

### 3.1.2.2 木造建築物を対象とした簡便かつ高精度な耐震診断技術の開発

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成18年度業務目的

##### (2) 平成18年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) 木造住宅の耐震診断値の測定法の提案およびリスクコミュニケーションツールへの展開
  - 2) 既存木造住宅の耐震診断法確立のための実験的研究
    - 2-1) 木造家屋の耐震壁および雑壁量の減少に伴う振動特性の変化
    - 2-2) 簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性
    - 2-3) 既存住宅耐震性の経年変化に関する研究
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 木造建築物を対象とした簡便かつ高精度な耐震診断技術の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
名古屋工業大学 大学院工学研究科	教授	岡田成幸	okd@nitech.ac.jp
名古屋工業大学 大学院工学研究科	教授	谷口仁士	
北海道大学 大学院工学研究科	名誉教授	城 攻	
北海道大学 大学院工学研究科	助教授	高井伸雄	
北海道大学 大学院農学研究科	教授	平井卓郎	
北海道立北方建築総合研究所 生産技術部	研究員	植松武是	
松本建工株式会社 技術研究所	所長	林 勝朗	
日本データサービス株式会社	技術顧問	石山祐二	
松本建工株式会社 技術研究所	研究員	松田健志	
北海道大学 大学院工学研究科	大学院生	田畑直樹	
北海道大学 大学院工学研究科	同	名知典之	
北海道大学 大学院工学研究科	同	島田佳和	
名古屋工業大学 大学院工学研究科	同	中嶋唯貴	
名古屋工業大学 大学院工学研究科	同	石田隆司	

(c) 業務の目的

地震被災度の高い既存木造建物に対して、耐震安全性を高めるため、耐震診断技術の開発、耐震補強指針の開発、行政ならびに市民が容易に理解でき普及可能性の高い耐震補強技術の開発、耐震補強後の建物についての耐震補強診断技術の開発を行う。

(d) 5（あるいは計画年数）ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：実施業務の要約

建物微動の簡易耐震診断法への利用可能性の検討：木造住家の耐震性診断を微動の挙動複雑性（カオス性）に着目した方法で定式化するために、その有効性と汎用性について、既存データを用いて検討した。

木造住家の耐震診断上の問題点の検討：木造耐力壁（筋かい軸組を含む）には多くの仕様があるが、現行法規では同一の基本仕様に対して一律の許容耐力が与えられている。しかし、実際の建物中における耐力壁のせん断耐力は、基本仕様が同じでも、鉛直荷重や柱脚・柱頭部の接合仕様など、建物中における脚部浮き上がり拘束の程度によって大きく異なる。現在は柱脚・柱頭接合部の先行破壊による耐力壁の転倒を避けるため、一定の接合仕様に従うか、構造計算による接合耐力の確認を行うことになっているが、既存建物にはこのような接合耐力の確認が行われていないものが多いことが判明した。

住宅の総合耐震性に関する非破壊調査法の検討：既往診断法に関する文献調査の他、低

刺激入力時の住宅の応答特性とそれによって評価可能な耐震性能項目、耐震性能評価のための実在住宅における震動測定方法（換振器の配置等）、外装材等の非構造部材の耐震安全性の評価方法、躯体の老朽化とそれに起因する構造耐力の低下の評価方法、等々に着眼して情報を整理し、各種震動測定による躯体及び非構造部材の耐震性能評価法とその適用範囲について検討するとともに、実在住宅における震動測定を実施した。

木造住家の簡易耐震診断による被害予測と耐震補強への活用に関する検討：簡易耐震診断による判定値を被害予測と耐震補強への活用を目的に診断値と被害との関連分析と自己診断のばらつきに関する検討を行った。前者については、阪神淡路大震災で被災した家屋の診断を行い、診断値 1.0 以上あれば大きな被害を免れることを明らかにし、また後者については、愛知県内で 150 軒の調査から 30 軒を選択し、専門家による詳細診断を行って自己診断のバラツキを明らかにした。

簡易耐震診断法の他種構造形式への適用可能性の検討：木造以外の鉄筋コンクリート造・鉄骨造・ブロック造などの構造形式への微振動による非破壊診断の適用は未知であるため、先ずその可能性について検討するための基礎的な資料の収集を行った。現地実測データと耐震性能との関わりは、構造体の水平剛性とそのばらつき度合い、減衰性能とそのばらつき度合いが主たる要因と考えられるが、この他の実測ないしは聞き取り調査あるいは構造関連書から比較的簡易に得られる資料の重要性について検討を行った。

## 2) 平成 15 年度：実施業務の要約

14 年度の結果を承け、耐震診断事例を増やし、関連の資料収集を愛知県にて行った。また、低レベル振動による診断の問題点を明らかにするために、実大振動実験を実施した。さらに、木造住家の構造複雑化に鑑み、混構造住家の診断の可能性についても検討した。その結果、以下のことが成果として得られた。

愛知県における住家所有者による自己診断と専門家による耐震精密診断との精度比較：素人による「わが家の耐震診断表」を用いての自己診断は極めて精度の悪いことが判明した。その原因は、特に偏心率関連の評点にあること・壁量関連の計算ミスが多いことなど、専門的項目が逆に精度劣化に繋がっている。

愛知県における建物微動による簡易耐震診断の実施：簡便かつ精度の高い診断方法の開発を目的として、前年度の北海道での計測に加え、愛知県において建物の微動を計測しその記録より、住家の固有周期に加え、揺れの複雑さをカオス度の概念より数値評価し併用することにより、診断精度が格段に向上することを示した。また、カオス度の計算に当たり、その精度向上のためのノウ・ハウが蓄積できた。

また、札幌市の既存木造住家においても同様の診断を行い、住様式の地域差による影響も検討した。

木造実大箱型モデル試験体を用いた振動台実験：建築構法（仕様）・偏心率などを考慮した木造実大箱型試験体を製作し、北海道立北方建築総合研究所所有の振動台を用いた加振実験を実施した。実験では、試験体の地震応答特性を把握するための換振器の種類や配置パターンについても比較を行った。常時微動、調和振動、White Noise、実地震波に対する実測データを整理・分析し、以下の点について検討した。①換振器の配置による応答特性の評価可能範囲と評価精度、②偏心率と地震応答特性との関係、③構法

(仕様)と地震応答特性との関係、④低レベル加振時と大地震時の応答特性の違い、⑤低レベル加振時の応答特性と偏心率、構法との関係、⑥大地震波入力前後の応答特性の変化。以上により、常時微動測定や低レベル加振による耐震性能評価に関する検討課題の整理を行った。

簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性：近年の木造住家の構造複雑化に鑑み、木造に加えてRC造やコンクリートブロック造を併用した混構造住家の診断可能性を検討すべく、基礎となるRC及びSRCによる構成部材の振動測定を実施した。その結果、RCについては無損傷時の卓越周期が損傷時において面内方向及び面外方向の両方向とも2倍程度に長周期化することが分かった。また、SRCにおいては、フーリエスペクトルがコンクリートの強度差による卓越周期の相違と共に、常時微動に比べてと強制加振により周期が若干長期化すること、およびピーク曲線の山の幅が大きくなること等が判明した。

### 3) 平成16年度：実施業務の要約

主として以下の5点について研究を進め、住家の低レベル振動測定による高精度耐震診断法の実用化に大きく前進した。また、屋外からの測定法も試行し、その有効性を確認した。

木造住宅の耐震性能変化に関する実大実験：愛知県における住家解体工事を利用した壁率の変化（精密耐震診断値の低下）に伴う振動特性の変化について、強制加振と微動観測から得られる固有周期の変動を分析した結果、建物固有周期等の変化に影響が大きく現れ、建物微動を利用して住家耐震性が十分に把握出来ることを確認した。

レーザードップラー振動計による建物外部からの診断：屋外からの測定法を導入することにより、測定の簡便化が際立つことが期待される。レーザー光を利用したドップラー振動計を通常地震計システムと併用して測定を行った結果、スペクトル解析に十分耐える分解能力を持つ記録を得た。解析法を工夫することにより、耐震診断への応用の道が開けた。

微動実測による既存木造住宅の耐震診断法確立のための実験的研究：前年度に引き続き、構法・耐力壁の配置の異なる実大箱型試験体の正弦波・White Noise・実地震波による加震実験を実施し、既存住宅の応答特性を適正に評価するための換振器の配置法や被災前後の振動応答特性と被災程度との関係等を示すためのデータを蓄積し、様々な周期成分を含むランダム波に対しては、常に低剛性側の応答加速度が大きくなるとは限らないこと等を示すと共に、建物重心位置で計測した固有周期から建物の水平耐力（水平剛性）を推定する方法についての問題点と補足法等を検討した。

既存住宅耐震性の経年変化に関する研究：既存住宅の耐震性能初期値を求め、さらに経年変化による耐久性能劣化度を推定し、両方のファクターからその時点での耐震性能を簡便に予測しようとする手法を展開している。また、精密耐震診断法が大改訂されたことに伴う、評価値の新旧比較を行うため、新診断法による計算マクロを作成し、新旧の評価値比較を実施した。

簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性：近年の住宅の構造複合化に対応し診断結果の精度向上を目的とする。住宅の構造形式を、木造・コンクリートブロック造・RC

造・鉄骨造とそれらの混合構造に分類した。幾つかの異なる構造形式および偏心や床面内変形を伴う住宅の振動計測を実施し、その影響を無視できないことを明らかにした。

#### 4) 平成17年度：実施業務の要約

主として以下の6点について研究を進め、住家の低レベル振動測定による高精度耐震診断法の実用化に大きく前進した。

改訂耐震診断法（精密診断法1－保有耐力診断法－）のExcelマクロの作成：2004年7月に耐震精密診断法が大改訂され、本研究提案の診断法がこれに追随しているかどうかの新たなかつ大きな検証作業が発生した。この検証を本年度の主目的に据え、昨年度までに収集した住家診断・微動記録を主たる解析対象として改訂診断値（保有耐力診断法による略算必要耐力表を用いた精密診断）を新たに求め、微動記録から推定される診断値との比較を行った。そのための計算評価ツールをMS-Excelのマクロ言語を用いて作成した。

木造住宅の現位置的耐震診断値測定アルゴリズムの改良：上記ツールを用いて新たに診断値を求め、微動記録からの推定値と比較を行った。その結果、改訂診断値は住家の固有周期との関係性が強く示唆され、さらに狭帯域フィルタを操作したカオス度を導入することにより、より精度の向上が図られることが分かった。一方で、改訂診断法が地盤・基礎に相当する下部構造と上部構造の診断を分割する方法を採用したことにより、微動を用いる総合診断との齟齬が問題点として指摘された。

木造家屋の耐震壁量の減少に伴う振動特性の変化：診断法が改訂されたとはいえ、旧診断による診断値は未だ多く使われており、影響力が大きい。旧診断値が意味する耐震性能についても考察しておく必要がある。そこで、実存する木造家屋の構造壁を徐々に取り除き、旧耐震診断値および構造特性量の変化に伴う卓越周期の定量的把握を行った。その結果、壁量として長さ（雑壁を含まない壁のみ）と面積（雑壁を含む）を変数とした場合、家屋の卓越周期との相関係数は「面積」の方が高い値となった。両者の関係式から導いた「耐震診断値(振動)」と従来の精密耐震診断値と比較すると、精密耐震診断値が1.0以上では、「耐震診断値(振動)」は約0.3程度高めになり、1.0未満では、両者はほぼ同じ値となった。この結果の考察として、雑壁は耐震壁総量(長さ)の約12%に対応する耐震力となっている。

地震動の入力方向および耐力壁の部分的強度低下が木質構造住宅の耐震性能に及ぼす影響について：健全な住家に対する診断もさりながら、経年劣化により腐朽進行した住家（特に釘接合など接合部における腐朽進行）や、被災し部分的な強度劣化した住家などの偏心的非健全住家診断のあり方を検討している。そのために、劣化の進行した木質材料において釘接合の耐力試験を実施し、腐朽の進行具合と釘接合耐力に関するデータを蓄積し、強制腐朽処理後4か月で釘せん断耐力が健全時の半分以下に低下することなどを明らかにした。また、地震動入力方向の異なる場合における耐力壁の偏心と応答挙動との関係を明らかにするため、一層箱型試験体を製作し、地震動が耐力壁線に対して0度と45度の入力角で作用した場合の応答挙動を実験測定した。

微動の通年実測による建物暴露環境条件の診断への影響調査：木造戸建て住宅を主たる対象としながら、構造形式及び屋根形状の異なる家屋の常時微動並びに人力加振による振動計測を行った。2階建て片流れ屋根形状の建物では、2階部分の重心の偏心による

振れ振動が顕著となること、半地下RC構造の上に総2階建てを有する建物では、上部の木造階よりも振動数は高く、木造階とは合成しない独立系の振動性状を示すこと、三角屋根構造では桁行方向と張間方向の固有周期が大きく異なること、などが明らかになった。

建物補強の診断への影響：入手した木造住宅図書について、建築防災協会の精密耐震診断法（改訂版）を用い、耐震診断値を算出した。さらにその結果から耐震補強の効果とその傾向を推察した。

#### 5) 平成18年度：

本研究で提案した簡易的診断法アルゴリズムの改善を行うと共により簡便な屋外からの測定法及び解析法の見直しを行い、完成させる。また、診断の精度向上に関わる雑壁・構造体の部分劣化・不整形平立面形状の影響を調べると共に、一時的診断から継続的監視への展開を模索するため経年劣化評価・経年劣化を模した壁量減少に伴う振動特性変化の実験的追跡と診断結果の防災情報化を試み、診断システムとしてみたときのコミュニケーションツール機能の強化を計り、完成とする。

#### (e) 平成18年度業務目的

上記計画を以下の5つのサブテーマにパラフレーズし実施する。

- 1) 本研究で提案した簡易的診断法アルゴリズムの改善を行うと共により簡便な屋外からの測定法及び解析法の見直しを行う。さらに、診断結果を住宅居住者及び所有者にとり分かり易い防災情報として提供するコミュニケーションツールとしての機能向上を試みる。
- 2) 耐震診断における壁が受け持つ耐震力の定量的な把握を目的として、既存の木造家屋を実験棟として、耐震壁や雑壁を徐々に取り除きながら、強制振動を加えその振動特性と耐震診断値の変化を定量的に把握することで、筋交いに無い壁や雑壁の耐震力を定量的に明らかにし、耐震診断法への技術的反映に供する。
- 3) これまでに収集した各種構造部材及び木造住宅試験体の加力・振動データを追加検証実験により充実を図り、地震動の入力方向や構造体の部分劣化の影響等を考慮した、常時微動を含む低レベル振動入力時の応答と大地震動入力時の応答・損傷程度との関係を分析すると共に、異なる耐力特性を有する耐力壁で構成される木造住宅の応答や損傷過程等を分析し、これらの分析結果を木造住宅の耐震診断へ反映させる。
- 4) 木造・組積造・鉄筋コンクリート造などからなる混合構造や、不整形な平面・立面形状を有する実家屋を対象として微動計測を行い、計測法の妥当性と計測結果の耐震診断への適用性を検討し、過年度までの研究の総括として診断法の提案を行う。
- 5) 木造住宅新築時の耐用年数を推定できる予測式の開発を試み、また既存住宅の経年劣化調査法を提示し、劣化係数を決定することにより、建物全体の耐久性低下度を推定する。

## (2) 平成18年度の成果

### (a) 業務の要約

微動による住宅の耐震診断法を以下に改良した。スペクトル解析法で卓越周期を、またフィルタリングを並行したPG法によりカオス度を算定し、これらを用いての診断値推定法を提案した。これにより、現状の専門家による現場踏査による方法に比較し診断法が格段に簡便化された。さらに、診断に専門家の立ち会いを要せず、計測装置の継続的使用が容易なことから、一時的診断が継続性を持つ監視（モニタリング）システムとして道が開けた。加えて建物の構造健全性を診断するのみならず住人の地震時における死亡確率を監視する生命安全性モニタリングシステムとしての機能も付加された。以上により、診断値が住人へのリスク・コミュニケーションとして十分に機能する情報価値を持つに至った。

### (b) 業務の実施方法

本研究業務を円滑に遅滞なく遂行するために、係る研究課題をサブテーマに分け、それぞれの領域における第一人者を研究分担者として加え、共同的に進める体制を構築している。各成果は以下の業務成果として、各担当者が執筆した。

#### 1) 木造住宅の耐震診断値の測定法の提案およびリスクコミュニケーションツールへの展開

名古屋工業大学大学院工学研究科 岡田成幸

北海道大学大学院工学研究科 高井伸雄・田畑直樹・名知典之・島田佳和

#### 2) 既存木造住宅の耐震診断法確立のための実験的研究

##### 2-1) 木造家屋の耐震壁および雑壁量の減少に伴う振動特性の変化

名古屋工業大学大学院工学研究科 谷口仁士

##### 2-2) 簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性

北海道大学大学院工学研究科 城 攻

##### 2-3) 既存住宅耐震性の経年変化に関する研究

松本建工株式会社技術研究所 林 勝朗

### (c) 業務の成果

#### 1) 木造住宅の耐震診断値の測定法の提案およびリスクコミュニケーションツールへの展開

##### a) 業務目的

木造住宅を対象として、建物の微動記録より耐震診断値（耐震評点）を求めることを目的とする。昨年度までの成果として、微動から求められる卓越周期（建物の固有周期）およびカオス度（建物振動の複雑性）を説明変数とし、耐震診断値を目的変数とする重回帰式を導出した。今年度はデータを見直し重回帰式を若干改訂した。

さらに、耐震診断値の持つ情報としての分かり難さを払拭し、一般住人とのリスクコミュニケーションを円滑にし正しい防災情報を伝えるために情報写像を試みる。これは、住宅が持つ危険性を住宅所有者および居住者に分かり易く情報提供することに加え、耐震診断を一時的な診断に留めるのではなく、耐震補強後についても、また地震を経験した後も継続的に建物の構造的健全性を監視（モニタリング）し、住宅の今の状況を正しく伝えるためのコミュニケーションツールに診断システムの機能を高めることにつながる。

##### b) 耐震診断値推定式

建物微動による診断法の精度を上げる一つの試みとして、建物の振動の複雑さをカオス度により定量化し、それを診断要因に加えることの有効性をこれまで議論してきた。すなわち、建物が老朽化等により劣化が進むと仕口等の一体感が薄れ建物全体として複雑な動きとなることが予想される。その動きの複雑さをカオス度により定量評価を試みたものである。これまで行ってきたカオス度の計算方法は所謂次元解析に基づくものであり以下の手順に従う。

- ①波形の切り出し：7~10 分間の記録の中で、交通ノイズの少ない区間 5 秒間を切り出す。
- ②加速度記録に変換：速度波形を微分することにより加速度に変換する（速度計で記録した場合）。
- ③差分波形の計算：2 階と 1 階の波形記録の差分を計算し、この波形について零線補正した上で以下の処理を行う。
- ④相空間の再構成：時間遅れの方法  $\{x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}$  により  $m$  次元(埋め込み次元と呼ぶ)の相空間をコンピュータ上に再構成する。ここで  $\tau$  は時間遅れであり、切り出し区間のスペクトル解析により求まる建物固有周期( $T_0$ )から  $\tau = T_0/4$  で決定させる。
- ⑤フラクタル次元の計算：その相空間を埋める微動軌跡（トラジェクトリ）のフラクタル次元  $\nu$  を以下の式により求め、これをアトラクタ次元と呼ぶ。但し  $r$  は相空間原点を中心に持つ半径で、 $n$  は点の数である。

$$\nu = \frac{\log C(r)}{\log r} \quad \dots \quad (1.1)$$

ここに

$$C(r) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2 \sum_{i,j=1}^n H(r - |x_i - x_j|)} \quad \dots \quad (1.2)$$

⑥カオス度の決定：相空間の埋め込み次元数を上げることにより、アトラクタ次元がある値に収束していく。相空間の埋め込み次元数  $m$ (上限を 30 次元とする)とアトラクタ次元  $\nu$  の関係をプロットし、その収束先  $D_c$  を次式の 0 を切片にもつ指数関数を再尤法により求める。

$$\nu = -a(e^{-m/D_c} - 1) \quad \dots \quad (1.3)$$

このときの収束値  $D_c$  が切り出された微動波形のアトラクタ次元、ここではこれをカオス度と定義しており、値が大きいほど複雑な挙動を示している。

⑦精度の向上：計算されるカオス度の精度を高めるために、同波形の別の区間について①～⑥の手続きをさらに 3 回繰り返す、合計 4 区間のカオス度を計算し、最終的に 4 つの平均値をその建物のカオス度とする。

このようにして求められたカオス度であるが、カオス度はその計算法や対象システム(本研究の場合、木造住宅)の状態変数により値が大きく変動する敏感な指標である。簡単に得られる指標である反面、使いにくいという欠点を持つ。特に影響すると思われるのは極短周期の入力振源振幅(ノイズ)であり、この帯域は耐震診断には影響しないので、不必要な周波数成分を帯域濾波しカオス度を算定し直すこととする。ここでは時刻歴処理によるバターワースフィルタを用い、これで生じる周波數位相差を相殺するために、時刻歴両方向からの濾波処理を行う。濾波帯域は試行結果より 0.1～1 秒とし、これにより求められるカオス度をここでは濾波カオス度(*Chafil: Chaos filtered*)と称す。濾波カオス度と改訂耐震診断値との単相関は低いものの、診断要素である建物偏心率 (*Modulus of eccentricity*) と相関をもつ(図 1)。

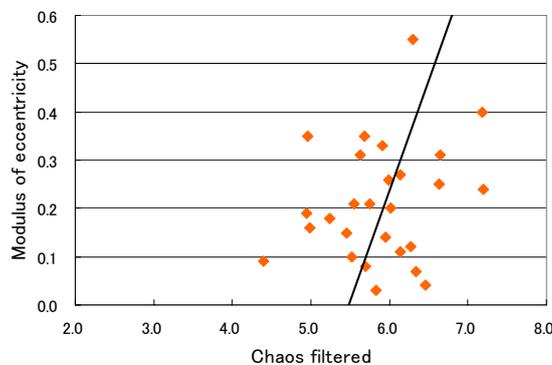


図 1 濾波カオス度 (Chaos filtered) と建物偏心率 (Modulus of eccentricity) との関係

さらに、固有周期周辺の周波数に着目したカオス度を考える。固有周期廻りのスペクトル形状に着目するものであり、振動系が固有周期  $T_0$  で共振する際の周波数選択性をみたものである。計算法は、固有周期を中心周波数とし  $\pm 0.5\text{Hz}$  の狭帯域濾波操作を時系列で行った後、カオス度を求める。これを固有周期周辺カオス度 (*Chanp: Chaos around natural period*) と称す。スペクトルピークの尖鋭度を見るのに等しい。固有周期周辺カオス度も耐震診断値との単相関はそれほど高くないものの、建物の老朽度(旧耐震診断法の老朽度評点  $F$  値) と相関を持つ(図 2)。老朽度が進んだ(旧耐震診断値の  $F$  値が小さい)建物ほど固有周期周辺カオス度  $Chanp$  が大きくなっており、部材接合部の強度が低下し建物全体としての挙動が複雑化してくるのに対応している。以上の考え方は常時微動による地盤種別法とアナロジーが成立する。地盤種別においては常時微動から周期頻度曲線を作成し、そ

の形状より第1種（硬質）地盤・第2種（普通）地盤・第3種（軟弱）地盤の3種に区分する。硬質地盤は卓越周期周辺の狭い周期帯のみの振動を選択し頻度曲線において鋭いピークを持ち、逆に軟弱な地盤ほど様々な入力周期を広い範囲で増幅させ頻度曲線において顕著なピークを持たない。固有周期周辺カオス度  $Cha_{amp}$  は建物総合で見たときの硬質性・軟弱性を示し、建物の老朽度に関する指標との理解ができる。

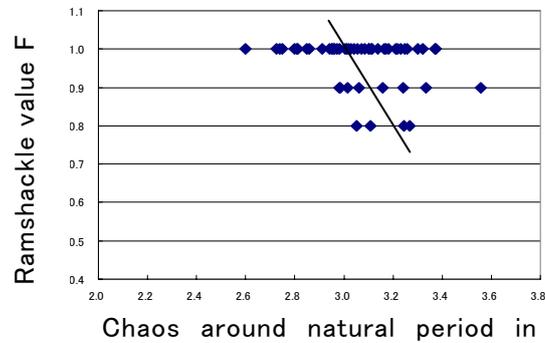


図2 老朽度 F 値と固有周期廻りカオス度との関係

固有周期  $T_0$ ・濾波カオス度  $Cha_{fil}$ ・固有周期周辺カオス度  $Cha_{amp}$  の以上の3変数を説明変数とし、改訂耐震診断値  $y$  を目的変数に重回帰分析を行った。

$$y = -4.28T_0 - 0.0275Cha_{fil} - 0.0311Cha_{amp} + 2.16 \quad \dots (1.4)$$

表1に推定値に対する各説明変数の寄与率を意味する標準偏回帰係数の一覧を示す。図3に診断値と式(1.4)による推定値との関係を示す。

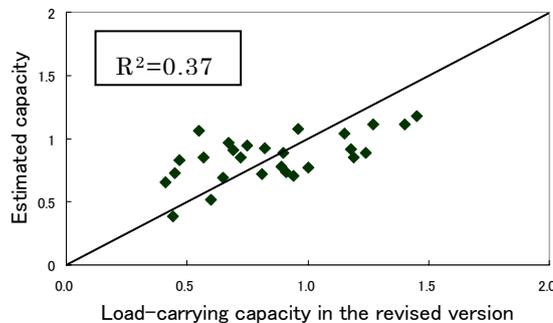


図3 推定式(1.4)と耐震診断値との関係

式(1.4)は調査対象住宅の部材の詳細状態が不明のため建物は老朽していないとの仮定で求められたものである。旧耐震診断の F 評点を診断値に乘算し、老朽劣化を考慮した状態で同様の重回帰式を以下に求めた。

$$y = -4.23T_0 - 0.0325Cha_{fil} - 0.120Cha_{amp} + 2.43 \quad \dots (1.5)$$

また、改訂法は地盤・基礎の評価を行っていない。改訂診断値に旧診断評点 A および F を乗算しその影響を反映させ、同様に重回帰分析を行った（図4）。

$$y = -3.49T_0 - 0.0529Cha_{fil} - 0.669Cha_{amp} + 4.00 \quad \dots (1.6)$$

表1の標準偏回帰係数の比較より、老朽劣化を考慮したことで（式(1.5)）、固有周期周

辺カオス度  $Cha_{anp}$  の寄与率が 3 倍に向上していることが分かる。診断に当たり老朽度を精査することの必要性が理解できると共に、目視により全部材について老朽度を精査することの難しさに比較し、微動測定では総合値として評価されることが分かった。さらに、地盤・基礎の情報を入れることにより（式(1.6)）、より高い精度で診断できることが分かった。

改訂診断法では基礎と上部構造を分離してしまっただが、建物の耐震性は上部構造のみで決まるものではなく、基礎や地盤の状態が被震時に大きな影響を与えることは疑いがない。これも含めた総合的診断が重要と考える。

表 1 標準偏回帰係数でみた各変数の寄与率

	式(4)	式(5)	式(6)
$T_0$	-0.5923	-0.5791	-0.4038
$C_{fil}$	-0.0600	-0.0703	-0.0968
$C_{anp}$	-0.0159	-0.0605	-0.2858
$R^2$	0.3731	0.3943	0.4050

c) リスクコミュニケーション方策

以上より求められた耐震診断値は住宅の構造安全性を示す指標であるが一般住人にとっては分かり難い。当該地域の地震動入力を仮定し本指標を用いることにより、対象住宅の被害程度（損傷度）およびその住人の生命安全性についての情報に変換し、防災情報としての付加価値を高めリスクコミュニケーションツールへの展開を試みる（図 4）。

i) 建物診断値から損傷度情報への変換

建物の被害程度は損傷度（Damage Index）で、建物一棟全体の被害程度を数値尺度上 [0,1] で表現される。また、損傷度と建物の被害状況を視覚化した建物の破壊パターンとの関連づけもされており、一般住人にとり情報として非常に分かり易い（岡田・高井<sup>1)</sup>）。当該地域の地震動入力は震度または最大地動速度で与えられ、耐震診断値をパラメータとして建物損傷度を推定する関数（損傷度関数）が岡田・高井<sup>2)</sup>・田畑・他<sup>3)</sup>により以下に与えられている。これは、木造住家に関する地域被害率関数と地域の木造住家の耐震診断

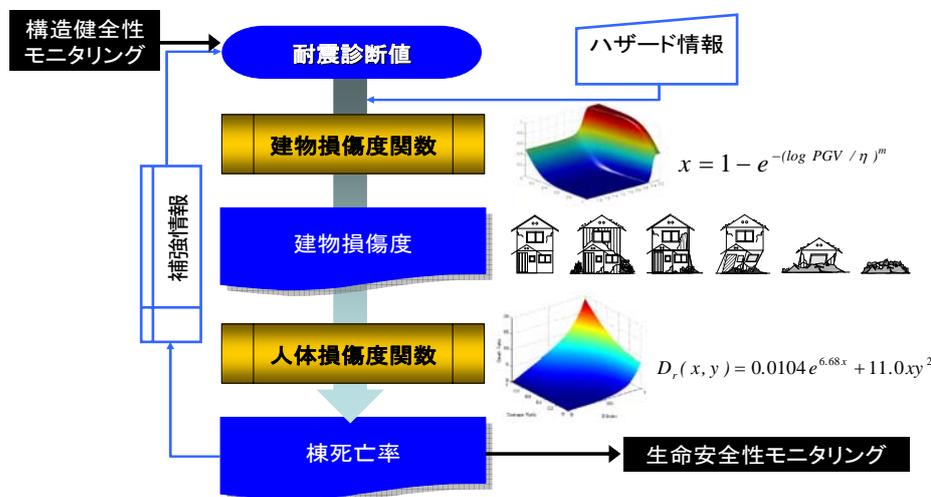


図 4 耐震診断値の利活用

値分布（木耐協資料）を基に、損傷度関数としてワイブル分布を仮定し同定したものである。

$$F(s) = 1 - e^{-\frac{s^m}{s_0}} = 1 - e^{-\left(\frac{s}{\eta}\right)^m} \dots (1.7)$$

ここに  $F(s)$  は損傷度を表し、パラメータは形状母数  $m$  と尺度母数  $\eta$  である。  $s$  は入力地震動であり、震度や最大地動速度（但し、最大地動速度を用いる場合は、地動速度の常用対数とする）を意味する。得られたパラメータを表 2 に示す。

表 2 損傷度関数式(7)のパラメータ

耐震診断値	PGV		震度	
	m	$\eta$	m	$\eta$
0.1	1.41	44.84	7.66	5.55
0.2	1.64	71.79	9.86	5.98
0.3	1.81	94.73	11.45	6.23
0.4	1.95	115.45	12.75	6.40
0.5	2.06	134.70	13.87	6.54
0.6	2.16	152.88	14.86	6.65
0.7	2.26	170.23	15.77	6.75
0.8	2.34	186.91	16.60	6.83
0.9	2.42	203.04	17.37	6.91
1.0	2.49	218.71	18.09	6.97
1.1	2.56	233.98	18.76	7.03
1.2	2.62	248.91	19.40	7.09
1.3	2.68	263.53	20.01	7.14
1.4	2.74	277.88	20.58	7.18
1.5	2.79	291.99	21.13	7.23
1.6	2.84	305.89	21.65	7.27
1.7	2.89	319.59	22.14	7.31
1.8	2.93	333.11	22.62	7.34
1.9	2.97	346.48	23.07	7.38
2.0	3.01	359.69	23.51	7.41
3.0	3.32	485.91	26.96	7.67

また、式(1.7)は以下のべき関数で近似され、式(1.7)における  $s$  を震度 ( $I$ ) とした場合、それぞれのパラメータは表 3 で与えられる。

$$F(s) = \left[ \frac{(I-a)}{b} \right]^{\frac{1}{c}} \dots (1.8)$$

表 3 損傷度関数式(1.8)のパラメータ

耐震診断値	a	b	c
0.1	1.59	4.48	0.21
0.2	1.28	5.07	0.17
0.3	0.93	5.61	0.14
0.4	0.49	6.19	0.12
0.5	-0.05	6.86	0.10
0.6	-0.89	7.81	0.09
0.7	-2.16	9.18	0.07
0.8	-4.72	11.88	0.05
0.9	-14.48	21.80	0.02

式(1.7)を3次元表示したものが図5であり、耐震診断値をパラメータに2次元表示したものが図6である。

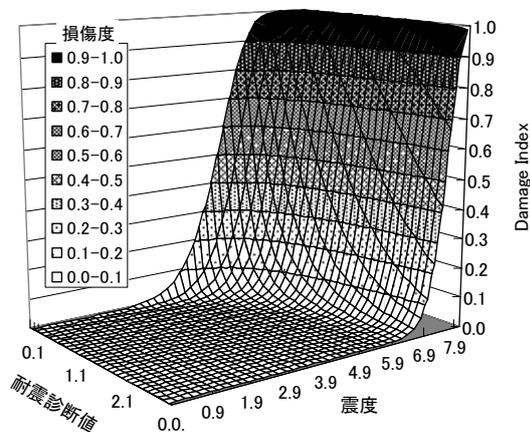


図5 損傷度関数の3次元表示

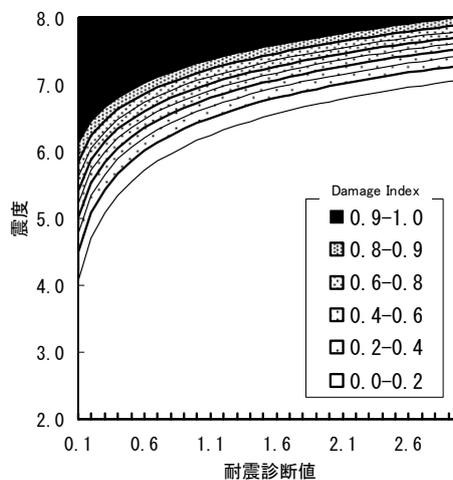


図6 損傷度関数の2次元表示

ii) 損傷度情報から人的危険度情報への変換

家の壊れ方が推定できれば、そこでの死亡確率が計算できる。住人にとっては生死情報であり、住家耐震化の切迫性がより緊張感をもって伝わり、改修・建て替えを含め防災行為へのインセンティブを高めることが期待できる。

Damage Indexで与えられた建物の損傷状態および周辺の全壊率を説明変数として、住家一棟当たりの死亡率（棟死亡率）推定式が以下に与えられている（田畑・岡田<sup>4)</sup>）。

$$D_r(x, y) = 0.0104e^{6.68x} + 11.0xy^2 \quad \dots \quad (1.9)$$

$$D_r(x, y) = 0.000580e^{9.32x} + 6.69xy^2 \quad \dots \quad (1.10)$$

式(1.9)は戸建て住宅の場合、式(10)は集合住宅（長屋、共同建て）の場合であり、変数  $x$  は式(7)で与えられる損傷度（定義域[0,1.0]、但し0.6未満の半壊以下では死者は発生しないものとしカウントしない）を、 $y$  は周辺全壊率（定義域 [0,1.0]）を意味する。式(1.9)について、3次元表示したのが図7である。

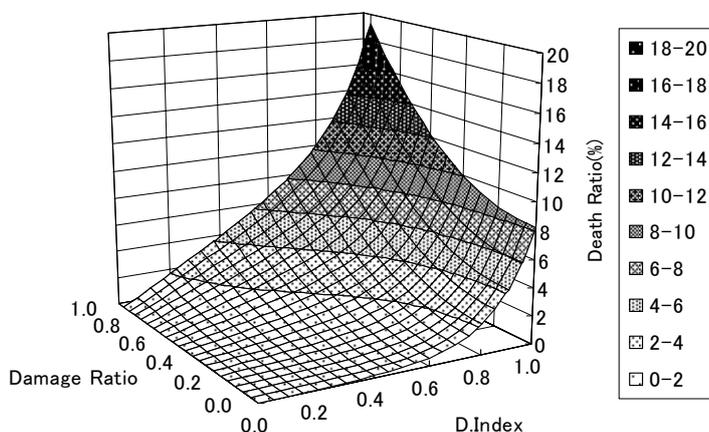


図7 木造独立建物棟死亡率関数3次元表示

d) おわりに

本年度は建物微動から住家の耐震診断値を求める推定式を改訂したことに加え、求められた診断値（耐震評点）の意味を如何に住人に伝えるか、すなわちリスクコミュニケーションの立場から防災情報の付加価値を高めるための検討を行った。これにより、診断値を常時監視（モニタリング）することにより、耐震補強をしたことによる効果、時間経過による老朽度、また地震等により被害を受けたときの損傷程度（診断値劣化状態）も生命安全性の情報と共に知ることが可能となる。

## 2) 既存木造住宅の耐震診断法確立のための実験的研究

### 2-1) 木造家屋の耐震壁および雑壁量の減少に伴う振動特性の変化

#### a) 業務目的

既存不適格に類される木造家屋の地震時安全性確保の取り組みは、1995年阪神・淡路大震災以降、全国各地の自治体で精力的に行われている。この取り組みには、耐震診断(耐震力の評価)と改修から構成されているが、両者とも大きな成果を上げているとは言い難い。その理由として、診断値を1.0まで引き上げるに要する改修費に関わる経済的側面もあるが、耐震診断値が抱える問題もある。具体的には、耐震診断では筋交いが入った壁のみ考慮されているが、実際には雑壁や筋交いの無い壁も耐震力として評価されるべきである。ただし、筋交い入りの耐震壁と同等の耐震力は有しておらず、これらの壁の耐震力を定量的に明らかにすることも重要な問題の一つである。

そこで、本業務では壁が受け持つ耐震力の定量的な把握を目的として、既存の木造家屋を実験棟として、耐震壁や雑壁を徐々に取り除きながら、強制振動を加えその振動特性と耐震診断値の変化を定量的に把握することで、筋交いに無い壁や雑壁の耐震力を定量的に明らかにした。

#### b) 業務の実施方法

試験体の概観と1階の平面図および地震計の配置を写真1と図8に示した。この試験体は1960年代後半に建てられた木造軸組在来工法による2階建て(39.69㎡)である。振動観測は2階の床上の4隅とほぼ中央の5箇所で行った。実験は以下の手順である。

- 1) 119 N の加振力を持つ振動台を2階の床上に設置
- 2) 加振は1Hz～10Hz まで0.5Hz ごとに共振点付近では0.1Hz ごとに10秒程度ずつ出力を一定にし加振
- 3) 家屋に加速度計を設置し加速度を収録
- 4) 加振、データ収録後、雑壁、耐力壁の順に壁を撤去し、原型を含め8回測定
- 5) 各 Case の実験概要を表4に示す



写真1 試験体の概観(左：正面。右：背面)

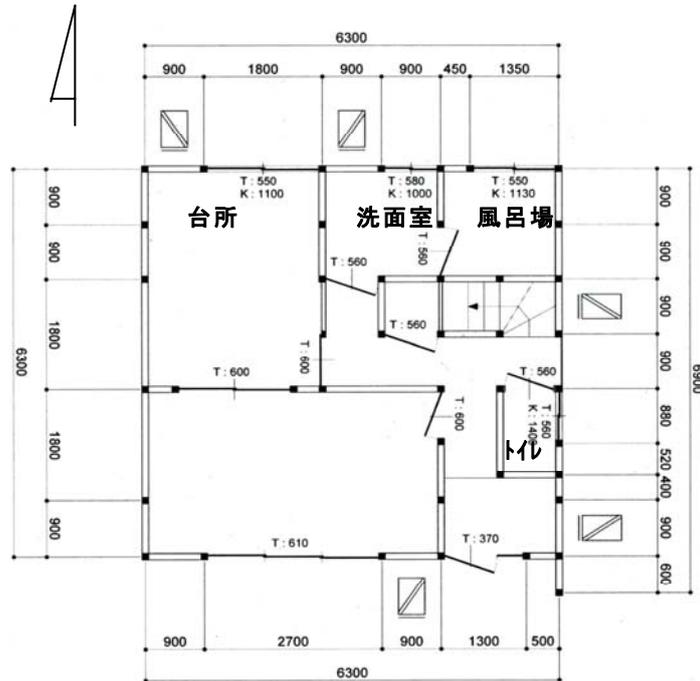


図8 試験体の1階平面図および地震計の配置(配置場所は全て2階)  
(加振方向は、東西方向の1方向のみ)

図中の T : 腰壁の高さ(mm)

K : 腰壁の高さ(mm)

表4 試験体の実験概要

	解体の概要
Case1	原型
Case2	中央壁南側化粧壁撤去
Case3	中央壁撤去、台所西側化粧壁撤去
Case4	階段周り壁、トイレ壁撤去
Case5	風呂場南側壁撤去
Case6	加振方向の雑壁撤去
Case7	加振直角方向の間仕切り壁撤去
Case8	洗面室北側無開口壁(筋交いも)撤去

### c) 業務の成果

各 Case での壁量(長さおよび面積)と耐震診断結果を表5に示した。

収録した加速度波形のスペクトル解析については、平滑化は Hanning Window を用い卓越周波数については、3Hz から 8Hz の区間で最大値もしくは極値を取るものとした。得ら

れた卓越周波数の結果を表6に示した。なお、卓越周波数は2階床に設置した5箇所の観測点の平均値である。

表5 各Caseごとの壁量と耐震診断値

	全壁量 (m)	全壁量(m <sup>2</sup> )	X方向壁量 (m)	X方向壁量 (m <sup>2</sup> )	簡易診断値	精密診断値
Case1	33.55	102.11	11.75	40.42	0.42	0.44
Case2	31.75	97.87	9.95	36.17	0.42	0.44
Case3	28.15	86.20	9.00	34.05	0.37	0.36
Case4	25.45	79.83	6.30	27.67	0.32	0.29
Case5	23.65	75.58	4.50	23.43	0.29	0.23
Case6	23.65	63.36	4.50	11.70	0.29	0.17
Case7	17.75	49.47	4.50	11.20	0.29	0.16
Case8	16.85	47.34	3.60	9.08	0.26	0.13

表6 解析された卓越周波数と壁量、診断値のまとめ

	卓越周波数 (Hz)	X方向壁量(m)	X方向壁量(m <sup>2</sup> )	簡易診断値	精密診断値
Case1	4.80	11.75	40.42	0.42	0.44
Case2	4.77	9.95	36.17	0.42	0.44
Case3	4.74	9.00	34.05	0.37	0.36
Case4	4.49	6.30	27.67	0.32	0.29
Case5	4.21	4.50	23.43	0.29	0.23
Case6	3.40	4.50	11.70	0.29	0.17
Case7	3.39	4.50	11.20	0.29	0.16
Case8	3.01	3.60	9.08	0.26	0.13

図9と図10に、壁量の長さ、面積と精密耐震診断値の関係を示した。両図に示したように壁量の減少に伴い耐震診断値も小さくなっている。壁量と耐震診断値との関係では、壁量を面積で関係付けた方が長さより、若干バラツキが少ないように思える。

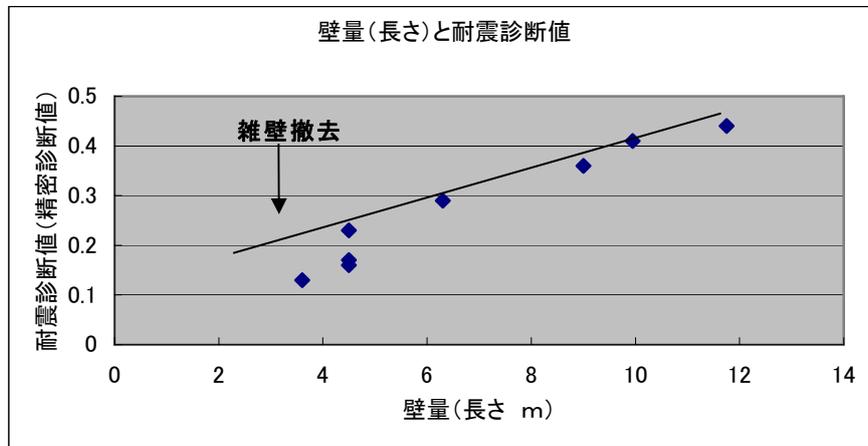


図9 壁量(長さ)と耐震診断値の関係

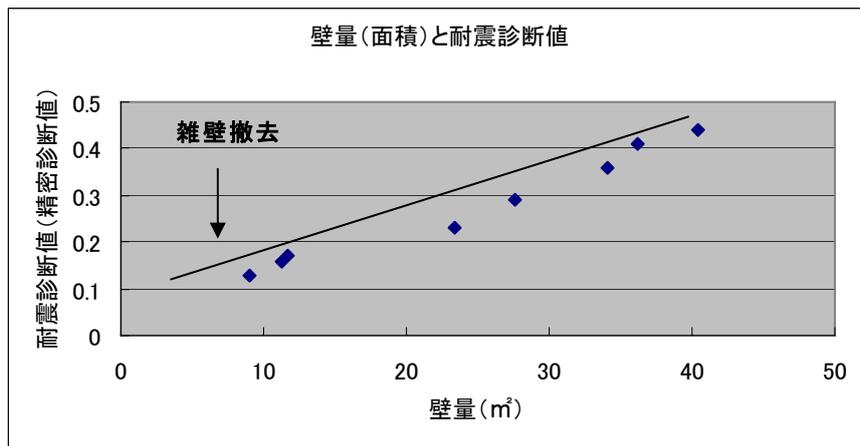


図10 壁量(面積)と耐震診断値の関係

卓越振動数と壁面積および耐震診断値の関係を図 1 1 と図 1 2 に示した。また、両者の関係についても図中に併記した。なお、図中には平成 17 年度に実験を行った 2 階建て家屋のデータも含まれている。

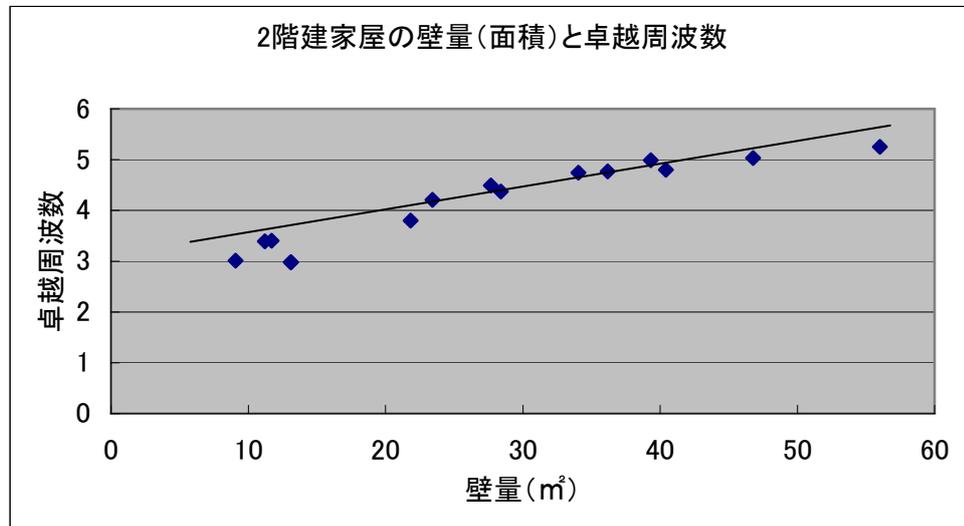


図 1 1 壁面積と卓越周波数の関係

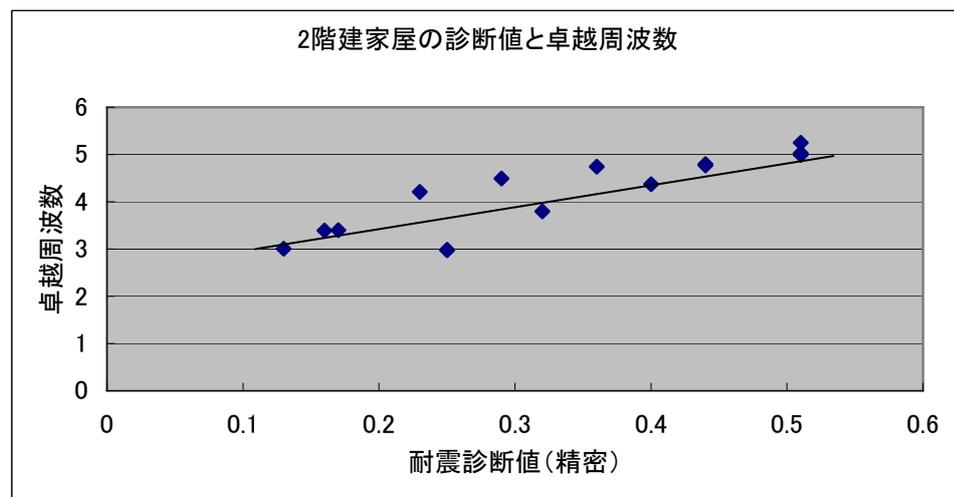


図 1 2 耐震診断値と卓越周波数の関係

ここで、壁の面積  $w$  と卓越振動数  $f$ 、耐震診断値  $g$  と卓越振動数  $f$  の関係を求めると、それぞれ、以下の回帰式となった。

$$f = 0.040w + 2.90 \quad (\text{壁面積})$$

$$f = 5.29g + 2.56 \quad (\text{耐震診断値})$$

これらの式より壁面積  $w$  と耐震診断値  $g$  の関係は、卓越周波数  $f$  を消去することで以下のようになる。

$$g = 0.0076 w + 0.064 \quad \dots (2.1) \quad (2 \text{ 階建て家屋の場合})$$

である。また、平成 17 年度の解析結果から(2.1)式に対応する関係式として、下記の(2.2)式を得ている。

$$g = 0.036 w + 0.086 \quad \dots (2.2) \quad (\text{平屋建家屋の場合})$$

以上の解析結果と平成 16,17 年度に行った振動実験の結果を加え、初期診断値、初期壁量、雑壁量、卓越周波数についてまとめた結果を表 7 に示した。表中の雑壁の寄与度とは (1.1) および (1.2) 式から得られた雑壁の面積を診断値に返還した値である。この雑壁の寄与度と家屋の初期耐震診断値(原型の状態)との比率を求めると、平屋家屋では 19%、2 階建て家屋では 34~39%に相当する大きな値となった。以上のことから、雑壁は 2 階建家屋の方が平屋建家屋より重要性が高く、その寄与度は平屋建の約 2 倍となった。

表 7 実物大実験から考察された雑壁の寄与度

		診断値 (原型)	原型の総 壁量(m <sup>2</sup> )	雑壁量 (m <sup>2</sup> )	卓越周波 数(原型)	卓越周波数 (雑壁撤去 後)	変動量 (Hz)	雑壁量の 寄与度
平屋	静岡市内	0.81	不明	不明	4.03Hz	3.24Hz	0.79Hz	算定不可
	名古屋市	1.23	38.97	4.11	8.43Hz	7.39Hz	1.04Hz	0.23
2 階	名古屋 1	0.51	56.01	16.7	5.25Hz	4.99Hz	0.26Hz	0.19
	名古屋 2	0.23	23.43	11.73	4.21Hz	3.40Hz	0.81Hz	0.15

【注】 1) 名古屋 2 の実験棟については、表 1 に示したように雑壁は Case6 で撤去しているので診断値(原型)欄では Case5 の場合を記した。その他の数値についても Case5 を示している。

2) 平屋(静岡市内)の試験体については壁量として長さを計測したのみで、面積は計測しなかったため、不明と記した。

#### d) 結論ならびに今後の課題

本業務は、実物大の木造家屋において壁を撤去しながら起振実験を行い、雑壁の影響、壁量と振動特性の関係から耐震診断値について考察を行ったものである。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 壁量が減少すると卓越振動数が長周期側に伸びていく。そして、壁量と卓越振動数の間には高い相関関係を有している。
- 2) 2004 年改定前の「木造家屋の耐震診断」では腰壁や垂壁などの雑壁は耐震力を有していないものとして扱われているが、実際には耐震力を有しており、卓越振動数から耐震診断値を考察してみると、耐震診断値換算で、0.15~0.2 程度加算できる。
- 3) 雑壁の寄与度と家屋の初期耐震診断値(原型の状態)との比率を求めると、平屋家屋では 19%、2 階建て家屋では 34~39%に相当する大きな値となった。
- 4) 雑壁は 2 階建家屋の方が平屋建家屋より重要性が高く、その寄与度は平屋建家屋の約 2 倍となった。

今後の課題として、実験棟を増やしながさら精度を上げて行く必要がある。また、実験方法として、雑壁撤去のタイミング(最初に撤去するか最後に撤去するかなど)についても考慮する必要がある。

## 2-2) 簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性

### a) 要約

我が国における戸建て住宅の構造形式は、全国的に木構造が主流であるが、現代では構造種別が多様化し、鉄筋コンクリート造や鉄骨造あるいはブロック造による単独構造と、木造を含む相互の混合構造が増加しつつある。また、その特徴は地域によっても異なり、特に北海道の様な寒冷多雪地では、耐雪構造となる屋根形状や、耐寒仕様となる壁構造を用いるために、耐震性能へも影響を及ぼす。従って、これらの要因を加味した各種独立構造および相互の混合構造を対象とした耐震性能の診断法が不可欠である。このために各種の構造形式や建物の平面及び立面形状の異なる戸建て住宅を対象として微動計測を行い、計測法の妥当性と計測結果の耐震診断への適用性を検討した。

### b) 昨年度までの成果

木造家屋の構造形式は、いわゆる在来軸組構法が全国的に主流であるが、近年は耐震性能の高いと言われるパネル構法やツーバイフォー構法も使われている。しかし、北海道においては、戦後における急速な住宅供給と積雪寒冷地仕様の技術開発から、戸建て住宅の構造形式は本州に比べてより多様化し、独特な建物形態を有するものが多い。札幌市近郊の住宅団地で実態調査を行った結果、階数は基本的に2階建てであり、木造が最も多いが、これに続いてコンクリートブロック（以下CB）造、鉄筋コンクリート（以下RC）造そして鉄骨造である。また、これらの混合構造も少なくなく、1階ないしは半地階をRC造あるいはブロック造として、その上に木造あるいはBC造を3層に重ねる形式も多い。更に、落雪促進対策として発達した2階建て三角大屋根形式や片流れ大屋根形式、あるいは無落雪陸屋根も特徴的である。これらの形態を有する幾つかの2階建てないしは3階建て住宅の微動計測を行い、平面的挙動の観測からは剛床仮定の可否や揺れ振動の影響あるいは大屋根面と各階床面との連動性、立面的挙動の観測からは高さ方向の剛性分布あるいは木造階と高剛性階との不連続性等を検討した。

これらとは別に、RC造の3層1階耐震壁や、柱梁接合部を含む十字形フレーム式部分架構の水平繰り返し加力実験を利用して、各試験体の頂部に地震計を設置し、常時微動やマンパワーあるいはワイヤー強制加振実験を行った。この結果、加力前の無損傷時の水平剛性と加力実験後の損傷時における水平剛性の変化により、これらの構造系形式においても微動計測を用いて、損傷程度を推測しうることの可能性を明らかにしている。

### c) 本年度の検討目標

元来、建築物は、建て主から個別の条件で発注され、個々の建築設計者が独自の技術で設計するために、量産住宅を除けば、戸建て住宅ではその構造形式や形状が多様となる。従って、耐震性能を判定する場合には、これらの条件に対応した振動性状を把握して性能判定に考慮できる仕組みを確立しておくことが重要である。このためには、性状の異なる多くの建物を対象とした震動実測データを蓄積する必要がある。昨年度に引き続き、新たに一部2階建て木造住宅1棟と、昨年度に計測した総2階建て混合構造住宅1棟、および三角大屋根2階建てCB造住宅1棟について、屋根雪荷重が加わっている積雪時に振動計

測を行って、無積雪時との相違を明らかにする。いずれも3台の加速度型振動計を用いて、各階毎の平面内水平振動分布や、平面重心位置における水平振動の高さ方向分布などを同時計測によって検討を行い、耐震診断判定時の精度を向上させるための基礎的資料を得ることを目標とした。以下ではこれら計測結果を示す。

d) 構造条件の異なる各種の戸建て住宅における振動性状実測結果

計測対象とする建物毎に地盤条件が大きく異なると、その影響を除去する必要がある。このために、昨年度に計測した住宅を含めて相互に比較的接近した建物を選定した。即ち、実測を行った江別市道営大麻団地は、石狩平野の中央に位置し、若干の起伏のある高台であり、地盤性状は普通（第2種）地盤である。

本年度実測した2階建て建物は、いずれも深さ60cm程度の逆T字形断面のRC布基礎が外周および内部壁面に沿って配置されている。本年度新たに一部偏心2階建て木造住宅Gを加え、さらに過年度の夏季に計測を行った住宅Cはコンクリートブロック造の1階に総2階の木造を増改築した無落雪陸屋根形式であり、住宅Dは三角大屋根を有するコンクリートブロック造である。いずれも隣接建物とは数m以上の間隔があり、相互の振動的な影響はないと考えられる。また、計測器の感度上の関係から、加速度波形による分析を行っており、以下に示す振動モード形は、真の変位分布ではないが、高さ方向の水平変位分布や振れ挙動の性状を示していると判断する。さらに、冬季積雪時の計測を行うことにより、屋根上積雪荷重の増大が建物の剛性と質量の変化に及ぼす影響を調査し、耐震診断を行う計測時期と測定結果の判断を検討する。

i) 一部偏心2階建て木造の住宅G

本建物を写真2、3に示す。平面規模は、1階で9.0×5.4mの長方形平面母屋にガレージが西側に突出した不整形平面であり、2階は5.4m角の正方形平面に階段部分が北側に突出している（図13）。この2階平面は、その東側の妻面が1階の妻面と共通する様に東側に偏っている。また、南角には吹き抜けのアトリウムを有している。屋根は各階共に無落雪型とする陸屋根である。建設後約20年が経過している。



写真2 住宅G／西面全景



写真3 住宅G／南面2階部分

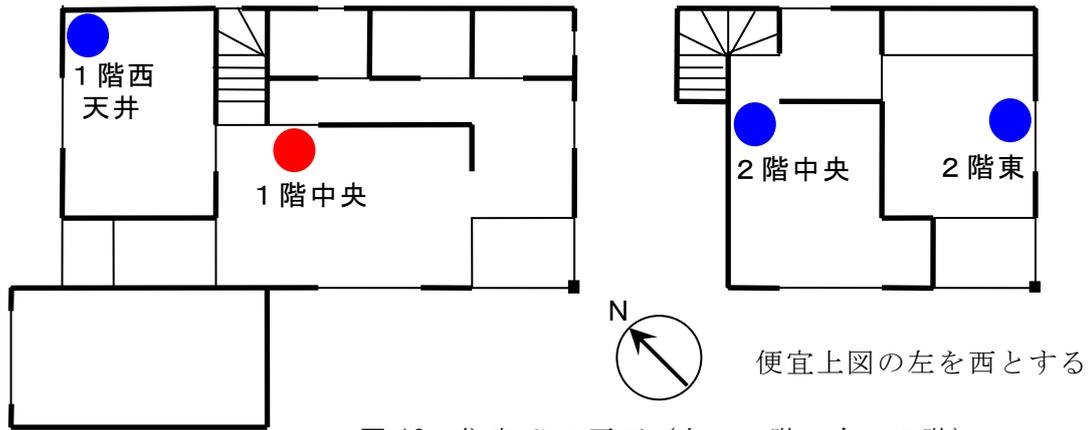


図 13 住宅 G の平面（左：1階、右：2階）

微動計測は、第 1 シリーズとして 2 階床面内での面内変形および捩れ振動を把握するために、2 階東端と 2 階中央（1 階平面の中央部の直上に相当）の床面に計測器を設置し、2 階のない西端は 1 階の天井面に設置した。振動方向は南北（短辺）方向として、常時微動時と 2 階中央近傍の柱に対する人力による短辺方向の水平加振を行って振幅を高めた際の振動観測を行った。

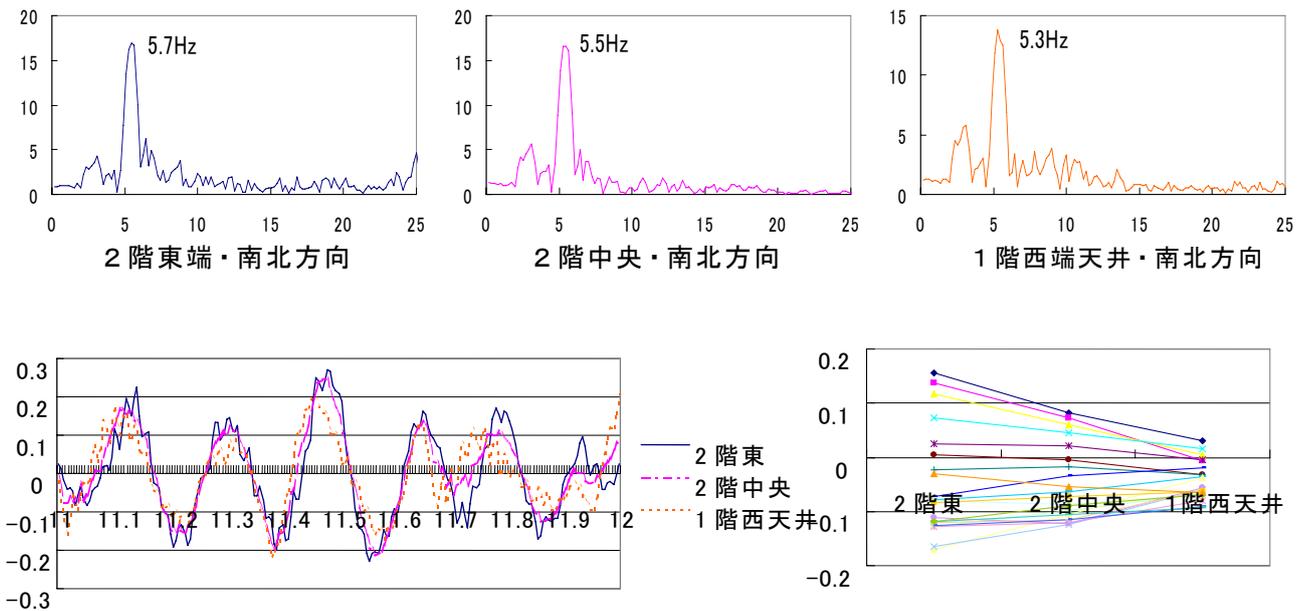


図 14 2 階床面における南北(短辺)方向の観測結果（人力加振時）

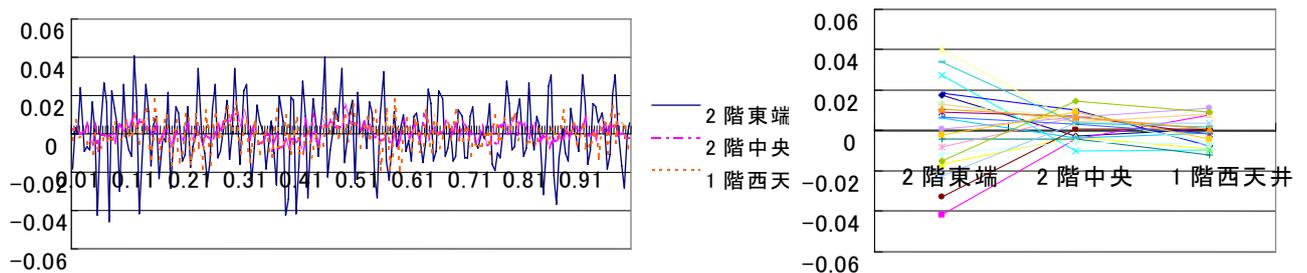
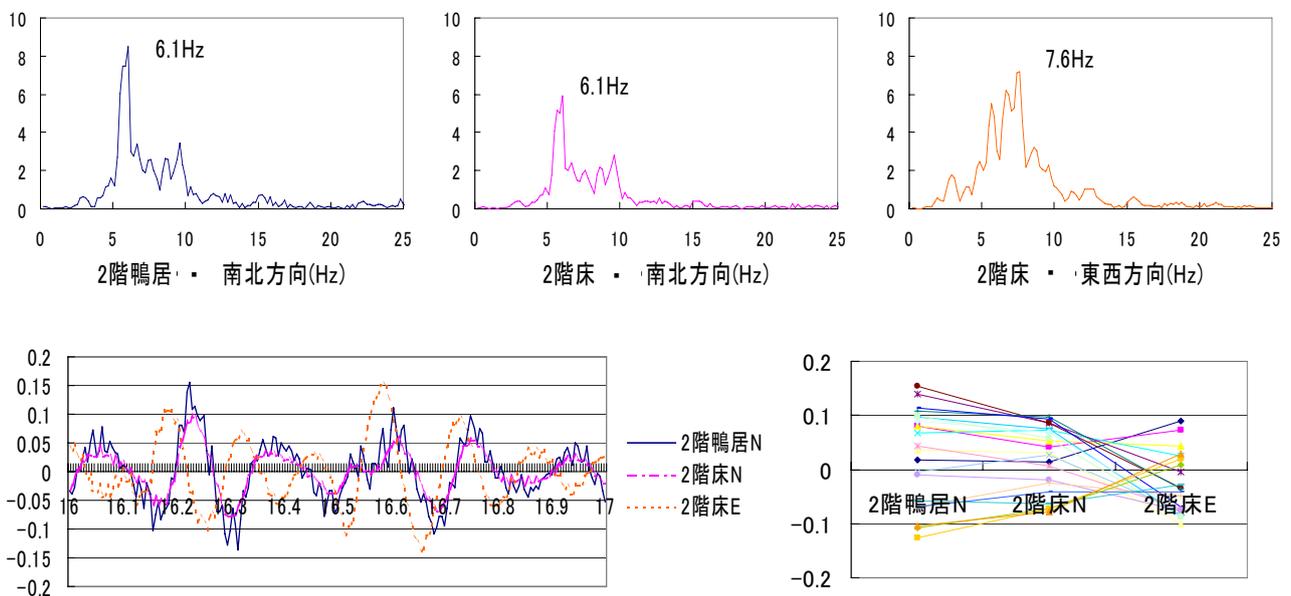


図 15 2 階床面における南北方向の時間挙動（常時微動）

人力加振を行った際のアスペクトル解析による建物固有周期は、**図 14** に示すように 5.7Hz から 5.3Hz の間に分布しているが、振動モードは 2 階建て部分の東端が大きく、これに続いて中央部（2 階では西端に相当する）、西端の順に小さくなり、明らかに 2 階部重量の偏心による捩れ振動が発生している。しかし、振幅の並びは直線的であり床面内変形は認められなかった。また、**図 15** に示すように、常時微動の振幅は人力加振のおよそ 10 分の 1 であり、高次振動あるいはノイズ成分が卓越しているが、この場合でも捩れ振動は明確に現れている。

第 2 シリーズは、短辺（南北）方向および長辺（東西）方向の振動性状の相違を把握するために、建物の 1 階平面上の重心位置近傍に観測点を定めて、この直上の 2 階床で 2 方向に、更に 2 階鴨居で短辺方向に計測を行った。常時微動時と人力による加振は各方向で行ったが、このうち長辺方向に加振した際の観測結果を **図 16** に示す。長辺方向の固有振動数 7.6Hz は、短辺方向の値 6.1Hz より大きい。合計壁長さに関しては、2 階の短辺方向が長辺方向より大きく、1 階ではその逆となっている。即ち、1 階の壁長さが大きいために、剛性の高い長辺方向の振動数が大きくなったもので、上階より下階の剛性が振動性状へ及ぼす影響が大きいと言える。

本建物の場合、無落雪の陸屋根であって 2 階部分が偏心しているために、積雪荷重が不均等に分布すると重量的な偏心が増減する。一般には 2 段屋根形式の場合には、低層部が風上側であっても風下側であっても風向に関係なく、低層部側に吹き溜まりが発生し易いので、偏心は減少して捩れ振動は小さくなることが想定できる。これらは実測によって確かめる必要がある。



**図 16** 建物重心位置における 2 方向の観測結果(2 階中央部東西方向人力加振時)

ii) 三角大屋根コンクリートブロック造の住宅 D

本建物は、昨年度に無雪時（**写真 4**）に実測し報告したものである。平面規模は、9.0 × 5.4m の整形長方形平面（**図 17**）で、コンクリートブロック造 2 階建て、三角大屋根形式である。建設後約 30 年経過している。後述する住宅 C の改築前と同一架構で、改築に

よる総 2 階建て（1 階ブロック造+2 階木造階）と比較し、改築や屋根の形状の影響を調べることも目的の 1 つである。



写真 4 住宅 D / 西面全景（無雪時）



写真 5 住宅 D / 西面全景（積雪時）

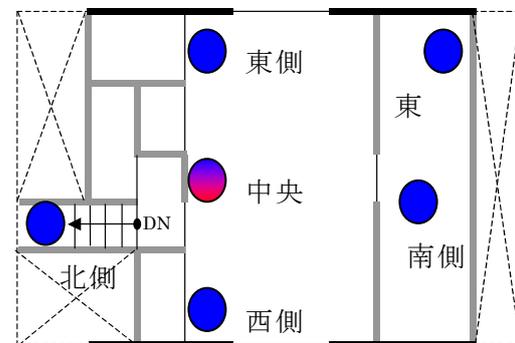
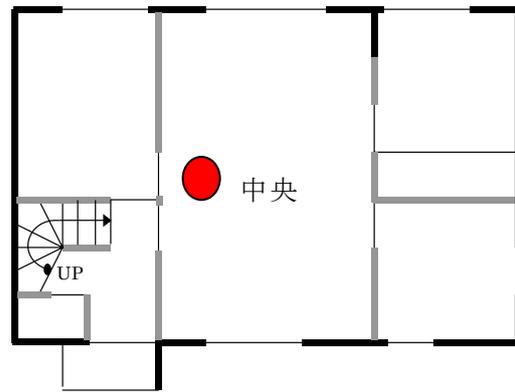


図 17 住宅 D : 平面図（図面左下が北）  
（上図：1 階、下図：2 階）  
※便宜上図の左を北とする

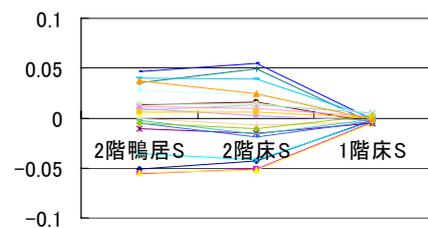
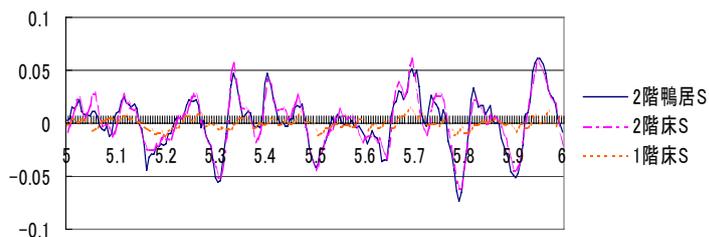


図 18 建物重心位置における南北（桁行）方向の観測結果（人力加振時）

無雪時に得られた特徴は、桁行方向振動モード図（図 18）より、振幅は 2 階鴨居と 2 階床でほぼ等しく 1 階は小さい。三角屋根の場合、桁行方向では 3 階と 2 階とが屋根で連結されているために、長手方向では変位が等しくなる。また、外周に BC 造の壁を配置し中央位置の壁量が小さい場合には、2 階床の面内剛性が不足して床面内で湾曲的な変位を生じることを図 19 は示している。

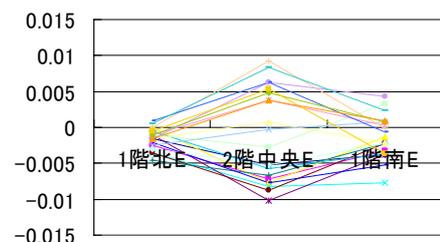


図 19 2 階床面における東西方向の震動モード

iii) 混合構造の住宅C

本建物は、積雪時の状況を写真6に、平面を図20に示す様に、9.0m×5.4mの整形長方形平面で総2階建てである。構造は、1階の外周と長辺の控え壁がCB造であり、2階は全て木造である。木造部は軸組の外周外側に構造用合板を、その内側および間仕切り壁には石膏ボードが釘止めされている。屋根は無落雪の陸屋根となっていて、冬期間の積雪を全て負担している。1階のCB造は、建設後約35年を経過しているが、2階は当初三角屋根形式のCB造であったものを、撤去・増築し6年を経過している。



写真6 住宅Cの北側外観（積雪時）

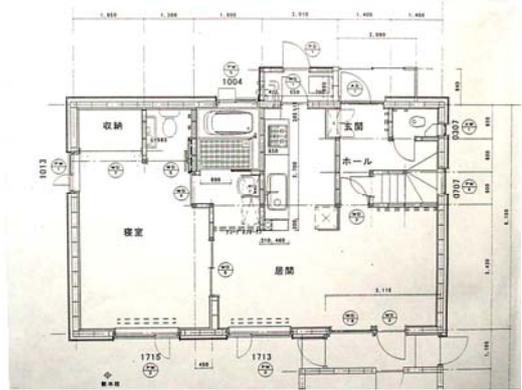


図20 1階平面図（上方＝北）

図21は、無雪時に計測した1階～3階の短辺方向振幅高さ分布である。1階がCBで2階が木造であるが、ほぼ等しい層間振幅を示し、木造であるための剛性低下は認められず、建設年が新しく合板構造の影響と考えられる。従って、混合構造でも建物の経過年数と、構造形式が影響することが分かる。

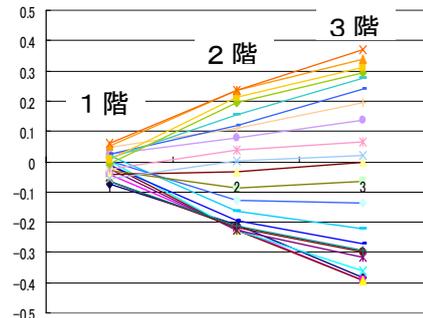


図21 短辺方向振幅高さ分布

e) 本年度実施分のまとめ

本年実施している3棟の戸建て住宅の微振動計測の中間結果は、以下のように纏められる。

- (i) 2階平面が1階平面に対して小さくて片側に偏在する木造住宅では、常時的に振れ振動が発生しているため、振れ挙動を考慮した耐震診断を行う必要がある。また、1階が陸屋根の場合には、2階床面と1階屋根面とが連続して床面内剛性を確保するために、面内変形は顕著ではない。
- (ii) 積雪荷重の耐震性への影響は、屋根形状によって異なり、水平2段屋根のように屋根の階によって不均等に堆積する場合は、重心が移動するために偏心を増減させることになる。また、勾配の大きな傾斜屋根の場合は、地震時の振動で落雪して積雪質量が急速に減じたり、無落雪屋根では屋根上で積雪が水平方向に滑動することも想定されるので、屋根形状に伴う有効質量の概念が必要となる可能性がある。
- (iii) 屋根上積雪が比較的均等に分布している場合には、積雪による偏心への影響はないが、質量の増大により固有周期が大きくなる。計測した建物の建設年が比較

的新しかったことと合板木構造であったために、水平剛性への影響は小さかった。しかし、軸組み構造の場合には建設年が古くなるほど接合部の弛緩が顕著となるために、積雪重量によって接合部が絞め固められ、剛性増大への影響が予測できる。この場合には、積雪重量の有無における固有周期の変化とその分散は、耐震性能の経年劣化を表す指標となる可能性を含んでいる。

#### f) 総括

担当課題である「簡易耐震診断法の多種構造形式への適用可能性」について、一般的木造住宅と異なる耐震診断法に関する提案事項は、以下の様に取り纏められる。

##### (i) 微動計測点の簡便化と構造形式との関係

当研究における簡易耐震診断法の特徴的手法として、実際の木造建物の微動計測を行ってその振動性状を用いて耐震性を判断している。簡便化の趣旨からは建物の重心位置などにおける 1 箇所の振動計測結果を用いて診断できることが望ましいが、以下に掲げる各種の要因によって複数の計測点および計測方向の同時計測が避けられない場合があり、建物によって計測法を適切に選択する必要がある。

##### (ii) 建物の構造的影響要因への対応

- ① 同一規模の木造住宅において、従来型軸組構造に比べて合板パネル構造では固有振動数は増えるが、スペクトル分析におけるピーク幅は相対的に狭くなる。従って、固有振動数の不確定性を用いた耐震診断では構造種別毎に判定を与えるべきである。
- ② 構造種別の相違により階毎の水平剛性が著しく異なる場合（例えば 1 階 RC 造＋上階木造など）には、各階同一方向の同時計測から、剛性率に相当する応答増大係数を考慮すべきである。ただし、パネル構造などの合板貼り木造形式で建設年が新しい場合には、RC 造やコンクリートブロック造との水平剛性の相違は比較的少ない。

##### (iii) 建物の形状的影響要因への対応

- ① 片流れ屋根や 2 階部分が偏って配置された建物では、偏芯による捩れ振動が卓越し、2 階部分のある側の梁間方向水平変位が増大する。このために、直交する二方向の振動計測装置を建物平面の対角線上の 2 つのコーナー部に設置し、同時計測により併進成分と捩れ成分を計測して、偏芯性による応答増大率を考慮すべきである。
- ② 整形でない平面形、くびれのある平面形、広い吹き抜けを有する平面形では、床面内剛性が確保できないために、併進振動以外の局所的な挙動を示す。また、三角大屋根構造でも平面中央部の梁間方向挙動が両側に比べて大きくなる。従って、明らかに水平変位が増大する部位が予め判断できれば、その位置で計測すべきである。

##### (iv) 振動計測条件への対応

- ① 常時微動の建物挙動に対して、自動車走行や人力加振などにより入力が大きくなると、建物の固有振動数が減少し低周波成分が卓越すると共に、各構面

の剛性の相違が顕在化する傾向があり、地震時挙動により近い性状が把握できる。

- ② 積雪重量などの大きな重量の有無における固有振動数の変化とその分散が把握出来れば、その建物の耐震性能の経年劣化を表す指標となり得る。

## 2-3) 既存住宅耐震性の経年変化に関する研究

### a) 耐久性低下と耐震性能

#### i) 耐久性と耐震性

一般的に、建物が古くなると耐久性は低下する。特に構造材の腐朽によって建物としての耐久性が低下する場合、耐震性も大幅に低下する。耐久性低下に関わる要因は数多く存在し、特に北海道のように積雪寒冷地においては、住宅の構法・構造のみならず、断熱・気密工法、暖房方式などが影響の大きいパラメータとして加わり、劣化現象を更に複雑にしている。

改定診断法では壁の劣化低減係数を導入し、評点の低減を計算できるようになっているが、より精度の高い劣化判定を行うことのできる方法を、以下、詳述する。

本項では既存住宅の耐久性劣化度予測のための各種手法を整理する。既存住宅の現有耐震性能は、初期値( $y_0$ )と耐久性劣化係数  $k(x_i)$  の積として以下のように求められる。

$$\text{現有耐震性能} = \text{耐震性能初期値}(y_0) \times \text{耐久性劣化係数}(k(x_i)) \quad \cdots (4.1)$$

#### ii) 耐久性能と劣化現象関連の概念

建物の耐久性能と劣化現象の関係を決定する主要な因子は、次の 6 種があげられる。

- ①新設時建物保有性能(Pa)
- ②建物に要求される所要性能下限値(cPa)
- ③ある経過年での建物の保有性能(Pa<sub>(y)</sub>)
- ④耐久性能指標(年数 : y)
- ⑤劣化現象発生期
- ⑥劣化勾配( $\theta_i$ )

その他に、⑦劣化現象発見期、⑧建物補修交換期、⑨期待耐用年数などがある。

以上の諸因子のうち、①～③の性能評価に関するものは、地震、風、積雪などの外力に対する場合と、機能・美観からのものがある。特に「③所要性能下限値」を知るには、既存建物の劣化度判定手法が確立されていなければならない。また「⑥劣化勾配」は、劣化環境の程度と諸劣化要因の影響度に左右される因子で、環境が劣悪なほど負の勾配は大きくなる。

#### iii) 耐久性劣化係数( $k(x_i)$ )予測手法について

劣化係数予測のために、劣化要因調査と分析が必要である。要因調査は、現実に腐朽等劣化外力によって被害を受けた建物の事例調査と、被害の程度が外観からは明確でない建物の劣化調査に分離する。本論では前者を腐朽実態調査、後者を劣化度調査と称する。腐朽実態調査は腐朽の発生や進行状況を把握して耐久性喪失要因と劣化度レベルの推定を行い、劣化度調査は既存住宅の劣化環境(外部環境、建物性能、室内環境、保守管理等)及び内部・外部の劣化状況を把握する。

#### iv) 腐朽実態調査方法

以下、主な調査方法と診断手法を示す。

##### ①木材含水率測定

Kett 高周波容量式木材水分計(2~150%計測可能)を用いて、含水率を測定。

##### ②ハンマー打診による診断

市販されているハンマー(やや小型)を用いて木材面を軽く叩き、反発の感触によって、

木材劣化の状態を測定する。感触の大まかな分類と腐朽度の推定を次に示す。

- A：反発大、打撃音高いー木材は健全。
- B：反発音やや低いー木材は含水率高く、劣化の疑いあり。
- C：反発力なく、打撃音低いー腐朽進んでいる。
- D：打つとめり込む感じー腐朽相当に進み、木材の強度はほとんどない。

### ③腐れ深さ測定

木材の残存断面を調べ、表面の劣化進行と腐朽深さとの関係を把握するための調査。アイスピック状の器具を部材表面から相当の力で押し込み、貫入深さを腐朽による断面欠損と考える。

### ④床下温湿度測定

デジタル温湿度計により、室内空気の床下への流入を極力避け測定。

### ⑤土の含水率測定

床下の土を採取した後、ビニール袋に密閉し、熱風循環乾燥器で乾燥させ、低減質量から含水率を計算する。

#### v) 非破壊試験による耐震性能推定

建物の振動特性を簡便に知る方法に、常時微動測定法がある。構造物の耐震性能と振動性状（固有周期等）の関連性を根拠にした推定手法である。建物の耐震性能指標として改定診断法の「評点」があり、これと固有周期との関連が明確になると現有耐震性能の把握は極めて簡便かつ精密に行われることになる。

#### vi) 腐朽実態調査事例

耐久性劣化係数( $k(x_i)$ )を推定するには建物の劣化度調査を積み重ね、耐震性に及ぼす影響の大きな要因を抽出する必要がある。ここでは床下腐朽の実態調査の実例を述べる。

建物概要：木造戸建て住宅、2階建、建築面積；81.98 m<sup>2</sup>、平成6年建築（築後9年）

基礎：鉄筋コンクリート、砂質地盤、床下防湿；ポリフィルム敷込み・火山灰押さえ 50 mm、床下換気孔開閉式

暖房方式：温水集中暖房

調査日時：平成15年7月30日

調査項目：木材含水率測定：Kett水分計HM520型（測定範囲2～50%）を使用

ハンマー打診：市販小型ハンマー使用

腐れ深さ測定：アイスピック使用

調査結果を表8と9および図22～24に示す。図には劣化の位置と劣化の進行度が分かるように縦細線でハッチを描いている。この高さが高い程、劣化が進んでおり（あるいは劣化の危険性が高く）、面積が大きい程、劣化（あるいは劣化の危険性）の範囲が広いことを表す。

全体的に床根太の劣化は相当進んでいると思われるが、土台は調査個所については腐朽の様子は見られない。個々の調査個所を比較検討すると、ハンマー打診と腐れ深さは劣化度、腐朽の程度はほぼ同様な傾向を示しているが、含水率は必ずしもその傾

表8 土台腐朽調査結果

測定位置		木材含水率(%)	ハンマー打診	腐れ深さ(cm)	特記事項
A ①-④	外端	17	B	0	腐朽なし
H-I ①	中央部	20	B	0	腐朽なし
N ①-④	外端	31.5	A	0	健全
	中央部	-	B	0	腐朽なし
	内端	24	A	0	健全

向が一致していない。木材の腐朽が進み過ぎるとセルローズ分解による水分は逆に減少してくること、また、高含水でも腐朽は即座には発生せず、時間の遅れがあることによる。

b) 耐震性能評点と耐久性

ここで耐震診断評点を用いて、木造住宅の耐用年数予測式の構成を試みる。これはあくまでも簡便な便宜式なので、仮定の妥当性は今後の多くの実態調査を待つことになる。

耐用年数予測式は当面、以下の仮定の下に誘導する。

表 9 大引腐朽調査結果

測定位置	木材含水率(%)	ハンマー打診	腐れ深さ(cm)	特記事項	
B ①-④	外端	15	B	0	腐朽なし
	内端	-	-	-	
C ①-④	外端	28.5	C	0	
	内端	-	-	-	
D ①-④	外端	20.5	C	3	
	内端	21	D	2	
F ②-④	外端	-	-	-	
	内端	13	D	4	全面腐朽
H ①-④	外端	13	D	4	全面腐朽
	内端	26	A	0	健全
I ①-④	外端	16	D	4	子実体あり
	内端	20	B	0	腐朽なし
J ①-④	外端	18	C	3	
	内端	15	C	1	
K ①-④	外端	28.5	B	0	腐朽なし
	内端	-	-	-	
L ①-④	外端	18.5	A	0	健全
	内端	24.5	B	0	腐朽なし
M ①-④	外端	18.5	D	3	
	内端	18.5	B	0	腐朽なし

i) 一般木造住宅の目標耐用年数は 50 年とする<sup>5)</sup>。

ii) 短期的には枠組壁工法の融資期間 30 年を目標値とする。

iii) 耐用年数の推定は、診断法の判定基準を用い、その危険/安全の境界値である 0.7, 1.0, 1.5(1.2 を追加) と関連づける。

iv) 評点と想定震度及び過去の大地震とは文献 6) を参照し、次のように関連づける。

(a) 評点 0.7 : 震度 5 強 : 新潟、宮城沖(仙台)、十勝沖地震(函館)

(b) 評点 1.0 : 震度 6 強 : 福井、関東地震(横浜)

(c) 評点 1.2 : 震度 7 : 関東(小田原)、阪神・淡路地震(直下)

(d) 評点 1.5 : 震度 7 以上

v) 縦軸を評点に、横軸を耐用年数に取る。

vi) 評点 0.7 を下限耐震性能とし、境界評点 1.0 以上の位置から劣化度(負勾配)推定式を誘導する。

vii) 評点 1.0 と短期目標耐用年数 30 年の座標、及び評点 1.2 と目標耐用年数 50 年の座標を結び、劣化勾配  $\theta_i$  を求める。評点 1.0 と耐用年数 30 年の座標は、(0, 0.7) (30, 0.7)。従って、 $\theta_1 = (0.7 - 1.0) / (30 - 0) = -0.01$  となる。評点 1.2 と耐用年数 50 年の座標は、(0, 1.2) (50, 0.7)。従って、 $\theta_2 = (0.7 - 1.2) / (50 - 0) = -0.01$  となる。両者とも同一勾配なので、これを共通の劣化勾配とする。縦軸(評点)を  $\alpha$ 、横軸(耐用年数)を  $\beta$  とおくと、

$$\beta = (0.7 - \alpha) / \theta_i \quad \dots (4.2)$$

ここで  $\theta_i = -0.01$  を代入し、以下を得る。

$$\beta = 100(\alpha - 0.7) \quad \dots (4.3)$$

当面、上式を木造家屋の耐用年数予測式としておく。

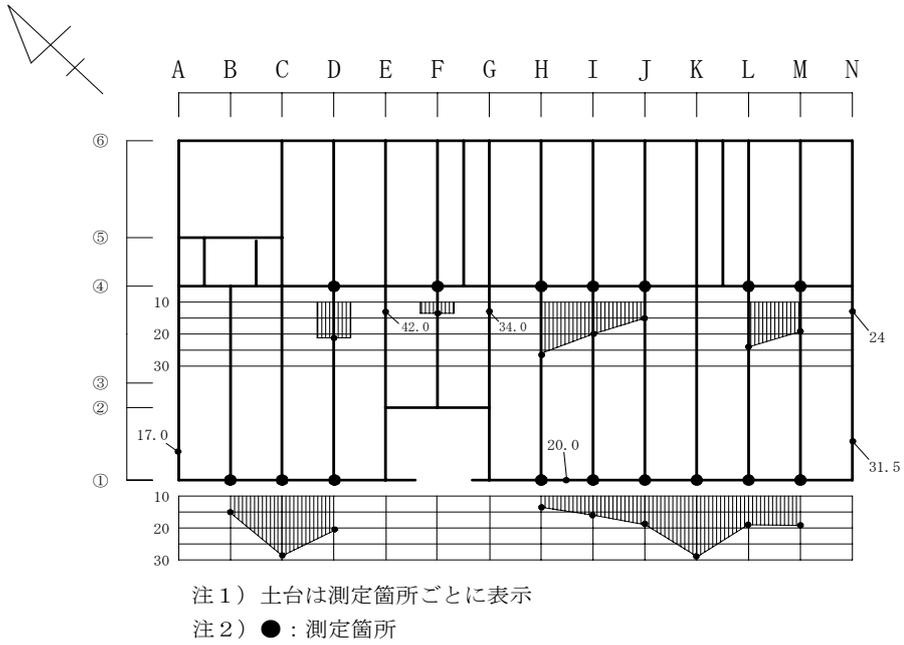


図 22 大引・土台の含水率(%)

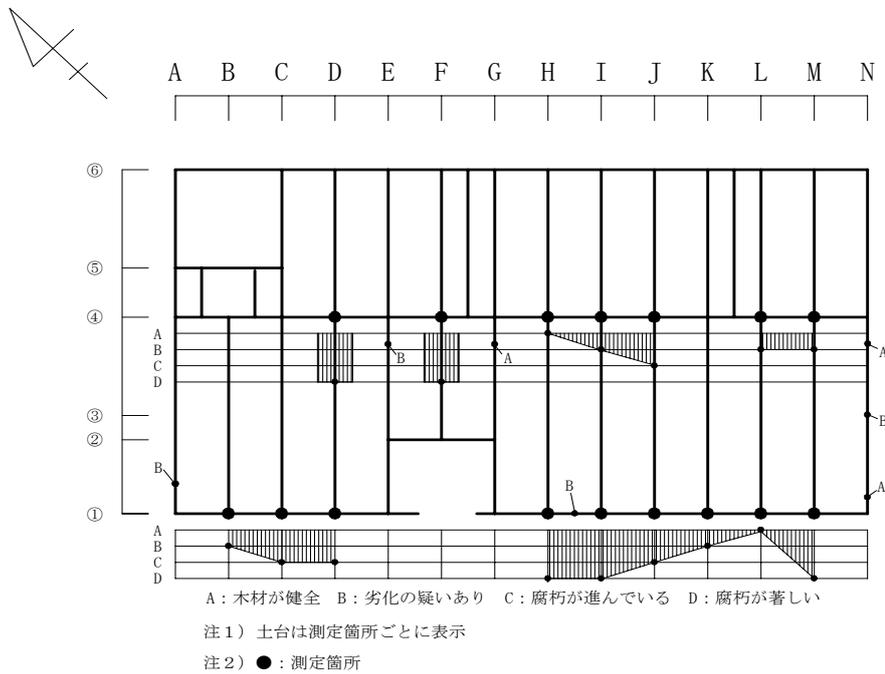


図 23 大引・土台のハンマー打診(A~D)

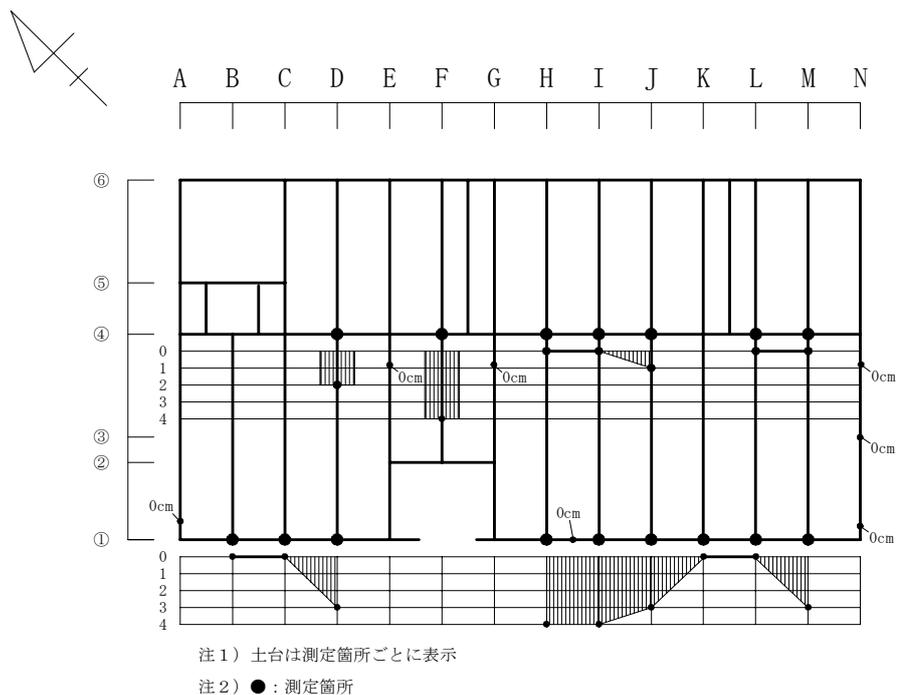


図 24 大引・土台の腐れ深さ

#### c) 劣化診断法の一般化

上式を用いた劣化診断法をやや一般化しておく。家屋に使用されている木材の劣化度を先に記した腐朽実態調査法により以下の4段階に分類する。

- A; 木材が健全
- B; 劣化の疑いあり
- C; 腐朽が進んでいる
- D; 腐朽が著しい

上記の区分を劣化係数化する。たとえば、 $A=1.0$ 、 $B=0.7$ 、 $C=0.3$ 、 $D=0$ を与える。これらの係数値は当面、順位的意味しか持たないが、サンプルがある程度集まると、圧縮強度試験により数値化が可能になると思われる。

次に、耐震精密診断法を併用し、建物の耐用年数低下度の推定を以下のように行う。

- i) 対象建物の耐震要素部位を、土台と壁部に分離し、それぞれの要素ごとに診断する。
- ii) 壁幅 91 cmを1要素とし、1要素ごとに劣化調査を行う（開口部も同じ）。土台も同じ位置で調査する。

iii) 各調査カ所の劣化度を判定し、劣化係数を算出（上記値を利用）。土台と壁の係数のうち、小さい方を選定する。

iv) 建物を X、Y の2方向に分け、精密診断法を用いて耐震性能評価をする。

- ① 壁要素を1要素ごとに壁耐力を求める。
- ② まず、劣化していない状態の耐震評点を求める。これは対象建物の建築直後の値、即ち、初期値である。
- ③ 1要素ごとの耐力に、上記iii) で求めた小さいほうの劣化係数をかけ、X方向、Y方向ごとに建物の耐震評点を求める（劣化係数導入により、偏心率も変わるので要注意）。
- ④ X、Yのうち小さいほうを建物の評点とする。

- ⑤  $\beta \sim \alpha$  図 (図 25) に初期値の評点と調査時点の評点を結ぶ (築後年数は事前調査)。  
 2つの評点の直線を延長し、 $\alpha=0.7$ の横軸平行線との交点の座標を求める。  
 ⑥ 交点の X 座標が対象建物の総耐用年数。そこから調査時点までの築後年数を差し引くと残りの耐用年数が求まる。

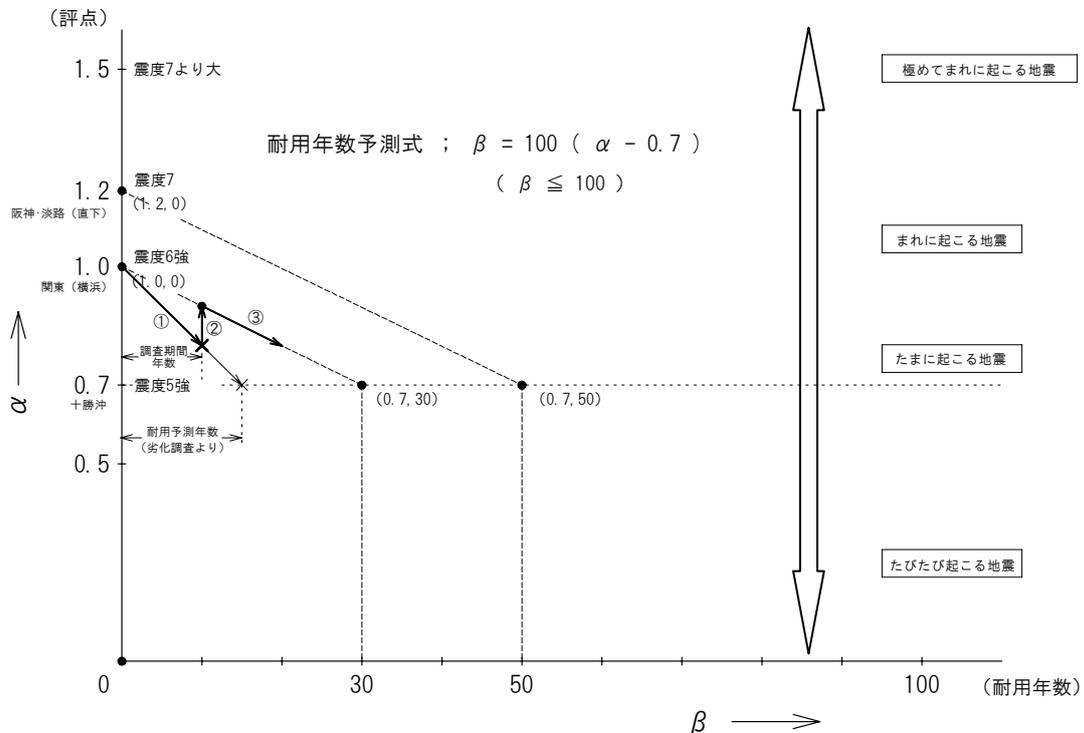


図 25 耐用年数予測の考え方

d) まとめ

本研究は、既存住宅の現存耐震性能を、建設当初の初期値と経年変化による劣化係数の乗数で推定しようとしたものである。まず、耐震性能初期値の推定に、改定耐震診断精密法-保有耐力診断法を用い、2000年以降建設の住宅12棟(枠組壁9、在来軸組3)、1979年建設7棟(在来軸組)の新旧住宅の評点を算出した。その結果、新築住宅は全て0.94~2.72(平均1.69)と耐震性が高く、一方、旧住宅は0.27~0.72(平均0.47)で耐震性の低いことが判明した。その要因は1981年の規準法改正(所要壁量大幅増)と2000年の告示改正に伴う補強金物の強化である。一方で、耐震性に大きな影響を及ぼす劣化要因と劣化係数を引き続き追求していくため、床下腐朽住宅の劣化実態調査を行った。ここでは、本報告の調査方法の有効性を確認した。さらに、種々の仮定の基に、耐震性能評点から木造住宅の耐用年数を推定する予測式を誘導した。

耐用年数を予測する際に、ここで仮定した $\alpha=0.7$ (住家としての構造的な性能限界値=評点0.7)はあくまでも当面の値としての意味を持つ。耐震改修時まで、この程度の耐震性は確保してほしいとの筆者(林)の考えであり、筆者が設定したものである。もちろん異論はたくさんあろうし、建物建築年代や行政側の事情もあり、このラインが動くのは当然のことと思う。ただ、劣化による耐震性能の低下をいつまでも認め、性能がほとんどゼロになった時期が耐用年数との捉え方は、改めるべき時期に来ていると筆者は考える。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

本研究は、木造住家に関する原位置的な非破壊簡易耐震診断法の開発を目的とするものであり、住宅の耐震診断法に微動を用いることで、現状の診断法に比較し診断所要時間の短縮が可能となり、診断が簡便化されたことによる耐震診断の普及に弾みがつくことが期待される。さらに、個別的に関連派生する問題を発展させた。一つは木造住宅の構造的多様性の考慮である。木造を基本としながらも RC や補強ブロック造との混構造の普及も著しく、建物全体の揺れ挙動を考慮した診断法の必要性が示唆された。また 2004 年に耐震診断法が大改訂されたが、改訂診断法の採用率は都道府県により様々であり、雑壁の耐力を無視する旧診断法による診断値の解釈は当分続くものと思われる。木造住宅の実物大振動実験から、雑壁の寄与度と初期耐震診断値との比率を求めた結果、平屋家屋では 19%、2 階建てでは 34~39% に相当する大きな値となり、また、雑壁は 2 階建家屋の方が平屋建家屋より重要性が高く、その寄与度は約 2 倍となることが明らかとなり、耐震補強計画に指針を与える。加えて、診断法を従来の建物構造健全性診断に留めるのではなく、本提案の方法を応用することにより継続性を持つ監視（モニタリング）システムとしての道が拓け、居住者の地震時における死亡確率を監視する生命安全性モニタリングシステムとしての機能も付加された。以上により、診断値が居住者及び建物所有者へのリスクコミュニケーションとして十分に機能する情報価値を持つに至ったことが、成果としてあげられる。

今後の課題は、モニタリングシステムを具体化し、世帯単独で行う現状のポイント・モニタリングから地域全体で情報を共有するエリア・モニタリングに展開し、地域の全体の防災力向上を図っていくことである。

#### (e) 引用文献

- 1) 岡田成幸・高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集，524, 65-72, 1999.
- 2) 岡田成幸・高井伸雄：木造建築物の損傷度関数の提案と地震防災への適用 —地震動入力を確定的に扱う場合—，日本建築学会構造系論文集，582, 31-38, 2004.
- 3) 田畑直樹・岡田成幸・高井伸雄：建物損傷度関数と棟死亡率関数の地震防災への利用法 —人的損失に着目した木造低層建物の被害率関数の作成と震害予測例—，日本建築学会構造系論文集，611, 39-46, 2007.
- 4) 田畑直樹・岡田成幸：地震時の木造建築物倒壊に伴う死者数推定に向けた棟死亡率関数の提案，日本建築学会構造系論文集，605, 71-78, 2006.
- 5) 強度・生物劣化研究会：木造住宅の耐久性、第 30 回日本木造学会大会，1984.
- 6) 日本建築家協会都市災害特別委員会編：建築家のための耐震設計教本，彰国社，1997.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
岡田成幸・ 高井伸雄・ 田畑直樹	個別防災情報のための「地震動入力－建物耐震評点－棟死亡率」の3者間関数化の試み	日本建築学会大会梗概集	平成18年9月
岡田成幸・ 高井伸雄・ 田畑直樹・ 名知典之・ 中嶋唯貴・ 石田隆司	個人防災に焦点を当て地域防災も視野に入れた被害評価ツールの開発(地震動入力－建物耐震評点－棟死亡率の3者間関数化の試み)	日本地震学会 2006 年秋季大会	平成 18 年 10 月
岡田成幸・ 高井伸雄・ 島田佳和	微動のカオス性に着目した次元解析による木造住宅の原位置的簡易耐震診断法の開発	第12回日本地震工学シンポジウム講演論文集	平成 18 年 11 月

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

