

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560501

研究課題名（和文）

カーボンストックを目的とした丸太打設による地盤の液状化対策技術の開発

研究課題名（英文）

Development of Countermeasure against Soil Liquefaction by Log Piling for Carbon Storage

研究代表者

吉田 雅穂 (YOSHIDA MASAO)

福井工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：90210723

研究成果の概要：

本研究の目的は、地下水位以深の軟弱な砂質土地盤に丸太を打設することにより、地震時の液状化被害を軽減する工法を開発することである。実験や資料分析の結果、59年間、河床に埋設されていたスギ丸太の木杭基礎の健全性、また、1964年新潟地震の際に液状化地盤に建設されていた木杭基礎構造物の健全性、そして、丸太打設による液状化被害軽減効果、を明らかにした。さらに、広大な埋立地盤等の液状化対策として本工法を利用すれば、地中カーボンストックによって地球温暖化対策に寄与できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地球温暖化、カーボンストック、液状化、木杭、腐朽、丸太、模型実験、スギ

## 1. 研究開始当初の背景

2005年に発効された京都議定書では、地球温暖化の主要な原因である温室効果ガスの具体的削減目標が提示され、我が国では2008～2012年の間に1990年の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の6%削減が定められた。しかし、依然としてエネルギー消費量もCO<sub>2</sub>排出量も減少の方向に進んでおらず、このままでは京都議定書の削減目標達成が困難となることが危惧されている。

現在、地球温暖化防止対策として、温室効果ガスを対象とした「排出源対策」とCO<sub>2</sub>の「吸収源対策」の2つが提案されているが、

このうち後者では、森林が持つCO<sub>2</sub>吸収能力、地下の地質が持つCO<sub>2</sub>貯留能力、海洋が持つCO<sub>2</sub>溶解能力などを活用し、CO<sub>2</sub>を吸収・隔離する「カーボンストック」の技術開発が盛んに行われている。

ここで、京都議定書で定められた我が国の削減目標6%のうち、森林吸収による削減目標は3.8%となっている。ただし、森林によるCO<sub>2</sub>吸収は林業経営が適切に行われた森林が対象であり、手入れされていない森林はカウントの対象外となっている。しかしながら、我が国の林業は安価な外材に押されて長期にわたって低迷しているため、放棄された森

林が増加しており、森林吸収による3.8%の削減目標の達成は非常に困難な状況にある。このため、地球温暖化防止のためには森林、特に人工林の手入れを適切に行うことが必要であり、そのためには、国産材を積極的に利用することにより、植林→育成→伐採→流通→加工→利用→植林という森林管理のサイクルを安定的に循環させることが重要となる。

ところで、我が国における木材需要を用途別で見ると建築用と製紙用がそのほとんどを占めており、土木事業における利用は約2%と非常に少ない。以前は橋梁や建築物の基礎杭として丸太が用いられていたが、1955年に政府が木材資源利用合理化政策の一環としてコンクリート杭の利用を促進させた動きを契機に木杭の利用が途絶えることとなった。一方、木材を土木事業で利用する際の最大の懸念材料として腐朽の問題がある。しかし、例えば、東京の旧丸ビル基礎に使われていたマツ杭基礎が80年経過後にも関わらず腐朽することなく健全であったことが物語っているように、木材が地下水位以深に打設されているならば腐朽の心配はない事例が数多く報告されている。

このような背景のもと、近年、コンクリート構造物の劣化が問題視されているなか、地下水位以深という条件付きではあるが、木材の長期耐久性という利点を見直す必要があると言える。また、土木事業は大規模であるため木材を大量に利用できる可能性があるため、先に述べた森林管理サイクルにおける「利用」の促進に直結し、ひいては地球温暖化対策に大いに貢献できるものと考えられる。

## 2. 研究の目的

木材を土木事業で大量に利用する手段として軟弱地盤の改良工事が考えられる。地下水位の浅い軟弱地盤は、すなわち、木材の長期保存に都合の良い環境を有する地盤であり、粘性土地盤であれば圧密沈下対策、砂質土地盤であれば液状化対策として木材の活用が期待される。

そこで、本研究では地下水位以深の軟弱な砂質土地盤に丸太を打設することにより、その置換効果や締固め効果によって、地盤の液状化強度を増加させる地盤改良工法を開発することを目的とする。特に、埋立地盤など広大な敷地の液状化対策として本工法が活用できれば、大量のカーボンストックが期待でき、地球温暖化対策に寄与できるものと思われる。

## 3. 研究の方法

- (1) 足羽川で掘り出された丸太の健全度評価  
福井県福井市を流れる足羽川の水越橋、幸

橋、木田橋の架け替え工事の際の2006年に、河床より掘り出された15本の丸太の健全度評価を行い、地下水位以深では木材の腐朽の心配はないことを明らかにする。丸太の長さは最大で約5mであるため、杭先端より50cm間隔で木材を切り出し、深さごとの供試体を作製して評価を行う。評価方法は目視による腐朽度評価(JIS K 1571:2004)、木材試験機ピロディンによる貫入試験、縦圧縮試験(JIS Z 2101:1994)の3通りである。既往の研究により明らかとなっている木材腐朽の目安となる値や設計基準強度と比較し、各丸太の健全度を評価する。

- (2) 丸太打設による液状化対策効果に関する模型振動実験

研究代表者の吉田と分担者の宮島の各所属機関が所有する振動試験機を利用し、模型振動実験を実施する。振動試験機のテーブル上に設置した土槽内に丸太模型を打設した飽和砂地盤を作製し、丸太の長さや直径、打設する深さや間隔、地下水位の位置等をパラメータとして実験を行う。そして、丸太打設による液状化抑制効果、ならびに、構造物の沈下抑制効果を明らかにする。

- (3) 新潟地震において液状化地盤に存在した木杭基礎の調査

1964年に発生した新潟地震では新潟市で甚大な液状化被害が発生したが、杭基礎としてマツ丸太745本が打設されていた新潟駅舎が全く被害を受けなかったという報告がある(斎藤, 1964)。そこで、当時の被害資料や設計資料を調査し、液状化対策として木材を利用する時の設計法を検討するための基礎資料を収集する。

一方、サンドコンパクションパイル工法のように砂杭密詰めによる液状化対策の設計法が確立されているため、丸太打設により十分な周辺地盤の置換効果と締固め効果が得られれば、丸太の強度や変形特性は設計時に特に考慮する必要がないことが期待される。そこで、新潟地震における新潟駅の資料を基に、木杭打設に伴う周辺地盤の相対密度の増加について検討を行う。

## 4. 研究成果

- (1) 足羽川で掘り出された丸太の健全度評価  
① 木杭の掘出し調査の概要

2004年7月福井豪雨では足羽川の堤防決壊等により甚大な被害が発生した。その後、足羽川河川激甚災害対策特別緊急事業が採択され、2004年度より5ヶ年計画で、河床掘削や橋梁架替等の工事(一部は福井縦貫線幸橋整備事業)が進められている。その工事の最中、足羽川に架かる水越橋、幸橋、木田橋の各地点より橋梁基礎等に利用された丸太状の木杭が数多く発見された。

このうち、写真-1に示す木田橋から掘り出

された木杭は、現在の木田橋の2代前に当たる1949年完成の木橋の基礎であり、同橋は1948年に発生した福井地震の被災後に、足羽川上流にある池田町や美山町（現在は福井市に併合）の山林より運搬された木材で作製されたものであり、1957年まで供用された。木杭の寸法は末口直径30cm、長さ3.5mであり、（独）森林総合研究所による鑑定の結果、樹種はスギ科スギ属であることが判明した。また、2006年に掘り出されるまで、この木杭は59年間河床に埋められていたこととなる。

掘出し時には杭頭部約1.4mが地盤より上に出ていたが、試験室に搬入された木杭を観察すると、杭頭部約1.1mが長期間水で洗われたように滑らかに削られた痕跡があり、その上部が地盤表面より突出していたと考えられる。杭頭部が1.1mほど地盤より突出していたと仮定すると、付近の土質柱状図との対応により、粘土層の下部にある砂質シルト層に杭先端があり、杭の大部分は粘土層内にあったと推測できる。なお、杭頭部は水中に没していたと考えられるが、湯水期には水位面より上に存在していたと推測できる。

## ②木杭の健全度評価

図-1は「木材保存剤の性能試験方法及び性能基準（JIS K 1571:2004）」に従い、前述の木田橋の木杭について、目視により腐朽度を判定した結果である。同図に示す基準を参考にA、B、Cの3名の評価者が木杭の状況を観察し判定を行った。なお、同図に示す河床面と水位面は推定した位置である。同図より、河床面より下の部分、すなわち、常に地盤中に存在していたと推測される部分は被害度が1以下となっており、河床面上よりも腐朽程度が低いことが確認できた。

図-2は前述の木田橋の木杭について、木材の軟質腐朽の程度を調べるピロディン試験を行った結果である。貫入量が大きい方が軟らかいことを示し、25~30mm以上の値が腐朽の目安となる。試験に用いた試料は、掘り出した木杭を深度方向に50cm間隔で切り出した厚さ10cmの円盤状のものであり、飽和状態と気乾状態の2通りの保管方法で作製した。貫入方向は木杭断面の幹軸方向（円盤面）と木杭側面より幹軸直交方向（円周面）の2通りとし、それぞれ計40点および計48点の計測点を設けた。同図より、スギは晩材と早材の密度差が著しい樹種であるため、円盤面では貫入位置によるばらつきが大きい傾向が見られるが、平均値で判断すると両試料ともにほとんどの深さで30mmを下回る結果となっており、健全性を有していることが明らかとなった。

木材の試験方法（JIS Z 2101:1994）に準拠し、木杭より採取した試験体を用いて縦圧縮試験を行った。試験体の作製方法は、ピロディン試験を実施した円盤状試料から、3cm



写真-1 木田橋より掘り出された木杭

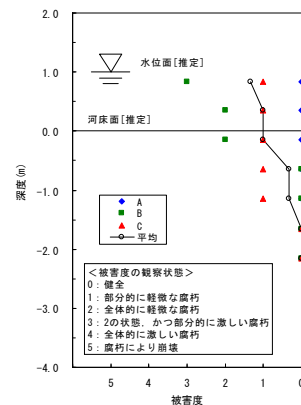


図-1 目視評価の結果

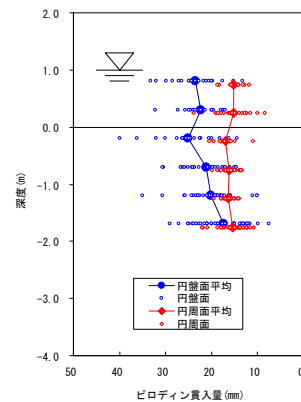


図-2 ピロディン試験の結果 (気乾試料)

角で材長6cmの短柱状試験体を最大で8個切り出した。試験方法は万能試験機を用いて変位制御で行い、平均荷重速度はJISに従い毎分9.80N/mm<sup>2</sup>以下とした。図-3は前述の木田橋の木杭に関する結果であり、深度ごとの縦圧縮強度を示したものであり、G.L. -0.0mの位置が推定した河床底面の位置である。ここで、福井県土木部監修の基礎工設計マニュアルに記載されている木杭基礎の軸方向圧縮強度の許容応力度は6MPa、また、（独）森林総合研究所監修の木材工業ハンドブックに掲載されているスギの標準的な圧縮強度は35MPaである。同図より、全ての試験体の強度が標準強度を下回っているものの、許容応力度に対しては3倍から5倍の強度を有していることがわかる。したがって、59年間地

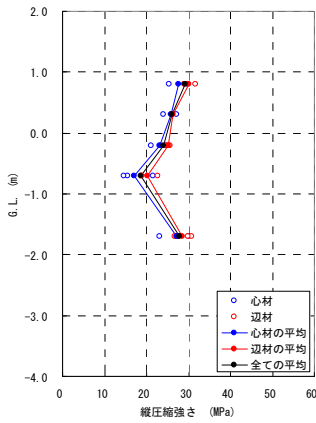


図-3 縦圧縮試験の結果

中に埋まっていたスギ丸太が、現在もなお基礎杭としての強度を有する状態であったことが明らかとなった。

(2) 丸太打設による液状化対策効果に関する模型振動実験

#### ①地盤の液状化抑制効果に関する実験

図-4 に模型実験の概要を示す。振動台上にアクリル製の土槽（幅 800mm×奥行き 400mm×高さ 500mm）を設置し、その中に模型地盤を作製して振動実験を実施した。模型地盤は珪砂 7号を用いて水中落下法で作製した層厚 300mm の緩詰めめの飽和砂地盤の上に、層厚 20mm の碎石 7号を敷き詰め、地下水位は砂地盤上面とした。同地盤は左側の丸太模型を打設した改良地盤と右側の非改良地盤で構成されており、改良地盤には計 36 本の丸太（直径 12mm、長さ 220mm）が 30mm 間隔で正方形配置されている。なお、丸太頭部は 20mm だけ碎石層に貫入させており、丸太頂部は碎石層上面と一致している。また、丸太は福井県産スギの間伐材より作製したものであり、水浸減圧容器で約一週間脱気して飽和化した。入力波は振動数 5Hz の正弦波で加振時間を 4 秒間とし、100gal, 120gal, 140gal, 160gal, 180gal と最大加速度を順に変えた実験を行い、同一地盤に対して計 5 回の加振を与えた。なお、実験中は入力加速度 (A1)、地盤内の過剰間隙水圧 (P1, P2, P3, P4, P5)、丸太および地盤の鉛直方向変位量を計測した。

図-5 は 120gal 加振時の土槽底面から 200mm の位置における過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示したものであり、改良地盤 (P1) と非改良地盤 (P4) とを比較した結果である。同図より、非改良地盤では過剰間隙水圧比が 1.0 に達し完全液状化状態となっているが、改良地盤では過剰間隙水圧比の最大値の低減、上昇速度の抑制、消散速度の向上が見られ、液状化が防止されていることが確認できる。これは、砂を木材で置き換えたことによる置換効果、また、丸太を打設する際に周辺地盤が締められることによる密度増大効

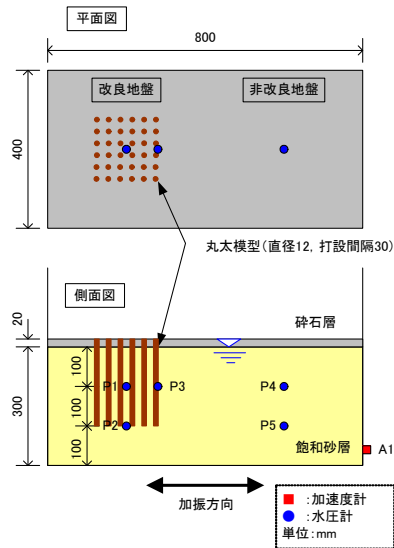


図-4 模型実験の概要

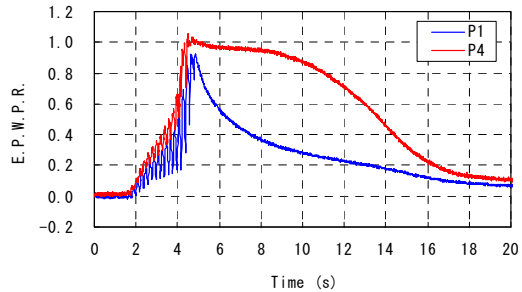


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

果、丸太頭部が碎石で固定されていることによる地盤のせん断変形抑制効果、そして、丸太周面から地表面方向への間隙水圧消散効果などが、地盤の液状化強度の増加に影響を与えたものと考えられる。

#### ②地上構造物の沈下抑制効果に関する実験

図-6 に模型実験の概要を示す。実験に用いた材料や地盤作製方法は図-4 と同様である。丸太模型は福井県産のスギ間伐材より作製したものであり、直径 12mm で長さ 200mm の柱状丸太と末口直径 10mm、元口直径 14mm で長さ 200mm の錐状丸太の 2 種類の模型を用いた。同図に示すように、地盤中央は未改良地盤とし、地盤左側は計 36 本の柱状丸太を 30mm 間隔で正方形配置し、同地盤右側は計 36 本の錐状丸太を同様に配置して改良地盤とした。また、丸太は飽和化したものを使用し、その密度の平均値は約  $1g/cm^3$  であった。地表面に設置した上載模型は底面が 150mm 四方で高さ 112mm の防水処理を施した木箱で、重さは 6000g に調整した。なお、上載模型は地表面および杭頭上に静置してあるだけで杭頭とは連結されていない。入力波は振動数 5Hz の正弦波で加振時間を 4 秒間とし、60gal, 80gal, 100gal と最大加速度を順に変えた実験を行い、同一地盤に対して計 3 回の加振を

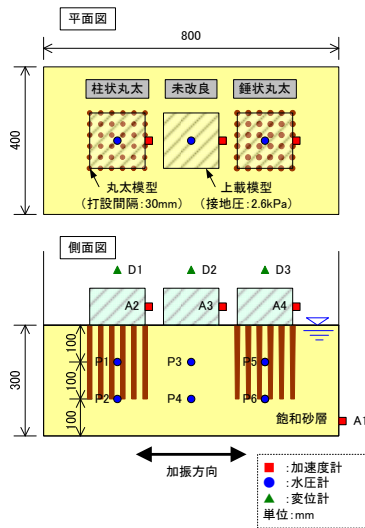


図-6 模型実験の概要

与えた。

図-7は80gal加振時の地表面から100mmの位置における過剰間隙水圧の時刻歴波形の一例を示したものであり、柱状丸太地盤(P1)、未改良地盤(P3)、錘状丸太地盤(P5)を比較した結果である。また、図-8は同実験における上載模型の沈下の経時変化を示したものである。

入力波は同図の時刻歴において1秒から5秒の間で加振しているが、過剰間隙水圧は加振開始1秒後より上昇を始め2秒後には最大値に達している。ここで、各水圧計の地点における初期有効上載圧は約3.4kPaであるため、同地点では液状化には至っていないと言える。しかし、最大値を示した後に水圧が急激に低下し、さらに回復する挙動を示し、これは後述する上載模型の沈下開始の時期と一致していた。上載模型の沈下は過剰間隙水圧が最大に達した時から始まり、柱状丸太と錘状丸太を打設した改良地盤では加振終了とともに沈下が停止した。一方、未改良地盤は過剰間隙水圧の消散が終了する35秒付近まで沈下を継続し、最終沈下量は約2.3cmとなった。それに対し、柱状丸太地盤は0.2cm、錘状丸太地盤は0.6cmと大きな沈下抑制効果が確認できた。

### (3)新潟地震において液状化地盤に存在した木杭基礎の調査

#### ①新潟駅における木杭基礎の概要

1964年新潟地震に関する文献調査や当時の職員の方へのヒアリング調査によれば、当時の新潟駅と地震による被害は以下の通りである。新潟駅は、主にRC造地下1階地上4階建ての本屋と、地上6階建ての支社からなる。これらの基礎は、手小荷物扱所が直接基礎、駅本屋が末口22.5cm長さ7.5m(杭間隔約1.5m)のマツ丸太基礎、コンコース上の連絡建屋および支社が直径30cm長さ6mのPC

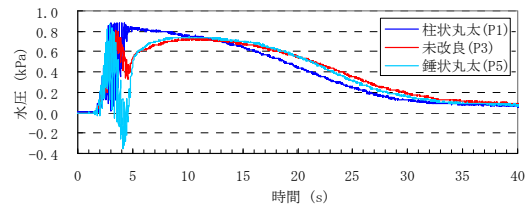


図-7 過剰間隙水圧

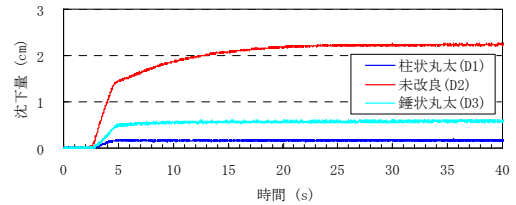


図-8 上載模型の沈下

コンクリート杭(2本継ぎ、杭間隔不明)であった。基礎の木杭は1956~1957年頃に打設され、新潟駅本屋は1958年に開業した。地下水位は、くみ上げ過ぎで地盤沈下が激しかったため規制が行われ、GL-0.5m程度であった。

地震後、ホームへ渡る地下道は泥水で埋まり、アメのように曲がったレールや建造物の基礎周辺には噴砂が多数確認され、新潟駅では明らかに液状化が生じたと言える。これにより、車庫や事務室などは沈下傾斜し、ホームは約45cm、駅前広場も全体的に約40~50cm沈下した。さらに、支社は不同沈下が10cm程度生じ駅前広場側に傾斜し、左側の手小荷物扱所も被害を受けた。一方、木杭で支えられた本屋は健全であった。このように本屋が健全であった理由として、斉藤(1964)は、木杭基礎について液状化対策を施したことを、当時、次のように述べている、「・・・流砂現象のおそれは十分あり得ると言う結論に達した。それで基礎底面から-12mの支持層までゆるい砂層を締固めると共に、建物荷重を支持層に確実に伝達するために杭基礎とすることとし、末口22.5cm、長さ7.5mの松丸太745本(1.5m間隔程度)を打設した・・・」

なお、新潟駅本屋は、地震後被害がなかったことから、2009年の現在もなお当時の木杭基礎のまま使用されており、新潟地震において液状化対策としての機能を果たし、杭打設後53年経過後も基礎としての機能を維持していると言える。

#### ②木杭打設による相対密度の増加量の推定

資料によれば、新潟駅部の緩い砂地盤の間隙比は0.87~0.9、杭の打設間隔は $L=1.5m$ 程度、杭径は末口 $D=22.5cm$ であった。木杭打設による改良率を $a_s$ 、地盤の初期間隙比を $e_i$ とすると、木杭打設による相対密度の増加は次式で表される。

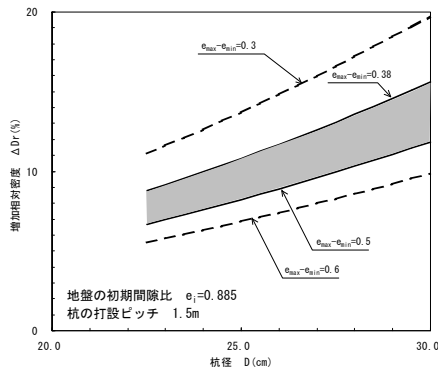


図-9 木杭打設による推定増加相対密度

$$\Delta D_r = \frac{a_s(1+e_i)}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

ここで、右辺分母の砂の最大間隙比と最小間隙比の差は、一般的に 0.3~0.6 程度であり、新潟駅周辺の砂の場合は文献調査により 0.38~0.50 であった。木杭の元口の太さを最大 30cm と仮定し、また、地盤の初期間隙比を 0.885 と仮定すると、木杭打設によって増加した相対密度  $\Delta D_r$  は、 $e_{\max} - e_{\min}$  をパラメータとして図-9 のように求められる。これより相対密度は、末口では 7~9%、元口では太さを 30cm と仮定すると 12~16%増加したと推察される。

木杭打設により、このような密度増加とともに、水平方向土圧の増加、杭打設の振動による締固め効果も加わり木杭打設が液状化対策として機能したものと推定される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 沼田淳紀, 吉田雅徳, 濱田政則: 1964 年新潟地震における木材による液状化対策事例, 木材学会誌, 掲載確定, 2009, 査読あり

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 吉田雅徳, 沼田淳紀, 本山 寛, 久保 光, 宮島昌克, 野村 崇: 液状化対策工法へのスギ間伐材の利用に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 掲載確定, 2009, 査読なし
- ② 吉田雅徳, 宮島昌克, 沼田淳紀, 木内貴之, 渡邊雄大, 内藤法子: スギ丸太を利用した液状化対策工法に関する模型振動実験, 第 44 回地盤工学研究発表会平成 21 年度発表講演集, 掲載確定, 2009, 査読なし
- ③ 吉田雅徳, 沼田淳紀, 本山 寛, 久保 光, 宮島昌克, 野村 崇: スギ丸太を用いた液状化対策技術の開発, 第 4 回木質科学シンポジウムポスター発表要旨集, p. 44, 2009, 査読なし
- ④ 吉田雅徳, 沼田淳紀, 上杉章雄, 久保 光,

宮島昌克: スギ丸太を用いた液状化対策工法の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, pp. 43-44, 2008, 査読なし

- ⑤ 正田大輔, 沼田敦紀, 久保 光, 吉田雅徳, 河端俊典, 本山 寛: 足羽川幸橋木杭基礎の健全性評価と地球温暖化防止対策, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2008, 地盤工学会関西支部, pp. 125-130, 2008, 査読あり
- ⑥ 沼田淳紀, 吉田雅徳, 宮島昌克: 地中に打設された木杭の液状化時の浮上について, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, pp. 45-46, 2008, 査読なし
- ⑦ 吉田雅徳, 平野文睦, 宮島昌克, 沼田淳紀, 上杉章雄: 丸太打設による液状化対策に関する基礎的模型振動実験, 第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集, pp. 1605-1606, 2008, 査読なし
- ⑧ 沼田淳紀, 吉田雅徳, 宮島昌克, 上杉章雄: 1964 年新潟地震で液状化対策として機能した木杭, 第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集, pp. 1707-1708, 2008, 査読なし
- ⑨ Numata, A., Uesugi, A., Yoshida, M. and Kubo, H.: Investigation of wood piles retrieved from the Asuwa River, Proc. of 10th World Conference on Timber Engineering, No. 407, 6p., 2008, 査読なし
- ⑩ 沼田淳紀, 吉田雅徳, 宮島昌克, 上杉章雄: 木杭による液状化対策の可能性について, 第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集, Q18-1115, 2p., 2008, 査読なし

〔その他〕

NPO エコプランふくい主催の「粗朶沈床セミナー」において、研究代表者の吉田が「地球温暖化防止対策のための建設工事における丸太活用」と題して本研究課題の一部を一般聴講者に紹介した。(福井県職員会館, 2008. 5. 11)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 雅徳 (YOSHIDA MASAHO)  
福井工業高等専門学校・  
環境都市工学科・准教授  
研究者番号: 90210723

### (2) 研究分担者

宮島 昌克 (MIYAJIMA MASAKATSU)  
金沢大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 70143881

### (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・室長  
研究者番号: 10443649  
上杉 章雄 (UESUGI AKIO)  
飛鳥建設株式会社・技術研究所・研究員  
研究者番号: 80443654