

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282115

研究課題名(和文)地震減災と環境負荷低減を実現する丸太杭による既設戸建住宅の液状化対策

研究課題名(英文) Log piling method not only for the liquefaction countermeasure for existing houses but also for the measure for global warming

研究代表者

三輪 滋 (MIWA, Shigeru)

飛鳥建設株式会社技術研究所・ - ・特別研究員

研究者番号：60443636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震では広域で液状化が生じ、特に戸建住宅に甚大な被害を及ぼした。発生の逼迫が懸念される首都圏直下、南海トラフの地震は、人口や資産が集中している埋立地や沖積低地が広域に分布した地域が対象であり、戸建住宅の液状化対策は喫緊の課題である。本研究課題は、CO<sub>2</sub>吸収・貯蔵効果、CO<sub>2</sub>排出削減効果、林業活性化に貢献、健全な山の育成に貢献、軽量、加工が容易で狭隘地での施工や現場での融通性が高い、木材を地下水位が高い地盤で利用することで腐朽という木材の短所も克服するといった木材の特徴を検証して、既設戸建住宅の液状化対策法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The 2011 Great East Japan Earthquake caused significant soil liquefaction, and many residences were damaged as a result of associated settlement and inclination. This highlighted the importance of seismic countermeasures for small-scale structures. One such measure involves driving logs into the ground to add density. As trees store carbon during growth, logs placed underground below the water table are not prone to deterioration. Based on this characteristic, subterranean log piling represents a dual measure against both global warming and liquefaction. In this study, liquefaction countermeasure for existing houses by log piling method have been developed by clarifying the effect of carbon storage of log, the effect of reducing energy comparing with the other material, the workability in narrow area and the durability of deterioration.

研究分野：地震工学，地盤工学，災害軽減工学

キーワード：液状化対策 木材 戸建住宅 減災 丸太 炭素貯蔵 地球温暖化緩和 環境調和型都市基盤整備

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では広域で液状化が生じ、関東地方では東京湾岸埋立地利根川流域などで甚大な被害が発生した。発生の逼迫が懸念される首都圏直下、南海トラフの地震では、数多くの人口や資産が集中している埋立地や沖積低地が広域に分布した地域が対象であり、さらに大きな被害に繋がる可能性が高い。特に、今回の地震で多くの被害が生じた戸建住宅の液状化対策は、これまで十分に検討されておらず、新設はもとより、既設の戸建住宅の液状化対策が喫緊の課題となっている。戸建住宅の場合は、地盤・基礎の重要性の認識が十分浸透していないこと、狭隘な場所での安価な施工が必要なことなどから、効果的で経済的な対策工法や制度がないのが現状である。

申請者らは、木材に着目し、その土木分野での有効利用を検討してきた。木材利用の利点は、(1)CO<sub>2</sub>吸収・貯蔵効果：成長過程でのCO<sub>2</sub>の吸収・固定、伐採後の長期間の使用、新たな植林の繰返してCO<sub>2</sub>貯蔵量をどんどん大きくできる、(2)CO<sub>2</sub>排出削減効果：他の材料に比べ、製造時のエネルギー消費量が極めて小さいという環境負荷低減効果に加えて、(3)林業活性化：新たな木材需要を増やすことで林業再生に大きく貢献する、(4)健全な山の育成：林業活性化により山林の健全化が図れ、水源涵養、土砂災害の減少など副次的な効果も極めて高い点にある。しかも、現在国内の森林資源量は豊富であり、まさに活用の時期となっている。また、木材を地下水位が高い地盤で利用することで、腐朽という木材の短所も克服することができる。さらに、木材は、他の材料に比べ軽量で、加工しやすいといった特徴があり、狭隘な場所での施工が容易で現場での融通性が高く、戸建住宅特有の課題を解決する有力な手段となり得る。

2. 研究の目的

丸太を用い、安価で、狭隘地でも施工可能で、かつ十分な性能と合わせてCO<sub>2</sub>削減や林業活性化効果も持つ既設戸建住宅の液状化対策技術を開発すること。同時に、宅地の液状化の可能性評価法・調査法の提示、対策工法の環境優位性の評価、液状化や対策の不動産価値の評価法などソフト面の整備の検討を行い、総合的な既設戸建住宅の液状化対策法を提示することである。以下の5つの項目について研究を進める。

- (1) 宅地に適した液状化評価法・地盤調査法の検討
- (2) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策工法の開発
- (3) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の環境・経済面での有効性の検討
- (4) 戸建住宅の液状化対策推進制度の研究
- (5) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の総合化

3. 研究の方法

- (1) 宅地に適した液状化評価法・地盤調査法

の検討

液状化危険度マップの課題の検討、地盤調査法の比較検討等を通じて、宅地や戸建住宅に適した液状化評価法と地盤調査法を提示する。

- (2) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策工法の開発

丸太による地盤改良効果に関して、これまでの知見と新たな実験・解析によって、以下の3項目を検討し、丸太による既設戸建住宅の液状化対策工法を開発する。既設戸建住宅の液状化対策の有効性の検証、設計法の検討、施工法の開発。

- (3) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の環境・経済面での有効性の検討

LCA手法による環境システム工学的な評価、生産・施工過程を含む温室効果ガス収支の評価、需要の見通しを考慮した林業の活性化と経済的効果の評価を行い、環境・経済面での有効性を示す。

- (4) 戸建住宅の液状化対策推進制度の研究

戸建住宅の液状化対策を推進する制度面の整備を図るため、液状化や液状化対策が不動産価値に及ぼす影響を定量的に評価する方法の検討、戸建住宅の液状化対策に関する公的助成制度、保険の可能性の調査を行い、実効性のある方法を提示する。

- (5) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の総合化

以上の研究を総合し、具体的な既設戸建住宅の液状化対策法としてまとめ提示する。

4. 研究成果

- (1) 宅地に適した液状化評価法・地盤調査法の検討

丸太打設による液状化対策を実施した地盤で、各種地盤調査を実施し、標準貫入試験(以下SPTと表示)の結果と比較することで、液状化判定や液状化対策効果の確認に適した試験方法を検討した。一例を図-1に示す。SPTと同様に動的に貫入する簡易動的貫入試験(PDCPTと表示)の結果は、SPTのそれと相関が高いが、スウェーデン式サウンディング(SWSと表示)はねじって静的に貫入する機構であり、SPTとの結果の相関は必ずしも良くない。宅地地盤では大掛かりなSPTは難しい

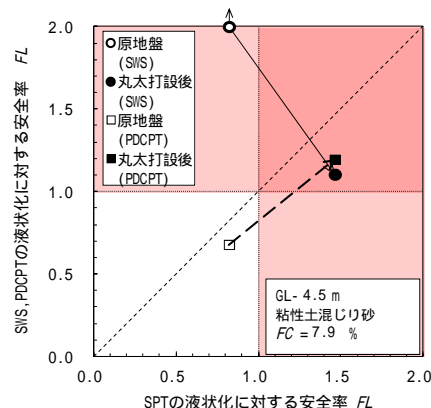


図-1 各種の貫入試験結果の比較

としても、動的な貫入機構を持つ試験のほうが、液状化に関する評価の信頼度は高いと考えられる。

液状化危険度マップと実際の液状化地点の比較を行った。地盤は狭い範囲でもその構造の変化が大きい場合もある、液状化危険度マップは、基になる地盤調査の結果の数が必ずしも十分ではなく、実際の液状化の可能性の判断は、当該地点での地盤調査によるのが望ましい。

(2) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策工法の開発

既設戸建住宅の液状化対策の有効性の検証

丸太打設液状化対策は、地盤に丸太を打設し、地盤の密度を増大させる液状化対策である。現場での実証、振動台での実験により、その効果が検証されている。丸太は地下水位以下に設置されるので、腐朽せず、丸太に貯蔵された炭素は、理論的にはほぼ永久に貯蔵されることから、液状化対策と地球温暖化対策を同時に行うことができる。既設戸建住宅に適用する場合は、建物下には打設できず、周囲のみの打設となり効果が限定的となる可能性がある。

まず、小型模型振動台実験により効果を検証した。図-2に実験の概要を示す。

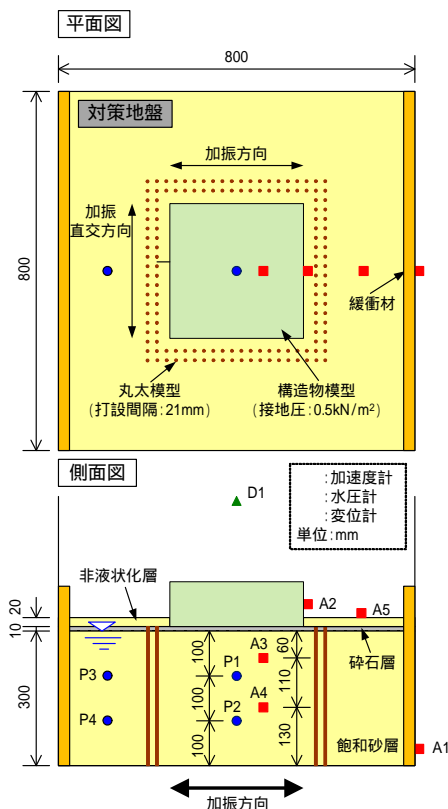


図-2 既設戸建て住宅の液状化対策の振動台実験

2階建ての戸建て住宅を対象とし、寸法はおおよそ実際の30分の1を想定している。水平一方向に加振した結果を図-3に示す。対策を施すことで、建物の沈下が抑制されてい

る。また、不同沈下も抑制されることを確認している。実験結果の分析から、建物の周囲に丸太を打設することで、住宅直下の過剰間隙水圧の立ち上がりおよび、繰返しせん断に伴うせん断剛性の低下が抑制され、構造物の沈下および不同沈下を低減することが確認できた。さらに、丸太の列数や配置を比較する実験、丸太頭部を連結する実験などを通じ、効果を安定的に発揮できる方法をさぐり、丸太頭部と建物の犬走りを結合するなど、丸太頭部の連結、建物との結合で効果が向上することを確認した。

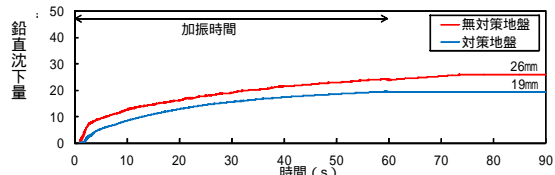


図-3 構造物模型の沈下量の時刻歴波形

次に数値解析による検討を行った。解析の対象を図-4に示す。このモデルに対して、解析コードFLIPを用いて、3次元および2次元の非線形有効応力解析を実施し液状化対策の効果を検証した。3次元、2次元の解析モデルを図-5に示す。2次元解析を行ったのは、3次元解析だけでは、解析ケースが限られるため、より多くのケースでの検討を行うためである。

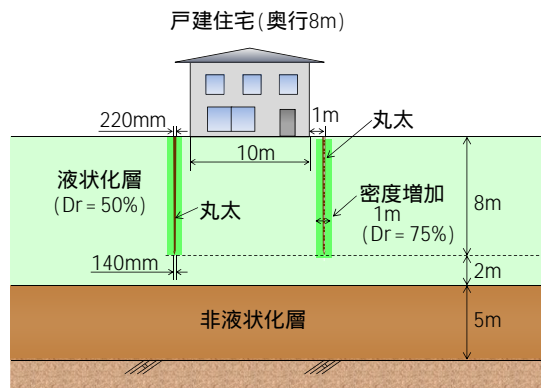
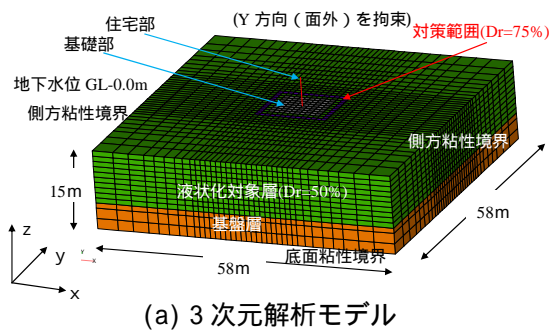


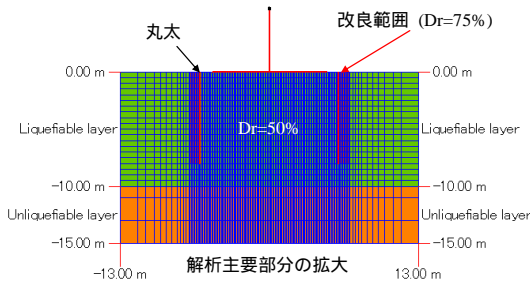
図-4 解析で検討する戸建住宅と液状化対策

数値解析により、建物の周りのみに丸太を打設する場合は、全面改良に比較するとその効果は低い。レベル2相当の地震動時において、無対策に比べ30~50%程度沈下を抑制する効果が認められることが分かった。また、周囲に丸太を打設することで期待される効果は、その部分の地盤の密度の増大、丸太そのものの剛性が考えられるが、丸太を打設することで増加する密度増大効果の寄与が大きいこと、同等の効果丸太の剛性のみで確保するには、複数列の丸太に期待する必要があることが分かった。さらに、周囲に丸太を打設することで地盤の側方への変形も抑えられ、めり込み沈下の抑制につながっていると考えられる。加えて、丸太頭部と基礎を相互に拘束することで、一体としての挙動が発

揮され、効果が向上する可能性があることが分かった。



(a) 3次元解析モデル



(b) 2次元解析モデルの主要部  
図-5 数値解析のモデル

引き続き、実際に液状化による被害が生じた浦安市の地盤をモデル化して、数値解析による効果の確認を行った。この解析においても、無対策に比べて沈下、傾斜を抑制する効果を確認した。

#### 設計法の検討

地盤全体あるいは建物の下全体に対して液状化対策を施す場合には、通常密度増大工法のような設計法を適用することができる。既設戸建住宅では、建物周囲にのみ丸太を打設するため、密度増加の範囲、また効果の範囲の設定など設計上の課題が存在する。土槽内地盤への丸太貫入実験、現地での事前事後のN値の変化、丸太打設の周囲への変形の影響範囲の確認実験などから検討した。1本であっても周囲を密にすること、比較的間隔を密にした場合には、相対密度の上昇が期待できることなどから、丸太の周囲と相対密度の上昇についてある程度定量的な評価が可能となった。ただし、丸太の剛性などは、設計上は考慮されておらず、今後の課題である。また、現状では、沈下抑制量と丸太配置の関係が十分に把握できておらず、さらに定量的に把握する取り組みをすることで、設計の精度が向上するものと考えられる。

#### 施工法の検討

本研究で当初の計画時点に予期しなかった事象が生じた事項である。計画時点は丸太打設液状化対策工法そのものの開発段階であり施工法も確立していなかった。重機で容易に丸太を直接圧入できると考えていたが常時は砂地盤はかなりしっかりして、まず鋼管によって先行回転圧入したのちに丸

太をかなりの圧力で圧入することが必要であることが分かった。そのため、小型の重機で圧入可能と期待していたのが、小型といえどもそれなりの重量を持つ重機が必要で、現状で最も小型の杭打機（幅 2.4m）での施工が必須であり、施工機械のさらなる小型化は現時点では難しいことが分かった。市街地での既設住宅間の狭隘部での施工も念頭に置いていたが困難となった。敷地に余裕のある場合、あるいは更地の場合には十分施工可能である。通常丸太打設液状化対策工法としての施工法は本研究期間に確立した。

#### (3) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の環境・経済面での有効性の検討

これまで特定の実証工事において、炭素貯蔵効果を検討していたが、丸太打設本数や改良面積などに対する関係は未解明であった。そこで、丸太打設液状化対策工法の炭素貯蔵効果をいくつかの施工地点で検討した。それらをまとめたものを図-6に示す。この図は、丸太打設間隔に対する液状化対策の体積  $1\text{m}^3$  当たりの丸太による炭素貯蔵量から工事による排出量を引いた収支の関係を示している。液状化対策工事による炭素排出量は、丸太による貯蔵量に比べて多くても 10%以下であり、ほとんどは貯蔵側として蓄積されることが分かった。当然、打設間隔が小さいほど貯蔵量も大きくなる。

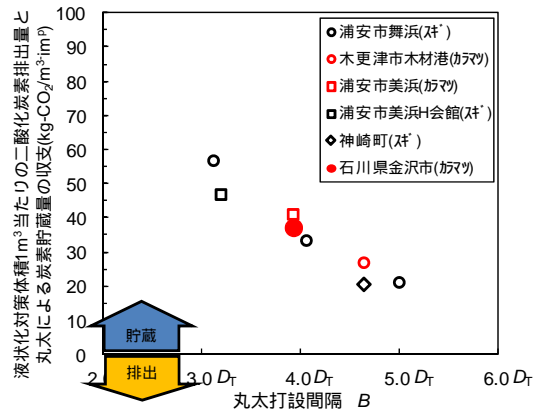


図-6 地盤改良体積  $1\text{m}^3$  当たりの炭素貯蔵

木を山で育成する段階からの各プロセスごとの  $\text{CO}_2$  排出量も算定し、工事だけでなくそれらを含めても、丸太の炭素貯蔵量が圧倒的に上回ることも確認したが、丸太運搬などの  $\text{CO}_2$  排出量は工事ごとに変動するため、定量的な関係を求めるため、上記の検討は工事による排出を対象として検討している。

これまで小規模な液状化対策工事ではコストが非常に高く、それが戸建住宅の対策が進まなかった要因であった。戸建住宅の液状化対策としても十分活用されるように、設計法の効率化、施工法の改良と効率化などを行い、まだ十分とはいえないまでも、実施可能な価格帯にまでコストを低減した。丸太調達についても、地域ごとの特性について検討し、コスト縮減の課題を整理した。

丸太打設液状化対策は、液状化対策の実現に加えて、炭素貯蔵という地球温暖化緩和への貢献、これまで利用価値が低かった比較的細径の丸太の需要拡大、木材資源有効活用による山林の健全化、林業活性化、地産地消による地域経済活性化、山林の健全化による滋養塩の海への供給など多様な効果を生み出す。公共事業では、それぞれの目的ごとに事業が行われることがしばしば見られるが、これらを一体として実施すれば、費用を低減しつつ、それぞれにおいて確実な効果を生み出すことが可能となる。それぞれの事項については、研究を通じてその基礎データを蓄積している。その概念図を図-7に示す。このようなプロセスは、政策提言にまとめられて発表されている<sup>1)</sup>。

また、このような考えに基づいた漁港の液状化対策の事例がすでに実現している<sup>2)</sup>。



図-7 複合目的の木材活用  
(防災・地球環境保全・地方創生)

#### (4) 戸建住宅の液状化対策推進制度の研究

2011年東北地方太平洋沖地震で液状化により甚大な被害が発生した浦安市の住宅政策や住宅市場動向について分析し、今後の不動産価値の考え方を考察した。市は建物の沈下や傾斜が多発する被害実態に即した認定基準を得る成果を得た。市独自の支援制度も創設し住宅再建の困難さを軽減した。地盤復旧工法をまとめて開示し工事の混乱予防に努めたが、必ずしも工事技術や信頼できる事業者の判定に十分な蓄積がない分野に集中的な需要が発生しトラブルも見られた。

浦安市は液状化からの復旧・復興のため委員会を立ち上げ市街地液状化対策事業を進めた。国土交通省の提示した公共施設と隣接宅地等の一体的な液状化対策を進める事業が市の政策に大きく影響を及ぼしている。また、浦安市に大規模開発用地を持つディベロッパーなどの民間企業、浦安市、明海大学が浦安環境共生都市コンソーシアムを組成し、次世代型のまちづくりの水準を明示的にする試みを進めた。このことで、大規模開発用地は乱開発されることなく、高い水準で開発が再開されることとなった。日の出7丁目開発、明海2丁目開発はいずれも高い水準での液状化対策が施されている。このように、民間事業者が企業戦略にもとづいて独自に液状化対策を行い、住宅市場の中で認知と定着を図る動きが本格化している。

住宅の市場としては、市の人口は、震災前、

毎年1千人の割合で増加し2011年で165千人であったが、2012年には3千人減少した。その後再び増加に転じて2014年には163千人まで回復している。液状化被害が発生した地域に見切りをつけた意図的な転出は限定的といえる。人気の高いエリアであった地域の地価は、大幅に下落した。しかし2014年以降は、液状化被害のなかった市川市と大差ない変動を示し、影響は限定的であった。

日本では、土地は土地、建物は建物として不動産価値が評価されるが、英米法の国では、建物には独立の所有権はなく、土地所有権に含まれる。また、外構や植栽、住民意識やコミュニティの状況なども構成要素である。このような一体的な評価は長期利用と資産価値の維持に重要であり、今後は、地盤情報も不動産の評価に必須の要素となる。

戸建て住宅の液状化対策を推進するには、インセンティブを働かせることが重要である。直接的には、耐震補強の助成制度のようなものが望ましいが、財源確保を含め、すぐには難しい。第一歩として、公的機関によるCO<sub>2</sub>固定認証が考えられる。すでに建物に対しての認証はいくつかの事例が見られるが、地中利用まで含まれてはいない。炭素固定の期間まで考えれば、最も長期的な固定方法であり、CO<sub>2</sub>固定の認証の対象とすることで採用意欲が向上する可能性がある。建物や地盤改良でのCO<sub>2</sub>固定量を一定の方式で求め、所有者はその環境貢献効果を表示し所有物のステータスを向上できる。これに加えて、貯蔵量に応じた助成制度が整備されれば、さらに活用の機運が高まる。このような提言もなされている<sup>1)</sup>。

また、技術的信頼性を高めるという意味で、液状化対策としての第三者機関の技術認証は重要である。

#### (5) 丸太による既設戸建住宅の液状化対策の総合化

本研究で得られた成果は、丸太打設液状化対策&カーボンストック工法の設計施工マニュアルに活かされ収録されている。これらを基に、第三者機関の技術認証(建築技術性能証明、建設技術審査証明)を取得した。

<引用文献>

1) JAPIC(日本プロジェクト産業協議会) 再生事業化委員会: 次世代林業モデル・平成28年度重点政策提言、

[http://www.japic.org/information/\\_28.html](http://www.japic.org/information/_28.html), 2016.6.

2) 松橋利明: 森林資源活用による水産基盤整備の必要性和その見通し【間伐材の有効活用を探る】、第7回木材利用シンポジウム「地盤改良に日本の森林資源を活かす」資料, pp. 49-56, 2016.3.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計12件)

三輪滋, 吉田雅穂, 村田拓海, 沼田淳紀 :

丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の小型振動実験および数値解析による検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No. 4, 2016.(査読有)

中城康彦: 液状化被害を受けた浦安市の住宅市場と住宅政策, 日本不動産学会誌, No.115, Vol.29 No.4, pp83-92, 2016.(査読無)

金子治, 川股紫織, 中井正一, 関口徹, 向井智久: 東北地方太平洋沖地震における杭基礎の被害要因に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 717, pp. 1699-1706, 2015.(査読有)

S. Nakai, T. Sekiguchi and H. Mano: A Study on Dewatering Effect as a Liquefaction Countermeasure for Existing Residential Areas by Centrifuge Shaking Table Tests, Proc. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No.555, 2015.(査読有)

Shigeru Miwa, Atsunori Numata, Masaho Yoshida, Takumi Murata and Masayuki Tsutsui: Log piling as a liquefaction Countermeasure for existing house, Proceedings of 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, paper No.181, 2015.(査読有)

三輪滋, 沼田淳紀, 村田拓海, 吉田雅穂: 丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の数値解析による効果の検討, 木材利用研究論文報告集, 14, pp.94-99, 2015.(査読無)

齊藤広子, 中城康彦: 民間賃貸住宅における被災への対応-浦安市の埋め立て地区の場合, 日本建築学会技術報告集, 第 48 巻, pp827-830, 2015.(査読有)

Chihiro Kayo, Ryu Noda, Takanobu Sasaki and Shinya Takaoku: Carbon balance in the life cycle of wood: targeting a timber check dam, Journal of Wood Science, Vol.61, Issue 1, pp.70-80, 2015.(査読有)

Ryu Noda, Chihiro Kayo, Takanobu Sasaki and Shinya Takaoku: Evaluation of CO2 emissions reductions by timber check dams and their economic effectiveness, Journal of Wood Science, Vol.60, Issue 6, pp.461-472, 2014.(査読有)

村田拓海, 吉田雅穂, 五十島康平, 三輪滋: 丸太を用いた戸建て住宅の液状化対策工法に関する研究, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.550-558, 2014.(査読無)

中城康彦: 追加投資を誘引する社会的な仕組みのあり方, 日本住宅協会『住宅』, Vol.63, pp.8-17. 2014.(査読有)

中城康彦: 中古住宅流通促進のための建物評価の課題, 資産評価政策学会『資産評価政策学』, 15 巻 2 号 (通巻 27 号), pp.24-31. 2014.(査読有)

[学会発表](計 31 件)

中城康彦: 土地利用に関する新たな展開-不動産の新しい価値概念, 日本学術会議公開

講演会「強靱で安全・安心な都市を支える地質地盤の情報整備-あなたの足元は大丈夫?」, 2016.1.23, 東京(日本学術会議)

三輪滋, 沼田淳紀, 村田拓海, 筒井雅行: 丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の 2 次元解析による検討, 第 34 回自然災害学会学術講演会, 2015.9.24-25, 山口(山口大学)

村田拓海, 沼田淳紀, 三輪滋, 筒井雅行: 二階建て集合住宅の液状化対策事例における炭素貯蔵量, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.9.16-18, 岡山(岡山大学)

吉田雅穂, 坂下和也, 三輪滋: 既設戸建て住宅の基礎に丸太を連結する液状化対策に関する模型振動実験, 第 50 回地盤工研究発表会, 2015.9.1-3, 札幌(北海道科学大学)

その他 27 件

[図書](計 2 件)

日本建築総合試験所(申込者: 飛鳥建設株式会社, 兼松日産農林株式会社, 昭和マテリアル株式会社): 建築技術性能証明評価概要報告書 LP-LiC 工法 - 丸太を用いた地盤の密度増大工法 -, 2013.12 (2015.4 改定), 131p.

先端建設技術センター(審査証明依頼者: 飛鳥建設株式会社, 兼松日産農林株式会社, 昭和マテリアル株式会社): 先端建設技術・技術審査証明報告書 丸太打設液状化対策 & カーボンストック工法, 2014, 238p.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三輪 滋 (MIWA, Shigeru)

飛鳥建設株式会社技術研究所・・・・特別研究員

研究者番号: 60443636

(2) 研究分担者

吉田 雅穂 (YOSHIDA, Masaho)

福井工業高等専門学校・環境都市工学科・教授

研究者番号: 90210723

中井 正一 (NAKAI, Shoichi)

千葉大学・工学研究科・教授

研究者番号: 90292664

中城 康彦 (NAKAJO, Yasuhiko)

明海大学・不動産学部・教授

研究者番号: 30286009

加用 千裕 (KAYO, Chihiro)

東京農工大学・農学研究科・助教

研究者番号: 50550183

(3) 連携研究者

沼田 淳紀 (NUMATA, Atsunori)

飛鳥建設株式会社技術研究所・・・・主席研究員

研究者番号: 10443649

筒井 雅行 (TSUTSUI, Masayuki)

飛鳥建設株式会社技術研究所・・・・部長

研究者番号: 90443639

(4) 研究協力者

村田 拓海 (MURATA, Takumi)