

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360204

研究課題名(和文) 塩分・酸化還元環境の変遷が深層混合処理工法の品質管理諸量と地盤環境に及ぼす影響

研究課題名(英文) Influences of changes of salt and oxidation-reduction environment on quality control of deep mixing method and ground environment

研究代表者

日野 剛徳 (HINO, Takenori)

佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・教授

研究者番号：20295033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：塩分や酸化還元環境の変遷が深層混合処理工法の品質管理諸量や地盤環境に及ぼす影響を明らかにするために、同変遷が海成層の地盤環境・地盤工学的性質に及ぼす影響、海成層・滞水層間の地下水質・流向・流速・地下水流動、同変遷が改良柱体における水和反応生成物の発現・劣化に及ぼす影響、同変遷が改良柱体・周辺地盤間の地盤環境に及ぼす影響について検討した。

本研究では、改良柱体打設後は周辺地盤にまで影響が及び、改良材の増加に伴い地盤環境に及ぼす影響の懸念も高まるとの定説を覆す結果を得た。このような知見は、今後の深層混合処理工法の調査・設計・施工の考え方に新たな方針をもたらす可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the influences of changes of salt and oxidation-reduction environment on quality control of deep mixing method and ground environment, the influences of same changes on the ground environment and geotechnical properties of marine clay layer, underground water quality, flow direction, flow rate and groundwater flow in marine clay layer and aquiclude, the influences of same changes on the development and degradation of hydration reaction products in the improved column, and the influences of same changes on the ground environment of improved column and surrounding ground were investigated.

In this study, the results of overturning the established theory that setting of improved column will influence its surrounding ground and the increased concern of impacts on the ground environment with the increase of improvement materials were obtained. The finding may bring a new policy on the concept of investigation, design and construction of deep mixing method in the future.

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：深層混合処理工法 塩濃度 酸化還元環境 品質管理 地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

臨海低平地域は、その多くが7,000年前の縄文海進・海退に伴う軟弱な海成層の堆積により形成されている。海成粘土中の間隙水の原初環境は海水であるが、現在では塩分溶脱現象が進み、塩濃度の減少が認められるところがある。深層混合処理工法のような軟弱地盤対策の多用を余儀なくされる臨海軟弱低平地域では、今後は地球温暖化に伴い一層の地表水位変動による影響にさらされる懸念とともに、海面上昇に伴う地下水の塩水化が深刻な懸念になろうとしている。

本研究に関連する動向として、海成層では深層混合処理工法の適用に際して塩分が改良強さにプラスの効果をもたらすと知見が得られている。石灰安定処理土の長期特性調査が実施され、27年間に及ぶ諸特性の変化が調べられ、改良柱体全体として強度低下は認められなかったことが報告されている。他方、改良地盤からのカルシウム溶脱に伴う周辺環境中のイオンの影響が調べられ、数値解析的予測手法が構築され、劣化評価の妥当性が論じられている。近隣の事例に目を向けると、有明海湾奥部に注ぐ強混合感潮河川の六角川では、改良土からなる堤防堤体から漏水が生じている。改良土が高塩分環境にさらされてわずか数年のうちにカルシウムの溶脱が進み、泥濘化するとの見解に端を発し、地表地下全般にわたる改良土の劣化現象の懸念が表明されている。

以上のように、塩分の視点一つをとっても、深層混合処理工法を取り巻く地盤環境の変遷とその品質管理諸量の関係の解釈は極めて混沌とした状態にある。

2. 研究の目的

周知のように、我が国の深層混合処理工法は海岸・河川堤防下を始め、構造物の基礎として多くの実績を有している。最近、深層混合処理工法による改良柱体が塩分や酸化還元環境の変遷によりごく短期間の内に劣化する懸念が生じている。これらのことが事実なら、地球温暖化に伴う海面上昇により臨海軟弱低平地域および地下水環境への影響が懸念される今日において、海岸・河川堤防下にある多くの改良柱体は地震頻発による影響以上の危険な状態にさらされることになり、大きな社会問題と化す。さらには、このような深層混合処理工法を取り巻く状態が再び地盤環境に及ぼす影響の懸念も生じることになる。本研究では、塩分や酸化還元環境の変遷が深層混合処理工法の品質管理諸量やこの周辺地盤との間の地盤環境に及ぼす影響について具体的に明らかにすることを目的とした。

(1) 海成層における塩分や酸化還元環境の変遷が現在の地盤環境および地盤工学的性質に及ぼす影響

(2) 海成層下の地下水質および流向・流速と上位海成層との間の地下水流動

(3) 改良柱体における塩分や酸化還元環境の変遷が水和反応生成物の発現や劣化に及ぼす影響

(4) 塩分や酸化還元環境の変遷が改良柱体と周辺地盤との間の地盤環境に及ぼす影響

3. 研究の方法

有明佐賀空港の北西部付近の研究フィールドにおいて、平成19年10月に高炉セメントB種・250kg/cm³の改良諸元からなる深層混合処理工法の試験施工が行われ、改良柱体が上部構造物を伴わずに好条件で現地保存されており、本研究ではこのフィールドを積極的に活用した。

(1) 研究フィールド内で未改良部のボーリングを行い、海成層における塩分や酸化還元環境の変遷が現在の地盤環境および地盤工学的性質に及ぼす影響に関する検討を行った。

(2) 地下水質および流向・流速観測孔を設け、海成層下の地下水質および流向・流速と上位海成層との間の地下水流動に関する検討を行った。

(3) 改良柱体本体およびその周辺でチェックボーリング、オールコアボーリング、シンウォールサンプリングを実施し、改良柱体における塩分や酸化還元環境の変遷が水和反応生成物の発現や劣化に及ぼす影響に関する検討を行った。

(4) 以上の検討結果に基づいて、塩分や酸化還元環境の変遷が改良柱体と周辺地盤との間の地盤環境に及ぼす影響に関する検討を行った。

4. 研究成果

(1) 海成層における塩分や酸化還元環境の変遷が現在の地盤環境および地盤工学的性質に及ぼす影響 地層区分は下位から地表にかけて、更新統に属する中原層下部 (dN₁: 非海成層)、中原層上部 (dN_u: 非海成層)、阿蘇-4 火砕流堆積物 (dA_{so-4}: テフラ)、三田川層 (dM: 非海成層) のように区分され、これより上位にかけて完新統に属する蓮池層下部 (aH₁: 非海成層)、有明粘土層 (aA_c: 海成層)、蓮池層上部 (aH_u: 非海成層) のように区分された。

G.L.25m 付近および5m 付近に認められる砂礫層群はそれぞれ、A_{s2} 層および A_{s1} 層と工学的に呼ばれるものであり、これらの砂礫層群による細分により、粘性土層も下位から上位にかけて A_{c3}、A_{c2} および A_{c1} 層と区分されている。堆積環境の視点によれば、aA_c 層は G.L.12m 付近を境に有明海の海進期による堆積体と高海面期による堆積体に区分され、後者ほど均質な様相を呈するようになる。これまでに、A_{c3} 層は不均質、A_{c2} 層および A_{c1}

層は均質とイメージされてきたのは、前述した A_{c3} 層および A_{c2} 層における堆積時の有明海象の違い、さらに A_{c1} 層については今日の蓮池層としての地層区分の違いによるものと整理される。

塩濃度の鉛直分布から明らかなように、当地の完新統では2次的地盤環境の変化が著しく生じているといえる。特に G.L.5m 付近の aA_c 層で塩分溶脱が著しい。G.L.19m 以深に認められる各物理化学的性質の鉛直分布の結果について、還元性が弱まり pH が中性を示し、塩分溶脱現象が顕著であることは、同地層群および直下の砂礫優勢地層群において酸素に富む地下水の流動が生じている可能性を示唆する。

本研究の対象とした改良柱体は、以上のような塩分や酸化還元環境の変遷を伴う地盤に打設されたものと考えることができる。

(2) 海成層下の地下水質および流向・流速と上位海成層との間の地下水流動 研究フィールドにおける海成層下の帯水層（三田川層：dM）の地下水質は、主成分および人の健康の保護に関する環境基準に照らして問題ないものであった。

次に、前述のような地層の間隙水における塩濃度の鉛直分布および本節に示す地下水流向・流速の測定、ならびに数値解析により、研究フィールドにおける地下水流動について検討した。まず、有明海沿岸低平地域における完新統の塩濃度の鉛直分布には2つのパターンが認められる。1つは、地表で低く下位で高い“三角形”分布のパターンであり、他の1つは地表と下位で低く地層の中間で高い“弓状”分布のパターンである。解析の結果から、深さ方向の一次元移流拡散により“三角形”分布は形成される。“弓状”分布の形成には、三田川層への淡水の供給および地下水の過剰汲み上げが関与していると推定される。

研究フィールドにおける完新統は後者に属すると考えられる。地下水の流向は西南西、流速については $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s} \sim 8.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ の範囲で値が得られている。以上のことから、研究フィールドの場合、深層混合処理工法の適用に際し常に懸念される地盤環境への影響は生じていないと判断される。

(3) 改良柱体における塩分や酸化還元環境の変遷が水和反応生成物の発現や劣化に及ぼす影響 後述の No.1・No.2 はそれぞれ、改良柱体の中心から 0.4m ($r/R_c=0.5$ 、ここに r : 改良柱体側面からの距離 (m)、 R_c : 改良柱体の半径 (m)) および 0.65m ($r/R_c=0.8$) から採取した試料である。No.3・No.4 はそれぞれ、改良柱体の中心から 1.20m ($r/R_c=1.5$) および 1.60m ($r/R_c=2.0$) から採取した試料である。No.5 は、改良柱体打設前の自然地盤としての試料である。

走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた微視的

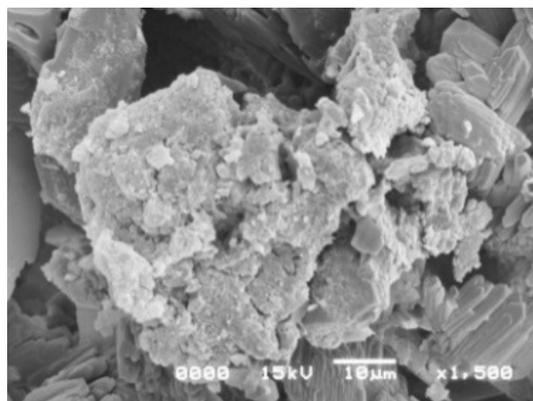


図 1

土構造の観察を行った。図 1 に結果の一部を示す。右側から下側にかけて、セメント水和物に基づく結晶と考えられる粒子が確認できる。また、中央部には土粒子の集合体があることがわかる。No.3~5 の SEM 画像では、いずれも珪藻遺骸やその破砕小片が多く存在している。特に No.5 については、シルト粒子の最大径とほぼ同じサイズの土粒子の集合体を確認できる。No.1・No.2 では、エトリングイトと考えられる針状結晶も多数確認できた。改良柱体内よりも自然堆積地盤において原型を留めた珪藻が多く観察できた。

さらに、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布の測定を実施した。No.1・No.2 の総水銀注入量は No.3~5 のものより小さかったことから、改良柱体は自然地盤よりも間隙が緻密化し、減少していることがわかった。

以上までの検討と同一試料を用い、蒸留水、塩水 20g/l および希硫酸 0.01N の各水溶液を用いた水浸試験を行い、一軸圧縮強さ、針貫入試験に基づく換算一軸圧縮強さなどからなる強度比の変化に関する検討を行った。No.2 より No.1 のほうで強度比が高い傾向を示した。No.1 および No.2 とともに、改良柱体の深さが増すほど強度比が高い傾向にあるとの改良柱体の品質も確認できた。浸水液を変えることによる強度比の変化は顕著でなかったことから、本研究に用いた改良柱体は周囲の地盤環境の変化による影響を受けにくいと考えられることがわかった。

(4) 塩分や酸化還元環境の変遷が改良柱体と周辺地盤との間の地盤環境に及ぼす影響

図 2 に pH の鉛直分布を示す。改良柱体 (No.1 および No.2) における pH の値は、打設 5 年後との経時変化を伴うが、なおもセメント使用時に特有の高アルカリ状態にあることがわかる。他方、No.3 および No.4 の値について、既往の研究では改良柱体の周辺に及ぼす影響が認められているが、改良柱体側面からの距離の観点、さらには No.5 の値との間で比較しても顕著な違いは認められない。図 3 および図 4 に、カルシウムイオン (Ca^{2+}) およびケイ素イオン (Si^{4+}) の溶出

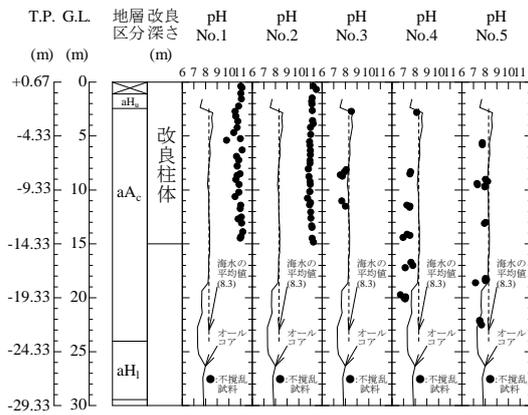


図 2

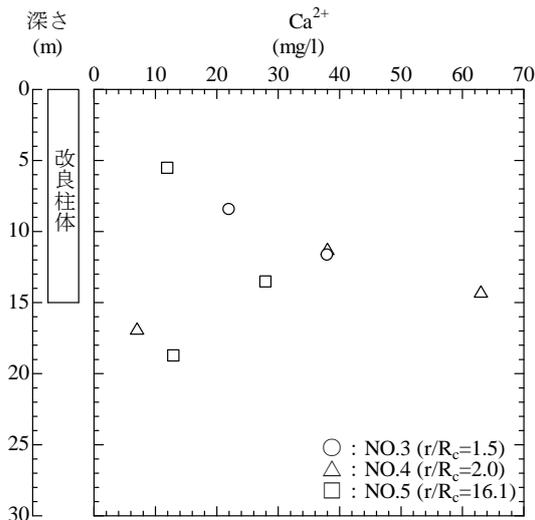


図 3

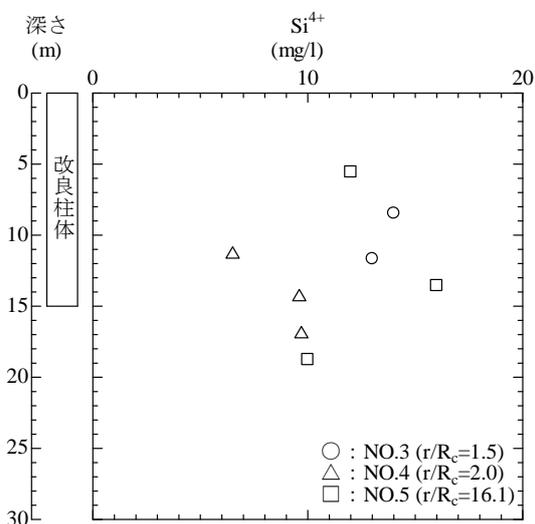


図 4

試験結果を示す。上述の pH と同様の傾向がこれらの値にも認められる。

図 5 に一軸圧縮強さの鉛直分布を示す。深層混合処理工法による改良柱体の打設により、研究フィールドの地盤は No.5 から No.1 への結果のように 100 倍以上の強度の増加がもたらされている。No.1 の結果に示すように、改良柱体の強さは打設 28 日後から 5 年後への経時変化を経ることにより、さらに 2 倍の強度増加を示すことが認められる。No.1 と

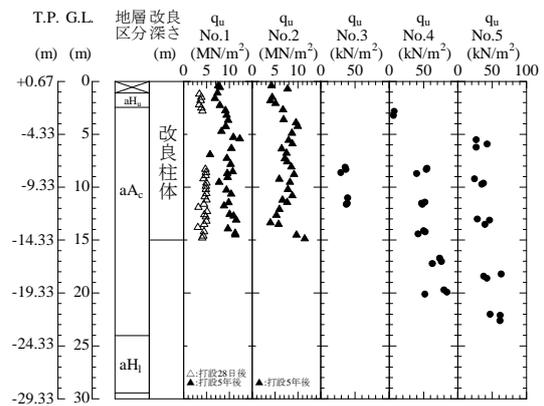


図 5

No.2 のボーリングの意図は、改良柱体の側面ほど未改良地盤に接し、セメント成分の溶出に伴い均質な品質が確保できていない懸念を確認するためのものであったが、深さ 12m から 14m 付近の結果を除けば両者に明瞭な違いは認められない。他方、No.3 から No.4 へと改良柱体側面からボーリング採取位置が離れる位置関係にある。これに伴い、No.3 の一軸圧縮強さは No.4 のものより大きいことが予想されたが、両者に明瞭な違いは認められなかった。

(5) まとめ 塩分や酸化還元環境の変遷が深層混合処理工法の品質管理諸量や地盤環境に及ぼす影響を明らかにするために、同変遷が海成層の地盤環境・地盤工学的性質に及ぼす影響、海成層・滞水層間の地下水質・流向・流速・地下水流動、同変遷が改良柱体における水和反応生成物の発現・劣化に及ぼす影響、同変遷が改良柱体・周辺地盤間の地盤環境に及ぼす影響について検討した。

本研究では、深層混合処理工法を取り巻く地盤環境の変遷とその品質管理諸量の関係に認められていた混沌とした状態において、同工法に携わる技術者・科学者にとってはむしろ安心材料を高めるための種々の知見を得た。本研究の対象とした改良柱体の諸元は 250kg/m^3 とのセメント系固化材の配合条件からなるものであり、一般的な土工の条件下では高品質のものに相当する。このような深層混合処理工法における改良材の多用は即座に地盤環境への影響の懸念に繋がるが、今ではむしろ、低配合条件こそが改良柱体の品質諸量や周辺地盤の地盤環境に及ぼす影響の懸念を高める可能性さえ否定できなくなってきた。以上のような考え方は、改良材の軽減がコスト・環境に対する是とされる今日の深層混合処理工法の調査・設計・施工において新たな方針を導く可能性が高く、今後も継続的に同様のデータを蓄積していく必要がある。

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 13 件)

- ① 日野剛徳, 柴錦春: 5.海面変動が地盤環境に及ぼす影響と評価, 講座「地球温暖化がもたらす地盤の環境変化と災害」, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol.62, No.1, Ser.No.672, pp.53-59, 2014. (査読有)
- ② 山田圭太郎, 日野剛徳, 下山正一, 竹村恵二, 檀原徹, 岩野英樹: 有明海北岸低地で新たに発見された中部更新統の年代と堆積環境, 地学雑誌, 東京地学協会, Vol.122, No.5, pp.841-853, 2013. (査読有)
- ③ 柴錦春, 日野剛徳: 間隙水の塩濃度に基づく佐賀平野の堆積環境の変化と海水浸入の可能性, 第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 日本大学文理学部, pp.103-108, 2013. (査読有)
- ④ 島内陽輔, 中川和樹, 日野剛徳, 加瑞, 柴錦春: 有明海北岸低平地域における上部更新統中地下水の水質と流向・流速のモニタリング, 第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 日本大学文理学部, pp.99-102, 2013. (査読有)
- ⑤ Jia, R., Chai, J.-C. and Hino, T.: Interpretation of coefficient of consolidation from CRS test results, Geomechanics and Engineering, Techno-Press, Vol.5, No.1, pp.57-70, 2013. (査読有)
- ⑥ Chai, J.-C., Jia, R. and Hino, T.: Anisotropic consolidation behavior of Ariake clay from three different CRS tests, Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials (ASTM), Vol.35, No.6, pp.1-9, DOI:10.1520/GTJ103848, 2012. (査読有)
- ⑦ 下山正一, 松浦浩久, 水野清秀, 窪田正和, 日野剛徳, 檀原徹, 岩野英樹, 山下透, 二宮崇: 有明海周辺から 0.6Ma 前後を示す指標テフラの発見とその意義, 地質学雑誌, 日本地質学会, 第118巻, 第11号, pp.709-722, 2012. (査読有)
- ⑧ Igaya, Y., Hino, T. and Chai, J.-C.: Laboratory and field strength of cement slurry treated Ariake clay, Proceedings of the 8th International Symposium on Lowland Technology ISLT 2012, Bali, Indonesia, International Association of Lowland Technology (IALT), pp.40-45, 2012. (査読有)
- ⑨ 伊賀屋豊, 日野剛徳, 柴錦春: 佐賀低平地における自然地盤及びフロート式深層混合処理地盤上の試験盛土の挙動, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol.60, No.8, pp.18-21, 2012. (査読有)
- ⑩ Hino, T., Jia, R., Sueyoshi, S. and

Harianto, T.: Effect of environment change on the strength of cement/lime treated clays, Frontiers of Structural and Civil Engineering, Higher Education Press & Springer, Vol.6, No.2, pp. 153-165, DOI: 10.1007/s11709-012-0153-y, 2012. (査読有)

- ⑪ Chai, J.-C., Hino, T. and Wenqi, D.: Lateral displacement induced by soil-cement column installation, Proceedings of the International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change (SGCC), Bangkok, Thailand, Asian Institute of Technology, International Geosynthetics Society-Thailand, CD-ROM, pp.103-109, 2012. (査読有)
- ⑫ Hino, T., Igaya, Y., Chai, J.-C., Jia, R. and Sueyoshi, S.: Interpretation of Quaternary Research and countermeasure of problematic lime-based deep mixing solidification in Ariake Sea coastal lowlands, Proceedings of the International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change (SGCC), Bangkok, Thailand, Asian Institute of Technology, International Geosynthetics Society-Thailand, CD-ROM, pp.307-316, 2012. (査読有)
- ⑬ Igaya, Y., Hino, T. and Chai, J.-C.: Measured behavior of a trial embankment on floating column improved soft Ariake clay deposit, Best Paper Award in ISLT 2010, Lowland Technology International, International Association of Lowland Technology (IALT), Vol.13, No.1, pp.41-46, ISSN 1344-9656, 2011. (査読有)

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 鍋内利輝: セメント系改良柱体の打設前後における自然地盤と改良柱体近傍地盤の pH と一軸圧縮特性, 土木学会西部支部, 2014年3月8日, 福岡大学.
- ② 嘉村俊: セメント系改良柱体の打設前後における地盤の微視的土構造と間隙径分布, 土木学会西部支部 2014年3月8日, 福岡大学.
- ③ 平岡武: 深層混合処理工法による改良柱体の強度の経年変化に関する検討, 土木学会西部支部, 2013年3月9日, 熊本大学.
- ④ 相賀康介: 佐賀平野に堆積する粘性土の物理化学的性質と微視的土構造, 土木学

- 会西部支部 2013 年 3 月 9 日, 熊本大学.
- ⑤ 聶集祥: 有明粘性土の圧密異方性と微視的土構造に関する実験的研究, 土木学会西部支部 2013 年 3 月 9 日, 熊本大学.
- ⑥ 日野剛徳: 有明海北岸低平地域における深層混合処理工法適用前の地盤の堆積環境, 地盤工学会, 2012 年 7 月 14 日～16 日, 八戸工業大学.
- ⑦ 聶集祥: 有明海地域における軟弱な粘性土の圧密異方性と微視的土構造に関する研究, 地盤工学会 2012 年 7 月 14 日～16 日, 八戸工業大学.
- ⑧ 山田圭太郎: 再軟弱化した中期更新統の発見とその原因, 日本地球惑星科学連合, 2012 年 5 月 20 日～25 日, 幕張メッセ国際会議場.
- ⑨ 杉田公和: 塩濃度分布に基づく有明海北西岸低平地の堆積環境の変化に関する研究, 土木学会西部支部, 2012 年 3 月 3 日, 鹿児島大学.
- ⑩ 浪瀬智史: カオリン改良土に及ぼす溶存シリカ量の影響と初期強度発現過程における強度の変化, 土木学会西部支部, 2012 年 3 月 3 日, 鹿児島大学.
- ⑪ 松田昶浩: 生石灰改良による有明粘土・蓮池粘土の地盤内環境を考慮した強度変化, 土木学会西部支部, 2012 年 3 月 3 日, 鹿児島大学.
- ⑫ 島内明: 有明海沿岸低平地域における地下水の物理的・化学的モニタリングの動向, 地盤工学会, 2011 年 7 月 5 日～7 日, 神戸国際会議場.
- ⑬ 杉田公和: 佐賀低平地における完新統・上部更新統の塩濃度分布パターンに関する数値解析的検討, 地盤工学会, 2011 年 7 月 5 日～7 日, 神戸国際会議場.
- ⑭ 末吉聖次: 改良土の初期強度発現過程における強度・溶出特性の基礎的検討, 地盤工学会, 2011 年 7 月 5 日～7 日, 神戸国際会議場.
- ⑮ 日野剛徳: 地球温暖化が有明海沿岸低平地域における海成完新統の土構造と土質特性に及ぼす影響に関する一考察, 地盤工学会 2011 年 7 月 5 日～7 日, 神戸国際会議場.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 出願年月日:
 国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 取得年月日:
 国内外の別:

〔その他〕(計 1 件)

- ① 陶野郁雄, 中村裕昭, 日野剛徳: 近未来と地盤環境～複合的災害と地球環境に対する理学と工学の融合～, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム特別セッション講演・資料集, 地盤工学会, 日本大学文理学部, 38p, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日野 剛徳 (HINO, Takenori)
 佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・教授
 研究者番号: 20295033

(2) 研究分担者

柴 錦春 (CHAI, JinChun)
 佐賀大学・工学系研究科・教授
 研究者番号: 20284614

根上 武仁 (NEGAMI, Takehito)
 佐賀大学・工学系研究科・助教
 研究者番号: 30325592

加 瑞 (JIA, Rui)
 佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・研究機関研究員
 研究者番号: 60598845