

3.1.6 軸組構法木造建物実験(地震観測)

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ヵ年の年次実施計画
- (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) 業務の成果
 - 1) 地震観測の概要
 - 2) 常時微動計測による振動特性に影響を与える要因
 - 3) 地震時の振動特性の変化
 - 4) 瞬時振動数の同定
 - 5) 固有振動数の変形依存性
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 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 E-ディフェンスによる京町家実験(地震観測)

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学大学院工学研究科	教授	林 康裕	hayashi@archi.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院工学研究科	助手	森井 雄史	morii@archi.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院工学研究科	大学院生	井田 祥子	is2.sho-ko0617@archi.kyoto-u.ac.jp
大成建設(株)技術センター	研究員	新居 藍子	ni-aik00@pub.taisei.co.jp

(c) 業務の目的

日本全国各地には、地域特有の木構法によって建てられた木造軸組建物が数多く存在している。これらの木造建物には建設年代が古い建物も多いが、今後も地域で継承していくべき構法や建物が多い。しかしながら、地域に特有な構法で建てられた既存建物の耐震性能の力学的解明は十分とは言い難く、来るべき大地震に対する耐震化対策を考える上でも、実際の地震時の応答特性の把握は不可欠である。本研究では、既存の木造軸組建物を対象とした地震観測を実施し、地震応答・耐震性能を解明する事を目的とする。

(d) 5 ヶ年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成14年度:

既往の地震観測システムについて調査を行い、観測機器・システム仕様を決定した。

パイロット的な地震観測のための既存木造建物として、1棟を選定して地震観測を開始した。

2) 平成15年度:

地震観測対象建物を2棟追加選定し、地震観測を開始する。

平成15年度までに観測を開始した建物の振動特性・構造特性について分析を行う。

平成15年度の地震観測記録の分析を行う。

3) 平成16年度:

地震観測対象建物を1棟追加選定し、地震観測を開始する。

平成16年度までに観測を開始した建物の振動特性・構造特性について分析を行う。

平成16年度の地震観測記録の分析を行う。

4) 平成17年度:

建物の振動特性・構造特性について分析を継続する。

地震観測記録の分析を継続する。

5) 平成18年度：

建物の振動特性・構造特性について5年間の成果を分析・整理してまとめる。

地震観測記録について5年間の成果を分析・整理してまとめる。

(e) 平成18年度業務目的

京都市内において、既存の軸組木造建物を4棟選定して地震観測を開始してきたが、地震観測とともに、定期的・継続的な常時微動計測を実施し、振動特性について分析を行う。過去5年間の常時微動計測と地震観測のまとめとして、i) 常時微動計測による振動特性（特に、固有振動数）に影響を与える要因の分析、ii) 地震時の振動特性の変化の分析、iii) 瞬時振動数の同定、iv) 固有振動数の変形依存性評価法の構築を行う。

(2) 平成18年度の成果

(a) 業務の要約

軸組構法木造建物の地震時挙動を把握するために既存木造建物の地震観測を平成14～17年度に引き続き実施し、地震観測記録の分析を行っている。また、過去5年間の常時微動計測と地震観測のまとめとして、i) 常時微動計測による振動特性（特に、固有振動数）に影響を与える要因の分析、ii) 地震時の振動特性の変化の分析、iii) 瞬時振動数の同定、iv) 固有振動数の変形依存性評価法の構築を行った。

(b) 業務の成果

1) 地震観測の概要

a) 観測建物

観測対象は、京都市内の立地地点を図1中に示すが、表1および図2に示す4棟の京町家である。IR邸以外は、京町家の典型的な特徴である細長い平面形状と通り庭を有している。通り庭(張り間)方向には隣家に接して側壁がある。しかし、直交(けた行)方向には全面土壁が少なく、両方向で明瞭な耐力差を有する。KJ邸、TN邸の通り庭部分は土間で、屋根まで吹き抜けであり、通り庭を挟む両側の壁は梁で連結されている。IR邸では2004年に耐震改修が施工されている。

表1 観測京町家の概要

	KJ邸	KT邸	IR邸	TN邸
特徴	表屋造	旧お茶屋	郊外型	標準規模
建築年	明治32年	築60～70年	築約70年	明治初期
平面形態	2列3室型	1列3室型	-	1列4室型
建物重量(kN)	2階	384	154	117
	1階	269	133	142
床面積(m ²)	2階	130.6	59.1	71.4
	1階	169.0	57.1	80.5
階高(m)	2階	2.79	3.01	2.75
	1階	3.08	2.78	3.10
	軒高	5.87	5.79	5.85
ベースシア係数	けた行	0.14	0.11	0.43
	張り間	0.44	0.45	0.46
固有振動数(Hz)	けた行	2.2, 4.2	2.7	7.4, 8.6
	張り間	4.2, 5.3	4.6, 5.7	6.4
隣接建物の有無(左, 右)	(有, 有)	(有, 有)	(無, 無)	(有, 有) (有, 無)
観測成分数	9	9	9	18
観測開始時期	2003年6月	2004年4月	2004年9月	2005年2月

*はねじれモードを示す振動数

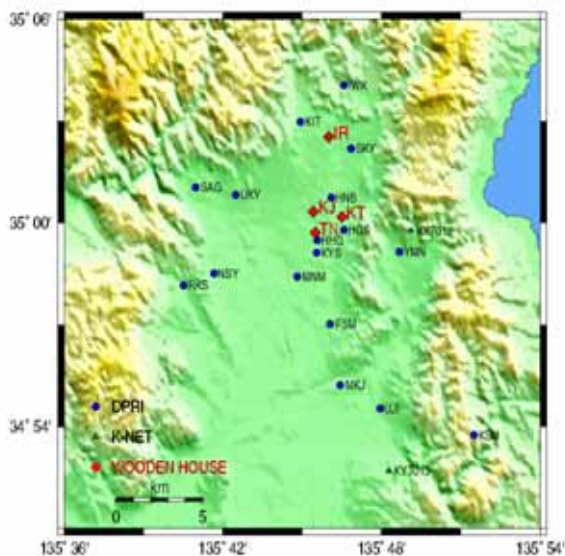


図1 観測京町家の立地点(図中の印)



(a) KJ邸



(b) KT邸



(c) IR邸



(d) TN邸

図2 観測京町家の外観

b) 地震計配置

各京町家での地震計の設置場所は、地表面3成分、建物は2階床レベルと小屋梁レベルの各水平2成分を基本として、ねじれ振動や構面毎の振動性状が把握可能な様に、適宜水平成分を追加し、合計9(TN邸のみ18)成分で観測を行っている。観測建物の平面図と地震計配置を図3に示す。

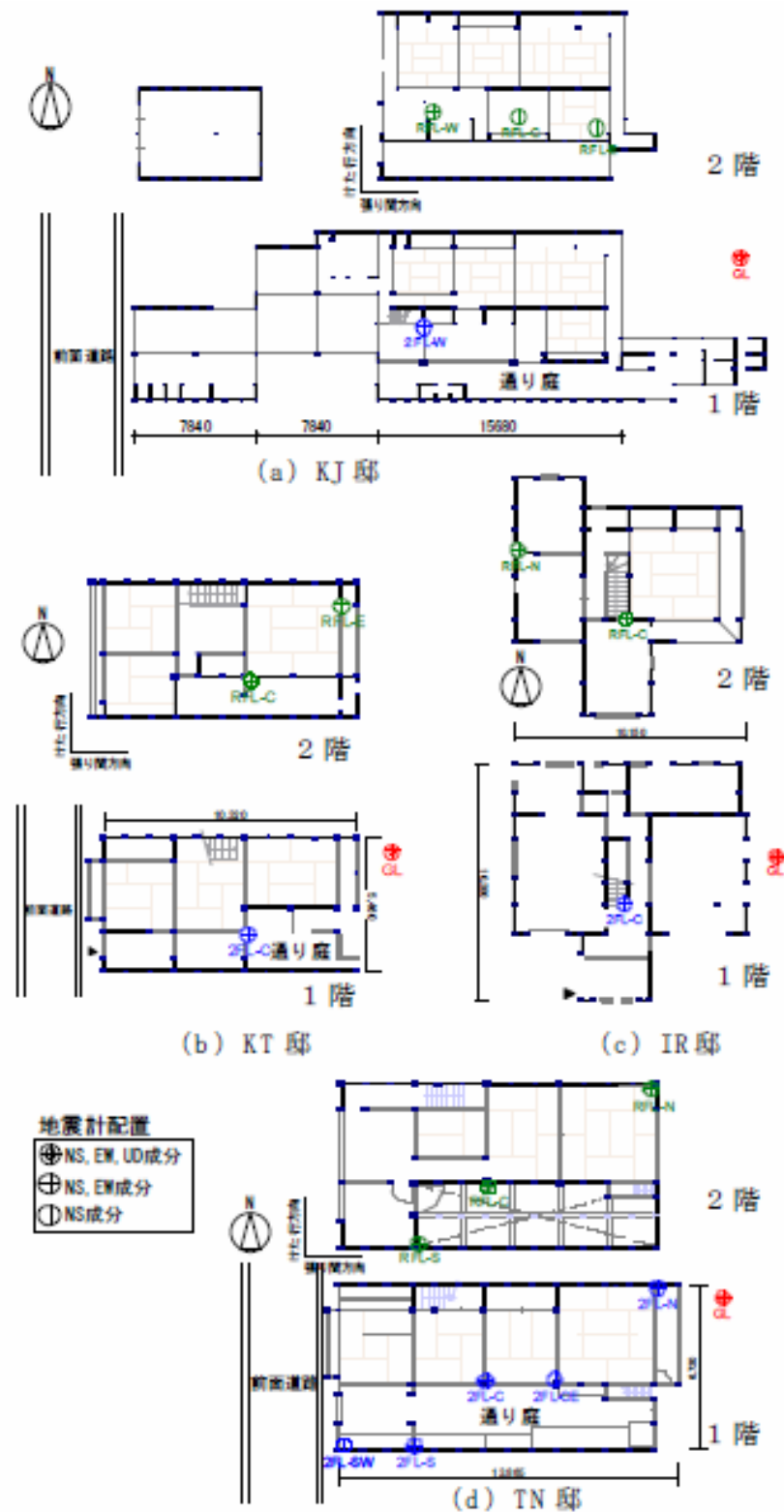


図3 観測建物の平面図と地震計配置

2) 常時微動計測による振動特性に影響を与える要因

a) 計測の概要

地震観測可能な成分数には限りがあるため、建物の基本振動特性（固有振動数や振動モードなど）の把握を目的として、別途常時微動計測を行っている。常時微動計測では、加速度計（水平2成分、鉛直成分）10台を地表面1か所、建物内9か所に設置し、同時計測を行った。

計測された加速度データから算出した、代表的な計測点の地表面に対するフーリエスペクトル比を、各建物について図4に示す。また、各計測点のフーリエスペクトル比のピーク値と同振動数における地表面との位相差を用いて得られた振動モードを図5に示す。

表1に各建物で得られた固有振動数を示す。通り庭を有するKJ邸、KT邸、TN邸の固有振動数は、けた行方向で2~3Hz、張り間方向で5Hz前後の値となっており、耐震要素を配置し難いけた行方向で小さな値となっている。なお、IR邸も耐震改修前は2方向とも5Hz以下であったが、改修後は6.4~8.6Hzと高い値となっている。振動モードでは、KJ邸とTN邸では、けた行方向の明瞭なねじれ振動モードが見られた。

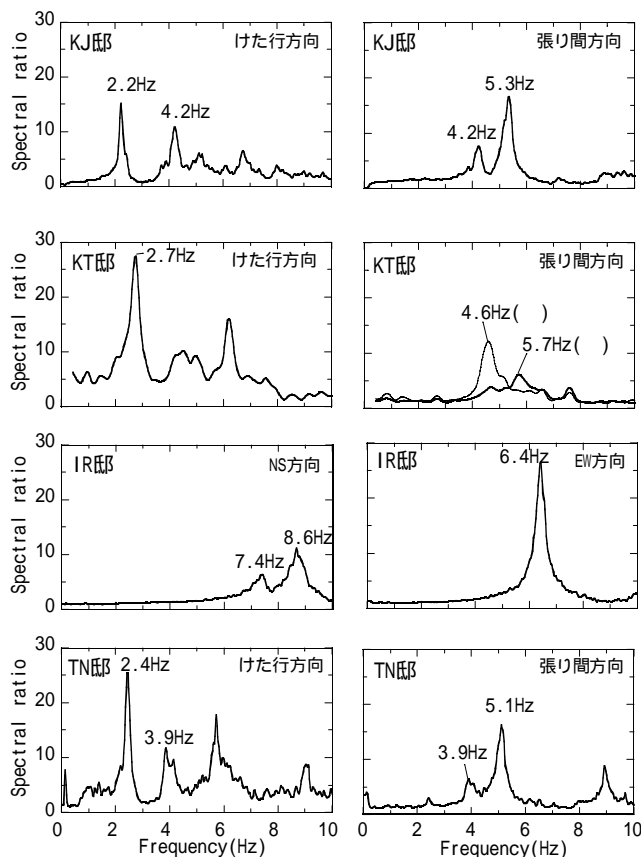


図4 フーリエスペクトル比（常時微動計測）

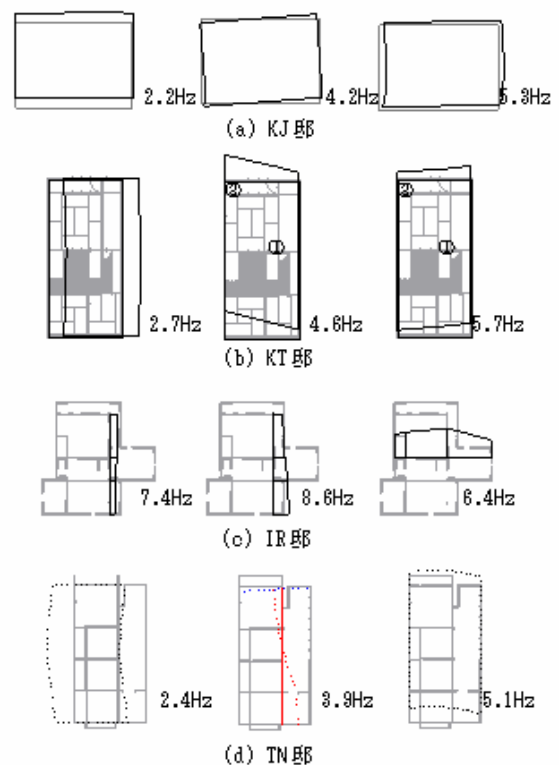


図5 振動モード

b) 固有振動数とベースシア係数の関係¹⁾

伝統軸組構法による木造住宅について、常時微動計測より得られる固有振動数 f_0 と限界耐力計算に基づき算定されるベースシア係数 C_y の関係として、次式が提案されている。

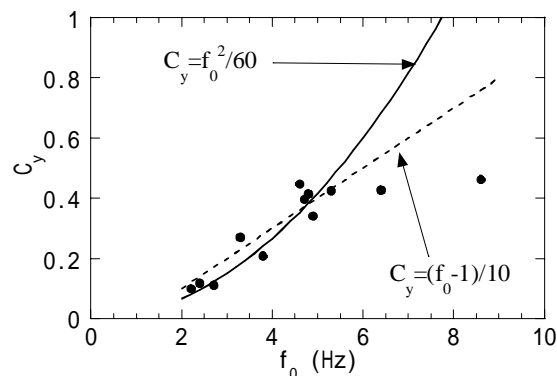
$$C_y = f_0^2/60 \quad (1a)$$

$$C_y = (f_0 - 1)/10 \quad (1b)$$

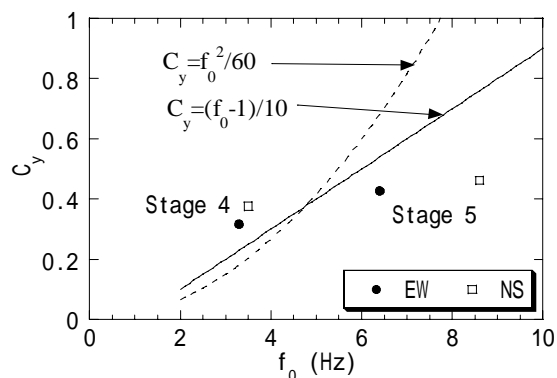
地震観測対象京町家 4 棟を含む 6 棟の京町家の f_0 - C_y 関係を図 6(a) に示す。改修が施された IR 邸を除き、概ね(1)式に適合し、 f_0 より C_y が略算可能と考えられる。

c) 仕上げ材による固有振動数の変化²⁾

IR 邸では、耐震補強と改修工事の代表的な施工段階で常時微動計測を行っている。工事は、ほぼ軸組の状態にした後、順次、耐震補強・仕上げが施されている。Stage 4 は軸組に構造要素(荒壁パネル、構造用合板、木杵、筋かい)を施工した段階、Stage 5 は内装(プラスターボード)、外装(ラスモルタル)仕上げを施した竣工後の状態である。各 Stage の f_0 - C_y 関係を図 6(b) に示す。Stage 4 から 5 の過程で大きく降伏せん断力は増加するが、重量も増加している。従って、 C_y の増加は大きくないが、固有振動数は大きく変化しており、前述の様な現代的な仕上げ材仕様によって、微小変形時の固有振動数が増大し、(1)式との乖離も増大したと考えられる。



(a) 京町家 6 棟の固有振動数



(b) 仕上げ前後の変化(IR 邸)

図 6 常時微動計測より得られた京町家の固有振動数

d) 隣接家屋の解体による振動特性の変化

TN 邸では、壁を接していた隣接家屋が解体された前後(図 7 参照)で、振動特性に顕著な変化が見られている。図 8 に隣接家屋解体前後に行った微動計測の代表的な計測点の地表に対するフーリエスペクトル比を示す。固有振動数は張り間方向では殆ど変化が見られないが、けた行方向では 3.1Hz から 2.4Hz へと 8 割程度に低下している。また、隣接家屋の解体前後の振動モードの変化は、図 9 に示す様に隣接家屋の解体後にねじれ振動モードの存在が顕著になった。

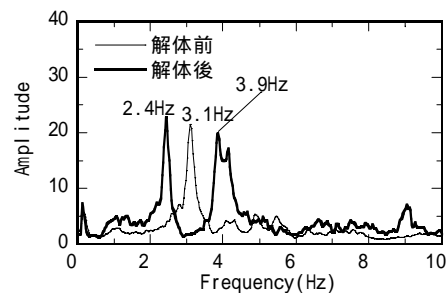


(a)隣接家屋(奥)解体前

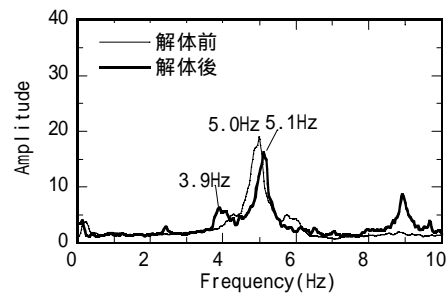


(b)隣接家屋(手前)解体後

図 7 TN 邸と隣接家屋の解体

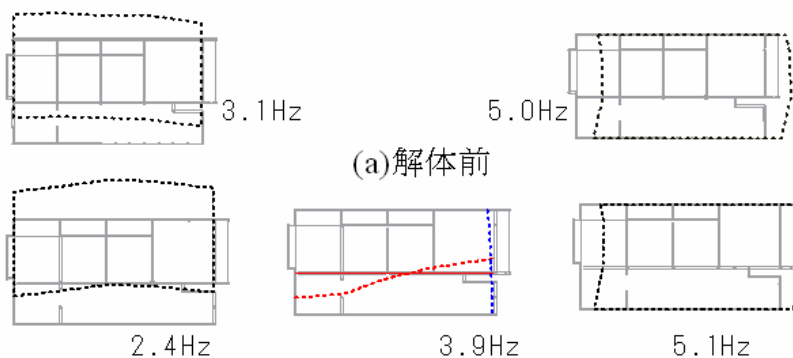


(a) けた行方向



(b) 張り間方向

図 8 隣接家屋解体前後のスペクトル比(2FL/地表)の変化(TN 邸)



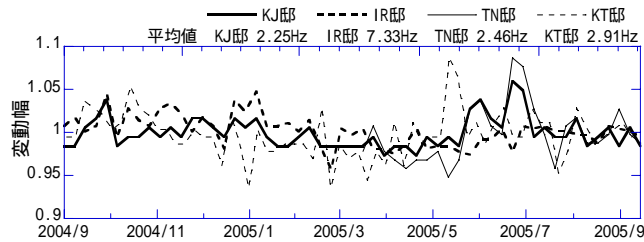
(a)解体前

(b)解体後

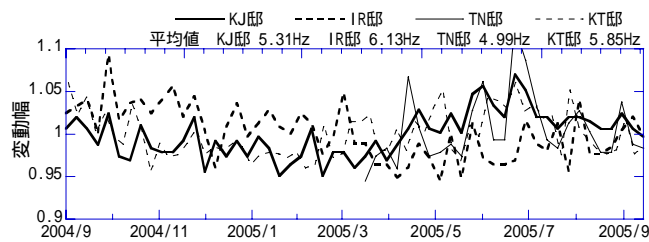
図 9 TN 邸の隣接家屋の解体前後の振動モードの変化

e) 固有振動数の季節変化

週1度の定期的な常時微動計測により得られた年間(2004年9月~2005年9月)の固有振動数の変化を、年間平均固有振動数で正規化して図10に示す。各建物の固有振動数は夏に高く、冬に低くなる傾向がみられ、年間の変動幅は±5~10%程度となっている。また、KJ邸を例に固有振動数の季節変化を京都气象台による温湿度データ³⁾と比較して図11に示す。固有振動数は相対湿度と相関が高い事が分かる。

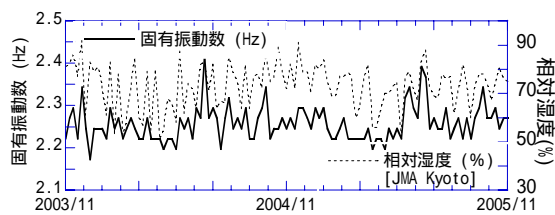


(a) けた行方向

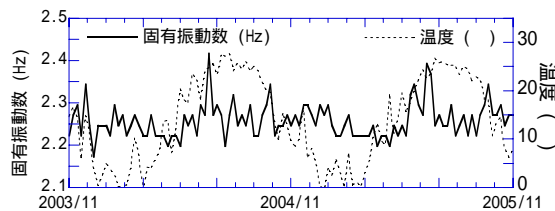


(b) 張り間方向

図10 固有振動数の変動幅



(a) 相対湿度との比較



(b) 温度との比較

図11 固有振動数と温湿度との比較 (KJ邸)

3) 地震時の振動特性の変化

代表例として、KJ 邸での観測記録の分析結果を示す。

a) 代表的な観測地震

KJ 邸での観測記録のうち、計測震度が大きかった 2 つの地震、2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分発生 of 東海道沖の地震(M7.4)と、2004 年 12 月 1 日 23 時 30 分発生 of 京都府南部を震源とする地震(M4.0)(ともに計測震度 3.2)について、震源位置と観測点 KJ 邸の位置を図 12 に、地震の諸元と KJ 邸地盤での観測記録の概要を表 2 に示す。東海道沖の地震において、KJ 邸地盤で観測された加速度波形を図 13 に示す。京都府南部の地震が直下型の地震で、継続時間が短いのに対して、東海道沖の地震は、震源までの距離が長く、継続時間が長い。

b) 地震時の応答特性

2 つの地震について、地表面に対する小屋梁レベル(RFL-W)の加速度フーリエスペクトル比を常時微動計測で得られたフーリエスペクトル比と併せて図 14 に示す。常時微動計測時に明瞭に見られたピーク(けた行方向は 2.2Hz と 4.2Hz、張り間方向は 4.2Hz と 5.3Hz)は、地震時にはピーク値が小さくなり不明瞭になるとともに、ピーク振動数が低下している。

東海道沖の地震観測記録について、けた行方向の観測記録を時間分割し、図 13 に示す ~ の各時間帯について、地表面に対するフーリエスペクトル比を求めた(図 15)。1 次のピーク振動数とピーク値は、地震発生前には 2.2Hz で、地震動が大きい時間帯ほど低下し、主要動部分の で最も低くなり、徐々に 2.2Hz に戻っていく傾向が確認できる。ただし、4.2Hz 付近に見られたねじれが卓越したピーク振動数には、顕著な変化が確認できなかった。

表 2 地震の諸元と KJ 邸地盤の観測記録の概要

発生日時	震源地	北緯	東経	M	深さ(km)	PGA (cm/s ²)		PGV (cm/s)		I _{JMA}
						NS	EW	NS	EW	
2004/9/5 23:57	東海道沖	33.1	137.1	7.4	43.5	21.1	18.8	2.5	2.1	3.2
2004/12/1 23:30	京都府南部	35.0	135.8	4.0	12.7	97.5	103.1	2.6	3.5	3.2

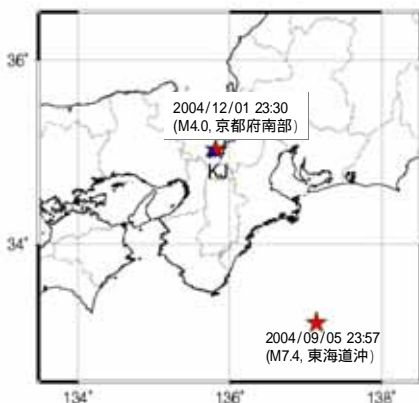


図 12 震源と観測点位置

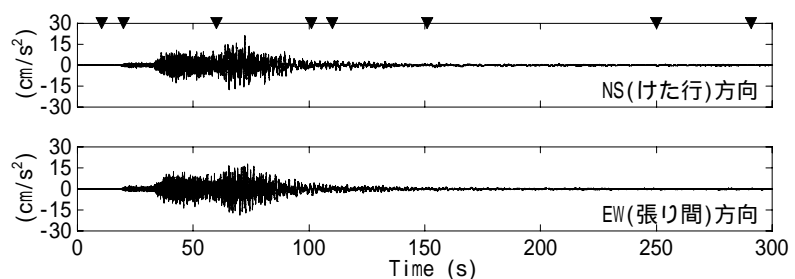


図 13 東海道沖の地震で得られた地動加速度波形 (KJ 邸)

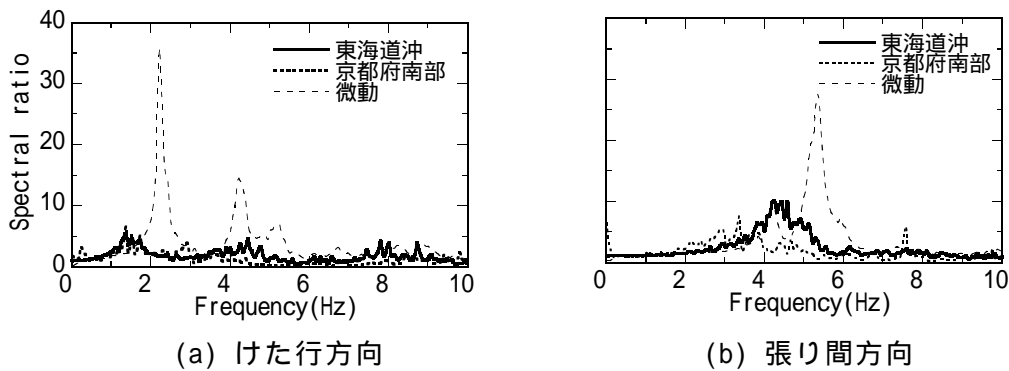


図 14 フーリエスペクトル比の時間変化
(KJ 邸、けた行方向、東海道沖の地震)

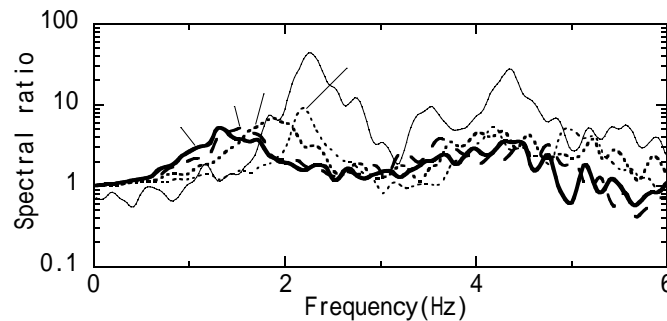


図 15 フーリエスペクトル比
(KJ 邸、地震時と微動時)

4) 瞬時振動数の同定

地震の最中の時々刻々の固有振動数の変化を、瞬時振動数の同定手法を適用して追う。また、手法の適用性について検討を行う。

a) ウェーブレット変換による瞬時振動数

時刻歴波形 $f(t)$ の、時刻 b 、振動数 a におけるウェーブレット変換 $T_f(b, a)$ は、

$$T_f(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi_{(b,a)}(t)} dt \quad (2)$$

で表される。本検討では、 $\overline{\psi_{(b,a)}(t)}$ のマザーウェーブレットとして Morlet ウェーブレットを用いた。ここで、 dt を時間刻み、 n/a を平均する時間間隔とし、絶対速度 $x(t)+y(t)$ の地動速度 $x(t)$ に対する伝達関数 $H_{x+y,x}(b, a)$ を次式により定義する。

$$H_{x+y,x}(b, a) = \frac{\sum_{i=-\frac{n}{2dt}}^{\frac{n}{2dt}} T_x^*(b + \frac{i}{a}, a) T_{x+y}(b + \frac{i}{a}, a)}{\sum_{i=-\frac{n}{2dt}}^{\frac{n}{2dt}} T_x^*(b + \frac{i}{a}, a) T_x(b + \frac{i}{a}, a)} \quad (3)$$

時刻 b について $T(b, a)$ 、 $H(b, a)$ の値が最大となる振動数 a を瞬時振動数とした。

b) 観測記録への適用結果

東海道沖の地震での KJ 邸のけた行方向の記録に適用した結果を示す。 T_x 、 T_y 、 $H_{x+y,x}$ の瞬時振動数の時間変化を図 16 に示す。 T_y 、 $H_{x+y,x}$ の瞬時振動数を見ると、主要動で低下後、徐々に 2.2Hz へ回復している。ただし、 T_y 、 $H_{x+y,x}$ の瞬時振動数には、主要動後、地動 $x(t)$ の卓越振動数に相当する 0.1Hz、0.5Hz の影響が見られ、建物の固有振動数の変化は明瞭でない。なお、地動の卓越振動数 0.5Hz は、京都の堆積地盤構造に関連した卓越振動数と考えられる。一方、 $H_{x+y,x}$ の瞬時振動数にも主要動後にゆらぎが見られる。この原因として、 $x(t)$ に固有振動数付近の成分がほとんど含まれないため、瞬時振動数の算定精度が低下した可能性も考えられる。

なお、Hilbert-Huang 変換⁴⁾を用いた同定手法による瞬時振動数の算定も行っており^{2,5,6)}、東海道沖の地震の観測記録に対しては比較的良好に瞬時振動数が同定されている。しかし、他の建物や地震を対象としたスタディの結果、必ずしも瞬時振動数の同定が可能ではないことがわかった。特に、複数のモードの存在や固有振動数の大きな変化が、現象をとらえられない原因となっており、木造住宅の固有振動数の変化の同定には、適当ではないと考えられる。

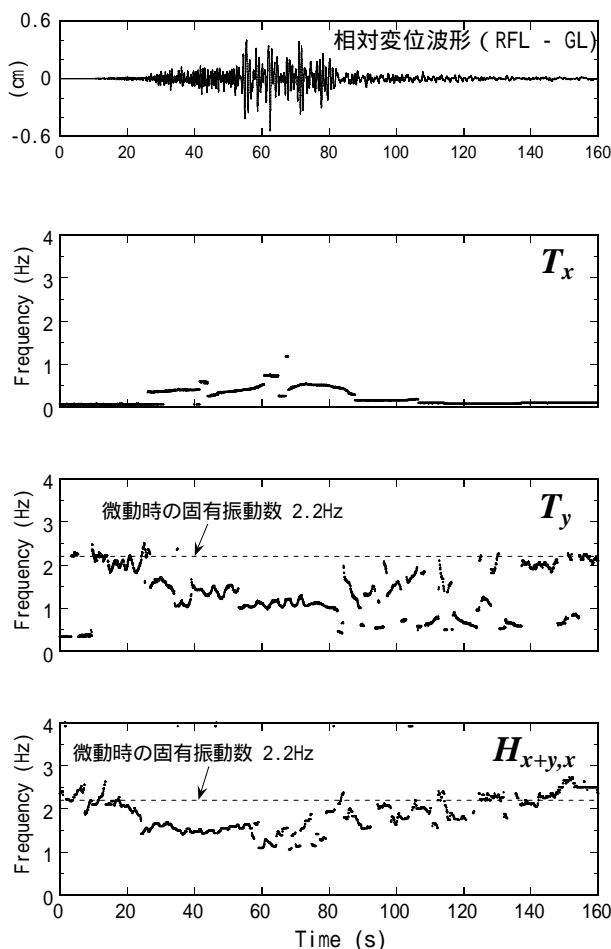


図 16 ウェーブレット変換による瞬時振動数 (KJ 邸、けた行方向)

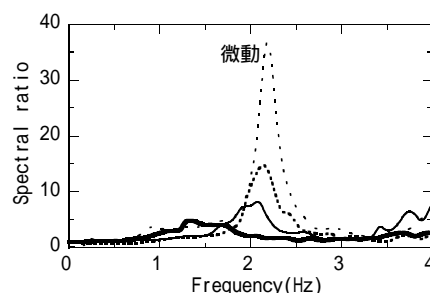


図 17 地震毎のフーリエスペクトル比 (KJ 邸)

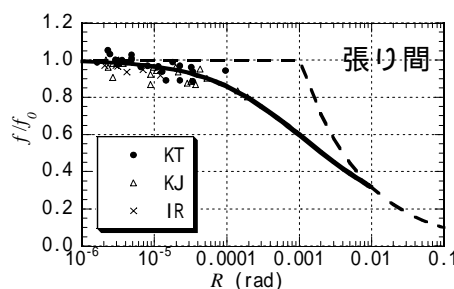
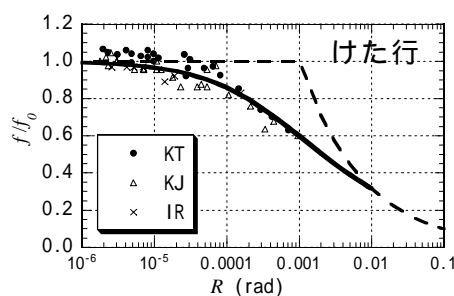


図 18 1 次固有振動数と最大変形角の関係

5) 固有振動数の変形依存性

常時微動計測結果と複数の地震観測記録から得られた、けた行方向の1次ピーク振動数付近のフーリエスペクトル比を図17に示す。地震時の変形の増大とともにピーク振動数とピーク値の明瞭な低下がみられる。

京町家3棟の地震観測記録の分析より得られた、地震時の1次固有振動数 f と最大応答変形角 R の関係を図18に示す。地震時の1次固有振動数 f は常時微動計測による1次固有振動数 f_0 で除して基準化している。1次固有振動数の低下傾向は3棟で差が見られなかった。

そこで、地震時の1次固有振動数 f の概略評価を目的として、a) $R \geq 1/100$ の場合には、降伏変形角 $R_0=1/1000$ の完全弾塑性型の復元力特性を基に、最大応答変形角 R に対する割線剛性で固有振動数 f を略算し(図18破線)、b) $R < 1/100$ の場合には、3棟の分析結果を近似(図18実線)すれば、次式を得る¹⁾。

$$\begin{aligned} (f/f_0)^2 &= 1/1000R & (R \geq 1/100) \\ (f/f_0)^2 &= 1/(1+9(100R)^{0.7}) & (R < 1/100) \end{aligned} \quad (4)$$

(c) 結論ならびに今後の課題

4棟の京町家を対象として、常時微動計測結果や地震観測記録に基づき、固有振動数や振動モードなどの振動特性を同定するとともに、地震時における振動特性の変化について分析を行った。得られた結論を以下に示す。

- ・常時微動計測より得られた固有振動数は、けた行方向より張り間方向の方が高い。また、固有モードには、明瞭なねじれ振動モードが存在する場合が多く、剛床仮定は必ずしも成り立っていない。

- ・常時微動計測によって推定される1次固有振動数に及ぼす要因として、季節変動・日変化、隣接建物の影響、仕上げ仕様の影響など考え、それらの影響度について定量的な把握を行った。

- ・1次固有振動数の明瞭な変形依存性が、地震観測記録により確認された。そこで、最大応答変形角に基づく1次固有振動数の概略推定式を提示した。

- ・ウェーブレット変換を用いた手法により、地震時の固有振動数が変化する過程を概ね同定できた。例えば、主要動付近で、最大応答変形角が $1/1000$ 程度になると固有振動数は約6割に減少し、振動が小さくなるにつれて地震発生前の固有振動数に回復していることを確認した。

なお、本地震観測では、研究期間中に比較的小さな地震しか観測されていない。引き続き観測を継続し、分析を行っていく必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 林康裕, 新居藍子, 森井雄史: 木造軸組構法住宅の振動計測の活用に関する研究, 日本地震工学会大会-2005 梗概集, pp.114-115, 2005.11.
- 2) A.Nii, D.Ju, Y.Hayashi, Y.Suzuki: Variation in Vibration Characteristics of Retrofitted Timber-Framed House, Structural Health Monitoring and Intelligent

Infrastructure, vol2, pp.1351-1357, 2005.11.

3)気象庁(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

4)Huang, N. E. et al. (1998). " The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis." Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, pp.903-995.

5)新居藍子,具典淑,林康裕,森井雄史,須田達,鈴木祥之:京町家の構造特性評価に関する研究(その3)郊外型町家の地震観測記録の分析,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-1,pp471-472,2005.9.

6)新居藍子,林康裕,具典淑,鈴木祥之:地震時における京町家の固有振動数の変化,日本地震工学会大会-2005 梗概集,pp.112-113,2005.11.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
新居藍子, 林康裕, 森井雄史, 具典淑, 鈴木祥之	地震観測に基づく京町家の振動特性の分析	日本建築学会近畿支部研究報告集 第46号・構造系	平成18年6月
井田祥子, 森井雄史, 新居藍子, 小椋大輔, 林康裕	京町家の構造特性評価(その5)相対湿度が固有振動数に及ぼす影響	日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-2 構造	平成18年9月
新居藍子, 林康裕, 森井雄史, 井田祥子, 鈴木祥之	京町家の構造特性評価(その4)常時微動計測より推定される固有振動数	日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B-2 構造	平成18年9月
新居藍子, 林康裕, 森井雄史, 井田祥子, 鈴木祥之	常時微動計測から推定される京町家の振動性状	日本建築学会構造系論文集, No.613	2007.3. (掲載予定)

(f) 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

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし