

繰り返し変形が木造住宅の耐震性能に及ぼす影響

井上 涼^{1*}

Effect of repetitive deformations on seismic performance of wooden houses

Ryo Inoue^{1*}

概要

地球環境や住民の資産維持などの観点から木造住宅についても長寿命化が求められている。木造住宅は、使用期間内において蟻害や腐朽といった生物劣化や繰り返し変形を経験することによって耐震性能が低下する可能性がある。後者について、大地震を複数回にわたって受ける場合や大地震を受けた住宅がその後に余震を受ける場合を想定した、比較的大きな変形の繰り返しを対象とした劣化挙動についての検討は進められており、地震応答解析に用いるための耐力要素の復元力特性なども提案されているところである。本稿では、このような繰り返し変形による木造住宅の耐震性能劣化に着目した既往の研究について紹介しつつ、筆者が取り組んだ、通常では弾性域とみなされるような小変形の繰り返しが木造住宅の耐震性能や大地震時の応答変形に影響するか否かを検討した内容を紹介する。

1. はじめに

近年、環境問題に対する関心の高まりとともに、炭素固定化などを目的として木材の積極的な利用を目指した取り組みが進められている。建築分野においては、特に木材を構造材として用いた建築物の建設が促進されている。一方で、木造住宅についても地球環境および森林環境、さらには住民の資産維持などの観点から、2009年に長期優良住宅普及促進法が施行されるなど、長寿命化が求められている状況にある。木造住宅を長期的に使用するためには、これから建てられる新築住宅の高耐震化はもちろんのこと、既存住宅についても適切な改修・修繕をおこなっていく必要がある。

一般的に耐震性能は新築時の性能をもって議論されることが多い。しかし、木造住宅は、使用期間内に腐朽や蟻害といった生物劣化、または繰り返し変形することなどによって耐震性能が低下する可能性がある。前者について、耐力要素に生物劣化が生じた場合には急激に耐震性能が低下すると考えられる。そこで、生物劣化を受けた既存木造住宅の残存耐震性能の正確な評価を目指して、強制的に劣化処理を施した耐力要素について性能確認実験を実施し、得られた実験データをデータベース化するなど^{例え}ば¹、様々な取り組みが進められているところである。後者は、使用期間内に複数回受ける可能性がある地震によるものである。繰り返し変形を経験することで、新築時と比較して耐力や剛性が低下することが考えられる。実際に2016年熊本地震の際には、2度にわたる震度7の大地震に加え、複数回の余震が観測された。表1は、各県庁所在地について、過去30年における震度ごとの地震発生回数を気象庁震度データベース²より調べ、最大数を記録した県庁所在地のデータを震度ごとに示し

2023年10月5日受理。

¹〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1 熊本大学大学院 先端科学研究部

* E-mail: rinoue@arch.kumamoto-u.ac.jp

たものである。例えば、震度 3 は茨城県水戸市、震度 5 強は岩手県盛岡市での発生回数である。震度 4 や 5 弱といった地震が各地でしばしば発生しているほか、地域によっては震度 3 程度の小地震が多発している状況にある。したがって、このような複数回の地震による繰り返し変形が木造住宅の耐震性能に与える影響を把握しておくことは重要であると考ええる。

繰り返し変形による劣化現象は一般的に疲労現象と呼ばれており、建築分野では特に鋼構造分野で研究が進んでいる。これは鋼材の疲労現象が耐震性能へ与える影響が大きいためである。一方で木造住宅においても、面材耐力壁や筋かい耐力壁といった主要な耐力要素について、繰り返し変形による劣化傾向の把握が進められている。本稿では、木造住宅の耐力要素や耐震性能に繰り返し変形が与える影響について、既往の文献と併せて著者のこれまでの研究として、中小地震を想定した小変形の繰り返しに着目した検討内容を紹介する。

表 1 過去 30 年間における各震度に対応する地震の最大発生回数

震度階	震度 2	震度 3	震度 4	震度 5 弱	震度 5 強
発生回数	679	335	81	7	3

2. 大変形の繰り返しによる影響

本章では、繰り返し変形による劣化傾向について報告している既往文献をいくつか簡単に紹介する。

木造住宅の主な耐力要素は耐力壁であり、近年は合板耐力壁などの面材壁と筋かい壁の 2 種が主流となっている。特に面材壁は釘接合部の性能が重要となるため、耐力壁のみならず、釘接合部についても繰り返し変形による劣化挙動について検討されている。釘接合部は地震による正負交番繰り返し荷重を受けた場合に低サイクル疲労を引き起こすことが知られており、特に繰り返される変形が大きい場合には、耐力や靱性が低下することが報告されている。釘接合部の劣化現象について報告した例として、例えば、宮澤³⁾は、釘接合部の風や地震時の挙動を明らかとすることを目的として数百から数千の繰り返し荷重下での耐力低下について実験的に検証しており、振幅 1 mm 以上では釘の破断を伴う疲労破壊の可能性を報告している。徳田⁴⁾は、主材をベイツガ製材、側材をベイツガ合板とした試験体の実験結果より、実用上の疲労限度を耐力比にして約 30 % と提案している。澤田ら⁵⁾は、CN50 釘を用いた合板とホワイトウッドの接合部について 0.5 mm から 5.0 mm までの変形を 10 回ずつ繰り返した実験結果を報告し、ピーク荷重の低下傾向を確認している。平井ら⁶⁾は、CN50 釘を用いたラーチ合板とトドマツの接合部実験より、動的載荷の場合は釘の低サイクル疲労が起こる可能性を示している。

また、耐力壁についての先行研究として例えば次のようなものがある。大野ら⁷⁾や梶川ら⁸⁾は、筋かい耐力壁および合板耐力壁について、定振幅を最大 10 回繰り返す実験をおこない、その結果を報告している。下村ら⁹⁾は、木造住宅の耐風性能を評価するための復元力特性を検討することを目的とした繰り返し加力実験を実施しており、荷重およびエネルギー吸収性能が繰り返し回数の増加とともに低下することを報告している。村地ら¹⁰⁾は、1/200 rad 以上の変形を対象としたランダム載荷により耐力の劣化傾向を考察し、疲労寿命について論じている。さらに、五十田ら¹¹⁾は、枠組壁工法仕様の石膏ボード壁を対象とし、1/120 rad 以上の変形の繰り返しによる劣化傾向を確認し、合板壁などと比較して荷重低下が大きいことを報告している。山崎ら¹²⁾は、筋かいおよび合板耐力壁を対象とし、一連の研究において大変形域での繰り返し載荷による耐力の劣化傾向を報告している。具体的に、終局変位の 1/2 倍以上の繰り返しによって、筋かい壁では最大耐力が低下、合板壁の場合にはほとんど耐力がなくなったこと、繰り返し回数の増加に伴う荷重低下は一定値に収束する傾向がみられ、変形が大きいほど収束値が小さくなることなどを報告している。また、繰り返し変形に対する劣化を抑制することを目的に、制振素材を耐力壁に組み込む試みもいくつかなされている(例えば 13)。

これらは主に、複数回の大地震を受ける場合や大地震を受けた住宅がその後の余震を受ける場合を

想定した地震時挙動の追跡を目的としたものであり、降伏変位を超えるような変形の繰り返しによる劣化特性に着目して実施されたものが多い。繰り返し回数が増すごとにピーク荷重は低下していくが、特に最大荷重を迎えるような大変形が繰り返される場合には目立った耐力低下がみられ、釘の疲労破壊が発生するようである。なお、このような比較的大きな変形の繰り返しについては、地震応答解析に用いるための劣化を考慮した復元力特性¹⁴⁾なども提案されているところである。

3. 小変形の繰り返しによる影響

一方で筆者らは、降伏変位以下の小変形の繰り返しに着目した。大地震と比較して稀地震以下の中小地震の発生頻度は高く、変形は小さくとも繰り返される回数は多くなる。実際に、表 1 に示すように例えば茨城県では過去 30 年間で震度 3 の地震が 300 回程度発生している状況である。小変形が多数回繰り返される場合であっても、大変形と比較すると微量ながら、等価剛性やエネルギー吸収性能の低下が考えられる。そこで、一般的に弾性域とみなされ、現状考慮されていない中小地震による小変形の繰り返しが、釘接合部や面材耐力壁の強度性能に与える影響を把握するとともに、木造住宅の耐震性能に与える影響を把握することを目的とした。

3.1 釘接合部および実大壁の小変形の繰り返し実験

釘接合部および実大壁について小変形を繰り返し、劣化傾向を確認した^{15, 16)}。釘接合部（図 1）については、側材として構造用合板、OSB、MDF（いずれも $t=9$ mm）、および石膏ボード（ $t=12.5$ mm）の 4 種、主材としてスギ集成材と SPF の 2 種、接合具として N50 釘と CN50 釘の 2 種を組み合わせる試験体を作成した。実大壁（図 2）については、幅 910 mm、高さ 2730 mm の仕様で、面材は釘接合部試験体と同様の構造用合板と石膏ボードの 2 種とし、N50 釘を用いて 150 mm ピッチで軸組材に留め付けた。なお、釘接合部については各仕様 6 体ずつ、壁試験体については 3 体ずつ試験に供した。

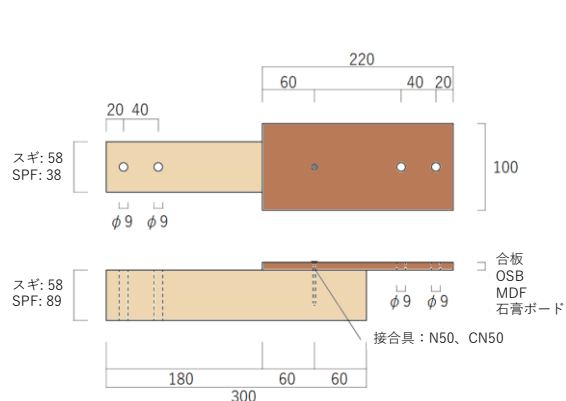


図 1：釘接合部試験体寸法（単位：mm）

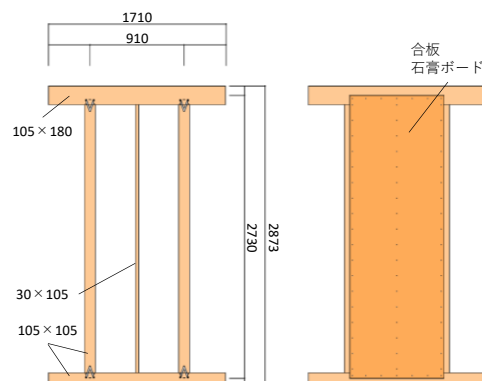


図 2：壁試験体寸法（単位：mm）

釘接合部、実大壁それぞれ、表 2 に示すように中小地震を想定した小変形を繰り返した。例えば釘接合部の場合の加力スケジュールは、 ± 0.2 mm $\rightarrow$ ± 0.5 mm $\rightarrow$ ± 1.0 mm $\rightarrow$ ± 1.5 mm $\rightarrow$ ± 2.0 mm の変形を順に多数回繰り返した後、最大荷重

表 2 制御変位と繰り返し回数

制御変位（実大壁） （ $\pm$ rad）	制御変位（釘接合部） （ $\pm$ mm）	繰り返し回数
1/2000	0.2	200
1/1000	0.5	200
1/450	1.0	50
1/300	1.5	50
1/200	2.0	10

の 8 割まで荷重が低下するまでの単調引張加力である。また、一般的な性能評価試験で用いられる加力スケジュールに従って載荷したものを対照試験体として、小変形を繰り返した試験体との強度特性値の比較に用いた。

実験結果の例として、実大壁試験体について、図 3 に各ステップにおけるピーク荷重の推移を 1 回目の荷重に対する割合として示し、表 3 に完全弾塑性モデルによって算出した強度特性値の一覧を示す。

接合部試験体、壁試験体共に、同一振幅が繰り返される状況において、微小な変形の場合でもピーク荷重が低下することが明らかとなった。また、小変形の繰り返しにおいても、既往文献¹¹⁾と同様に石膏ボード壁の荷重低下傾向は合板壁と比較して大きいことを確認した。釘接合部の実験では、本研究で取り上げた木質面材を用いた釘接合部のピーク荷重の低下傾向は、いずれの軸組材、接合具を用いた場合でも概ね同様であるという結果を得ている。

一方で、いずれの面材の場合においても、繰り返し小変形が釘接合部や実大壁の降伏耐力や最大耐力といった強度特性値に明確な影響を与えないことが明らかとなった。これは、鋼板釘打ち接合部について、疲労試験で破壊しなかった試験体に対して静的実験をおこなった結果¹⁷⁾とも一致するところである。繰り返される変形が小さい内は、経験変形までの荷重が低下するものの、新規変形では、初期骨格曲線まで荷重が回復していく（新規変形における荷重値を低下させない）傾向がみられたためである。

なお、接合部の劣化傾向を既存の面材張り大壁の耐力計算方法に適用することで、実大壁の荷重低下傾向を概ね説明可能であることも確認している。

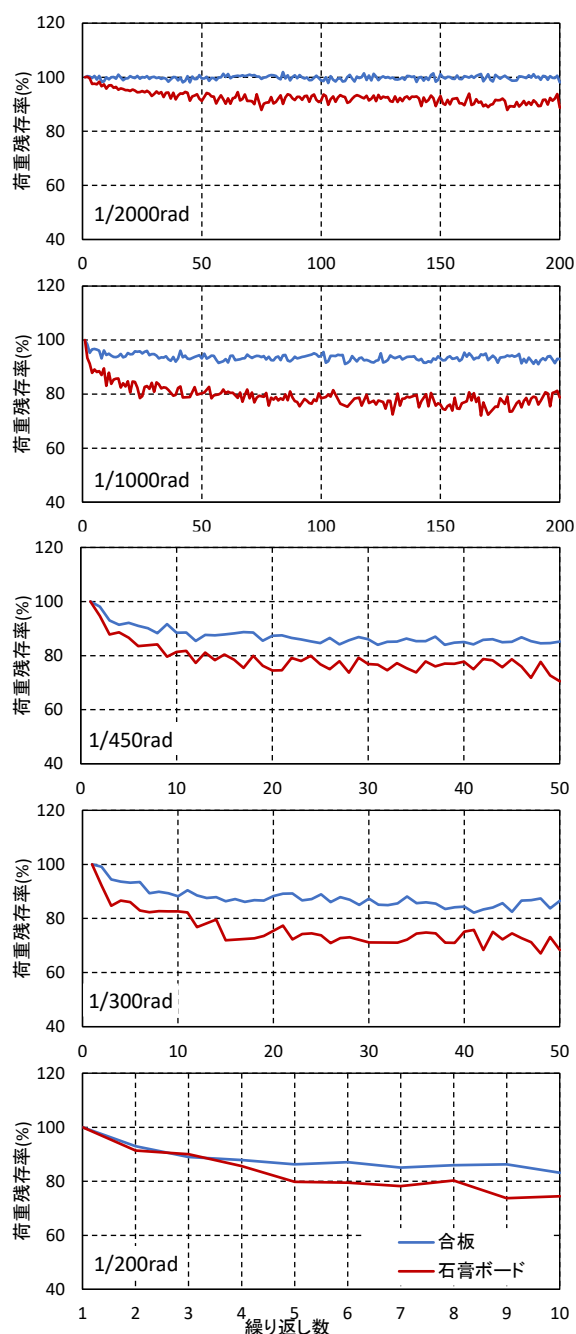


図 3：ピーク荷重の推移（壁試験体）

表 3：強度特性値の一覧（壁試験体）

		P_{max} (kN)	P_y (kN)	K (kN/mm)	P_u (kN)
合板	対照試験体	7.35	4.16	0.92	6.61
	繰り返し試験体	6.83	4.06	0.76	6.01
	繰り返し／対照	0.93	0.98	0.82	0.91
石膏ボード	対照試験体	3.97	2.55	0.49	3.60
	繰り返し試験体	4.07	2.44	0.55	3.61
	繰り返し／対照	1.02	0.96	1.13	1.00

3.2 小変形の繰り返しを考慮した地震応答解析

実験で得られた合板壁および石膏ボード壁の経験変形と繰り返し数関係を基に算出したピーク荷重の低減係数を用いて、2 質点系せん断モデルによる応答解析を実施した¹⁸⁾。復元力特性は五十田らが提案している改良 EPHM¹⁴⁾とした。なお、1/200 rad 以上の繰り返しでは、既往の劣化則を用いて指向点の荷重低下を表現した。解析条件の詳細については割愛するが、耐力要素は合板耐力壁と石膏ボード壁のみとし、仕上げはモデルに含めていない。また、小変形の繰り返しが新規変形での荷重に影響しないものとした。解析パラメータは、降伏時のせん断力係数 C_0 (1 階の存在せん断耐力/建物重量) 8 種、石膏ボード壁が耐力中に占める割合 3 種 (0%、20%、40%)、劣化条件 4 種 (大地震のみを入力する場合、震度 3 を 300 回、震度 4 を 100 回、震度 5 弱を 10 回入力後にそれぞれ大地震を入力する場合)、大地震波 8 種 (KiK-net 益城 (前震、本震)、JMA 神戸、JR 鷹取、想定波 (東海・富士、霞が関)、JMA 川口、KiK-net 日野) とした。震度 3、4 及び 5 弱の地震波は BSL2 に倍率を乗じて作成した。線形加速度法、減衰定数は初期剛性比例型で 5 % として応答解析を実施した。なお、基準法で規定される要求性能をギリギリ満たす住宅の C_0 は 0.2 から 0.3 程度となる。

解析結果として、図 4 に健全の場合に大地震が入力された場合と比較した応答倍率を示す。ただし、ここには健全時の応答変形が倒壊相当となった解析モデルの結果は含んでいない。また、図中の割合は、石膏ボードが耐力中に占める割合を示す。地震波や耐震性能の組み合わせによって応答倍率にばらつきがみられたものの、平均応答倍率に着目すると、 C_0 が 0.2 以下となるような著しく耐震性能の低い住宅を除けば、中地震を複数回経験する場合でも大地震時の応答変形に大きく影響しないことが明らかとなった。さらに、保有耐力に占める石膏ボードの割合の違いで、応答倍率に特筆すべき差異は認められず、考慮の必要が小さいことがわかった。これは、大地震時には応答変形が必ず新規領域に入るためであると考えられる。

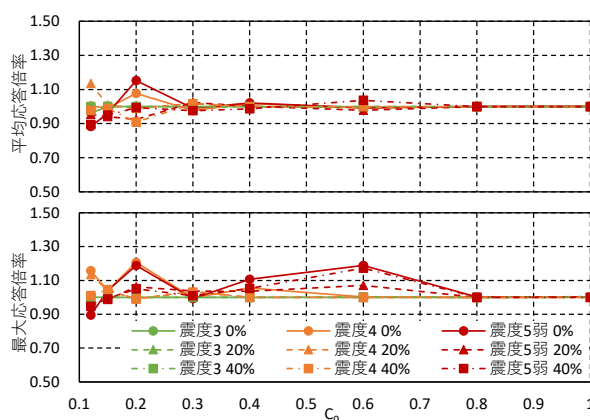


図 4 健全に対する最大応答変形の倍率

4. まとめ

本稿では、使用期間内に発生する可能性のある複数回の地震による繰り返し変形が、木造住宅の耐震性能に及ぼす影響に着目した研究内容を紹介した。

最大荷重を迎えるような大変形の繰り返しは釘の疲労破壊の要因となり、耐力や靱性に大きく影響することが既往研究によって明らかとされていること、またその後の地震時の応答変形に影響を与える可能性があることを示した。また、筆者が取り組んだ複数回の中小地震による繰り返し変形を受ける場合については、釘接合部や実大耐力壁の実験から、経験変形までの領域でピーク荷重や等価剛性の低下が認められるものの、一般的な性能評価に用いられる降伏荷重や最大荷重といった強度特性値には明確に影響しないことを明らかとした。また、複数回の中小地震が大地震時の応答変形に与える影響は小さいことを確認した。

現行基準では大地震時に建物が倒壊しないことを想定して必要性能が規定されているため、大地震後に継続的に住宅に住み続けるためには、基準に対して保有耐力を引き上げる必要がある。中小地震の影響は小さいという結果が得られたが、いずれにせよ、必要耐震性能に対して余裕をもった性能を付与しておくことで、より長く使い続けることのできる住宅が実現するのではないかと考える。

参考文献

- 1) 森拓郎, 田中圭, 河野孝太郎, 中畑拓巳, 築瀬佳之, 栗崎宏, 腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断耐力の推定, 材料, 63 (4), pp. 314-319, 2014
- 2) 気象庁, 震度データベース, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>, 2020年6月9日参照
- 3) 宮澤健二, 釘せん断接合部の繰返し荷重における耐力と変形特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1289-1290, 1985
- 4) 徳田迪夫, 釘接合部の両振れ繰返し力に対する疲労特性, 木材学会誌 33 (7), pp.605-609, 1987
- 5) 澤田圭, 平井卓郎, 繰返し加力が機械的接合部のせん断力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75-76, 2009
- 6) T. Hirai, T. Uematsu, Y. Sasaki, M. Toda, O.G. Wanyama, K. Sawata, Dynamic responsive characteristics of nailed plywood timber joint under harmonic vibrations, J. Wood Sci., 58, 408-416, 2012
- 7) 大野吉昭, 岡部実, 佐久間博文, 下屋敷朋千, 耐力壁の水平加力試験における繰返し回数の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.279-280, 2000
- 8) 梶川久光, 三津橋歩, 高木良, 小川春彦, 六車典子, 野口弘行, 木質系実大耐力壁面の動的挙動に関する研究 その5 繰返し回数による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.457-458, 2008
- 9) 下村祥一, 大熊武司, 加工方法の違いが木造軸組工法耐力壁の復元力特性に及ぼす影響とそのモデル化手法 木造軸組構法耐力壁の耐風性能評価用復元力特性に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集 607, pp.133-140, 2006
- 10) 村知朋和, 五十田博, 三宅辰哉, 橋爪丈夫, 合板耐力壁の最大変形と累積エネルギーをパラメータとした限界性能に関する実験, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 50, pp.85-88, 2007
- 11) 五十田博, 岡崎友也, 三宅辰哉, 木造耐力壁の最大変形と累積エネルギーを指標とした限界値に関する一考察 その3 せっこうボードの繰返し実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.197-198, 2009
- 12) 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安, 任意変形履歴を受ける木造耐力壁の耐力及びエネルギー吸収性能 繰返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 84 (765), pp.1443-1451, 2019
- 13) 峯村廣紀, 五十田博, 服部学, 余震や繰返し加力に対する劣化を抑制した壁を組み込んだ木造住宅の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 79 (698), pp.491-498, 2014
- 14) 人見祐策, 五十田博, 河合直人, 大変形と繰返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力モデル -木造建物の地震時挙動に関する研究 その2-, 日本建築学会構造系論文集, 75 (646), pp.2299-2306, 2009
- 15) R. Inoue, T. Mori, A. Ariki, S. Matsumoto, Evaluation of single shear performance of nailed joint damaged by cyclic deformation due to moderate earthquakes, Construction and Building Materials, 342, 128044, 2022
- 16) R. Inoue, T. Mori, S. Matsumoto, Effect of numerous small deformations caused by moderate earthquakes on shear performance of wooden walls, Construction and Building Materials, 364 130016, 2023
- 17) 林知行, 佐々木光, 鋼板釘打ち接合部の疲労特性, 木材研究・資料, 17, 112-121, 1983
- 18) R. Inoue, T. Mori, S. Matsumoto, Effect of Numerous Small Deformations Due to Moderate Earthquakes on Seismic Response of Wooden Houses, Buildings 13(4), 1062, 2023

著者プロフィール



井上 涼 (Ryo Inoue)

＜略歴＞ 2018 年広島大学工学部第四類（建設・環境系）建築プログラム卒業／2020 年広島大学大学院工学研究科建築学専攻修了／2023 年広島大学大学院先進理工系科学研究科先端理工系科学専攻修了（博士（工学））／2023 年京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員／2023 年熊本大学大学院先端科学研究部助教、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞安全に長期使用が可能な木質構造の実現のための研究＜趣味＞ドライブ、旅行、モータースポーツ観戦など。