

常時微動計測を用いたイラン・聖タデウス教会の振動特性評価

Evaluation of Vibration Characteristics of Church at Monastery of St. Thaddeus in Iran Using Microtremor Measurement

東澤航平¹・池本敏和²・宮島昌克³・Abdolhossein Fallahi⁴

Kohei Tozawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Abdolhossein Fallahi

¹金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

Graduate student, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

²金沢大学講師 理工学域地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Associate Professor, Faculty of Geosciences and civil Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

³金沢大学教授 理工学域地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Professor, Faculty of Geosciences and civil Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

⁴元アゼルバイジャン シャヒド マダニ大学准教授 土木工学科 (35km. of Tabriz-Maragheh Road, Tabriz, IRAN)

Former Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University

Currently, 60% of the world's population resides in masonry structures, several of which are constructed using bricks of inferior quality. While inexpensive to construct, masonry structures are vulnerable to earthquakes. There are world heritage sites of stone structures in Iran, and it can be said that there is an urgent need to consider seismic measures to protect these structures. The authors observed the microtremors of St. Thaddeus in Iran. The safety of St. Thaddeus was evaluated from the characteristics of the church building and the ground surface using the results of microtremors. As a result, it is speculated that the church may collapse due to again and earthquake.

Keywords: microtremor, brick buildings, world heritage, St. Thaddeus church

1. はじめに

世界の地震大国では、社会・経済的な面から地方都市の耐震化が進んでおらず小規模の地震でも建造物および人的被害が発生する地域が多数存在する。地震頻度の高いアジア諸国として中国、インドネシア、イラン、日本、トルコ等が挙げられる。その中でもイランは、ユーラシアプレート、アラビアプレート、インド・オーストラリアプレートの3つのプレートがぶつかり合う地域に位置している。図1¹⁾は8ヶ国の地震頻度と被災死者数の関係を示す。図1を見るとイランと日本の地震発生頻度の差は少しであるが、被災死者数はイランの方が圧倒的に多いことがわかる。また、近年イランで発生した被害の大きい地震災害として2003年12月26日に発生したイラン・バム地震が挙げられる。震源地はイラン南東部のバム群であり、地震の規模を表すマグニチュードは M_w 6.6、揺れの大きさは日本の震度階5強から6弱に相当する。

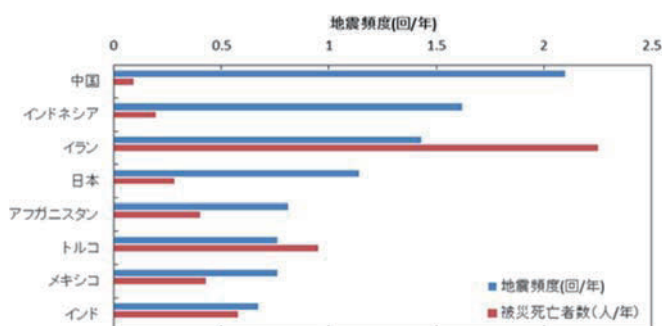


図1 地震頻度と被災死者数の関係¹⁾

この地震による死者は26,700名を超え、バム市内の人口の約3割に相当する。バム市の旧市街に多く分布しているアドベ（日干し煉瓦）建造物の倒壊被害が報告されており²⁾、世界最大のアドベ建造物である「アルゲ・バム」も壊滅的な被害を受けた。このようにイランでの死亡者が多い理由は煉瓦建造物の崩壊が一因である。一方イランでは、多数の重要文化財建造物（世界遺産群）が存在しており、これらを保護するためにも耐震対策の検討が急務であるといえる。

世界では常時微動を用いた組積構造の振動特性に関する研究が多くなされている。このことから、常時微動を用いた建造物の振動特性の把握を行うことは非常に有用であると考えられる。本研究では、イランの歴史的組積造建造物であるユネスコ世界遺産・聖タデウス教会で常時微動観測を行い、建造物と地盤の観測結果から固有振動数および減衰定数を求める。

2. 常時微動計測について

聖タデウス教会は2008年にイランのアルメニア人修道院建造物群のひとつとしてユネスコ世界遺産に登録された歴史的組積造建造物であり、西暦68年頃に建造された。また、1319年の大地震により被害を受け19世紀に修復が行われた。聖餐台の周りには10世紀の遺構も残っている。最初期の建築に黒色の石が用いられ、修復時にも一部利用されていることから黒の教会とも呼ばれている³⁾。

建造物の常時微動測定に携帯用振動計（東京測振社製SPC-51A（写真1））及びサーボ型加速度計（写真2）を用いた。計測は、サンプリング周波数を100Hz、測定レンジを10gal、計測時間を15分（測定データ数90,000点）とする。実際に解析に必要なデータ数は比較的波形が安定している2,048点×10区間である。

本研究では、聖タデウス教会の白い石が用いられている西側の塔（以下、白の教会と称す）と黒い石が用いられている東側の塔（以下、黒の教会と称す）の常時微動計測を行った。修道院内の教会の位置を図2に、教会を北東側から撮影した画像を写真3に示す。手前が黒の教会、奥が白の教会である。黒の教会の計測では1階床レベルおよび屋上レベルに各水平2成分の合計4成分の計測を行った。また白の教会の計測では1階床レベルおよび屋上レベルに各水平2成分の合計4成分の計測を塔の北側と東側で2回行った。計測1~4回目の振動計設置箇所及び方向を図3に示す。建造物がEW方向、NS方向に立地しており、EW方向が建物の長辺、NS方向が建物の短辺である。



写真1 携帯用振動計 SPC-51A



写真2 サーボ型速度計

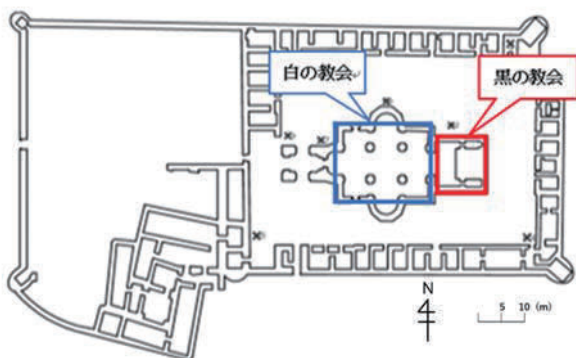


図2 研究対象地の平面図

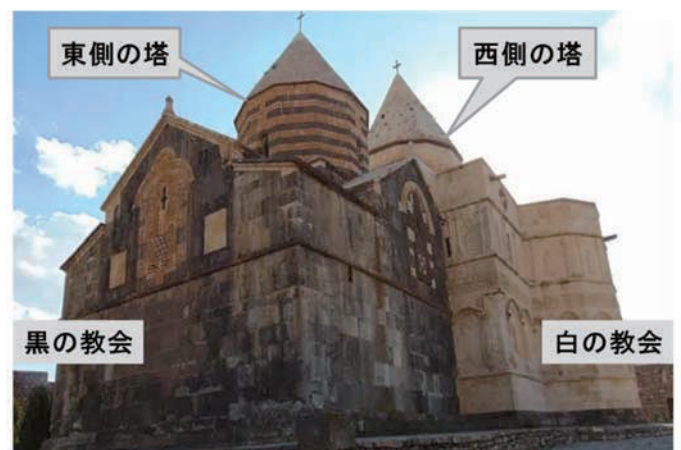


写真3 聖タデウス教会

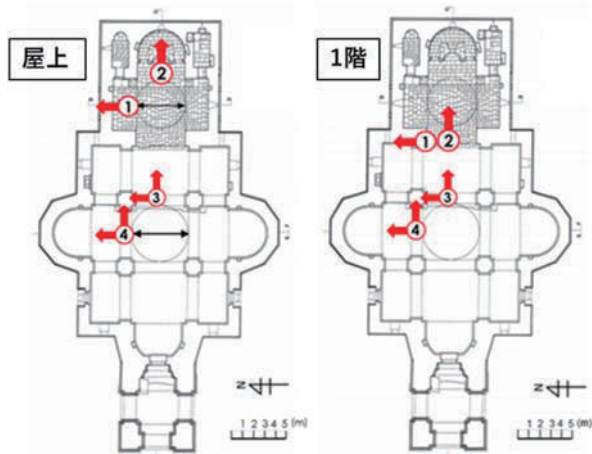


図3 教会計測点(平面図)

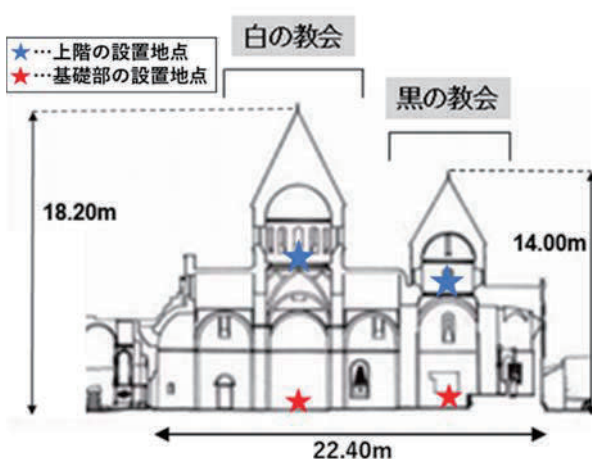


図4 教会計測点(南側立面図)

対象建造物の平面を図3、立面を図4に示す。今回の対象建造物である聖タデウス教会は、地上18.20mの石組積造である。祭壇のある10世紀頃の遺構が残っている黒の教会と19世紀に建てられた白の教会があり、黒の教会は地上14.00m、塔の直径が4.25mとなっている。白の教会は地上18.20m、塔の直径が5.40mとなっている。出入口や窓などは白の教会に多く見られたが、黒の教会にはほとんど見られなかった。教会全体にひび割れがあり、写真4のように、西側の塔の南北方向の半円型の内部壁面に特に多く見られた。このことは教会全体が南西方向に膨らんできていることを示していると考えられる。

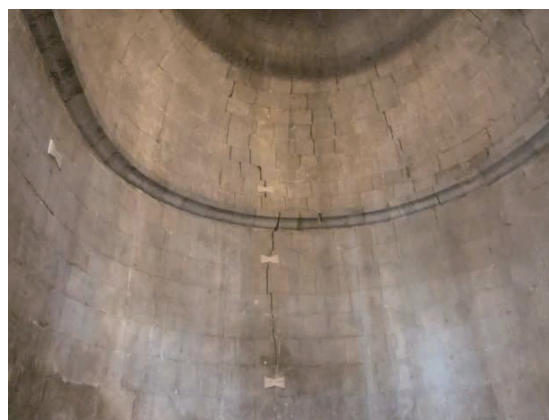


写真4 壁面ひび割れの様子

3. 固有振動数の算出

各計測点における常時微動記録から求めた H_r/H_f ($r=roof$, $f=foundation$) スペクトル比を図5に示す。 H_r/H_f スペクトル比とは建造物の同一方向にでの上階の加速度スペクトルを下階(基礎)の加速度スペクトルで除したもので、上下階の各振動数における伝達特性を表すものと考えられる。得られた卓越振動数を表1に示す。

黒の教会の卓越振動数はNS方向で9.7Hz、EW方向で10.0Hzである。EW方向とNS方向における卓越振動数を比較するとほぼ同程度の値であることが分かった。白の教会の東側における卓越振動数はNS方向で6.9Hz、EW方向で6.9Hzである。白の教会の北側における卓越振動数はNS方向で4.4Hz、EW方向で5.2Hzである。EW方向とNS方向における卓越振動数を比較するとNS方向に比べEW方向の方が0.8Hz大きい結果が得られた。

表1より卓越振動数を比較すると、黒の教会がおよそ10Hzという結果が得られた。黒い塔の高さが14mと低く、内部空間も狭い、また出入口や窓などの開口部がほとんどなかった。組積造では、同程度の規模の材料を使用して建てられている小さな建造物ほど堅固である⁴⁾ことから、黒の教会は白の教会に比べ内部空間(図2参照)が狭いため卓越振動数が高くなったと考えられる。白の教会では内部空間の広さや開口部の数から黒の教会に比べ卓越振動数が低くなったと考えられるが、塔の東側で6.9Hz、北側では5Hz付近と卓越振動数に差があった。これはひび割れが多く見られた教会北側の壁面における卓越振動数の低下が影響したと考えられる。黒の教会と白の教会で卓越振動数が違うことから構造的に連続性が見られないと想定される。また、白の教会の北側におけるNS方向、EW方向への振動では、卓越振動数が10Hzと高く剛な構造であると思われる黒の教会の影響があったためEW方向の卓越振動数が0.8Hz大きくなったと考えられる。白の教会の東側ではEW方向、NS方向の卓越振動数に違いはみられないが、 H_r/H_f スペクトル比(図5)を比較すると6.9Hz付近に確認できるピークがEW方向では緩やかなのに対して、NS方向では急に表れている。このことから、黒の教会による振動の影響が少ないと考えられるNS方向が大きく揺れている。

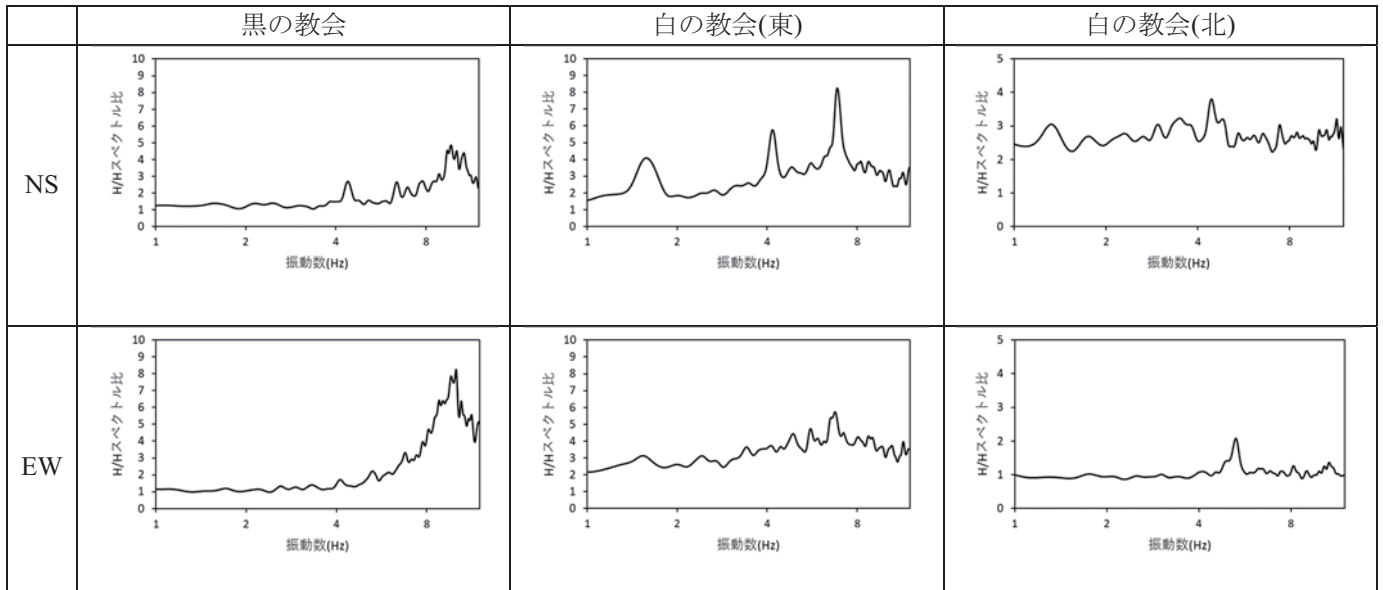


図5 教会における H_r/H_f スペクトル比

表1 卓越振動数と H_r/H_f スペクトル比

	方向	卓越振動数(Hz)	H_r/H_f スペクトル比ピーク値
黒の教会	NS	9.7	4.8
	EW	10	8.2
白の教会(東)	NS	6.9	5.7
	EW	6.9	8.4
白の教会(北)	NS	4.4	3.8
	EW	5.2	2.1

4. 減衰定数の算出

対象建築物の減衰定数をハーフパワー法を用いて求める。黒の教会、白の教会それぞれの減衰定数を表2に示す。黒の教会ではNS方向で5.5%、EW方向で8.3%という結果となった。また白の教会の東側ではNS方向で7.6%、EW方向で3.2%、白の教会の北側ではNS方向で9.3%、EW方向で3.2%という結果となった。黒の教会ではEW方向の方が大きく、白の教会ではNS方向の方が大きいという結果が得られた。

組積造は比較的、減衰定数が大きく算出されるため⁵⁾今回の解析結果と対応している。小石らの既往の研究⁶⁾では、煉瓦・RC混構組積造建物においてひび割れの有無によりひび割れ前の減衰定数が約4%、ひび割れ後の減衰定数が約6.6%と大きくなるという結果が得られていることから、教会内部に多く見られた半円型の壁面のひび割れによるエネルギー損失や内部減衰が大きくなり減衰定数が大きく評価されたことも考えられる。そのため、黒の教会のEW方向、白の教会のNS方向で減衰定数が大きくなったと考えられる。

表2 減衰定数の算出結果

	方向	減衰定数(%)
黒の教会	NS	5.5
	EW	8.3
白の教会(東)	NS	7.6
	EW	3.2
白の教会(北)	NS	9.3
	EW	3.2

5. 周辺地盤の振動特性および対象建造物との比較

建造物の常時微動と同様に教会周辺地盤の常時微動計測を行い、H/Vスペクトル比⁷⁾から地盤の卓越振動数を推定した。聖タデウス教会周辺地盤の各計測点を図6に示す。計測点1A及び1Bは計測時間10分、計測点2～8は計測時間15分である。また計測点1Aは地下で計測を行った。明確にピークが確認された計測点3、4のH/Vスペクトル比を図7、8に示す。計測結果から聖タデウス教会周辺地盤の卓越振動数はおよそ8.2Hzである。これは日本の道路橋示方書（表3）では、I種地盤に相当し強固な地盤であると言える。

黒の教会のEW方向の卓越振動数は10.0Hz、NS方向は9.7Hz、白の教会の東側のEW方向の卓越振動数は6.9Hz、NS方向は6.9Hz、白の教会の北側のEW方向の卓越振動数は5.2Hz、NS方向は4.4Hzであった。地盤と建物の共振は主に地盤と建物の1次固有振動数と強い相関性が考えられるため、これらについて比較する。聖タデウス教会周辺地盤の卓越振動数は8.2Hzと大きく、教会の卓越振動数をみると、黒の教会ではNs方向で9.7Hz、EW方向で10.0Hz、白の教会では東側でNS、EW方向ともに6.9Hz、北側ではNS方向で4.4Hz、EW方向で5.2Hzといずれの塔においてもそれほど近い値ではない。しかし、建物の劣化や地震による建物の損傷によって固有振動数は低下することから、黒の教会の固有振動数が低下したときに地盤の固有振動数と近い値を示す可能性が考えられる。そのような場合、地盤と建物が共振し黒の教会における損壊の危険性が高くなると推測される。

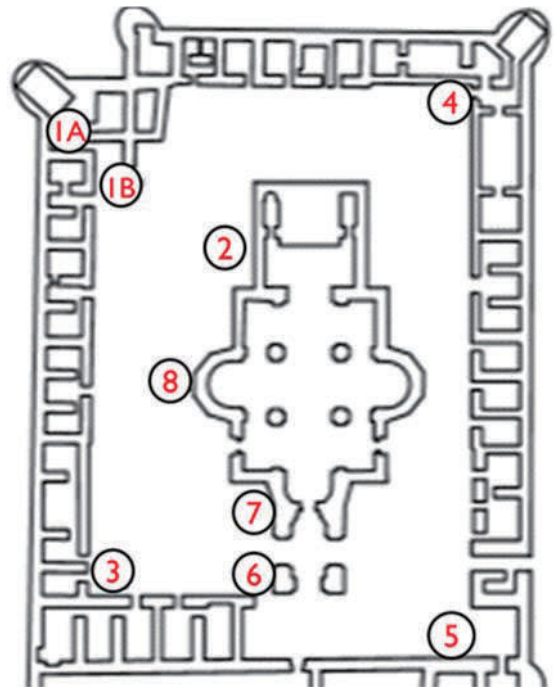


図6 聖タデウス教会周辺地盤の計測点

表3 日本での地盤種別の判別方法

地盤種別	固有周期T
一種地盤	$T < 0.2$
二種地盤	$0.2 \leq T \leq 0.6$
三種地盤	$0.6 \leq T$

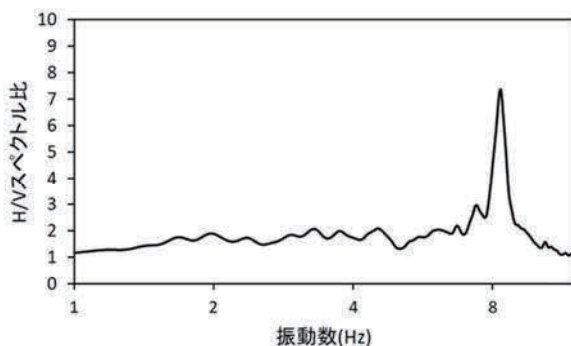


図7 H/Vスペクトル比(計測点4)

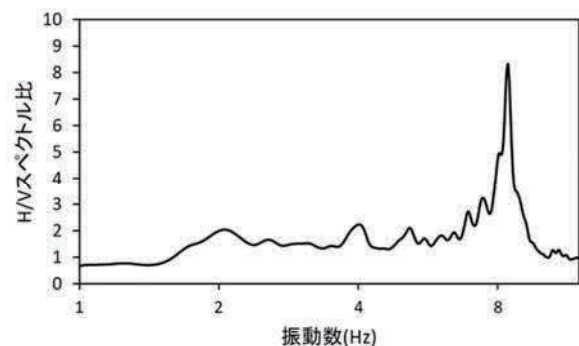


図8 H/Vスペクトル比(計測点3)

6. 結論

本研究では、イランの歴史的煉瓦組石造建造物である聖タデウス教会において、常時微動計測を行い建造物の常時微動特性を明確にするとともに聖タデウス教会周辺地盤でも常時微動計測を行い、建物と地盤の常時微動計測結果の比較を行った。

聖タデウス教会の教会部分で常時微動計測を行った。黒の教会における卓越振動数についてEW方向で10.0Hz、NS方向で9.7Hzという結果が得られた。白の教会の東側における卓越振動数についてEW方向で6.9Hz、NS方向で6.9Hzという結果が得られた。白の教会の北側における卓越振動数についてEW方向で5.2Hz、NS方向で4.4Hzという結果が得られた。計測の結果、塔の高さが低く内部空間の狭かった黒の教会における卓越振動数が大きくなった。白の教会においては、卓越振動数の大きかった黒の教会の拘束による影響を受けたためEW方向の卓越振動数がNS方向に比べて大きくなったと推測される。減衰定数の結果、黒の教会ではNS方向で5.5%、EW方向で8.3%という結果となった。また白の教会の東側ではNS方向で7.3%、EW方向で3.2%、白の教会の北側ではNS方向で9.3%、EW方向で3.2%という結果となった。

次に聖タデウス教会周辺地盤の常時微動計測の結果は、卓越振動数がおよそ8.2Hzと日本の道路橋示方書のI種地盤に相当するため強固な地盤である。地盤と建造物の常時微動計測の結果を比較すると、黒の教会、白の教会どちらの卓越振動数においても地盤の卓越振動数とは近い値になかった。しかし、建造物の卓越振動数は経年劣化や地震による損壊によって低下することから、黒の教会において卓越振動数が低下すると地盤の卓越振動数と一致する可能性が考えられる。そうした場合、建造物が倒壊する危険性が増すものと推測される。

また、今回の調査では、屈折法弾性波探査を行い聖タデウス教会周辺の地下構造推定を行う予定であったが機器の不具合により推定を行えなかったため、今後の調査では再度実施する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、Azarbaijan Shahid Madani 大学の学生・卒業生にご協力を賜った。ここに謝意を表します。また、JSPS 科研費（国際共同研究(B)、宮島昌克、18KK0129-01）による助成を受けた。

参考文献

- 1) 目黒公郎：2005年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案，自然災害科学，J.JSNDS25-3381-392，381-392，2006.
- 2) 飛田哲男，宮島昌克，幸左賢二，荒井幸夫，田崎賢治，宇野裕教：2003年イラン・バム地震における被害分布と表層の地盤振動特性，地盤工学ジャーナル，Vol. 2, No. 2, pp. 51-64，2007.
- 3) UNESCO World Heritage Convention Nomination of Properties for Inclusion on The World Heritage List Tehran2007，<https://whc.unesco.org/uploads/nominations/1262.pdf>
- 4) 若林實：耐震構造—建物の耐震性能，1981.
- 5) 山道康平：イラン・タブリーズ市の歴史的建築物 Arg-e Tabriz の耐震安全性評価，歴史都市防災論文集，2010.
- 6) 小石咲樹：常時微動計測と振動実験に基づく損傷を受けた組積造建物の振動特性に関する考察—熊本の煉瓦・RC混構造建物を対象として—，九州大学大学院修士学位論文，2018.
- 7) 中村豊：H/V スペクトル比の基本構造，物理探査学会地震防災シンポジウム，2008.