASUHIRO)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70324704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：伝統木造住宅が大振幅地震動を受けたときの、損傷進展過程の解明と倒壊余裕度の定量的評価を可能とし、耐震補強の目標性能を明確化するため、調査・実験・解析に基づいた研究を行った。主な成果は、a)木材の劣化度や材料特性を非破壊で推定可能な試験法の開発、b)実験による伝統木造軸組み架構の倒壊限界の解明、c)倒壊限界に影響する住宅の構造的特徴や被害実態を解明するための調査、d)倒壊限界を定量的に把握可能な設計法の開発である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、南海地震・東南海地震・東海地震に代表されるプレート境界型の巨大地震とともに、その前後に多発する内陸活断層による直下地震の発生が切迫し、古い木造住宅の耐震性向上が急務となっている。本研究の成果である非破壊試験法や耐震診断法は、日本全国に現存する多くの伝統木造住宅や文化財建物に対して、実効性の高い耐震補強の実施や促進に大いに貢献できると考えている。

研究成果の概要(英文)：The damage process and the degree of collapse margin when traditional wooden houses are subjected to excessive strong earthquake ground motions are quantified and the target performance of seismic retrofit is clarified. Our research is based on field survey, experiments, and analyses. The main results are as follows. First, we develop nondestructive test methods of wooden members to identify the degree of degradation and the property of material. Next, we clarify the collapse limit of traditional wooden frames by many static loading tests. Then, we conducted field survey to clarify the structural characteristics and collapse margin of houses. Finally, we develop the design methods to grasp the collapse limit of traditional wooden hoses.

研究分野：耐震構造

キーワード：伝統木造建物 倒壊余裕度 生物劣化 耐震補強 静的加力実験 3次元解析法

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震では6400人を超える死者が発生し、死因の約9割が古い木造住宅の倒壊による圧死と言われている。そして、被害木造住宅の分析から、蟻害・腐朽などの生物劣化が見られた住宅の全壊率が格段に多かったとされている。一方、近年、南海地震・東南海地震・東海地震に代表されるプレート境界型の巨大地震とともに、その前後に多発する内陸活断層による直下地震の発生が切迫し、古い木造住宅の耐震性向上が急務となっている。また、強震動評価技術の向上により、建築基準法で想定している地震荷重レベルを大きく超えた地震動が予測されており、伝統木造住宅の耐震補強の目標性能を合理的に定める上でも、倒壊に至るまでの挙動の解明と倒壊余裕度の定量化が望まれている。

一方、兵庫県南部地震後、伝統木造住宅についても耐震性能解明に関する様々な実験的研究が精力的に行われきた。倒壊挙動の解明に関しても、震動台実験や引き倒し実験などを行い、倒壊挙動を解明しようとする試みがなされていたが、下記のような課題を有していた。

(1) 単位構造要素や実大2層架構の平面架構を対象とした大変形静的水平加力実験では、変形角 $1/10\sim 1/5$ 以上で復元力を喪失するまでの倒壊挙動が明らかとなりつつある。しかし、加力方向と直交する部材による変形拘束効果・補剛効果(立体効果)などが倒壊挙動に及ぼす影響は十分に検討されていない。

(2) 変形性能が高い実大の伝統木造住宅を対象として、震動台を用いた倒壊実験を行うには、加振変位振幅 $\pm 30\text{cm}$ を大きく超える必要があり、実施可能な震動台は限られる。また、施設利用や安全対策も含めて実験費用が多額となり、実験実施組織も限定されてしまう。

(3) 大型震動台を用いた伝統木造建物の倒壊実験は殆ど実施されていない。伝統木造住宅の引き倒し実験は多く実施されているが、対象建物の構造の複雑さ、加力・計測方法の制約から、詳細な分析は殆ど行われていない。従って、倒壊過程(建物内部の損傷進展状況と応力状態)の詳細挙動の分析は殆ど行われていない。

(4) 伝統木造住宅の耐震性能を評価する上で、蟻害・腐朽などの生物劣化の影響が無視できない。木材や木造住宅の劣化診断法に関する提案はあるが、劣化診断結果を住宅の耐震性能値へ定量的に関連付けている研究事例は極めて少ない。客観的で信頼性の高い既往の生物劣化診断技術を駆使し、生物劣化を受けた木造住宅の残存構造性能の推定、倒壊余裕度の定量化、低下した耐震性能を回復するための合理的な補修法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

伝統木造住宅が大振幅地震動を受けたときの、損傷進展過程の解明と倒壊余裕度の定量的評価を可能とし、耐震補強の目標性能を明確化するため、下記を目標とした実験的研究を行う。

- 動的倒壊実験や引き倒し実験では困難な、倒壊に至るまでの損傷過程に関する詳細データを取得可能とするため、立体木造軸組架構の大変形加力システムを開発する。
- 蟻害・腐朽などの生物劣化、加力方向と直交する部材による立体効果などが、伝統木造住宅の倒壊限界性能に及ぼす影響を定量的に評価可能な解析モデルの構築を行う。
- 劣化診断結果と住宅の耐震性能低下度の定量的な関連付けを可能とし、生物劣化を含む伝統木造住宅の限界性能と倒壊余裕度を定量的に評価する。

3. 研究の方法

(1) 非破壊型材料試験法の開発

非破壊で木材の材料試験法として、超音波法と衝撃弾性波法により計測される伝播速度を用いた新たな材料試験法を、改良を重ねながら提案した。そして、提案試験法を適用した小試験体の曲げ破壊試験を行い、材軸方向の伝播速度と曲げヤング係数や曲げ強さの関係を導いた。また、材軸直交方向への伝播速度分布を用いて、木材内部の劣化を推定する方法について検討した。

(2) 架構の静的加力実験

[あみだ形フレーム] 伝統木造軸組み架構に適用可能な補強方法として、新たに、「あみだ形フレーム」を開発し、その構造性能を確認するための静的加力実験を行った。

[京町家] 一般的な2階建て京町家を想定した実大平面架構と、それに耐震補強を施した架構の静的水平加力実験を行った。補強方法としては、構造用合板を用いた方法、乾式パネルと足固めを併用した方法、乾式パネルに代えてあみだ形フレームを用いた方法を比較検討した。

[大垂壁付き架構] 差鴨居とせいの高い垂壁で構成される大垂壁付き架構は、差鴨居付近での柱折損により倒壊限界を決定づける要因となる。そこで、大垂壁付き平面架構の静的水平加力実験を行い、その力学特性の把握と倒壊限界余裕度の把握方法の検討を行った。さらに、大垂壁付き架構の耐震補強法について検討した。

[立体架構] 平面架構の大変形水平加力システムを改造し、立体架構の倒壊限界を把握可能な大変形水平加力システムを開発した。その有効性を例示するため、加賀などに見られる「枠の内造り」を模した 1×2 スパンの立体架構を製作し、静的水平加力実験を行って、倒壊限界の把握や大断面の桁状梁の立体効果について検討した。

(3) 現地調査

[伝統木造住宅の構造実態調査] 耐震診断結果を基に京町家の調査を行うとともに、典型的な架構について非線形解析を行って、倒壊危険性の高い部位の分析を行った。また、京町家長

屋の調査と耐震補強上の留意点について分析した。さらに、重要伝統的建造物群保存地区の三重県関町、美馬市脇町南町、日向市美々津の伝統木造住宅を対象とした調査を行うとともに、全国の伝統木造住宅間で構造的特徴の統計的比較を行った。

[熊本地震の住宅倒壊被害調査] 当初計画にはなかったが、本研究の目的である「木造住宅の倒壊余裕度の解明」を行う上で、貴重な実被害経験である。本被害経験を活かすため、急遽、熊本県益城町、西原村、阿蘇市一宮の強震観測点周辺を中心として、倒壊住宅調査を空中写真と地上目視を併用した調査を実施した。そして、前震本震別・建築年代別・地区毎の倒壊率を分析した。そして、観測されたパルス性地震動が、どのように住宅倒壊と関係したのかを、観測地震動を用いた木造住宅解析モデルの地震応答解析を行うとともに、最大地動速度分布の推定を行った。

(4) 設計法の提案

- (1) 架構の静的加力実験結果を説明可能な、骨組み解析モデルについて検討を行った。
- (2) 大垂壁架構の崩壊形（層崩壊型・全体崩壊型）を推定可能な手法の検討を行った。
- (3) 京町家のような通し柱を有する架構にも適用可能な限界耐力計算法の検討を行った。



(a)補強京町家試験体

(b)大垂壁付き架構

(c)立体架構

図1 大変形静的水平加力実験



(a)長屋京町家調査

(b)脇町の住宅調査

(c)美々津の住宅調査

図2 住宅の構造調査

4. 研究成果

(1) 非破壊型材料試験法の開発

柱材の曲げ強度や曲げヤング係数を推定可能な完全非破壊型の木材材料試験法として、衝撃弾性波法を提案した。提案手法の有効性を示すとともに、評価依頼を受けて重要文化財建物2棟に適用した。

(2) 架構の静的加力実験

[あみだ形フレーム]

木材またはポリカーボネートで作られた横材を、木材の柱に大入れすることで木材のめり込み効果を考慮した新しい耐震補強部材である。あみだ形フレームの復元力特性の算定法と伝統木造住宅の各構面に必要な耐震補強部材の仕様の決定法を提案した。

[京町家]

京町家のような伝統木造住宅の耐震補強を行う際に、構造用合板や面格子壁などの大きな耐力を有する部材を用いると、柱脚の滑りや接合部の破壊（横架材ほぞの引き抜け・脱落）を生じ、倒壊の可能性を高める可能性が高いことを明らかとした。すなわち、多くの接合部の補強を併せて行う必要があることを指摘した。さらに、不適切な補強（例えば、構造用合板を用いた補強）や適切な耐震補強について、実験を通じて例示した。

[大垂壁付き架構]

大垂壁付き架構の柱（独立柱に限らない）は、柱の接合部における断面欠損を考慮した有効断面の曲げ強度の0.5倍程度で折損する可能性を指摘した。また、大垂壁架構の耐震補強法として、柱脚固定度を増すことで大垂壁付き架構の耐力を増大する方法がある。しかし、実際には、下記のような問題点があり、設計上注意する必要があることを指摘した。a) 柱・足固め接合部の補強も同時に行わなければ、固定度が十分ではなく、想定どおりの耐力上昇は見込めない

い。b) 耐力上昇するほど変形性能が低下する。

[立体架構]

実大の立体架構を大変形まで静的加力実験を実施可能なシステムを開発した。枠の内造りに見られる井桁状の大断面梁は、各鉛直構面の復元力特性には殆ど影響を及ぼさない。また、井桁状の大断面梁による鉛直構面間のせん断抵抗機構を実験的に明らかとした。

(3) 現地調査

[伝統木造住宅の構造実態調査]

- (1) 典型的な京町家の架構について、柱の折損や接合部破壊を生じやすい部分を明らかとした。また、長屋京町家の部分的な解体や補強は、特に、継がれた部材の破壊やねじれ振動の誘発をもたらす可能性があり、残された部分も含めた総合的な性能評価を行った上で実施する必要があることを指摘した。
- (2) 三重県関町、美馬市脇町南町、日向市美々津の伝統木造住宅の調査結果より、各地の構造的特徴を明らかとした。例えば、美々津の伝統木造住宅は、a) 壁厚が厚い、b) 降伏ベースシア係数が著しく低い、c) 1階のナカノマの周辺が大垂壁で囲まれており、その周りの2階の部屋がスキップフロアになっている、d) 蟻害が深刻などの特徴を有することを示した。さらに、全国の重要伝統的建造物群保存地区の伝統木造住宅の構造的特徴を比較し、その構造特性の違いを明らかとした。

[熊本地震の住宅倒壊被害調査]

2016年熊本地震における主要観測点周辺で実施した木造住宅被害調査結果に基づき、以下のことを明らかとした。a) 倒壊被害集中域の倒壊率は、耐震化率60%以上であるにも関わらず、倒壊率が60%以上にも達している。b) 震源域の観測地震動は、周期1秒と3秒の2つの卓越周期が卓越している。c) 木造住宅の倒壊には、兵庫県南部地震と同じく周期1秒の周期成分が大きく関与した。d) 兵庫県南部地震における木造住宅の倒壊率被害関数を用いて、倒壊集中域では最大地動速度が150cm/sを大きく超えていたことを推定した。

(4) 設計法の提案

- (1) 伝統木造軸組架構の骨組解析モデルの構築を行った。解析モデルの特徴は、a) 接合部の引き抜け、b) 大垂壁の差鴨居・柱接合部における曲げ耐力低減効果、を考慮可能な点にある。
- (2) 大垂壁付き架構の簡易設計法として、差鴨居付近の柱が折損して倒壊限界変形角が小さな「層崩壊形」と、垂壁の破壊が先行して倒壊限界変形角の大きな「全体崩壊形」を、構面事に判定する設計法を提案した。
- (3) 通し柱を有する京町家のような伝統木造軸組架構の限界性能を簡易かつ合理的に評価可能な設計法として、修正限界耐力計算法を提案している。既往の限界耐力計算では、せん断質点系モデルを用いているために無視している、1、2層の連成効果（通し柱効果）を考慮可能である。通し柱効果を考慮することで、より合理的な耐震補強設計を可能としている。

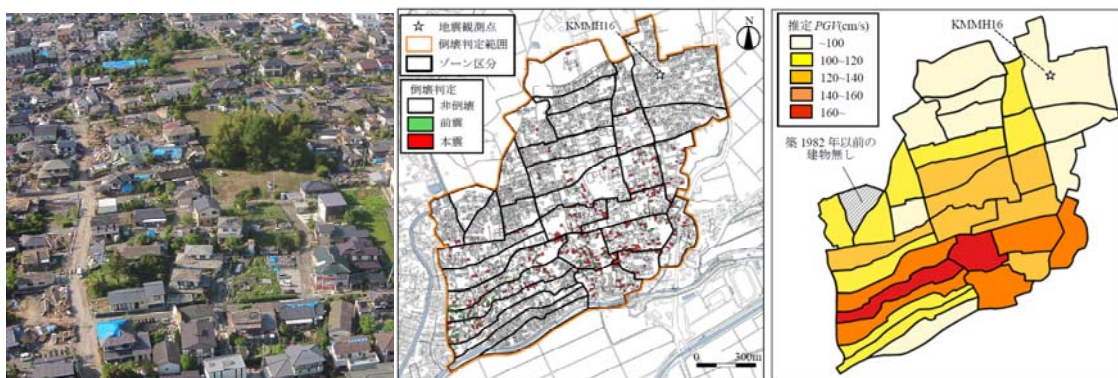


(a) 計測方法

(b) 実施例

図4 柱脚部の補強効果確認実験

図3 衝撃弾性波試験



(a) 空中写真

(b) 倒壊住宅の分析

(c) 推定最大速度分布

図5 熊本地震の倒壊住宅被害（益城町）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

1. 中津有紀子, 大村早紀, 杉野未奈, 林 康裕: 木材とポリカーボネートを横材に用いたあみだ形フレームの復元力特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 84 巻 756 号, 2019, pp. 237-245, <https://doi.org/10.3130/aijs.84.237>
2. 西塔純人, 杉野未奈, 林康裕: 常時微動計測による低層住宅の 1 次固有振動数低下率の変形依存性評価, 在来木造, 軽量鉄骨造および伝統木造について, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 84 巻 757 号, 2019, pp.343-350 <https://doi.org/10.3130/aijs.84.343>
3. 南部恭広, 杉野未奈, 多幾山法子, 林康裕: 伝統木造住宅の耐力要素や重量の地域性に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, 65 B 巻, 2019, pp.149-156
4. 大村早紀, 間平一輝, 杉野未奈, 林康裕: 柱脚回転拘束が大垂壁を有する伝統木造建物の力学的特性に及ぼす影響評価, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 83 巻 751 号, 2018, pp.1285-1293, <https://doi.org/10.3130/aijs.83.1285>
5. 中津有紀子, 小池哲朗, 大村早紀, 杉野未奈, 高取愛子, 林 康裕: 伝統木造建物の耐震補強法に関する研究-あみだ形フレームの力学特性-, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 83 巻 748 号, 2018, pp.827-835, <https://doi.org/10.3130/aijs.83.827>
6. 速水紀文, 村瀬詩織, 杉野未奈, 林康裕: 衝撃弾性波を用いた大径木材の完全非破壊型材料特性推定に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 24 巻 57 号, 2018, pp.649-654, <https://doi.org/10.3130/aijt.24.649>
7. 村瀬詩織, 大村早紀, 杉野未奈, 林 康裕: 2016 年熊本地震における地震動強さと木造住宅の倒壊率の関係, 日本地震工学会論文集, 査読有, Vol.18 No.2, 2018, pp.147-165
8. 大村早紀, 杉野未奈, 林康裕: 大垂壁を有する伝統木造建物の耐力および崩壊形の簡易推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 83 巻 743 号, 2018, pp.147-154, <https://doi.org/10.3130/aijs.83.147>
9. 徳岡怜美, 内田賢, 杉野未奈, 林康裕: 軸組架構の実態調査結果を踏まえた京町家の耐震性能評価: 日本建築学会技術報告集, 査読有, 24 巻 56 号, 2018, pp.123-128, <https://doi.org/10.3130/aijt.24.123>
10. 遠山光輝, 早川小百合, 南部恭広, 杉野未奈, 渡辺千明, 林康裕: 重要伝統的建造物群保存地区・美馬市脇町南町の木造住宅構造調査, 査読有, 24 巻 56 号, 2018, pp.153-158, <https://doi.org/10.3130/aijt.24.153>
11. 亀井功, 村瀬詩織, 杉野未奈, 林康裕: パルス特性化提案手法を用いた 2016 年熊本地震断層近傍観測波のパルス特性評価と応答特性の考察, 日本地震工学会論文集, 査読有, 18 巻 1 号, 2018, pp.18-34, https://doi.org/10.5610/jaee.18_1_18
12. 小池哲朗, 大村早紀, 杉野未奈, 林康裕: 京町家の耐震補強に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 82 巻 736 号, 2017, pp.843-852, <https://doi.org/10.3130/aijs.82.843>
13. Jian Jiao, Yasuhiro Nambu, Mina Sugino, Noriko Takiyama, Chiaki Watanabe, Yasuhiro Hayashi; Regional Structural Investigation on the Preservation Districts of Yuasa and Ine in Japan, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, refereed, Vol.16 No.1, 2017, pp.193-200 <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.193>
14. 徳岡怜美, 内田賢, 杉野未奈, 林康裕: 1 列 3 段型の京町家の間口方向構面における架構の構造的特徴, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 53 号, 2017, pp.119-122, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.119>
15. 菖蒲真生人, 南部恭広, 杉野未奈, 渡辺千明, 林康裕: 宮崎県の重要伝統的建造物群保存地区(日向市美々津)の伝統木造住宅構造調査, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 53 号, 2017, pp.123-128, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.123>
16. 南部恭広, 守屋友貴, 杉野未奈, 渡辺千明, 林康裕: 三重県関町における伝統木造住宅の現地調査と耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 53 号, 2017, pp.129-134, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.129>
17. 井立直人, 多幾山法子: 大断面横架材を有する 2 スパン伝統木造軸組の耐震要素配置と力学特性, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 82 巻 732 号, 2017, pp.247-255, <https://doi.org/10.3130/aijs.82.247>
18. 西塔純人, 西村健, 前田珠希, 林康裕: 被災した軽量鉄骨造住宅の固有振動数に関する調査研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 54 号, 2017, pp.513-516, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.513>
19. 内田賢, 徳岡怜美, 杉野未奈, 高取愛子, 林康裕: 空き家を含む京都の町家長屋の構造調査, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 54 号, 2017, pp.475-480, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.475>
20. 速水紀文, 小林素直, 杉野未奈, 林康裕: 超音波を用いて得られる木材の伝播速度, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 23 巻 54 号, 2017, pp.469-474, <https://doi.org/10.3130/aijt.23.469>
21. 杉野未奈, 山室涼平, 小林素直, 村瀬詩織, 大村早紀, 林康裕: 2016 年熊本地震における

- 益城町の建物被害の分析, 日本地震工学会論文集, 査読有, 16 卷 10 号, 2016, pp.10_69-10_85, https://doi.org/10.5610/jaee.16.10_69
22. 杉野未奈, 大村早紀, 徳岡怜美, 林康裕: 常時微動計測を用いた伝統木造住宅の簡易最大応答変形評価法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 81 卷 729 号, 2016, pp.1869-1879 <https://doi.org/10.3130/aijs.81.1869>
 23. 大村早紀, 南部恭広, 澁谷悦敬, 杉野未奈, 林康裕: 大垂壁を有する伝統木造軸組架構の耐震性能評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 81 卷 727 号, pp.1479-1489, 2016, <https://doi.org/10.3130/aijs.81.1479>
 24. 西塔純人, 北倉友佳, 更谷安紀子, 林康裕: 微動計測を用いた既存木造軸組構法住宅の簡易耐震性能評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 22 卷 50 号, 2015, pp.61-65, <https://doi.org/10.3130/aijt.22.61>

[学会発表] (計 61 件)

1. S.Murase: Relationship between Seismic Intensity and Ratio of Collapsed Wooden Houses in the 2016 Kumamoto, 16thECEE, 2018
2. S.Ohmura: Study on Breakage of Columns in Japanese Traditional Timber Frame Structures with Large Hanging Walls, 16thECEE, 2018
3. M.Sugino: Non-Destructive Test of Large Diameter Wood, 7thACEE, 2018
4. M.Sugino: Experimental Study on Seismic Reinforcement of Traditional Wooden Town Houses in Kyoto, 15thWCTE, 2018
5. S.Ohmura: Simple Estimation Equation Strength and Collapse Mode of Japanese Traditional Timber Buildings with Large Hanging Walls, 15thWCTE, 2018
6. Y.Hayashi: Study on Seismic Reinforcement for Traditional Timber Buildings using Amida-Shaped Frame, 15thWCTE, 2018
7. Xinyan Chen: The Comparison of Mechanical Characteristic and Estimation for Restoring Force of Different SASHIGAMOI Joint in Traditional Wooden Residents, Proceeding of 6th International Conference on Heritage and Sustainable Development, 2018

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 杉野 未奈

ローマ字氏名: (SUGINO, mina)

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号: 80758368

研究分担者氏名: 多幾山 法子

ローマ字氏名: (TAKIYAMA, noriko)

所属研究機関名: 首都大学東京

部局名: 大学院都市環境科学研究科

職名: 准教授

研究者番号: 10565534

研究分担者氏名: 吹田 啓一郎

ローマ字氏名: (SUITA, keiichiro)

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 教授

研究者番号: 70206374

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。