

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07641

研究課題名(和文) 早期の地盤圧密沈下実測データに基づいた予測手法の開発と高精度化技術に関する研究

研究課題名(英文) Prediction of ground consolidation settlement based on measurement records and its high accuracy

研究代表者

金山 素平 (Kanayama, Motohei)

岩手大学・農学部・准教授

研究者番号：60398104

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸低平地帯に分布する軟弱地盤上に建設される盛土構造物は、地盤の高い圧縮性と低い透水性のため築造後も長期間にわたって沈下が継続することから、盛土構造物の圧密沈下は農業農村工学および地盤工学上の重要な問題である。本研究では、観測初期に限られた実測値に基づく圧密沈下予測法の構築を目的とし、ニューラルネットワークによる沈下予測手法を使用し盛土地盤沈下の予測を行い、モデルの改良と予測精度について検討した。ネットワークモデルに沈下速度の収束パターンを認識させ、許容規準を満たした予測値を再学習させることによって、モデルの予測精度は大幅に向上し、少ない観測数においても高い予測精度を有することが分かった。

研究成果の概要(英文)：Earth-fill structures such as embankments, which are constructed for the preservation of land and infrastructure, show significant amount of settlement during and after construction in lowland areas with soft grounds. In this paper, an artificial neural network model for settlement prediction is evaluated and improved using measurement records from domestic and overseas embankment. To improve the accuracy of settlement prediction, it is proposed to add short-term predicted values that satisfy predefined statistical criterion of low coefficient of variance to the teach data, after which the model is allowed to re-learn and re-predict the settlement. This procedure is repeated until all predicted values satisfy the criterion. Using the improved network model resulted in significantly better predictions. Predicted settlements were in good agreement with the measurements, even when only the measurements up to a consolidation stage of 35% were used as initial teach data.

研究分野：土質力学

キーワード：盛土構造物 動態観測 圧密沈下 予測精度 ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

わが国の長い歴史の中で、農地・農業用水等の資源は、多くの自治体および農家中心の地域の人々によって築かれ、管理され、農業生産において最も基礎的な資源であると認識されている。これら農地・農業用水等の資源は、技術的に適切に管理されることではじめて機能を十分に発揮するものである。その機能が損なわれると復旧は非常に困難であることから、常に良好な状態で維持管理していくことが望まれる。特に、2011年の東日本大震災において被災した東北地方の農地、農業用施設および農地海岸の復旧・復興は急務である。また、地域社会では、地域の農地・農業用水等の資源の水循環システムが形成する多面的機能の発揮や生物の多様性の確保が求められ、この希少性の資源を次世代に有効に引き継ぐことが重要である。

農地・農業用施設を保護するため軟弱地盤上に築造される海岸堤防などの盛土構造物の沈下は古くから学術・実務上の重要な問題であり、数多くの研究者および技術者によって幅広く研究されてきた。特に、沿岸低平地帯に分布する軟弱地盤上に建設される盛土構造物は、その高い圧縮性と低い透水性のため、建設後も長期間にわたって沈下が継続する。軟弱粘土地盤における既存構造物の沈下状況調査や沈下・土質データの収集・動態観測は重要であり、多くの場合、動態観測結果を利用した沈下予測に基づいた適切な沈下管理が行われる。軟弱地盤対策として、施工後の地盤の沈下量を抑制するため載荷盛土工法やサーチャージ工法が実施されるが、最終沈下量および残留沈下量の検討、時間的制約がある場合の盛土厚の決定、現場計測に基づいたプレロード期間の決定には十分に注意する必要がある。

青森、岩手、宮城、福島4県の沿岸地域は、東日本大震災によって発生した津波により甚大なる被害を受け、その被害は農地20,610ha、排水機場97機、農地海岸堤防113地区に及んだ(農林水産省東北農政局整備部, 2015)。現在、被災した農地、海岸堤防および防潮堤などの防災施設の復旧・築造が行われ、平成27年1月時点で被災農地の69%で営農再開が可能、93%の排水機場の復旧着手(復旧完了62機)、全ての農地海岸堤防の復旧着手(復旧完了26地区)となっている。これらの施設を建設し、管理維持することは、沿岸地域の人々の生活を保障する点で重要となることから、構造物築造後の観測データを利用しその動態を精度良く予測することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、農地・農業用水関連の資源の最適な保全・管理に向けて、研究成果として構築したニューラルネットワークモデルによる沈下予測手法を改良し、多種の盛土地盤沈下の予測を行い、このモデルの

再構築と予測精度の向上及び汎用性の究明である。本研究の内容は、ネットワークモデルの最適な学習方法の選定、使用するネットワークパラメータが予測精度に及ぼす影響、動態観測開始時から観測データ数が少ない場合の沈下予測精度の向上について検討することである。また、本モデルの予測値に対し理論的解法による逆解析を行うことによって、求まる土質パラメータの適用性を検証する。最終的には、現場予測技術の向上に資すること、現場管理の有効なツールとなることを目標とする。

3. 研究の方法

ニューラルネットワークとは、生体のニューロンを模擬した人工の素子を相互に接続して構成されるネットワークである。現在までに多くのモデルが提案されているが、本研究では、入力層、中間層、出力層から成る3層構造の階層型パーセプトロンモデルを用いた。階層型パーセプトロンモデルは非常に強いパターン認識能力を持ち、同モデルによる地盤の沈下予測はそのパターン認識能力を利用したものである。具体的には、既知の観測データを教師データとして重みを修正することによって、ネットワークは入力層から出力層への写像関係を認識することができる。そして、予測すべき値に対応する既知の入力値を与えることで、未知の出力値が推定できる。

本研究で用いるニューラルネットワークの入出力関係は、金山ら(2009)による沈下速度の収束に着目した入出力パターンを採用した。さらに、学習過程で用いる教師データは、入力規則の観点から、3次スプライン補間法を用いて等時間間隔へと補正を行い、分割数は20とした。その入出力関係の概要を示した図がFig.1である。最初に、学習過程 $i = 1 \sim 20$ において、ネットワークは経過時間 t_i とその時の沈下量 S_i から沈下速度 v_i を十分に学習する。次に、予測過程 $i = 21$ において、沈下速度 v_i を出力することによって、予測値 S_{i+1} は $S_{i+1} = S_i + v_i \Delta t$ として計算され、次の入力値として使用される。時間 t_{i+1} は、等時間間隔であることから、 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ のように更新される。また、予測値の変動係数 CV に基づく規準を設け、CV が 1.0% 未

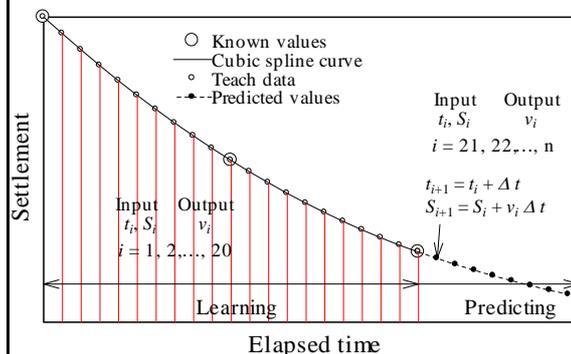


Fig.1 ネットワークモデルの学習過程と予測過程

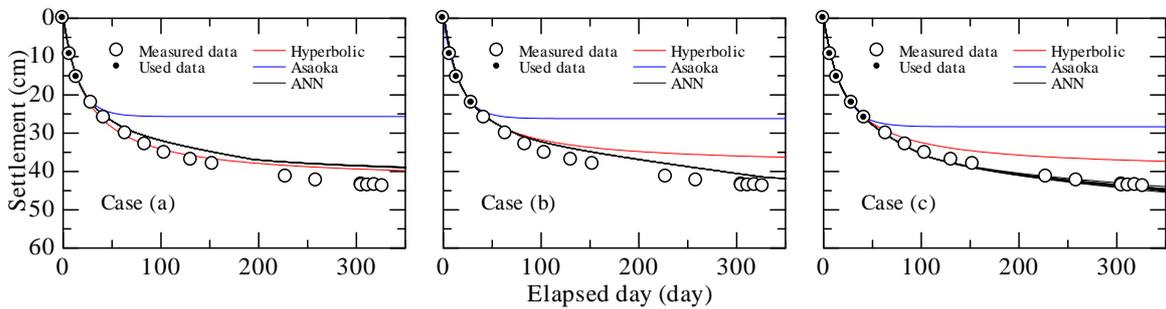


Fig.2 各手法による予測結果 Case(a), (b), (c)

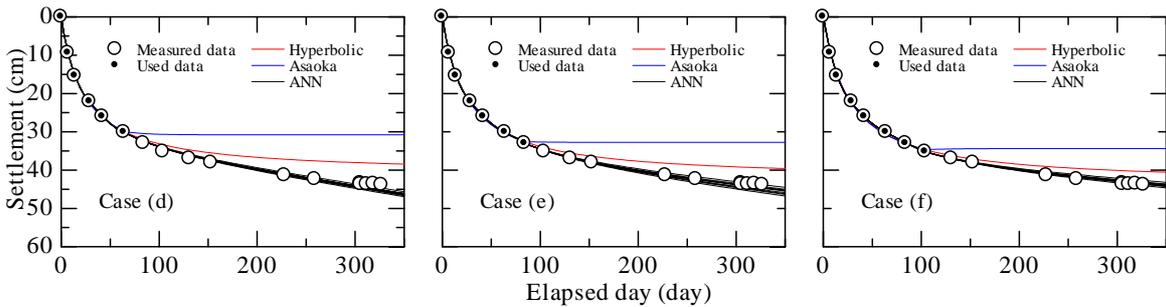


Fig.3 各手法による予測結果 Case(d), (e), (f)

満であれば学習データとして再学習することとした。最終的に、全ての予測値の規準パラメータが該当する規準を満たしたとき、予測値の計算を終了とした。なお、入力値と出力値は、入力値の最大値を使用し[0,1]に基準化して与えた。

以上の手段を用いて、ニューラルネットワークを用いた地盤の沈下予測の適用性とその予測精度の改善について検討した。本研究においては、ネットワーク中のパラメータに関して、gainを1.0、学習率を1.0、中間素子数を10と定め、計算の終了判定は学習回数に依存し、学習回数は10万回とした。なお、本研究において使用したプログラミング言語は、The Math Works社のMATLABである。

4. 研究成果

本研究で提案するニューラルネットワークモデルの地盤沈下予測への適用性とその予測精度を評価するため、(1)オランダ王国アムステルダム市近郊のブローエメンデルポルダーにて測定された試験盛土の沈下データを使用した。

さらに、(2)岩手県陸前高田市高田地区の嵩上げ区域において測定された盛土造成による沈下データを使用し、造成された高台中心部の地盤の沈下予測を行った。

(1) 実測値に基づいた地盤沈下予測手法の予測精度の検討

沈下予測を行った沈下データはオランダ、アムステルダム近郊のBloemendalerpolderにて測定されたものを使用した。試験盛土完成後の2011年2月17日から2012年1月10日までの327日のデータについて検討を行っている。予測に用いるデータの範囲が予測結果に及ぼす影響を検討するために、実測沈下量の最終値 S_f に対する各実測値 S_t の沈下量の比を沈下量比 $R (=S_t/S_f \times 100)$ と定義し、

Case (a) $R=35\%$, (b) 50% , (c) 60% , (d) 70% , (e) 75% , (f) 80% のデータを用いてそれぞれ沈下予測を行った。

本研究において使用した沈下予測手法は、双曲線法、浅岡法およびニューラルネットワークモデルを利用した方法(ANN法)の3つである。双曲線法は、盛土の沈下曲線が時間とともに双曲線的に減少するという経験に基づいて導かれた代表的な方法として知られ、国内外で多用されている。簡便でかつ高い予測精度を有することは既往の研究より明らかであるが、その精度を発揮するには十分な沈下データを必要とし、予測結果は初期値の設定に大きく依存する。浅岡法は、観測値の平滑化と欠測値の内挿を施した等間隔データに対して、前沈下量と現沈下量の直線関係式($Y=AX+B$, A :勾配, B :切片)を求め、 $Y=X$ の直線と交わる点の座標値($B/(1-A)$)を最終沈下量と定める方法である。浅岡法の沈下予測精度は、圧密度60%以上の沈下データに対して、双曲線法とほぼ同等であり、高い予測精度を有することが報告されている。ANN法については、Kanayama et al.が構築したニューラルネットワークモデルによる沈下予測手法を使用した。

Fig.2, 3は、盛土築造後の観測データCase(a)-(f)を使用して予測を行った結果であり、Table 1はその予測精度をまとめた表である。双曲線法においては、Case(a)において平均予測率(APR)が0.95、その変動係数(CV)が5.4%であったことから、予測精度が高いことが推察される。しかしながら、Case(a)の結果と比較して、Case(b)のAPRが減少、CVはやや増加したことから、Case(a)の結果については偶然の可能性があると考えられる。その後予測に使用するデータ数が増加するにともない、APRは増加、CVは減少を示したことから、予測精度が向上すること

Table 1 双曲線法，浅岡法および ANN 法の予測精度

Case	Hyperbolic method			Asaoka method			ANN method		
	Number of Predicted Data	Total Average Prediction Ratio	CV of Average Prediction Ratio	Number of Predicted Data	Total Average Prediction Ratio	CV of Average Prediction Ratio	Number of Predicted Data	Total Average Prediction Ratio	CV of Average Prediction Ratio
(a)	14	0.95	5.4%	14	0.70	19.3%	140	0.92	4.1%
(b)	13	0.88	6.3%	13	0.69	16.3%	130	0.94	1.9%
(c)	12	0.89	5.1%	12	0.72	12.8%	120	1.01	0.9%
(d)	11	0.90	4.0%	11	0.77	10.3%	110	1.00	2.4%
(e)	10	0.92	3.1%	10	0.80	8.4%	100	1.01	1.5%
(f)	9	0.94	2.5%	9	0.82	6.8%	90	0.99	0.9%

が分かる。浅岡法においては、使用したデータの近傍の実測値と良い一致を示したが、それ以降の実測値と比較して予測値は過小評価する傾向にある。この原因として、一つは本研究において内挿を施した等時間間隔を 1 日としたことである。二つ目は、前沈下量を独立変数、現沈下量を従属変数とした場合、比較的初期の沈下データと後期の沈下データの間には直線関係が成り立たないためである。最適な等時間間隔を決定することによって予測精度の向上が期待される。ANN 法については、Case (a) の時点から予測値が実測値とほぼ同じ値を示し、APR は 1 に近く、CV が最も小さい値を示した。この方法は沈下速度の収束に着目し、そのパターンを認識させ、規準を満たした予測値を再学習させる方法である。沈下予測結果から判断すれば、任意の沈下速度に収束するという規則性と明確な再学習規準に基づいた予測手法が有効であることが分かる。

以上の結果から、ANN 法、双曲線法ともに高い予測精度を有し、中でも ANN 法は平均予測率が 0.92~1.01、その変動係数が 0.9~4.1%であったことから、3 つの予測手法の中で最も高い予測精度を示した。浅岡法については、実測値と比較して予測値は過小評価する傾向にあった。ネットワークモデルに沈下速度の収束パターンを認識させ、許容規準を満たした予測値を再学習させることによって、モデルの予測精度は大幅に向上し、少ない観測数においても高い予測精度を有することが分かった。

(2) 地盤の圧密沈下実測データに基づいた将来予測とその高精度化

本研究で提案するニューラルネットワークモデルの地盤沈下予測への適用性とその予測精度を評価するため、岩手県陸前高田市高田地区の嵩上げ区域において測定された盛土造成による沈下データを使用した。東日本大震災から 6 年が経過した現在、大津波で甚大な被害を受けた岩手県陸前高田市の沿岸部では最大で 12m の盛土嵩上げ工事が行われ、嵩上げ地の中心部に一部の商業施設が開業している。今後の街づくりに期待がよせられる中、嵩上げ盛土の建設・管理・維持は、人々の様々な活動を保障する意味において重要となる。

Fig.4 は、陸前高田市高田地区の嵩上げ区域に設置された沈下板の位置図(都市再生機

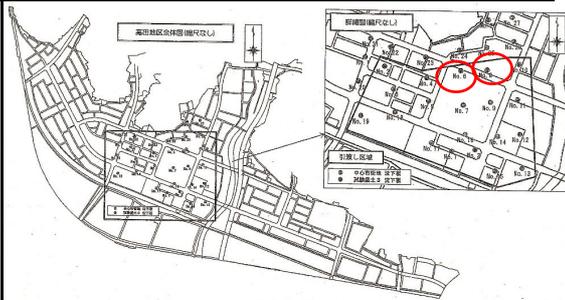


Fig.4 陸前高田市高田地区 沈下板位置図 (都市再生機構, 2016)

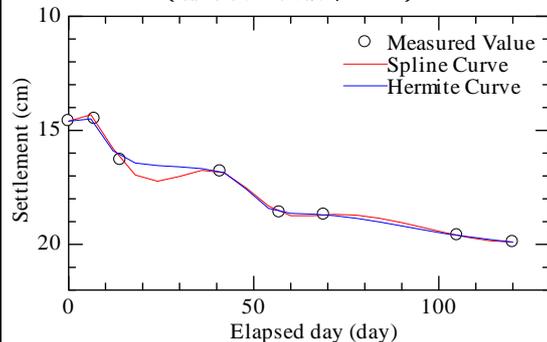


Fig.5 補間方法の違いが推定値に及ぼす影響

構, 2016) である。設置された沈下板は 20 箇所である。本研究において地盤の沈下予測に使用したデータは、沈下板 No.4 と沈下板 No.6 にて計測された観測値である。No.4 は 2014 年 12 月 10 日から 2015 年 9 月 24 日 No.6 は 2014 年 10 月 16 日から 2015 年 9 月 9 日の期間に地盤標高の計測が行われた。No.4 と No.6 の盛土厚はそれぞれ 8.4m と 6.8m となるよう盛り立てられた。最終的に計測された地盤の沈下量は、No.4 において 0.199 m、No.6 において 0.480 m であった。ニューラルネットワークによる沈下予測に用いたデータは、最大盛土厚に達した後のデータである。

本研究で用いた実測値は不規則に変動している。この変動は、現場計測における誤差に由来するものと考えられる。ニューラルネットワークモデルを用いた地盤沈下予測において、学習に用いる教師データの規則性がその予測精度に影響を及ぼすことが分かっている。学習データの規則性を向上させるため、2 種類の補間法を用いて等時間間隔データを作成した。Fig.5 は補間法の違いを示した図である。両補間法から算出された値は、データが平滑ではない場合、その違いが明らかになっている。エルミート補間法による値は、データが平滑ではない場合、オーバーシュートが生じず振動が少なくなっており、ス

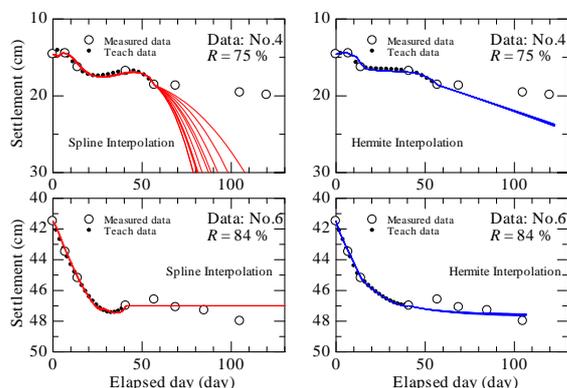


Fig.6 地盤の沈下量予測精度の検討

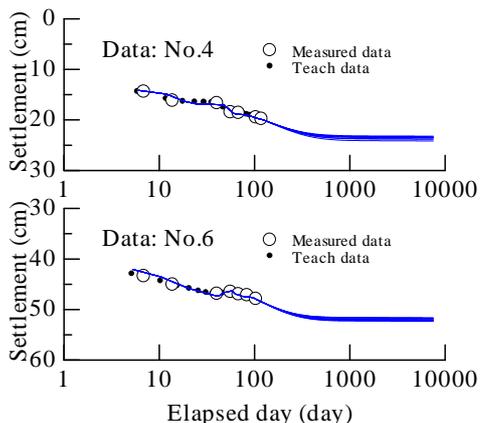


Fig.7 地盤沈下量の将来予測

プライン補間法の値と比べて地盤の沈下挙動をより適切に表現していることが分かる。

ニューラルネットワークを使用した地盤の沈下量予測精度の検討を Fig.6 に示す。沈下板 No.4 においては沈下量比 $R = 75\%$, No.6 においては $R = 84\%$ までのデータを教師データとして使用した。No.4 において、実測値の補間方法の違いによって予測値と実測値が大きく異なることが分かる。エルミート補間法を使用した場合、沈下量を過大評価する傾向にあるが、地盤の沈下挙動を再現していることが分かる。一方、スプライン補間法を使用した場合、予測値は実測値と一致せず、適切な地盤の沈下挙動を再現しているとは認められない。

最後に、エルミート補間法を採用したデータを使用しネットワークモデルに学習を行わせ、盛土築造後から 10 年 (2025 年) および 20 年 (2035 年) 経過した地盤沈下の将来予測結果を Fig.7 に示す。なお、この予測は 2015 年の実測データに基づくものであり、最終観測日以降の盛土地盤状況の変化は考慮されていない。最大盛土厚に達したときの地盤の沈下量は、No.4 において 14.6 cm, No.6 において 41.5 cm であった。これに対して本モデルによって予測した 10 年、20 年後の地盤沈下量は、No.4 ではそれぞれ 23.5 cm, 23.6 cm, No.6 ではそれぞれ 51.9 cm, 52.0 cm と算出された。計測された沈下量と比較すると、約 10 cm ほど地盤の沈下が進むと予想される。現場の動態観測に基づく沈下予測手法としては、双曲線法や星埜法、門田法、浅岡

法等が挙げられる。これらの中で、双曲線法は代表的な方法として知られ、国内外で多用されている。双曲線法による予測では、No.4 において 22.5 cm, No.6 において 49.0 cm となった。本モデルの予測値と比較すると過小ではあるが、概ね等しい値となっていることが分かる。今後の継続的な観測と十分な検証が望まれる。

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 7 件)

1. 中村哉仁, 金泉友也, 金山素平: 地盤の圧密沈下実測データに基づいた予測とその高精度化, 陸前高田グローバルキャンパス大学シンポジウム 2018 要旨集, 査読無, 89-92, 2018
2. 金山素平, 工藤基, 藤井芽衣: カキ殻を用いた土の固化処理に関する研究, 農業農村工学会論文集, 査読有, 85(2), 1_137-1_143, 2017
3. Kanayama, M., Fujii, M., Kudo, M., Kawamura, S. and Nakamura, K.: Study on solidification treatment of soil using waste oyster shell, Proceedings Sardinia 2017, 査読有, Paper No.642, 1-10, 2017
4. Kawamura, S., Kanayama, M., Yamazaki R. and Yuge, K.: Study on engineering properties of bamboo fiber mixed soil, Proceedings Sardinia 2017, 査読有, Paper No.641, 1-9, 2017
5. 金山素平, 藤井芽衣, 工藤基: カキ殻を用いた土の固化処理技術に関する研究, 陸前高田グローバルキャンパス大学シンポジウム 2017 要旨集, 査読無, 29-32, 2017
6. 金山素平: 実測値を用いた地盤圧密沈下予測手法の予測精度の検討, 土地改良の測量と設計, 査読無, 84, 14-20, 2016
7. Kanayama, M.: Soil Environmental Issues on Agricultural Land: Development and Maintenance, Thrid Myanmar-Japan International Symposium, 査読無, 55-56, 2016

[学会発表](計 18 件)

1. 中村哉仁, 金泉友也, 金山素平: 地盤の圧密沈下実測データに基づいた予測とその高精度化, 陸前高田グローバルキャンパス大学シンポジウム 2018, 2018 年 3 月 3 日, 岩手県陸前高田市。
2. 中村哉仁, 金泉友也, 金山素平: レオロジーモデルを用いた粘土の圧密沈下挙動の検討. 農業農村工学会東北支部第 59 回研究発表会, 2017 年 11 月 9 日, 岩手県盛岡市
3. 川村智子, 金山素平, 山崎瑠華, 弓削こ

- ずえ：竹繊維を混合した土の力学的性質に関する研究，農業農村工学会東北支部第59回研究発表会，2017年11月9日，岩手県盛岡市
4. 金山素平，進藤あきほ，八矢園子：廃棄物を利用した土の固化処理に関する研究，農業農村工学会東北支部第59回研究発表会，2017年11月9日，岩手県盛岡市
 5. Kanayama, M.，Fujii, M.，Kudo, M.，Kawamura, S. and Nakamura, K.：Study on solidification treatment of soil using waste oyster shell, Proceedings Sardinia 2017 / 16th International Waste Management and Landfill Symposium, 2-5 October, 2017, Forte Village, S. Margherita di Pula, Italy.
 6. Kawamura, S.，Kanayama, M.，Yamazaki R. and Yuge, K.：Study on engineering properties of bamboo fiber mixed soil, Proceedings Sardinia 2017 / 16th International Waste Management and Landfill Symposium, 2-5 October, 2017, Forte Village, S. Margherita di Pula, Italy.
 7. 川村智子，金山素平，山崎瑠華，弓削こずえ：竹繊維混合土の工学的性質に関する研究，平成29年度農業農村工学会大会講演会，2017年8月29日-9月1日，神奈川県藤沢市
 8. 金山素平，藤井芽衣，工藤基，進藤あきほ，八矢園子：カキ殻を用いた土の固化処理技術に関する研究，平成29年度農業農村工学会大会講演会，2017年8月29日-9月1日，神奈川県藤沢市
 9. 中村哉仁，金泉友也，金山素平：レオロジーモデルを用いた粘土の圧密沈下挙動の検討，平成29年度農業農村工学会大会講演会，2017年8月29日-9月1日，神奈川県藤沢市
 10. 金山素平：竹繊維を混合した土の工学的性質に関する研究，竹利用フェスティバル2017公開シンポジウム，2017年3月12日，鳥取県鳥取市
 11. 金山素平，藤井芽衣，工藤基：カキ殻を用いた土の固化処理技術に関する研究，陸前高田グローバルキャンパス大学シンポジウム2017，2017年1月21日，岩手県陸前高田市
 12. Kanayama, M.：Soil Environmental Issues on Agricultural Land: Development and Maintenance, Third Myanmar-Japan International Symposium, 3-4 December, 2016, Patheingyi University, Patheingyi, Ayeyarwady Region, Myanmar
 13. 川村智子，山崎瑠華，金山素平，弓削こずえ：竹チップ混合土の工学的性質に関する研究，平成28年度農業農村工学会大会講演会，2016年8月29日-9月1日，宮城県仙台市
 14. 加藤凱，中村哉仁，金山素平：実測値に
- 基づいた地盤沈下予測手法の予測精度の検討，平成28年度農業農村工学会大会講演会，2016年8月29日-9月1日，宮城県仙台市
15. 工藤基，藤井芽衣，金山素平：カキ殻を用いた土の固化処理技術に関する研究，平成28年度農業農村工学会大会講演会，2016年8月29日-9月1日，宮城県仙台市
 16. 嘉本晃子，金山素平：Micro-Indenterを用いたカオリン粘土に生じる微小力学的挙動の定量的評価，平成28年度農業農村工学会大会講演会，2016年8月29日-9月1日，宮城県仙台市
 17. 金山素平：地盤の圧密変形と実測値に基づいた沈下予測手法，平成28年度農業土木技術管理土研修会，2016年7月5日，秋田県秋田市
 18. 金山素平，加藤凱：実測値に基づいた地盤沈下予測手法の予測精度の検討，農業農村工学会東北支部第58回研究発表会，2015年10月26日-27日，福島県福島市
- 〔その他〕
- ホームページ等
岩手大学-研究者情報
http://univdb.iwate-u.ac.jp/profile.php?ISTActId=SCHKOB0010R1ni001&userId=781&lang_kbn=0
- 研究室情報
<http://www.agr.iwate-u.ac.jp/lab/%E5%9C%9F%E7%92%B0%E5%A2%83%E5%B7%A5%E5%AD%A6%E7%A0%94%E7%A9%B6%E5%AE%A4/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
金山 素平 (KANAYAMA, Motohei)
岩手大学・農学部・准教授
研究者番号：60398104