

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420567

研究課題名(和文) 津波漂流物による建物の衝突崩壊解析技術の構築と避難ビルの設計支援

研究課題名(英文) Development of Collapse Analysis Scheme of Buildings under Tsunami Debris Impact for Supporting Structural Design of Evacuation Building

研究代表者

磯部 大吾郎 (Isobe, Daigoro)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：00262121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震以降、構造上安全性に優れた津波避難ビルの必要性が高まっているが、流体力が建物被害に及ぼす影響は明らかになっていないなど、依然として検討すべき課題がある。本申請課題では、地震応答と津波作用、津波漂流物の衝突現象を再現した連続解析を行い、それぞれの外力が建物被害に及ぼす影響を数値的に評価した。さらに、構造物に及ぼす津波力の大きさとその分布を正確に把握するために、水理実験および安定化有限要素法による流体解析を実施し、推定波力の適用範囲などの有用な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Since the 2011 Great East Japan Earthquake, the need for tsunami refuge buildings which contribute to protect human lives during tsunami disasters has been increased. In this proposed subject, safety evaluation of a tsunami refuge building by dynamic analysis using the Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss code was carried out. The following three load conditions were considered; seismic excitation, fluid force which contains buoyant force and tsunami force, and impact force by tsunami debris. By performing the analysis with the loads consecutively applied to the tsunami refuge building, it was confirmed that a tsunami load had a great effect, and the impact force of debris even higher effect, on the damage of the building. In addition, tsunami fluid force acting on a structure was evaluated by performing a hydraulic experiment. Also, some useful information such as scope of application of estimated wave force were obtained by applying the stabilized finite element method.

研究分野：計算工学

キーワード：津波避難ビル S造建物 衝突崩壊解析 津波波力 津波漂流物 ASI-Gauss法

1. 研究開始当初の背景

2011年3月に起きた東日本大震災では、津波が大きな被害をもたらした。一般的には強靱とされている鉄骨造建物でも、船舶、車両、家屋などの漂流物が衝突することでその多くが損壊した。一方では、今後、津波による人的被害を低減させるためにも、避難ビルを街の随所に建てる必要がある。このような状況を鑑み、(独)建築研究所などが津波の被害調査結果について報告書(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)調査研究(速報)、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、2011年5月)にまとめ、今後は避難ビルの設計基準を策定していく予定となっている。しかし、津波が建物に達すると浮力や流体力が作用し、その作用の度合いも内部や壁面の構造(窓の有無など)に依存するため、建物の挙動は力学的に大変複雑となることが予想される。さらに、質量の大きな漂流物が衝突した場合の衝撃力の算定は、一般的には困難である。このような状況の下、避難ビルの設計に不可欠となる津波外力の算定については、例えば今村(東北大)、青木(東工大)や浅井(九州大、連携研究者)をはじめ、国内の多くの研究者が津波シミュレーションを実施することによって行っている。一部では、これらの結果を津波に対する広域避難計画などに生かす動きもある。他方、津波漂流物の衝突に伴う建築構造物の崩壊挙動に的を絞ったシミュレーションは国内外を問わず、まだ行われていない。それは、建築構造の崩壊現象を部材レベルにまで再現できる手法が他に存在しないからである。必然的に、シミュレーション結果に基づいた避難ビルの設計支援は未着手の段階である。

一方、研究代表者はこれまでに建築構造の崩壊解析に有効なASI-Gauss法に基づいた有限要素解析コードを開発してきた(例えば磯部大吾郎、チョウ ミヨウ リン: ASI-Gauss法による世界貿易センタービルの飛行機衝突解析、日本建築学会構造系論文集、第600号、(2006)、pp.83-88.)。そして、9.11ビル崩壊、発破解体、地震崩壊など、様々な崩壊問題において重要な成果を挙げてきた(例えば: 磯部大吾郎、レティタイタン: 高層建築物の火災時崩壊挙動に関する数値解析的検証、日本建築学会構造系論文集、第76巻、第667号、(2011)、pp.1659-1664.)。ASI-Gauss法は、はり要素の数値積分点を順応的にシフトすることで高精度な解が得られ、しかも破断面を特定した上で効率良く部材破断を表現可能な手法である。部材レベル

で断面力情報などが得られる有限要素解析手法であり、PCを使い低計算コストで解析が可能である。このような不連続性の高い崩壊問題をPCレベルで解ける解析コードは国内外を問わず他には存在しない。本解析コードを用いれば、PCレベルで高速に様々な崩壊問題のパラメータ計算を行うことが可能となり、津波による被害評価および避難ビルの設計支援において、重要な知見が得られることが予想される。このような背景から、津波漂流物の衝突に伴う建物の崩壊解析技術を構築し、避難ビルの設計支援に応用するという研究課題を着想するに至った。

2. 研究の目的

先の東日本大震災を受け、浮力と流体力、さらには漂流物による衝撃力を受ける可能性のある津波避難ビルの建築基準策定が進んでいる。その適正な基準を策定する上で、流体力の評価および津波漂流物との衝突に対するビルの強度評価をなるべく正確に実施する必要がある。そこで本申請課題では、粒子法に基づいた津波シミュレーションによる流体力の算出、および独自開発されたASI-Gauss法に基づいた崩壊解析による建物の対津波漂流物被害評価を実施し、津波避難ビルに必要なとされる基本仕様を明確化することを目的とする。その中で、既存の解析技術を定量的な面でさらに高精度化するため、モーションキャプチャシステムを用いて構造物の流出挙動計測を行い、解析結果との比較・検証を実施する。高精度化された衝突・崩壊解析を実施することで、避難ビルに必要な特性を定量的に明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

本申請課題では、津波漂流物に対する建築構造の被害を評価可能な解析技術を構築し、避難ビルの設計に有用な知見を見出すことを目的とした。そのためにまず、粒子法に基づいた津波シミュレーションを実施し、特に津波避難ビルの構造設計時に必要となる衝撃的な流体力の見積もりを行った。次に、ASI-Gauss法に基づいた衝突崩壊解析コードの改良、津波漂流物に対する建築構造の被害評価を実施し、崩壊解析技術の定性的評価を行った。また、モーションキャプチャシステムによる正確な部材挙動計測を行って流体解析結果と比較し、解析技術を定量的に評価しその高精度化を図った。最後に、津波漂流物のパラメータ、建築構造のパラメータを変化させた場合の解析を実施し、その結果を踏

まえて避難ビルの設計指針について検討した。

4. 研究成果

(1) 粒子法に基づいた津波シミュレーションによる流体力の算出

津波避難ビルの選定指針に役立つ数値解析シミュレータを確立するために、第一段階として流体力の評価にのみ着目して数値実験を行った。開口部有りのビル前面と背面から観測した津波の流れの時系列変化を図1に示す。フロアごとの津波波力を調べると、どのモデルにおいても、衝撃津波波力の観測後、津波波力は急激に減少し、それからまた徐々に上昇して最大重複波力をとるという傾向がみられた。また、津波の浸水深よりも低い位置に存在する1階と2階では衝撃津波波力が観測された。第1波が到達直後に関する衝撃波圧に関しては、波力算定式を超過する恐れがあることを確認した。

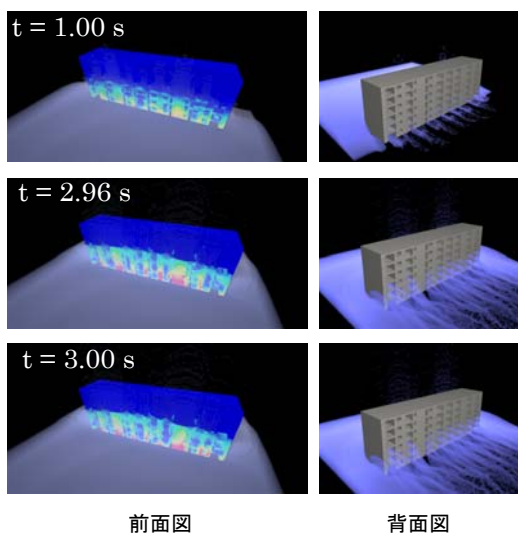


図1 開口部有りのビル前面と背面から観測した津波の流れの時系列変化

(2) ASI-Gauss 法に基づいた津波漂流物衝突シミュレーションによる衝撃力の算定

図2に示すようなベースシア係数0.3として設計された6層3スパン(階高3.6m, 1スパン6m)のS造建物に対し、3軸方向への地震力、流体による浮力および抗力、津波による漂流物を衝突させる連続解析を実施し、それぞれの外力が建物に及ぼす影響について調べた。初めに気仙沼波を150秒間モデルに入力し、続いて浮力を静的に、その後、抗力を動的に作用させた。浮力の算定に用いる建物の水面下体積は、壁が全て健全に残っている状態を想定した場合は水面下の全体

積とし、壁が無い場合は水面下の柱およびはりの体積のみとした。一方、津波波力としては抗力を用いたが、その抗力係数には長方形の面に抗力が作用した場合の値を用いた。建物の水面下投影面積は、壁が全て健全に残っている状態を想定した場合は水面下全面の投影面積とし、壁が無い状態を想定した場合は水面下柱側面のみ面積とした。例えば津波の速度を10 m/s、浸水深を6 mとすると、建物の水面下の部分に作用する抗力は、建物が静置されている状態で約7.8 MN(壁が有る場合)と約0.7 MN(壁が無い場合)と計算される。

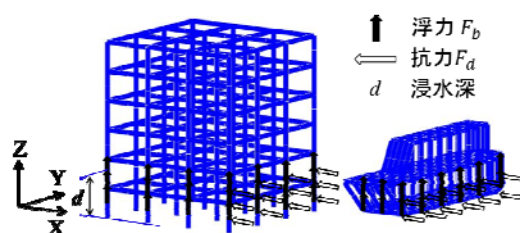
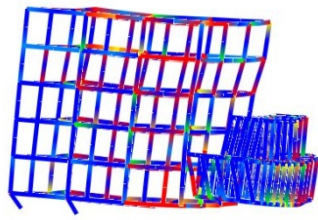


図2 建物と漂流物モデル(横向き衝突)

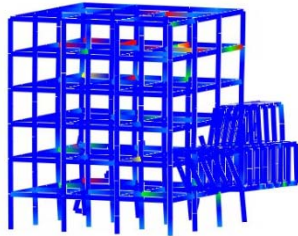
漂流物モデルには、重量110 ton、長さ27 m、幅6 m、高さ8 mのアルミ合金製の船舶モデルを用いた。t=151 sに漂流物に初速度として10 m/sを与え、図2に示すように建物に横向きに衝突させた。解析ではt=152.7 sに漂流物が建物に衝突した。船の喫水を2 mとすると、漂流物の水面下側面に作用する抗力は、初速度が与えられた状態では相対速度が0 m/sのため0 MN、建物に衝突し絶対速度が0 m/sとなった状態では約3.3 MNと計算される。動的解析での時間増分を1 msとし、時間積分法には数値減衰を考慮したNewmarkのβ法(β=4/9, δ=5/6)を用いた。

時刻t=150 sまで気仙沼波を建物に入力し地震応答解析を行った結果、多少の変形は生じたが大きな損傷には至らないことが分かった。次に、建物と漂流物に浮力および抗力を作用させ、漂流物に初速度を与えて衝突させた様子(時刻t=154.8 s)を図3に示す。図3(a)は水面下に壁が有る場合の挙動、図3(b)は壁が無い場合の挙動である。壁が有る場合には建物の低層部に大きな損傷が生じ、倒壊していることが分かる。これに対し、壁が無い場合には漂流物が衝突することによって多少の変形が生じているものの、倒壊には至っていないことが分かる。

次に、縦向き衝突用のモデルを作成し、横向き衝突の場合とともに、流速を変化させた場合の各浸水深における建物の最大層間変形角を調べた。水面下に壁が有る場合の結果

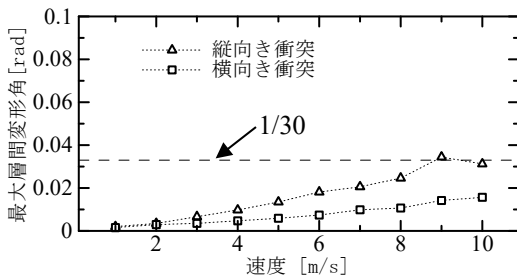


(a) 水面下に壁が有る場合

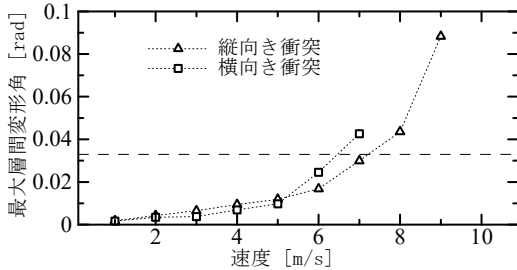


(b) 水面下に壁が無い場合

図3 漂流物衝突後の建物の挙動



(a) 浸水深 3m の場合



(b) 浸水深 6m の場合

図4 流速と建物1階の最大層間変形角の関係 (水面下に壁が有る場合)

を図4に示す。図中の水平な破線は、一般的に建物が大破と判断される層間変形角 (1/30) を示す。同図より、どの場合も流速が大きくなると最大層間変形角が大きくなることが確認できる。また、水面下の壁の有無に関わらず、浸水深小の場合は縦向き衝突の際に最大層間変形角が大きくなり、浸水深大の場合はある程度の速度以上で横向き衝突の際に最大層間変形角が大きくなるのが分かる。これは、浸水深小では漂流物が低層部に衝突するため、その場合には集中的に衝撃力が加わる縦向き衝突の方が低層部の

柱を損傷させる可能性が高く、浸水深大では漂流物が横向きに衝突し、抗力が広い範囲に作用する方が低層部の柱に損傷を与える可能性が高いためと思われる。

以上の結果より、壁が無い構造は抗力を逃すために津波に対し優位性が高いが、その場合にも漂流物の衝突力およびその後の抗力を受けるため、想定される漂流物の最大重量から衝突力のピーク値を見積もり、最大層間変形角が十分低くなるように設計する必要があるものと思われる。また、浸水深が比較的小さい場合にも、漂流物の衝撃力により低層部の柱が損傷し、建物が倒壊する危険性があることが定量的に確認された。津波避難ビルを設置する際には、その周囲に漂流物の接近を防ぐ柵を設置するなどの方策も必要と思われる。

(3) モーションキャプチャシステムによる部材流出挙動の計測および解析

粒子法に基づく流体剛体連成解析により、津波が橋梁に作用する流体力や橋梁上部構造の流出の挙動を解析的に検討した。また、モーションキャプチャシステムを計測機器とした模型実験の結果と解析結果から、この解析手法の妥当性を確認した。ここでは、自由表面形状変化などの大変形解析に適している粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法を解析手法として用いている。

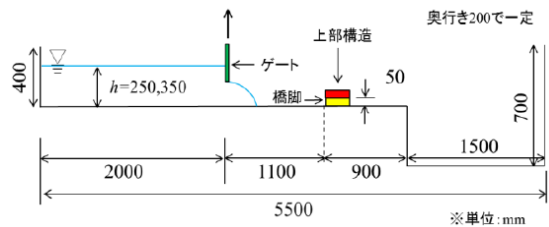


図5 実験の概要

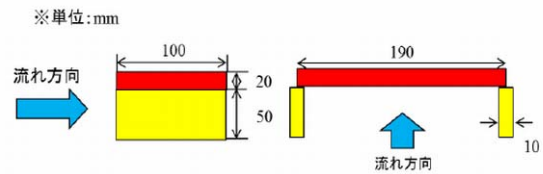


図6 模型の断面図



図7 回転角度の定義

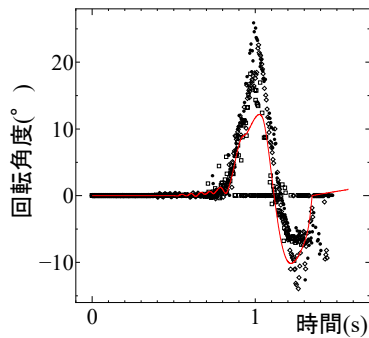


図 8 流失後の回転角度

津波発生時の橋梁の上部構造流出を模擬した水理実験の概要を図 5 に示す。この実験では貯水部に溜めた水を、ゲートを勢いよく引き上げることで放流させ、上部構造を模擬した模型に衝突させた。ここで、模型の断面図および寸法を図 6 に示す。模型が流失する際の運動を追跡するために、この実験では 3D モーションキャプチャー用の自発光マーカーを模型上部に設置し、模型が流失する際の回転角度(奥行き方向)を記録した(図 7)。実験では橋脚の幅は 5mm を使用しているが、解析においては粒子径との兼ね合いから幅を 10mm に設定した。実験結果と解析結果(赤線)の比較を図 8 に示す。同図より、津波が衝突した後の回転角度が正から負へと移行する過程を再現できていることが分かる。この結果から、流体剛体連成解析において外力ベースの定式化を用いることで剛体運動の精度に関して一定の妥当性が得られることを確認した。

(4) 一方向連成解析による津波避難ビルの安全性評価

最後に、津波避難ビルの設計時における損傷評価のための津波伝播解析手法を構築した。安定化有限要素法に基づく Volume of Fluid (VOF)法を実装し、津波避難ビルに対する津波伝播解析を行い、津波避難ビルの形状による波力の変化について検討した。

図 9 に各時刻における水面形状を示す。左側に開口部無し、右側に開口部有りの結果を示す。これらの図より、開口部無しの場合には、建物壁面に沿って津波の波高が大きくなっているのに対し、開口部有りの場合では、波高が低減されていることがわかる。また、時刻 10s と 20s でのビル前面の圧力分布の比較を図 10 に示す。同図より、開口部無しの場合に比べ、開口部有りの場合の方が建物に作用する圧力が低減されていることがわかる。

流体解析で評価された津波波力を外力と

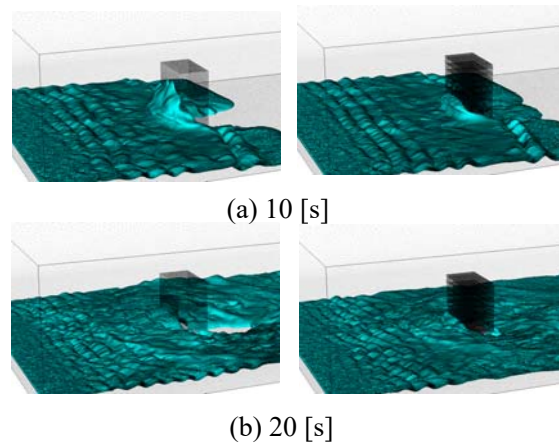


図 9 水面形状

(左：開口部無し 右：開口部有り)

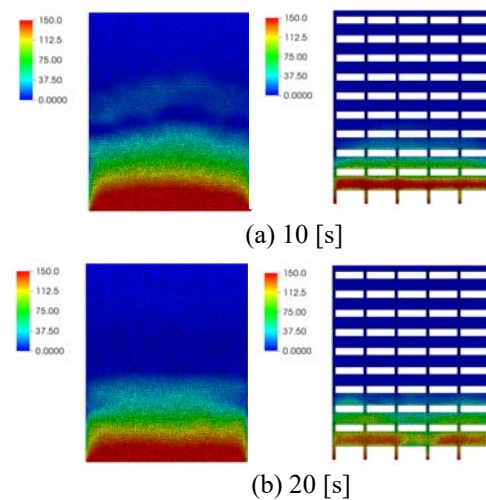


図 10 建物前面の圧力分布

(左：開口部無し 右：開口部有り)

して構造解析に適用する一方向連成解析を行い、推定波力を用いた場合の構造解析結果との比較を通して流体解析の必要性を検討した。流体解析で評価された津波波力を入力した場合の建物の挙動を図 11 に示す。津波波力は、3.11 の際の女川町の条件を設定したものである。図のように開口部が無い場合には、津波波力の作用によって 1 階柱脚部の要素の破断が受圧面側から連鎖的に起こり、建物が流出する現象が見られた。一方、開口部が有る場合では、建物の低層部が若干変形するに留まった。次に、推定波力および流体解析により得られた流体波力を入力した際の、建物 1 階の層間変形角時刻歴を図 12 に示す。後者を入力した場合に、層間変形角が増大していることが分かる。同図より、推定波力では表現できていない衝撃的な波力が建物被害に大きな影響を及ぼすことが分かる。このことから、実際の流体波力は推定波力よりも

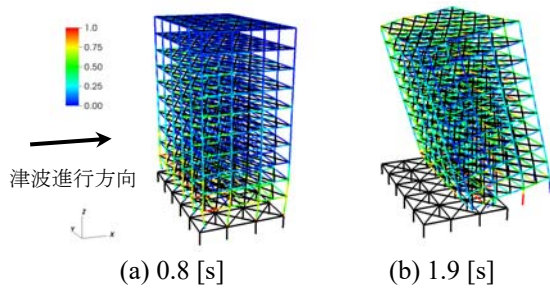


図 11 津波作用下における建物の挙動
(推定波力, 開口部が無い場合)

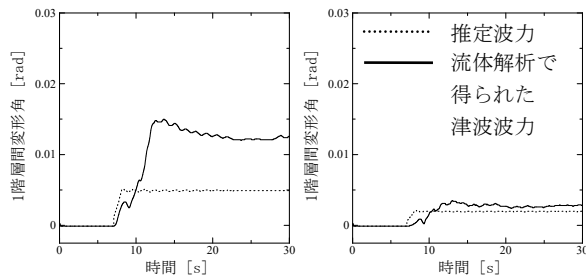


図 12 建物 1 階層間変形角の時刻歴
(左: 開口部無し 右: 開口部有り)

増大する可能性が高く、波力を評価可能な流体解析の必要性が示唆された。一方、開口部が有る場合には、それぞれの波力の結果に差はほとんどなかった。また、開口部が無い場合に比べ層間変形角は大幅に低減され、開口部が建物被害の低減に大きく寄与することが確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 浅井 光輝, 合田 哲朗, 小國 健二, 磯部大吾郎, 樫山 和男, 一色 正晴: 安定化 ISPH 法を用いた津波避難ビルに作用する流体力評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2, (2014), pp.649-658. DOI: 10.2208/jscejam.70.I_649, 査読有。
- ② 磯部大吾郎, 董 元奇: 津波漂流物の衝撃力が建物の被害に与える影響について, 第 11 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 4 頁, (2014). 査読有。

[学会発表] (計 10 件)

- ① 荻野 弘明, 田中 聖三, 磯部大吾郎: 地震応答・津波作用解析による津波避難ビルの安全性評価, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会講演論文集 CD-ROM, 3 頁, No.15-19, 2015.10.10, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市。
- ② 大屋 朋子, 浅井 光輝, 伊津野和行, 磯部大吾郎: 粒子法による流体剛体連成解

析の定式化の差異による精度確認, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会講演論文集 CD-ROM, 2 頁, No.15-19, 2015.10.10, 横浜国立大学, 神奈川県横浜市。

- ③ 荻野 弘明, 磯部大吾郎: 津波避難ビルの安全性評価に関する数値解析的研究, 日本建築学会 2015 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, pp. 367-368, 2015.9.4, 東海大学, 神奈川県平塚市。
- ④ D. Isobe and Y.Q. Dong: Sequential Analysis of Steel Frame Building Subjected to Seismic Excitation, Tsunami, and Debris Collision, Proceedings of the 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), 2 pages, 2015.3.16, Taipei (Taiwan).
- ⑤ 磯部大吾郎, 董 元奇: 津波漂流物衝突解析による鋼構造建築物の構造設計に関する考察, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会講演論文集 CD-ROM, 2 頁, No.13-3, 2013.11.2, 佐賀大学, 佐賀県佐賀市。

[図書] (計 2 件)

- ① 八木 勇治, 大澤 義明 (編著), 磯部大吾郎 (共著), 巨大地震による複合災害, 第 6 章 地震による建物の崩壊挙動を再現する (pp.97-113), 筑波大学出版会, ISBN:978-4-904074-38-1, 2015.
- ② 磯部大吾郎 (共著), 東日本大震災合同調査報告 機械編, 第 4 章 力学体系に基づく津波被害メカニズムの理解 (pp.126-149), 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 丸善, ISBN:978-4-88898-232-0, 2013.

[その他]

- ① 研究成果に関する web ページ:
<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~isobe/seismic.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 大吾郎 (ISOBE, Daigoro)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 00262121

(2) 連携研究者

浅井 光輝 (ASAI, Mitsuteru)
九州大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 90411230