

平成 22 年 3 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360249
 研究課題名（和文）市民への的確なリスクコミュニケーション方策としての住宅構造安全性モニタリング
 研究課題名（英文）Structural Health Monitoring System for Wooden Houses as a Suitable Risk Communication Tool for Inhabitants
 研究代表者
 岡田 成幸（OKADA SHIGEYUKI）
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：50125291

研究成果の概要（和文）：本邦の主要住家である木造建物（倒壊により死者発生危険度が特に高いとされている構造形式）について、地震からの構造健全性を微動のカオス挙動を測定する手法を応用して逐次監視し、さらに監視結果である物理指標を居住者に分かり易い防災情報（生命安全性）に変換し提供（リスクコミュニケーション）することにより、構造ヘルスマニタリングを人的被害軽減化対策システムとして防災に有効活用させる方途を考究した。

研究成果の概要（英文）：Many kinds of structure systems on wooden houses have been adopted throughout Japan, which brings the difficulty of seismic diagnosis for wooden houses. Added to this situation, the method of diagnosis for houses is subjective evaluation that depends on diagnostic technicians' knowledge and experience. We proposed the feasible manners to objectively estimate the effect on the deterioration of earthquake-resistant capacity of houses caused by aged deterioration and/or damaged by natural hazards such as earthquakes through the microtremors analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学／建築構造・材料

キーワード：地震防災、木造住宅、微動測定、構造ヘルスマニタリング、人的被害、耐震補強

1. 研究開始当初の背景

巨大地震により木造住家が倒壊し死者が多数発生することを防止する目的から、住家の耐震診断と耐震改修が国策として進められている。しかし、診断の煩わしさから受診数は目立って増えてはいない。簡便にしかつ精確な耐震診断法の開発が望まれている。本研究代表者はこれに応えるべく、建物微動

から固有周期を求めることに加えカオス度（振動の複雑性を定量化する指標）を耐震性判定の指標に加え、簡便にして高精度な診断法の可能性を見出している。従来の診断法は、専門家が住家に立ち入り全部屋をくまなく目視する必要があるため、診断に長時間を要し、また住人に多くの負担を課していたのに対し、微動を用いた診断法は、地震計を設置

するのみで短時間の診断が可能となる。本研究はこれをさらに発展させ、微動を常時監視することで耐震診断を継続的に行い、経年劣化や被震時の住家構造健全性診断も自動的に行うシステム、いわゆる木造建築物の構造ヘルスマニタリングシステム (SHM) の構築を目標とする。RC 建物に代表される Engineered Building は、被震時における構造部材の損傷を常時監視する構造ヘルスマニタリングの技術躍進を多く享受しているが、本邦の住家の主要構造形式である木造についてはモニタリングの分野は未開拓のままである。加えて、建築物の構造健全性指標は一般市民には馴染みが薄く、また、物理的意味を理解するには専門的知識が不可欠であり、そこからはわが家を耐震改修するインセンティブは生まれにくい。わが家の地震に対する構造健全性を居住者の生命安全性という市民語で理解できるコミュニケーションツールの開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究は木造住宅を対象とし、地震からの構造健全性を微動のカオス挙動を測定する手法を応用して逐次監視し、さらに監視結果である物理指標を居住者に分かり易い防災情報 (生命安全性) に変換し提供 (リスクコミュニケーション) することにより、SHM を人的被害軽減化対策システムとして防災に有効活用させることを目的とする。

具体的には、木造建物の構造的強度評価指標として、国土交通省住宅局監修の耐震診断値 (以下、耐震評点) を用い、建物の微動計測に基づく診断法を提案すると共に、診断を一時的なものに留まらず常時監視に発展させる道を探る。

3. 研究の方法

(1) 方法概要

まず、耐震評点と高い相関が指摘されている建物微動から求められる固有周期に加え、建物応答に強い影響を与える減衰定数、建物の揺れの複雑性を示すカオス度の3つの指標を耐震特性値として整理する。

次いで、建物モデル化に微動を用いたシステム同定法を応用することにより、精密診断法として提案されている時刻歴応答計算による方法に準拠しつつ、かつ現状の耐震評点を微動解析から常に追跡できる時刻歴応答解析耐震診断法を提案し、この結果との比較により微動から求めた耐震特性値で建物の構造健全性の評価可能性を検討する。

さらに解体中の実在住宅を模擬的な大損傷家屋とみなし、本手法を適用することで微動による損傷度評価の可能性を探ると共に、建物構造健全性劣化の長期モニタリングの有効性を検討する。

最後に、求められた耐震評点から想定地震動に対する建物の損傷度を推定し住人の生命安全性に関する情報 (棟死亡率) に変換する方法を検討し、住民へのリスクコミュニケーションツールとしての有効性を検討する。

(2) 実験対象住宅

本研究で対象とする住宅は、愛知県下の27棟 (豊橋市13棟、刈谷市9棟、半田市5棟) 及び札幌市内に建つ3棟の木造在来軸組2階建て住宅である (建築年は1904年から1980年)。本研究では、上記住宅に時刻歴応答計算による方法を適用し X、Y 方向別に予め評点を求め、それらを目的変数とし建物微動から求められる特徴ベクトルを重回帰式により回帰する方法を検討する。

微動測定システムは、センサーにサーボ型速度計 (Lennartz 社製) を採用し、高周波遮断回路により 30Hz 以上をハイカットし、100Hz のサンプリングレートで記録した。測定箇所は、地面、建物1階および2階の重心位置の計3カ所である。

(3) 微動から求められる特徴ベクトル

固有周期 (T_0): 1階に対する2階のフーリエスペクトル比より卓越周期を求め、これを建物の固有周期とする。建物剛性と負の相関をもつ特性指標である。

RD 法による減衰定数 (h_{RD}): 解析波形に対して、先に求めた固有周期を中心周波数とし $\pm 0.5\text{Hz}$ のバンドパスフィルタ処理を施し、RD 法を適用し減衰定数 h_{RD} を求めた。加速度が極大となる点から8秒間の記録を多数切り出し、極大値を $t=0$ に揃えて重ね合わせた。得られた自由振動波形 (RD 波形) の2周期目から約4秒間の極大値を結ぶ包絡線を指数関数 $\exp(-h\omega_0 t)$ で最小2乗近似し減衰定数を推定した。

システム同定法による減衰定数 (h_{SI}): システム同定 (System Identification) とは、測定データから対象とするシステムの数学モデルを推定することであり、RD 法では十分に評価できなかったケースにも評価が可能となる。本研究では物理パラメータ同定を行う。これはモデルの構造が完全に既知である場合の方法で、構造物の剛性や減衰定数を未知パラメータとし、これらを直接推定する。以降、システム同定法を SI 法と略記する。SI 法による減衰定数推定の第1段階として、建物剛性を推定する。質量は床均し荷重と床面積より各階の建物荷重を求め、2質点系モデルの剛性 $K1$ 、 $K2$ は微動のスペクトル解析より求めた1次、2次周期に最も適する $K1$ 、 $K2$ の組み合わせを固有値解析により算出する。第2段階として、地盤で測定された微動を入力とし2質点系の応答を Nigam 法による直接積分法を用いて計算する。減衰モデル

は剛性比例型とし減衰定数を 0.1~10%の範囲において 0.01 刻みで変化させながら応答計算を行い、モデル応答波形と 2 階の実測波形の振幅差の絶対値総和が最小となるときをもって SI 法による減衰定数とする。

固有周期周辺カオス度 (Cha_{ANP})：速度波形を微分することで加速度に変換し、建物 2 階と 1 階の波形記録の差分を計算し、零線補正を行う。これを以降、解析波形と呼ぶ。5~7 分間の解析波形の中で、交通ノイズの少ない区間 5 秒間を切り出し、以下の手順でカオス度を計算した。ここでいうカオス度は建物の微動入力に対する応答振動の複雑性を指標化したものである。時間遅れの方法により相空間の埋め込み次元数を上げる GP 法でフラクタル次元を求め、これを埋め込み次元との関係で収束値を推定しカオス度と定義する。カオス度は入力特性に大きく依存し構造システムの特徴を既述する指標としては使いにくい。入力特性をキャンセルする方法として 2 とおりの方法を提案する。1 つは解析波形に狭帯域フィルタを用いて必要成分を限定し、そのカオス度を求めるというものである。これを固有周期周辺カオス度 Cha_{ANP} と称すことにする。

固有周期周辺カオス度比 (ARC)：前項と同様の手順で、地面における常時微動の卓越周期周辺カオス度 Cha_G を計算する。そして、 Cha_{ANP}/Cha_G を固有周期周辺カオス度比 ARC と定義する。これは、入力微動に元々含まれるカオス性をキャンセルする操作であり、建物自体の揺れの複雑さを指標化したものである。各耐震評点と負の相関関係が認められる。

RD カオス度 (Ch_{RD})：カオス度に影響する入力特性をキャンセルするもう一つの方法は、入力をインパルスに特定し、その応答を解析することである。前項で得られた RD 波形は、いわばインパルス入力に対する応答波形であり、微動の周波数特性依存がキャンセルされた振動とみなせよう。RD 波形を解析波形とし 2 周期目から 5 秒間の区間を切り出し、同手順でカオス度を計算する。これを RD カオス度 Ch_{RD} とする。

4. 研究成果

(1) 微動記録に基づく耐震評点評価式構築

住宅 30 棟に対し、上記方法で X、Y 方向別に特徴ベクトル [T_0 , h_{RD} , h_{SI} , Cha_{ANP} , Ch_{RD} , ARC] を算出した。 T_0 , Cha_{ANP} , Ch_{RD} , h_{RD} (若しくは h_{SI}) の 4 変数の組み合わせ、または T_0 , ARC , h_{RD} (若しくは h_{SI}) の 3 変数を説明変数とし、評点を目的変数に重回帰分析を行い回帰式を得た。なお、時刻歴応答計算による方法は減衰定数 h の決定精度により評点評価が大きく左右されるので、モデル応答計算に際し、 $h=5\%$ に固定 (通常

の時刻歴応答計算の方法)、RD 法による減衰定数 h_{RD} を採用した場合、SI 法による減衰定数 h_{SI} を採用した場合の 3 とおりで計算し、それぞれに回帰式を求めた。

$$S_{5\%} = -4.35T_0 - 0.16Cha_{ANP} + 0.21Ch_{RD} - 0.03h_{5\%} + 2.40 \quad \dots \textcircled{1}$$

$$S_{RD1} = -3.17T_0 - 0.17Cha_{ANP} + 0.19Ch_{RD} + 0.10h_{RD} + 1.62 \quad \dots \textcircled{2}$$

$$S_{RD2} = -2.75T_0 - 0.52ARC + 0.15h_{RD} + 1.80 \quad \dots \textcircled{3}$$

$$S_{SI1} = -3.39T_0 - 0.19Cha_{ANP} + 0.13Ch_{RD} + 0.10h_{SI} + 1.89 \quad \dots \textcircled{4}$$

$$S_{SI2} = -3.41T_0 - 0.38ARC + 0.01h_{SI} + 1.98 \quad \dots \textcircled{5}$$

各説明変数の目的変数への寄与率を表す標準偏回帰係数と重相関係数との関係より考察する。全ての回帰式において、 T_0 , Cha_{ANP} 及び ARC が負の寄与、そして h_{SI} が正の寄与となっており、剛性が高く減衰能力にも優れエネルギー吸収能力の高い建物ほど耐震的であることが分かる。これは一般的な振動理論と一致する。またカオス度は小さいほど (振動モードは単純なことを意味するが) 耐震性は高く評価されている。詳細に見るなら、時刻歴応答計算 [$h=5\%$] の回帰モデルでは $h_{5\%}$ が負の寄与を示しているが、これは建物毎に特性的な値をとるべき減衰定数を本解析では通常の仮定のままに一定値 (5%) として応答計算を行っているためであると考えられる。減衰定数を微動の振動特性から評価するモデルでは正の寄与を示している。時刻歴応答計算ではカオス度の寄与率が極めて低くなっている。これは、時刻歴応答計算による診断法がモデル構造を完全に既知とする質点系モデルによる診断法であり、評点にカオス度等の総合化された特性指標を受け入れないためである。診断の曖昧さが排除される一方、建物の振動特性が正しくモデル化されるようパラメータ設定に相当の配慮が必要となることを意味している。同時に、モデルパラメータを微動により逐次追跡することができれば、提案式を用いて常時の診断を簡便に行うことができ、モニタリングへの道が開けることを示唆している。

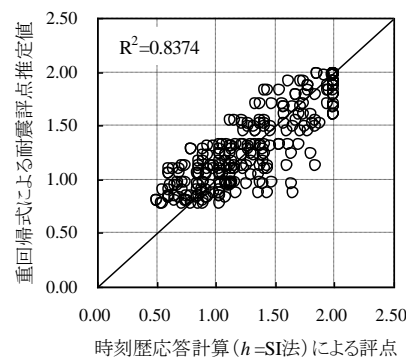


図 1 評点と推定値の関係

既述のように、耐震評点はその診断方法により値は微妙に変動する。一般に、時刻歴応答計算による方法が最も精度が高いとされており、本研究でも時刻歴応答計算による結果に回帰した式⑤を最終結果とする。

図1に回帰結果をプロットする。

(2)解体実験に基づく大損傷時の検証

愛知県名古屋市内に建つ解体予定の木造在来軸組2階建て住宅を対象とした。1階床面積39.69m²、建築年は1966年である。建物解体は、X方向に抵抗する1階雑壁を徐々に取り除いていくスケジュールで行い、その状態を履歴的に測定した。同時に、解体図面を参考に時刻歴応答計算による方法で耐震評点を求めた。対象とした住宅は内外装ともにモルタル厚が想定以上に厚く、見た目以上に剛性の高い建物(解体前の固有周期はX方向が0.196秒、Y方向が0.179秒)である。得られた微動記録に対し、X、Y方向別に T_0 、 Cha_{ANP} 、 Ch_{ARD} 、 ARC 、 hrd 、 h_{SI} を算出し、式(3)、(5)により耐震診断値を推定した(図2)。

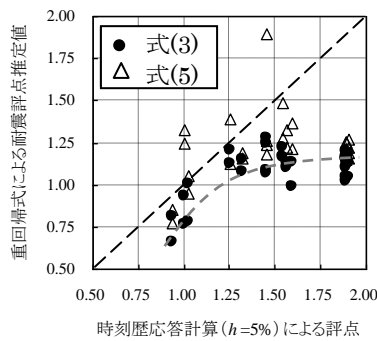


図2 解体時の評点の変化

図より、ばらつきは見られるものの微動による回帰式で時刻歴応答計算による耐震評点の変化を追跡していることがわかる。特に、解体が進んで剛性低下の大きい大損傷時を想定した解体ケース(評点が1.0以下)についても十分な精度を保っていることは、損傷時の大変形における動特性も微動から判断することが可能であることを示唆している。なお、解体前後における耐震評点の低減率はX方向で0.41であり、因みに固有周期から剛性の低減率を概算すると、 $\omega^2=K/M$ (K:剛性、M:質量)より剛性低下を見積もると(解体前固有周期=0.196秒、解体後=0.299秒)、0.57となる。一例のみではあるが、同一住宅においてその耐震性変化を微動から耐震評点という特性値で追跡することの可能性が示された。

(3)年間モニタリングの試行

愛知県一宮市に建つ木造在来軸組2階建て住宅を対象とした。建築年は1971年、2階

建て部分は1976年に増築され、1階床面積92.53m²、2階床面積18.83m²である。2階建て部分の屋根裏に地震計を1台(3成分)配置し、毎日定時5分間の測定を行った。測定期間は、2007年3月18日から2008年1月26日である。

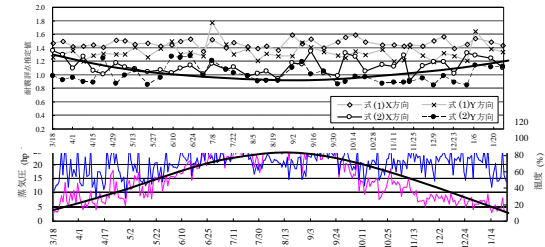


図3 耐震評点(上)と蒸気圧(下)の年変化

週1回のスケジュールで診断すると想定し、耐震評点推定値を算出した。得られた微動記録に対し、X、Y方向別に T_0 、 Cha_{ANP} 、 Ch_{ARD} 、 hrd を算出し、式(1)、(2)により耐震評点を推定した(図3(上))。本来、式⑤により耐震評点を推定すべきところであるが、年間微動モニタリングの地震計配置を検討した時点では、地盤の影響等を含めた議論は想定していなかったため、解析法が制限されてしまったことによる。同図より、減衰を5%に固定した診断目標値を推定する式①は過大評価となっているが、式②では減衰も含めた安定した耐震性評価が可能であることが分かる。1年間の測定期間では、耐震性の経年劣化は明確には現れていない。しかしながら、耐震評点は夏季(6月~10月)において低く、冬季(3月~5月及び11~1月)は高めに診断される傾向が見られ(同図(上))、対象住宅から最も近い(7km離れた)気象観測点(岐阜県岐阜)の蒸気圧(同図(下))と相関のある変動を見せている。すなわち、微動測定を始めた2007年3月~5月は岐阜県岐阜の蒸気圧は低く、6月から観測点蒸気圧は徐々に高くなり8~9月をピークに徐々に低下を始めている。それに呼応し耐震評点は3月期に1.4と診断されたが季節を追うごとに低くなり(耐震性は劣化)、8月~9月期の評点は1.1でもっと低い値を示した。それをピークに再び10月以降は耐震評点の上昇傾向を見せている。一般に冬季は蒸気圧が低く乾燥が進み無垢の木材長期耐力性能が上がると言われている。気候条件に伴う構造耐力の季節変動は微動からも追跡可能であり、長期間にわたる構造ヘルスマニタリングへの応用可能性は極めて高いと言えよう。

(4)リスクコミュニケーションのための情報変換

耐震評点は建物の耐震性の判断基準を与えてはいるが、一般住民にとりこの情報は分

かり易い情報とは決して言えない。「倒壊しない」とは完全なる安全を意味するのだろうか、「一応倒壊しない」とはどう解釈すべきなのか、「倒壊する可能性がある」とはどの程度の揺れに対しての可能性を意味するのか、「倒壊する可能性が高い」とは可能性があるに比べどの程度危険性が増したのか。筆者らによる建物損傷度関数と棟死亡率関数を応用することにより、耐震評点を上記疑問にも答え得る一般住民にも分かり易い情報に変換することが可能になる(図4)。

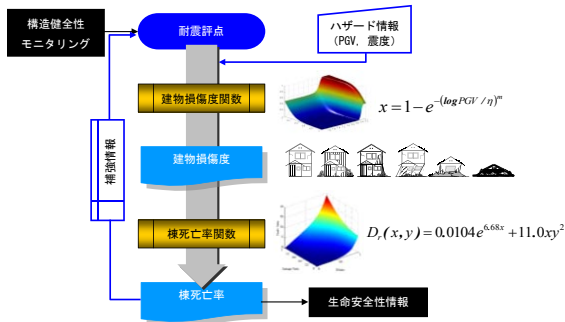


図4 分かり易い情報への変換操作

耐震評点は地域を襲う想定地震動(地動最大速度 PGV 、あるいは震度)と組みあわせ、建物損傷度関数を介することにより定義域 0(無被害)~1.0(完全層崩壊)で与えられる損傷度(Damage Index)に変換される。さらに損傷度は6段階の損傷区分(Damage Level)で損傷状態が可視化されているので、なじみやすい情報となるであろう。

建物損傷度関数は以下のワイブル分布で与えられる。

$$x = 1 - e^{-(\log PGV / \eta)^m} \quad \dots \textcircled{6}$$

ここに、 x は損傷度、 PGV は地動最大速度[cm/sec]、 m と η はワイブル分布の形状パラメータと尺度パラメータで耐震評点毎に係数が与えられている。関数形状は3次元(損傷度、ハザード(PGV 又は震度)、耐震評点)で表示され、図4中に示されている。

損傷度はさらに棟死亡率関数を介することで、家族の死傷問題(死の危険性)を導出する。対策の有無が家族の死傷にどのように影響するのかが評価され情報として与えられたならば、対策の切実さが直接伝わるのが期待される。棟死亡率[%]は以下で定義される。

$$D_r = Dn / Pn \times 100 \quad \dots \textcircled{7}$$

ここに Dn は建物一棟当たりの死亡者数、 Pn は地震発生時のその建物内における在宅者数である。棟死亡率 D_r を関数化するため 1995

年兵庫県南部地震のデータを基に以下の式に従い、建物損傷度別の平均的棟死亡率を求める。

$$D_r(x) = \sum_{i=1}^{N_m} Dn(x)_i / \sum_{i=1}^{N_m} Pn(x)_i \times 100 \quad \dots \textcircled{8}$$

同式中、 x は建物損傷度(Damage Index)、 N_m はDamage Index別の建物棟数、 $Dn(x)_i$ はDamage Index別 i 番目の棟死者数、 $Pn(x)_i$ は地震発生時におけるDamage Index別 i 番目の棟人口である。なお i は住宅に振られた連番である。被害直後の神戸市被災地航空写真から独自に読み取った13,129棟の建物データと当該地域死者データ507名について式⑧に基づき棟死亡率を算定し、このデータを回帰する棟死亡率関数として建物損傷度 x と周辺全壊率 y を変数とする以下の関数を求めた。

$$D_r(x, y) = 0.0104e^{6.68x} + 11.0xy^2 \quad \dots \textcircled{9}$$

周辺全壊率を説明変数に採用したのは、全壊率の高い地域は低い地域に比べ混乱状況が酷烈であり、救助時間をより要し同じ建物損傷下でも死亡率が高くなっていることに配慮したためである。関数形状は3次元(棟死亡率; 損傷度、周辺全壊率)で表示され、図4中に示されている。本提案の棟死亡率関数⑨に式⑥を代入し、損傷度 x を消去すると、周辺全壊率 y をパラメータとした{入力地震動強さ-耐震評点-棟死亡率}の関係が関数化され、住家の耐震補強程度に応じた個別世帯の死亡リスクの評価が可能となる。建物の耐震化対策を施すことで棟ごとの耐震評点が向上し、その効果を死亡リスクで実感することができる。

なお、このようにして診断された結果、耐震改修を要するとされた建物についての改修法選択・改修法・室内安全化についても検討している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

- ① 森 保宏, 井戸田秀樹: 避難リスクを考慮した木造住宅と学校建物の耐震化戦略 - 名古屋市を対象に -, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第74巻, 第646号, pp. 2189-2197, 2009.
- ② 川端寛文, 花井 勉, 井戸田秀樹, 石井 渉, 河尻 出: 木造住宅耐震補強工法選択のための意思決定支援ツールに関する研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第15巻, 第29号, pp. 105-110, 2009.
- ③ 谷口仁土, 杉野丞: 文化財建造物の地震リスクマネジメント, 歴史都市 防災論文集, 査読無, Vo. 1, pp. 281-288, 2008.
- ④ Okada S. and T. Ishida: Seismic Risk

Communication Technique for Individuals Supported by Structural Health Monitoring of Detached House, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 査読有, Paper No. S20-016, 2008.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 久保あすか, 中嶋唯貴, 岡田成幸: 緊急地震速報を利用した個人世帯における負傷回避システムの開発 ~コンピュータビジョンによる室内危険空間の自動認識~, 日本建築学会東海支部論文報告集, 47, 2009. 2. 15, 岐阜.
- ② 青木俊典・中嶋唯貴・岡田成幸: 解剖学的外傷重傷度指標の導入による地震時人体損傷評価法, 日本建築学会東海支部論文報告集, 47, 2009. 2. 15, 岐阜.
- ③ 岡田成幸: 地域の防災力の底上げを図る住宅向け SHM, 構造ヘルスマモニタリングがつくる安全・安心な建築空間, 2008 年度(社)日本建築学会振動部門パネルディスカッション, 2008. 9. 20, 東広島.
- ④ 石田隆司・岡田成幸: 微動入力による 2 質点系モデルの応答と実振動との比較検討 木造住家の簡易耐震診断法を目指して, 日本建築学会東海支部論文報告集, 46, 2008. 2. 17, 名古屋.
- ⑤ 石田隆司・岡田成幸: 木造住宅耐震評点の SHM(構造ヘルスマモニタリング) 特性値としての可能性, 日本建築学会大会梗概集, 2007. 8. 29, 福岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 成幸 (OKADA SHIGEYUKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 5 0 1 2 5 2 9 1

(2) 研究分担者

谷口 仁士 (TAHIGUCHI HITOSHI)
立命館大学・グローバルイノベーション研究機構・教授
研究者番号: 2 0 1 2 1 3 6 1
井戸田 秀樹 (IDOTA HIDEKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 1 0 2 0 3 1 9 2

(3) 研究協力者

林 勝朗 (HAYASHI KATSUAKI)
松本建工株式会社・技術研究所・所長
竹内 慎一 (TAKEUCHI SHINICHI)
北海道北方建築総合研究所・技術職員
名知 典之 (NACHI NORIYUKI)
北海道大学・大学院博士後期課程・学生

中嶋 唯貴 (NAKASHIMA TADAYOSHI)
名古屋工業大学・大学院博士課程・学生
島田 佳和 (SHIMADA YOSHIKAZU)
北海道大学・大学院修士課程・学生
石田 隆司 (ISHIDA TAKASHI)
名古屋工業大学・大学院修士課程・学生