

「桝の内」を持つ古民家の常時微動観測

Microtremor Measurement of Traditional Old Houses with “Waku-no-uchi”

三辻和弥¹・永井康雄²・佐々木達夫³

Kazuya Mitsuji, Yasuo Nagai and Tatsuo Sasaki

¹東北大学助教 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Assistant Professor, Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture and Building Science

²東北大学准教授 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Associate Professor, Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture and Building Science

³東北大学技術職員 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

Technical Officer, Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dept. of Architecture and Building Science

We investigated vibration characteristics of traditional old houses with “Waku-no-uchi” structure that covers atrium by multi-layered large beams and girders, based on microtremor measurement. Those old houses were expected to show torsional response because “Waku-no-uchi” structure has high stiffness in horizontal plane of structure. Natural frequency of the first mode was estimated 1.7 to 2.7 Hz in transverse direction and 3.0 to 4.6 Hz in longitudinal direction. Relative displacement and displacement orbit of the second floor showed the translation motion in the natural frequency of the first mode and the torsional motion in the natural frequency of higher mode.

Key Words : *Traditional Old House, “Waku-no-uchi”, Microtremor Measurement, Torsional Response*

1. はじめに

近年、伝統的建造物を保存しようとする動きが活発になり、建築史的な研究だけでなく、耐震性能や振動特性といった構造的な特性を把握しようとする試みが数多く行われている¹⁾²⁾など。その背景には、地震による被害によって、伝統的建造物を含む文化財が存続の危機にさらされることがしばしば起きており、伝統的建造物を建築構造の視点から研究することの意義は大きいと考えられる。

著者らは富山県滑川市とその周辺にある「桝の内」と呼ばれるこの地方独特の伝統的な構造を持つ古民家を調査する機会を得た。富山県・石川県などの地域では、「桝の内」と呼ばれる吹き抜け空間を持つ古民家が数多く存在する。「桝の内」について建築大辞典³⁾には、「桝の内」とは、『「ひろま」または「おえ」と称する居間あるいは土間において、4本以上の柱と平物（指鴨居）・貫・大引き・梁などによって井楼（せいろう）形に構造体を造り上げ、これを核として他の部分の構造を造り上げてゆく方法。』とある。土間や居間など公共性の高い空間に高い吹き抜けを造り、その家を構成する部材の中でも最も高級で、太い梁を井桁状に掛けることによって、水平構面の剛性を高めている。

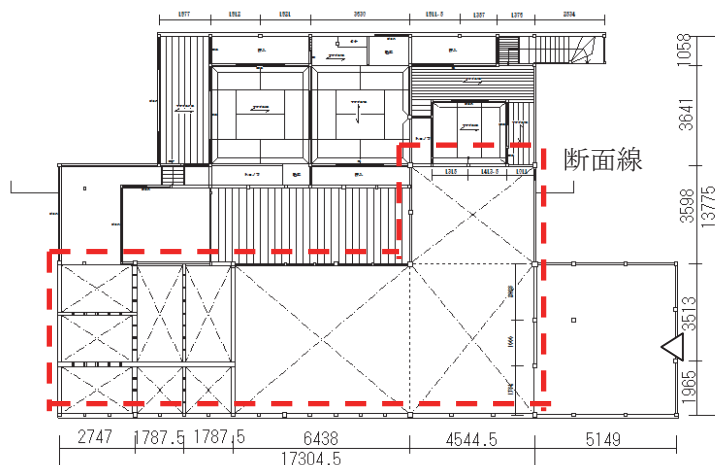
「桝の内」は吹き抜け空間に幾本もの太い梁が掛けられているため、接合部の状態にもよるが、民家のなかでも水平構面の剛性が高い要素になっている可能性が考えられる。また、「桝の内」の掛けられる土間や居間といった空間は正面出入口付近に設置されることが多い上に、これらの古民家は京町屋などと同じく、平面的には縦長のものが多いため、建物振動の観点からは、ねじれ振動を励起する可能性が考えられる。

「桝の内」を持つ古民家は文化遺産としての価値も高く、古民家を改修する際にも「桝の内」のみ現在の姿のまま養生して移築する例など見受けられる。一方で、2007年能登半島地震においては輪島市内の「桝の

内」を持つ建物で地震被害が報告されており、その振動特性を把握しておくことは文化財保護の意味でも、木造住宅の地震対策という意味でも有用である。本論では、合計7棟の「枠の内」を持つ古民家について常時微動観測を行い、基本的な振動特性について検討した。

2. 「枠の内」を持つ古民家の概要

調査対象とした古民家は富山県滑川市を通る北国街道沿いに点在する6棟と射水市の1棟の合計7棟である。建設年代はすべての建物について定かではなく、一部については明らかになっているが、概ね江戸時代後期から明治時代前期に建てられたものと思われる。図1に「枠の内」を持つ古民家の代表的な平面図を、図2には同じ民家の断面図を示す。断面図は図1の断面線で切断されたものである。



赤枠で囲った部分が「枠の内」に相当する

図1 MY家2階平面図(単位 mm)

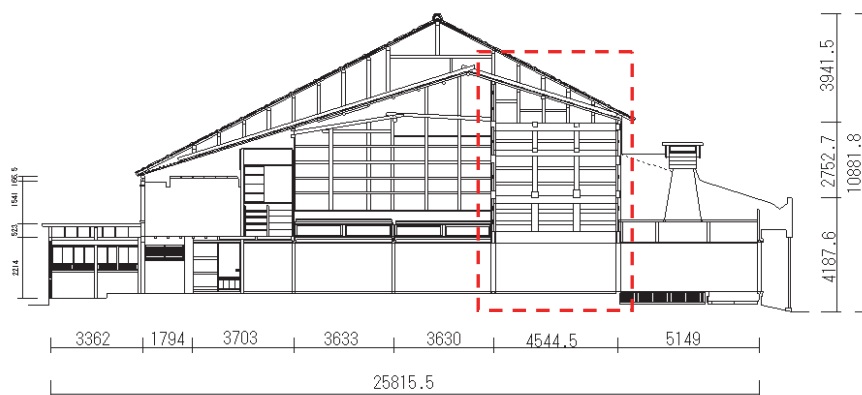


図2 MY家断面図(単位 mm)



写真1 「枠の内」(MY家)

図1の点線で示す部分および図2の赤点線で囲まれた部分が「枠の内」となっており、吹き抜け部分に写真1に示すような太い梁が幾重にも重なって掛けられている。「枠の内」は新築時から造られているものと、後から改築などにあわせて挿入されたものがあるようである。なお、この民家(MY家)では明治初年に「枠の内」を挿入したことが知られている。また、屋根は建設当初の板葺屋根の上に小屋組みを設けて新しい瓦葺屋根が掛けられている。ほとんどのこの形式の民家で、通りに面した間口に対して奥行きは長く、平面的には縦長の形状をしていることが多い。

3. 常時微動観測

前述の7棟の民家について、それぞれの基本的な振動特性を把握するために常時微動観測を行った。観測には東京測振社製のサーボ型速度計VSE-15Dを建物1階土間の部分および2階のほぼ重心と思われる位置の、できるだけ柱、梁に近い床上2箇所を設置した。各箇所でも水平2方向（建物間口および奥行方向）、上下1方向の計3成分について観測を行った。水平2成分は建物間口方向と建物奥行方向としている。計測時間は10分間で、サンプリング周波数は100Hzとした。NM家については、1階と2階のほぼ建物の重心と思われる位置で計測した他に、ねじれ振動の抽出を目的として、2階中央部と2階南端部、2階南端部と2階北端部の組み合わせでも計測を行った。

4. 観測記録の検討

図3にNM家の1階平面図と速度計設置位置を星印で示す。星印一つに対して速度計が3成分設置されている。尚、図中の赤枠は「枠の内」部分を示す。速度計は図3の1階平面図とほぼ同位置と思われる2階のそれぞれの位置に設置した。表1に常時微動観測から推定した各民家の1次固有周波数を示す。固有周波数を求めるに当たっては、計測した10分間の時刻歴波形から比較的波形の安定している40.96秒間の小区間を10個切り出し、FFTを用いてフーリエスペクトルから1階と2階の伝達関数を求めた後、10個の平均を取ったフーリエ振幅スペクトル比（伝達関数の絶対値）からピークの値に対応する周波数を読み取った。

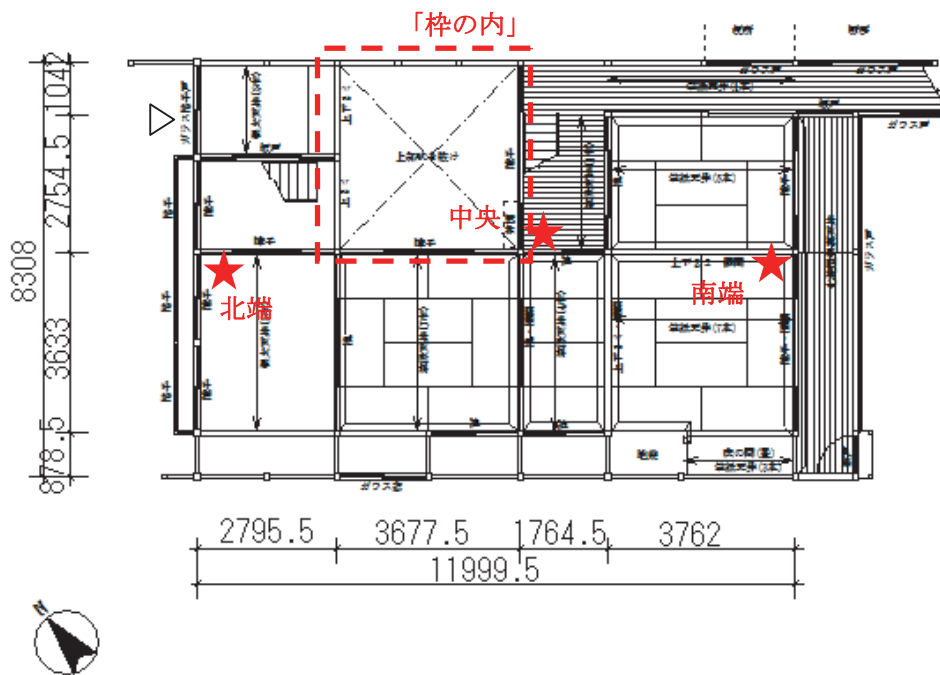


図3 NM家の1階平面図とセンサー設置位置（図中の速度計は2階に設置）

表1 各民家の固有周波数と平面形状

建物	1次固有周波数(Hz)		長さ(m)		平面縦横比 (奥行/間口)	重心間距離(m)	
	間口方向	奥行方向	間口方向	奥行方向		間口	奥行
AK家	2.7	4.6	18.6	16.4	0.9	1.8	1.8
DI家	1.7	4.3	9.6	18.3	1.9	2.4	2.3
KD家	1.9	3.6	9.6	19.1	2.0	2.5	2.3
MY家	2.4	3.0	13.8	17.3	1.3	3.5	0.9
NK家	2.5	3.6	11.0	17.5	1.6	2.3	3.0
NM家	2.5	4.6	8.3	12.0	1.4	2.1	1.4
ST家	2.4	3.8	8.3	19.4	2.3	1.7	2.8

表 1 より、推定した 1 次固有周波数は各民家とも、間口方向で 1.7Hz~2.7Hz、奥行方向で 3.0Hz~4.6Hz に分布しており、奥行方向の固有周波数が高めの傾向を示している。この傾向は建物の平面形状や建物正面は開口部が多いのに対して、奥行方向には外壁が多いことから推測できる。奥行方向の平面長さに対する間口方向の平面長さの比を平面縦横比として定義すると、AK 家以外の民家ではすべて平面縦横比が 1 を超え、さらに 2 前後のものが半数近くを占めている。DI 家と KD 家は平面縦横比がおよそ 2 であり、間口方向の 1 次固有周波数も 2.0Hz を下回っている。一方、AK 家では平面縦横比が 0.9 と唯一、1 を下回っており、1 次固有周波数も間口方向で 2.7Hz、奥行方向で 4.6Hz と、最も固有周波数が高い値を示しており、平面形状と固有周波数の間にある程度の相関が見られる。また偏心の程度を表す指標として、建物平面全体の重心と「枠の内」部分の重心との差を重心間距離として、奥行・間口方向ごとに求めた。重心間距離は 1m~3m の間に分布し、概ね 2m 前後となることが多い。この結果からも「枠の内」の存在が建物全体のねじれ振動に影響を与える可能性が想像される。

図 4 に各民家のフーリエ振幅スペクトル比を示す。いずれの民家についても間口、奥行き方向とも 1 次の固有周波数は明確に現れている。AK 家の奥行方向は 1 次固有周波数と判断した 4.6Hz よりも低い周波数 3.5Hz あたりに低いピークが見られ、これについてはさらに検討が必要である。間口方向の高次の固有周波数が奥行方向の 1 次固有周波数と近接しているところが見られている。

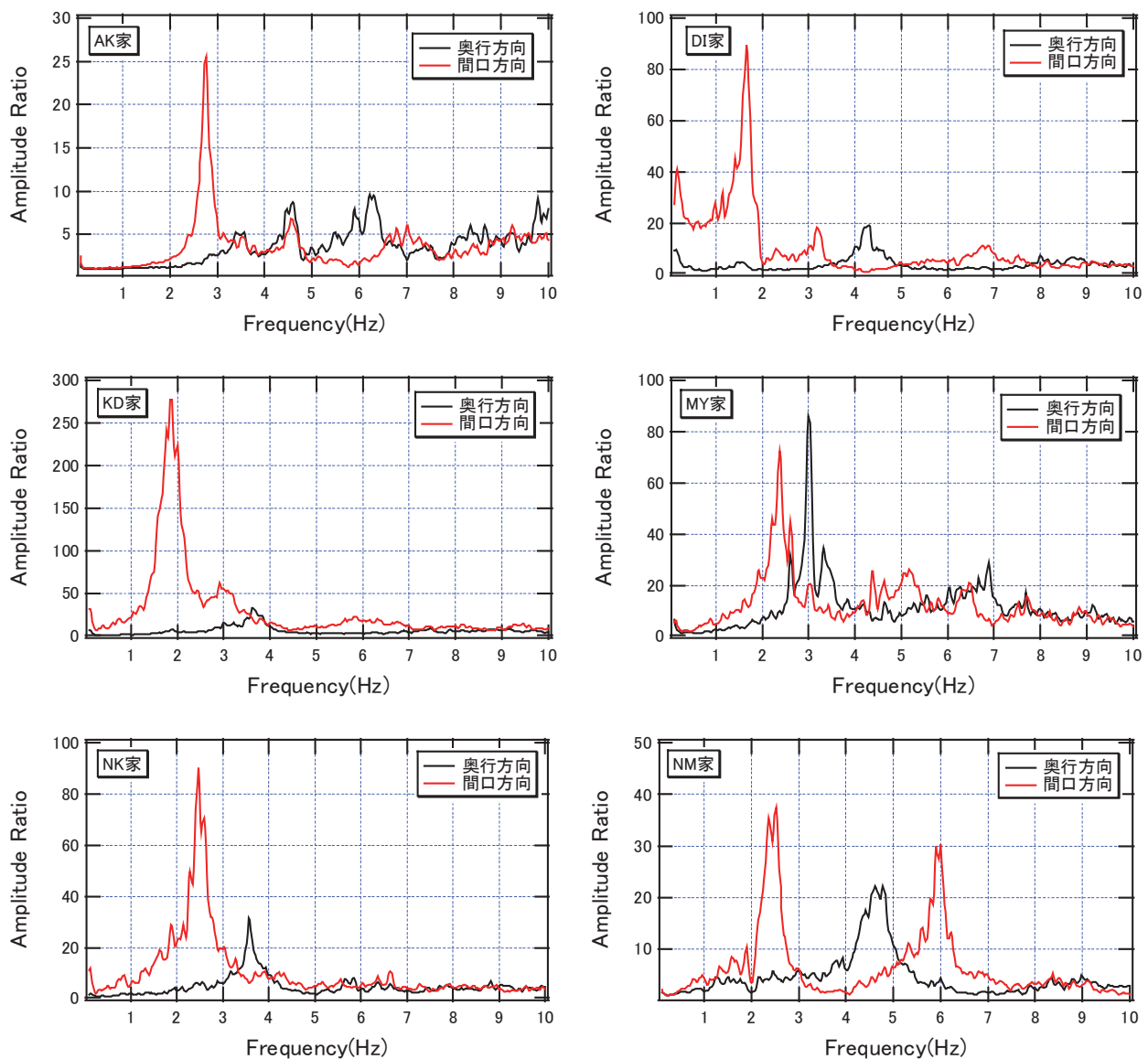


図 4 各民家のフーリエ振幅スペクトル比 (次ページに続く)

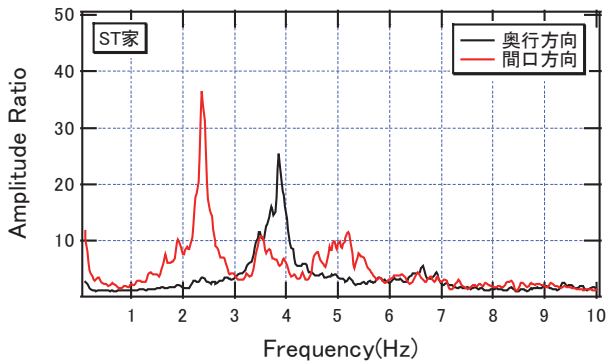


図4 各民家のフーリエ振幅スペクトル比 (前ページからの続き)

特に AK 家の 4.0-5.0Hz、ST 家の 3.0-4.0Hz では間口方向の 2 次固有周波数と奥行方向の 1 次固有周波数がほぼ一致しており、この周波数帯でねじれ振動など、並進成分以外の振動モードが励起されている可能性が考えられる。尚、スペクトル比の最大値は全体的にかなり大きなものとなっているが、これは観測を行った日には強風が吹いており、観測記録に風の影響を含んでいる可能性がある。この点については今後さらに検討する予定である。

図 5 には NM 家について、2 階中央と南端のフーリエ振幅スペクトル比を、図 6 には 2 階北端と南端のフーリエ振幅スペクトル比を示す。NM 家 2 階の速度計設置の状況は図 3 に示した通りである。中央と南端の関係については 3Hz 程度までの比較的周波数の低い領域では間口方向で約 2 倍程度、中央の振幅が大きくなっている。また、3Hz を過ぎたあたりからは、比較的大きな落ち込みが 4~5Hz に見られる。それよりも高い周波数領域では、5Hz 弱と 6Hz を越えたあたりにピークが見られる。したがって、間口方向の振動は比較的周波数の低い領域では 2 階中央で振幅が大きく、南端では小さなものとなっている。奥行方向については、ほぼスペクトル比が 1 であり、2 階中央と南端でほぼ同一の挙動をしていると考えられる。

北端と南端の関係についても同様に、間口方向については 3Hz 程度までの比較的周波数の低い領域で 2~3 倍程度、北端の振幅が大きくなり、2 階中央と南端の関係とほぼ同じである。それよりも高い周波数領域になると、ピークや落ち込みが見られ、5Hz 弱のところで大きなピークが見られる。また、6Hz 前後には大きな落ち込みが見られる。奥行方向については中央と南端の関係と同様にスペクトル比がほぼ 1 である。間口方向については、3Hz あたりの周波数領域までは南端に対して、中央、北端ともに振幅が大きくなる傾向であり、3Hz 以上の比較的周波数の高い領域では複雑な振動をするものと考えられる。

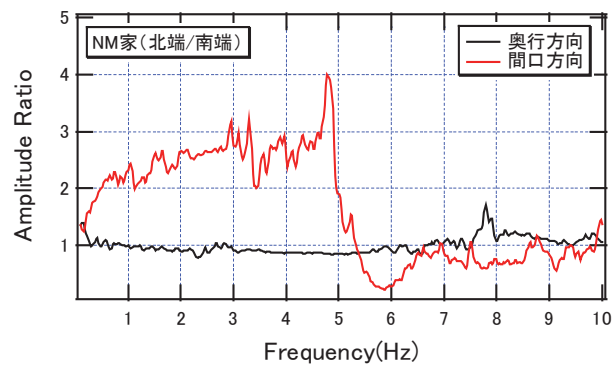
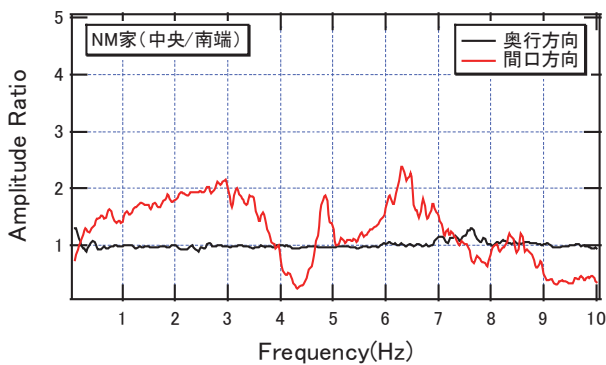


図5 中央と南端のフーリエ振幅スペクトル比 (NM 家)

図6 北端と南端のフーリエ振幅スペクトル比 (NM 家)

図 5、図 6 に対応する位相スペクトルを図 7 に示す。奥行方向の位相スペクトルは中央/南端、北端/南端ともこの方向の 1 次固有周波数周辺の 4-5Hz で位相はほぼ 0 を示し、他の周波数帯でも乱れは小さい。フーリエ振幅スペクトル比の結果と合わせて、2 階の奥行方向は 3 つの測定点でほぼ同一の振動をしていると考えられる。一方、間口方向ではこの方向の 1 次固有周波数にあたる 2-3Hz 付近と中央/南端 (図 7 左) の 2 次の固有周波数に相当する 5-6Hz で位相はほぼ 0 となっている。

図 8 には 2 階の観測記録から求めた間口方向と奥行方向の変位波形の軌跡を示す。変位波軌跡を求めるに当たり、1 回の観測で得られる 10 分間の記録から切り出した 10 区間の 40.96 秒間のうちから、その中でも最も波形の安定していると思われる区間の変位を取り出した。変位は図 4 および図 5 のスペクトル比でピークの見られた周波数帯でバンドパスフィルターにより帯域制限して求めた。帯域制限に用いた周波数帯は各

グラフの中に示した通りである。どの民家についても、間口方向の1次固有周波数付近の周波数帯で求めた変位軌跡（黒実線）は縦長の形状をしており、間口方向にほぼ並進運動をしていると考えられる。

DI家、KD家については間口方向の変位が特に強調されている。これは図4の結果に示されているように、間口方向のスペクトル比が奥行方向に比べてかなり大きいことを反映している。一方、AK家の3.0-4.0Hzや4.0-5.0Hzでは、変位軌跡は斜めに傾斜した軸を持つ楕円形を示している。DI家の3.0-4.0Hz、KD家の2.5-3.5Hzではそれぞれ図4のスペクトル比ではやや小さなピークが見られる。これらの周波数帯に対応する変位軌跡は振幅は小さいものの、やや傾斜した楕円状を示している。また、MY家の2.5-3.5Hz、NK家の3.0-4.0Hz、ST家の3.5-4.5Hzでは変位軌跡が比較的大きな膨らみを持った形状を示している。これら変位軌跡の形状と図4のスペクトル比を見比べてみると、1次固有周波数よりもやや高い周波数帯で、奥行方向のピークと間口方向のピークが近接していることがわかる。従って、この周辺の周波数帯で、ねじれ振動成分が現れている可能性が考えられる。

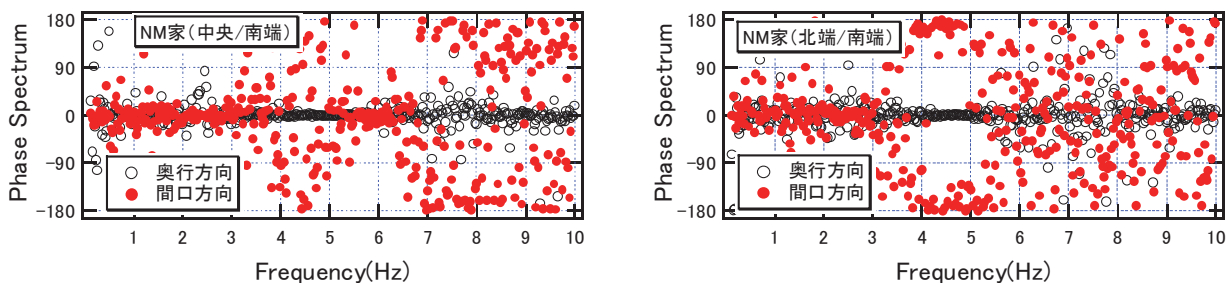


図7 中央/南端と北端/南端の位相スペクトル

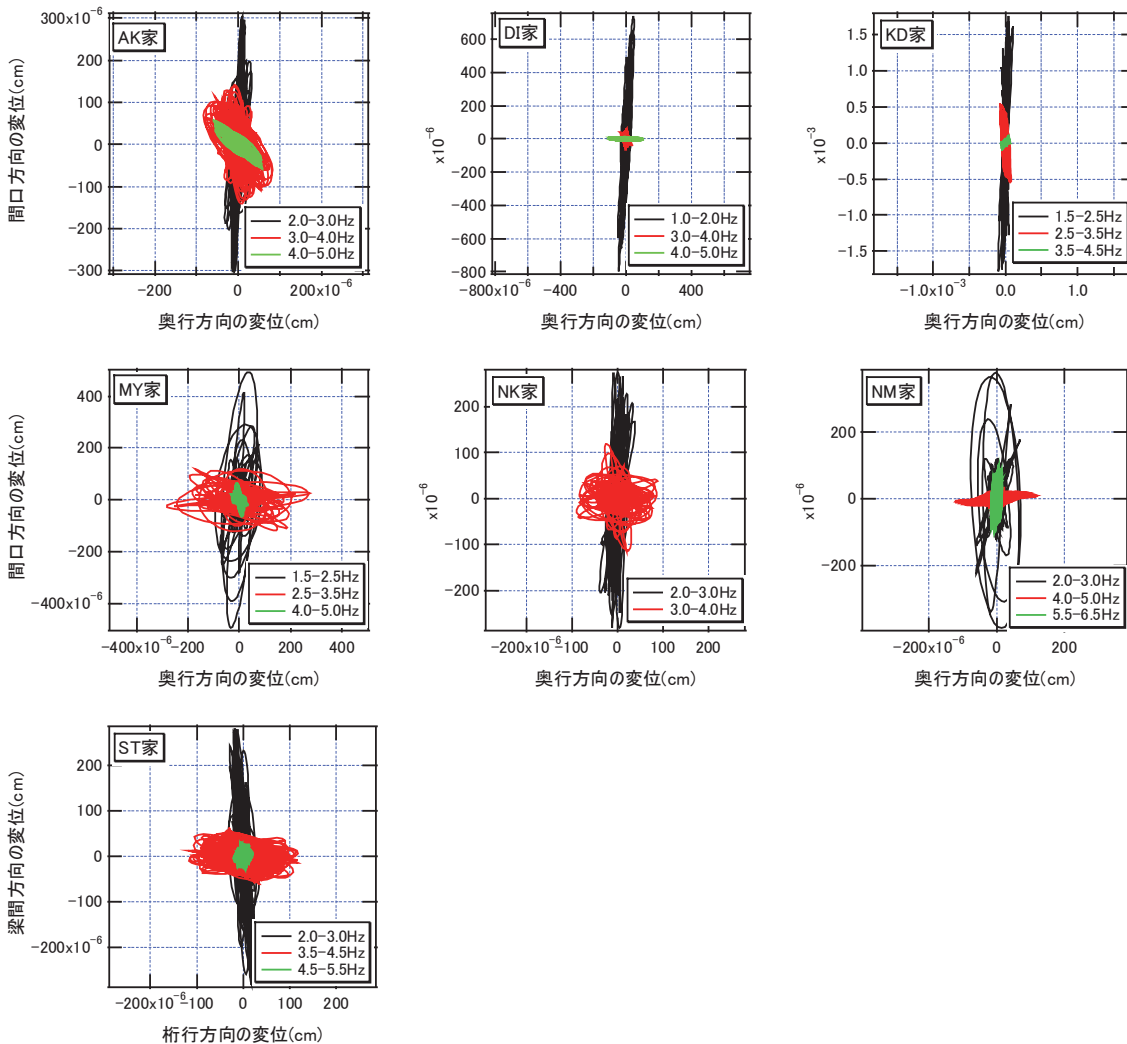


図8 各民家の2階の変位軌跡

図 9 には NM 家の 2 階に設置した速度計の記録から求めた、2 階の南端と中央、南端と北端の間口方向の変位波形を示す。2 階の速度計の設置位置は図 3 に示した通りである。図 9 左側の列のグラフは南端と中央、右側の列のグラフは南端と北端の変位波形である。図 8 の変位軌跡と同様にバンドパスフィルターを用いて図 4 のスペクトル比のピークを持つ周波数帯の変位成分を求めている。変位は計測した全時間から 10 区間 40.96 秒間にわたって求めているが、ここではその一部の 5 秒間を示す。

周波数帯で 2.0-3.0Hz は NM 家の間口方向の 1 次固有周波数に該当し、変位波形を見ても、南端と中央、南端と北端とも同位相で振動していることがわかる。従って、この周波数帯、すなわち間口方向の 1 次の固有周波数の周辺では、建物はほぼ並進運動をしていると考えられる。

一方、図 4 のスペクトル比で、NM 家の奥行方向の 1 次固有周波数である 4.0-5.0Hz では、南端と中央、南端と北端ともに変位波形は逆位相で振動している様子が見られ、ねじれ振動が起きていることが示唆される。この周波数帯での変位振幅は南端と中央では概ね南端のほうが大きい、図 9 中段左図のグラフより、振幅の大小関係が入れ替わっている区間も見られる。図 5 および図 6 によると、4.0-5.0Hz は 2 階中央の間口方向のスペクトル比が 2 階南端よりも低下する周波数帯であり、同じく 2 階北端のスペクトル比が南端に対してピークを持つ周波数帯でもある。従って、この周波数帯の 2 階の振動は南端-中央-北端について、「く」の字型のような複雑な振動をしている可能性も考えられる。ただし、2 階平面の観測は南端-中央、南端-北端の組合せで行っているため、南端-中央-北端の 3 点同時観測ではなく、あくまで相対的な評価となっていることに注意を要する。

NM 家の間口方向の 2 次固有周波数の周辺にあたる 5.5-6.5Hz の変位波形については、南端と中央の振動はほぼ同位相であるが、南端と北端では位相がややずれる区間も見られる。図 6 からこの周波数帯では南端と北端のスペクトル比に大きな落ち込みが見られることが影響していると思われる。以上の結果より、北端の動きは比較的高周波数で中央や南端とかなり異なるものであり、速度計を設置した北端の部分は改築や建増しなどの影響を受けている可能性もある。

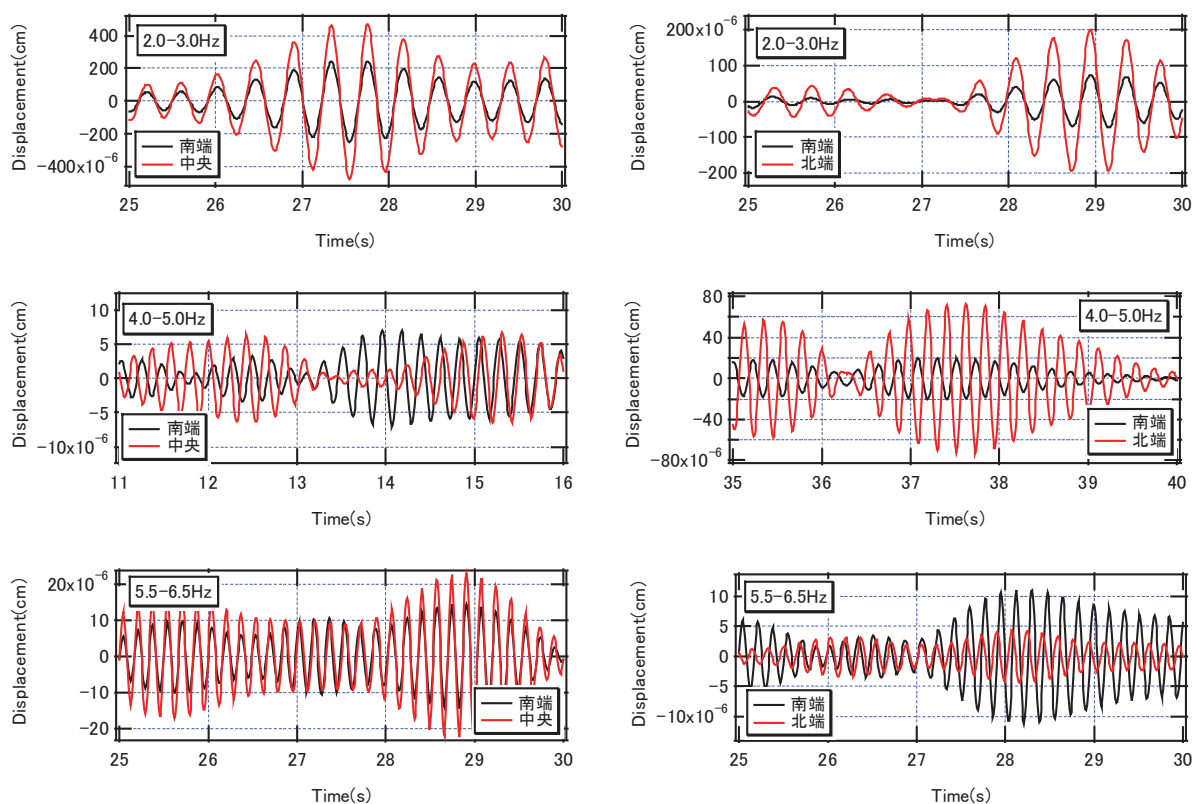


図 8 NM 家 2 階の間口方向の変位波形 (左列：南端と中央、右列：南端と北端)

5. まとめ

富山県滑川市およびその周辺にある「枠の内」構造を持つ古民家の常時微動観測を行い、その振動特性について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 観測を行った民家の平面形状は間口/奥行の平面縦横比で0.9~2.3であり、1次固有周波数は間口方向で1.7Hz~2.7Hz、奥行方向で3.0Hz~4.6Hzであった。間口方向は道路に面しており、開口部が多く剛性が比較的低下しているのに対して、奥行方向には外壁があり、開口部がほとんどないため、このような傾向が現れている。
- 2) 1階と2階の観測記録から求めたスペクトル比からは、いくつかの民家で間口方向の高次の固有周波数と奥行方向の1次固有周波数が近接する結果が見られた。2階中央での変位波形を間口方向、奥行方向の変位軌跡で表すと、間口方向の1次固有周波数付近では、並進運動を示す縦長の変位軌跡を描いているのに対し、奥行方向の1次固有周波数と間口方向の高次の固有周波数が近接している周波数帯では、変位軌跡が斜めに傾斜していたり、楕円状に膨らむ傾向があったりするなど、ねじれ振動の可能性を示唆するものであった。
- 3) NM家の2階中央と2階南端、2階北端と2階南端の変位波形の比較より、間口方向の1次固有周波数辺りでは、それぞれの変位波形は同位相の振動を示していた。一方、変位軌跡が楕円状を描く周波数帯、すなわち間口方向の高次の周波数帯や奥行方向の1次固有周波数帯では、逆位相に振動する波形が見られ、この結果からも比較的高次の周波数帯でねじれ振動が励起される可能性が示唆される。また、比較的高い周波数帯では南端-中央-北端で「く」の字型の振動をしている可能性を指摘した。これは建物北端部分が改築や建増しなどの影響を受けている可能性がある。

「枠の内」はこの地方独特の伝統的な建築構法の一つあり、伝統的建造物としての文化遺産的価値が高いものであるとともに、今後、古民家を改築する場合などにも地域的な住宅の特徴を示すものとして利用できる。伝統的な民家において「枠の内」は水平構面に対して剛性の高い要素と考えられることから、ねじれ振動の問題は重要であり、引き続き検討を行いたい。

謝辞：本調査研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号20360284)による成果の一部です。調査・観測を行うにあたり快くご協力いただいた、中屋一博氏、金山彰夫氏、中野重光氏、広橋和親氏、油本義広氏、城戸拓一氏、土肥穰氏、菅田安男氏、赤壁勝男氏、有限会社NAiS住設の方々、はじめ関係各位に心より感謝いたします。本文中に用いた図面は、北海道大学・池上重康助教、秋田工業高等専門学校・角哲准教授、東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻文化圏域学研究分野の皆さんによる調査に基づき、東北大学大学院・増田晴夫氏、星育恵氏に作成していただきました。常時微動観測に関しては秋田県立大学クアドラ・カルロス准教授から機器一式を貸していただきました。ここに深く感謝いたします。また、貴重なご意見・ご指摘をいただいた査読者2名に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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屋の振動性状，日本建築学会構造系論文集，第613号，pp.43-50，2007.
- 2) 須田達・鈴木祥之・奥田辰雄・斎藤幸雄・後藤正美・清水秀丸：既存京町屋の実大震動台実験による耐震性能と耐震補強，第12回日本地震工学シンポジウム，pp.802-805，2006.
- 3) 建築大辞典，彰国社，1981.