

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06207

研究課題名(和文) 盛土を併用した真空圧密を受ける泥炭の強度および剛性の発現過程の解明に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Process of Strength and Stiffness development of Peat under Vacuum Consolidation with Fill Loading

研究代表者

荻野 俊寛 (OGINO, Toshihiro)

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80312693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：盛土併用真空圧密下にある泥炭の応力状態を三軸試験装置内で模擬し、盛土併用真空圧密中の泥炭の非排水強度および剛性の発現過程について検討した。盛土併用真空圧密によって非排水強度は著しく増加したが、盛土載荷速度が大きい場合、発生する過剰間隙水圧によって一時的に非排水強度が減少する可能性が示唆された。このような非排水強度の発現は実務で用いられる強度推定式から求められる強度増加とは異なるものであった。剛性の発現にも同様の挙動が確認された。載荷後の剛性はおおむね圧密応力増分に対応して増加するが、急速な盛土載荷を行うと、過剰間隙水圧によって応力比が減少し、地盤の剛性が一時的に減少する可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the authors carried out a series of triaxial tests that simulate the vacuum consolidation with fill loading in order to investigate deformation behavior and change in the shear modulus and undrained shear strength during the loading. The undrained strength is significantly improved by the vacuum and axial stress loading, however, it temporarily drops when the loading rate of axial stress is rapid because the excess pore water pressure makes the stress state approach the critical state line. Similar behavior was observed in shear modulus. Although the shear modulus after the combined loading is improved according to applied consolidation stress, the change in shear modulus before that is strongly affected by the loading rate of axial stress. Since axial stress loading leads to development of excess pore water pressure, and thence decrease of stress ratio according to the loading rate, it declines during the axial stress loading, in particular, in rapid loading.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥炭 剛性 非排水強度 真空圧密 せん断弾性係数 変形特性

1. 研究開始当初の背景

すべり破壊の危険が少なく、比較的小さな設備で大きな圧密効果が期待できる真空圧密工法は近年、気密シートやドレーン材の改良によって真空度の維持が容易になったことで見直され、施工事例が急速に伸びている。特に、大きな変形が起きやすい泥炭地盤では真空圧によるすべり変形の抑制効果が顕著であることから、近年道路盛土等に積極的に取り入れられ、施工実績を伸ばしている。

真空圧密工法はさらなる圧密促進や側方変形を抑制する観点から盛土荷重と併用して用いられることが多い(図1)。このような盛土を併用した真空圧密において、刻一刻と変化する施工中の地盤の強度や剛性の増加を連続的に把握することは、地盤変形のコントロールだけでなく、盛土の安全施工の観点からもきわめて重要であるが、実施工中の地盤の強度や剛性の増加を直接知ることは容易ではない。現在のところ、その推定は間隙水圧測定と動態観測に頼るしかないが、盛土荷重(正圧)と真空圧(負圧)の複合的な荷重を受ける地盤は、符号の異なる過剰間隙水圧の重ね合わせによって有効応力状態が複雑に変化する。このような施工では地盤の強度増加が間隙水圧から得られた有効応力の増加と必ずしも対応しないという報告事例も見られ、申請者が示した最適な荷重条件下はもとより、真空圧および盛土荷重の複合的な荷重過程でどのように強度や剛性が変化するのかはほとんど明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究は、このような背景をふまえ、申請

者がこれまでに示した真空圧と盛土の最適な荷重条件下において、真空圧および盛土荷重によって複合的・連続的に有効応力変化を受ける泥炭の強度がどのような変化を辿って最終的な強度発現に至るのかを室内三軸試験および室内弾性波試験から明らかにしようとするものである。また強度と弾性波速度の相関から、盛土を併用した真空圧密において、地盤の強度や剛性の発現とS波速度の関係を明らかにすることを目的としている。具体的には、本研究の研究目標は以下ようになる。

- ・盛土併用真空圧密工法を模擬した室内三軸試験を実施し、盛土荷重と真空圧を複合的に受ける泥炭の強度の発現過程を明らかにする。
- ・上記試験中、連続的にS波速度を測定することにより、強度に加え、剛性の発現過程も明らかにする。
- ・真空圧および盛土荷重を複合的に受ける土の強度とS波速度の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 盛土併用真空圧密を模擬した三軸試験

上記の目的を達成するため、盛土荷重を併用した真空圧密を模擬した三軸試験を実施した。実験には東北地方で採取した不攪乱泥炭試料を用いた。試料は直径70mmの塩ビ管を地表面下0.5~1mに堆積した泥炭層に貫入して採取した。実験には塩ビ管から抜き出した試料の上下端面のみを高さ約150mmに整形し、供試体として用いた。試料の物性値は自然含水比807%、土粒子密度1.66g/cm³、強熱減量74%である。

図1は盛土併用真空圧密工法とそれを模擬

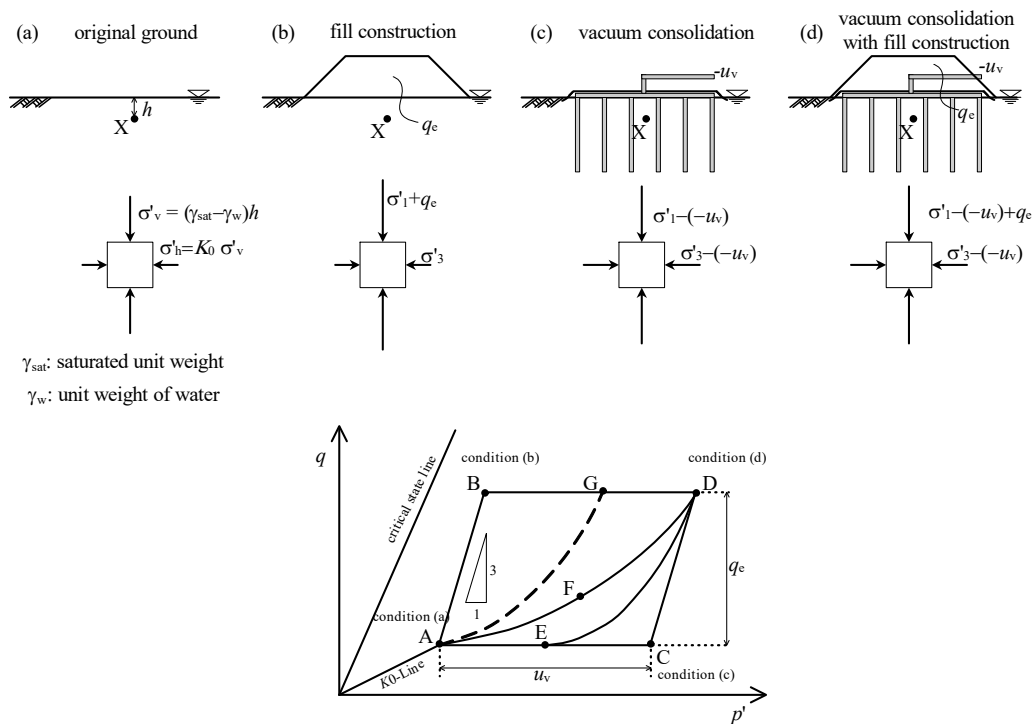


図1 各工法の模式図と想定した地盤内要素の応力状態および応力経路

表 2 実験条件

Test name	Stress path	Vacuum pressure u_v (kPa)	Rate of vacuum pressure loading du/dt (kPa/min)	Axial stress q_c (kPa)	Rate of axial stress loading dq/dt (kPa/min)	Pore water pressure at the start of fill loading u_a (kPa)
Test-Y1	AI	-	-	-	-	-
Test-Y2	AEJ			-	-	-
Test-Y3	ANAL			-	-	-
Test-Y4	AEGDK					
Test-Y5	AEJK					
Test-Y6	AEFM	80	0.1		0.1	
Test-Y7	AEDCK					
Test-Y8	AEHBDCK			120		40
Test-Y9	AEHL					
Test-Y10	AEHBM				0.5	
Test-Y11	AEHBDK					

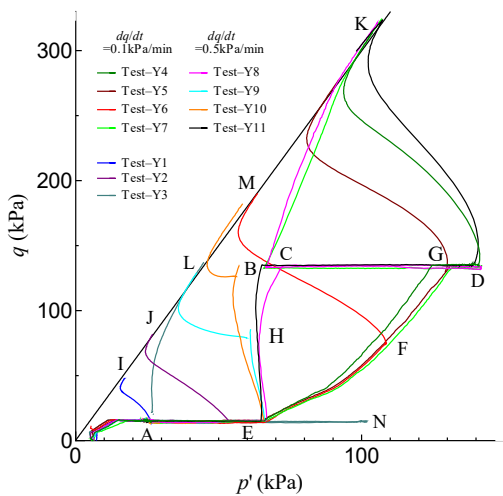


図 2 すべての実験の有効応力経路

した三軸シミュレーション実験の応力経路の模式図である。初期状態である原地盤(状態(a))において、点 X の応力状態は図中の要素によって示される。この地盤に荷重 q_e の盛土が築造されるとその状態は(b)のようになり、点 X の鉛直方向の応力状態は σ_1 から $\sigma_1 + q_e$ へと変化する。この時の応力経路は図中の経路 AB に対応する。盛土荷重の荷重速度が過剰間隙水圧の消散速度に比べて小さい場合は経路 AB は有効応力経路に等しくなる。次に、原地盤を真空圧密工法によって改良した場合は状態(c)のようになり、地盤内の間隙水圧は荷重した負圧 u_v と等しい分だけ減少し、全応力に変化が生じないため、点 X の有効応力状態は σ_1 から $\sigma_1 - (-u_v)$ へ、 σ_3 から $\sigma_3 - (-u_v)$ へと変化する。このときの有効応力経路は経路 AC で表される。

盛土荷重および真空圧の両方が作用した場合、応力状態は状態(d)となる。初期状態から状態(d)に至るまでの応力経路は盛土荷重開始の時期によって異なる。例えば、真空圧が完全に作用した後に盛土荷重を行った場合は経路 ACD となり、真空圧と盛土荷重を同時に開始した場合は経路 AFD となる。経路 AED は真空圧荷重の途中で盛土荷重を行った場合に相

当し、実務における荷重条件はこの経路に近い。また、応力経路は盛土荷重の荷重速度にも依存する。盛土荷重速度が大きいほど荷重中に大きな過剰間隙水圧が発生するため、経路はより破壊線に近づく。例えば、真空圧と盛土荷重を同時に開始した場合、盛土荷重速度が大きいほど経路は経路 AGD のようになる。

本研究では、このような盛土および真空圧による複合的な荷重を受ける応力経路のうち、盛土荷重の荷重時期については実務での荷重条件に近いことから、点 E で開始し、荷重速度を変化させた、2 とおりの応力経路、すなわち経路 AEFGD および経路 AEHBD を模擬した。表 2 には実施したすべての実験の実験条件をまとめており、図 2 はその応力経路を示している。原位置の応力状態(状態(a))は $\sigma_1 = 40\text{kPa}$, $\sigma_3 = 24\text{kPa}$ とし、真空圧は $u_v = -80\text{kPa}$, 盛土荷重は一般的な盛土荷重を想定して $p_e = 120\text{kPa}$ とした。同様の経路を辿る実験を複数回実施し、強度の発現を確かめるため、荷重完了時、あるいは荷重途中でせん断試験を実施した。

(2) ベンダーエレメント試験

実験に用いた三軸試験装置のトップキャップおよびペDESTALにはベンダーエレメント(BE)が組込まれており、真空圧および盛土荷重の荷重中に断続的に BE 試験を実施してせん断弾性係数を求めた。せん断弾性係数 G の変化から荷重中の剛性の発現をトレースすることができる。 G は以下の式から求められる。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ は土の密度、 V_s は BE 試験から得られる S 波速度である。

4. 研究成果

(1) 非排水強度の発現

図 3 は 2 つの応力経路 AEFGD および AEHBD における非排水強度の変化を示している。経路 AEFGD(図 3a)では軸応力荷重が進むにつれ、強度が増加しており、軸応力荷重中、非排水強度が常に増加しているが、経路 AEHBD(図 3b)では軸応力荷重中、点 E から点

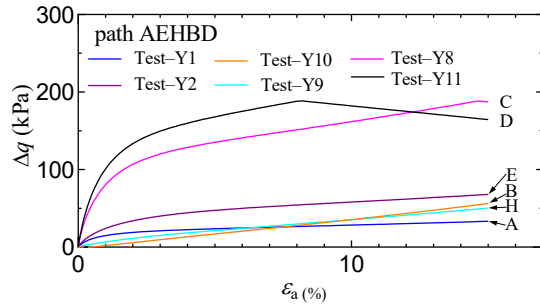
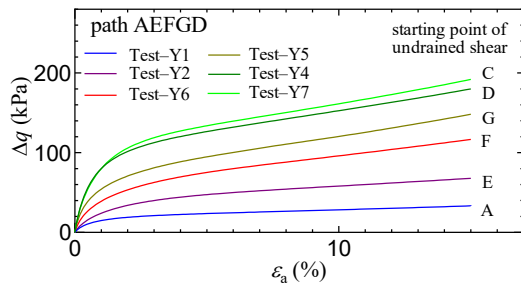


図3 非排水強度発現の差違 (a): 経路 AEFGD, (b): 経路 AEHBD

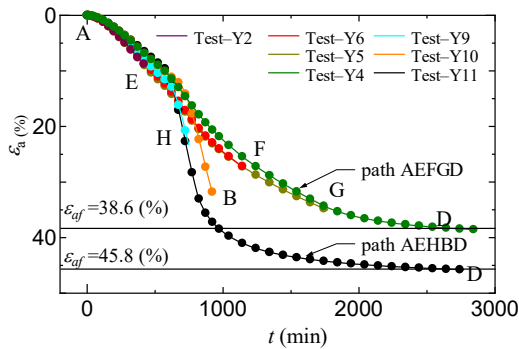


図4 真空圧および軸応力载荷中の軸ひずみ

H および点 B にかけて、一時的に非排水強度が低下していることがわかる。その後、軸応力载荷が完了し、圧密が進むと強度は増加し、点 D における非排水強度は 188kPa となっている。これは経路 AEFGD で载荷した場合の点 D における非排水強度とほぼ等しい。

実務において真空圧密併用盛土のすべりに対する安定を検討する場合、原地盤の非排水強度 s_u は下式によって評価される。

$$s_u = s_{u0} + m\Delta pU \quad (2)$$

ここに、 s_{u0} は原地盤の非排水せん断強さ、 m は非排水強度増加率、 Δp は地盤内の増加応力、 U は圧密度を表す。図4はそれぞれの経路における真空圧および軸応力载荷中の軸ひずみを示している。各経路の漸近値から圧密によって生じる最終軸ひずみが得られ、圧密度 U を計算することができる。図4から得られた U を用い、それぞれの経路について、 U と s_u の関係を図5に示している。経路 AEFGD では、非排水強度はほぼ直線的に増加している。その傾きはおよそ 0.59 であり、 m をおよそ 0.3 とした場合、式(2)によって非排水強度が適切に評価されることがわかる。ところが、軸応力载荷速度が大きい経路 AEHBD では点 H、点 B における一時的な非排水強度の落ち込みやその後増加する非排水強度の挙動と式(2)は一致せず、点 H、点 B では軸応力载荷中の強度を過大評価することになる。

(2) 剛性の発現

図6は応力経路 AEFGD および AEHBD における剛性の変化を示している。真空圧および軸応力の複合的な载荷によって、剛性は著

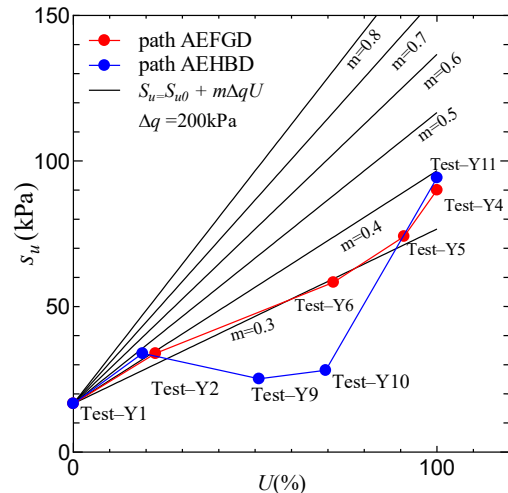


図5 圧密進行に伴う非排水強度増加

しい増加を示しており、点 D におけるせん断弾性係数の値は経路によってほとんど差は見られない。しかしながら点 D に至るまでの G の変化は経路によって大きく異なっており、経路 AEFGD(図6a)ではすべての実験で軸応力载荷にともなって G がほぼ直線的に増加しているのに対し、経路 AEHBD(図6b)では軸応力载荷直後(点 E)から剛性がほぼ変わらず载荷終了直後(点 B)から急激に大きくなっている。

図中に示す直線は申請者らによる正規圧密された秋田泥炭の実験式である。一般に、圧密応力比 $K(= \sigma_3' / \sigma_1')$ が小さいほど、直線は下方にシフトし、同一の軸応力 σ_1' に対しては K が小さいほど、すなわち側方応力 σ_3' が減少するほど G も減少する。図7は真空圧および軸応力载荷中の応力比 K の変化を示している。 K の値は大きく変化しており、真空圧のみ载荷中は応力の等方的な増加とともに増加し(AE間)、その後、軸応力载荷に伴って減少している(ED間)。特に、载荷速度が大きい経路 AEHBD では点 B で K 値が一度大きく落ち込んでいる。

図6中に示す太実線はこの K 値の変化を考慮して実験式から計算した Test-Y7 および Test-Y8 の G の挙動の計算値である。計算値は全体的にやや誇張されているものの、定性的には実験値の挙動を捕らえている。計算値と実験値の差違は、試料の種類の違い、载荷中と

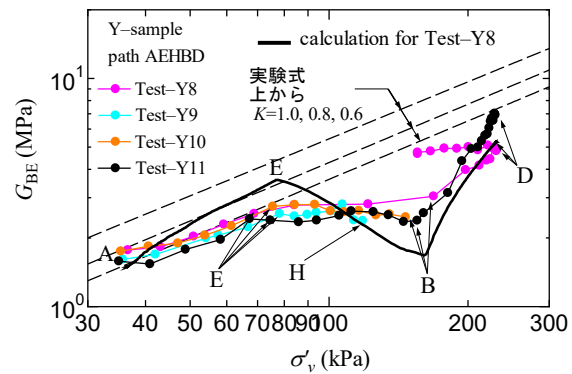
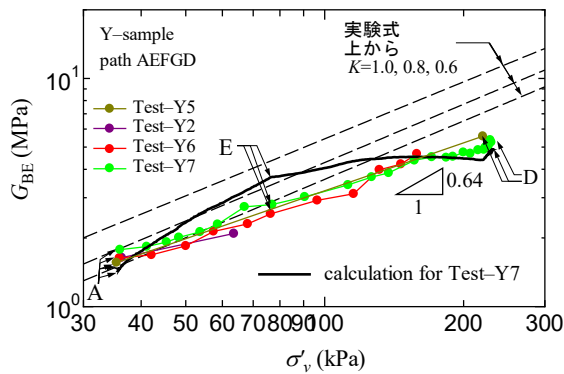


図6 剛性発現の差違 (a): 経路 AEFGD, (b): 経路 AEHBD

一次圧密終了時の間隙比の違い(粘性の影響), 部分排水による供試体内部の応力状態や密度の不均一によるものと考えられる。

実験データと計算値にはいくぶんの差違が見られるものの, これらの結果は真空圧および軸応力の複合的な荷重が通常の圧密時のような単調増加とは異なる G の挙動を引き起こすことを示しており, 実際の盛土併用真空圧密の施工では地盤の剛性増加の停滞や一時的な減少の可能性を示唆している。

(3) 研究成果の総括および今後の展望

盛土併用真空圧密下にある泥炭の応力状態を真空圧を背圧の減少, 盛土荷重を軸応力荷重として三軸試験装置内で模擬した。実際の施工を念頭に, 盛土荷重を緩速, 急速とした二つの代表的な実験条件を設定し, 盛土併用真空圧密中の泥炭の非排水強度および剛性の発現過程について検討した。

盛土併用真空圧密によって非排水強度は著しく増加した。しかし, 盛土荷重速度が大きい場合, 発生する過剰間隙水圧によって一時的に非排水強度が減少する可能性が示唆された。このような非排水強度の発現は実務で用いられる強度推定式から求められる強度増加とは異なるものであった。

剛性の発現にも同様の挙動が確認された。荷重後の剛性はおおむね圧密応力増分に対応して増加するが, 荷重中の剛性の変化は軸応力荷重速度に依存した。このことから, 急速な盛土荷重を行うと, 過剰間隙水圧によって応力比が減少し, 地盤の剛性が一時的に減少する可能性が示唆された。

また, 一連の研究成果から, 堆積環境に起因する泥炭の著しい構造異方性や粘性の影響が変形・強度特性に及ぼす影響が浮き彫りになった。2017年以降, 泥炭の構造異方性や粘性に着目した研究にも着手している。

【参考文献】

- 1) 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川洋, 三田地利之, 対馬雅己; “ベンダーエレメント試験および繰返し荷重試験による泥炭のせん断弾性係数”, 地盤工学ジャーナル Vol. 4, No. 1, 125-13

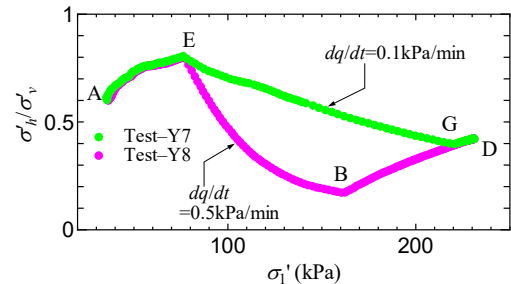


図7 真空圧および軸応力荷重中の応力比 K の変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) 荻野 俊寛, 山添 誠隆, 三田地 利之, 林 宏親, 高橋 貴之: 真空圧および盛土荷重による複合的な荷重を受ける泥炭の変形挙動—三軸試験によるシミュレーション—, 地盤工学ジャーナル, 査読有, Vol. 12, No. 2, (2017), 263-275.
- (2) Toshihiro Ogino, Nobutaka Yamazoe, Takayuki Takahashi, Masaki Tsushima: Strength and deformation characteristics of peat evaluated by triaxial tests simulating vacuum consolidation with fill loading, Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development – Geotech Hanoi 2016 –, 査読なし, (2016), 683-690.

[学会発表] (計 7 件)

- (1) 畑下 侑輝, 荻野 俊寛, 山添 誠隆, 田口 岳志: 泥炭の変形係数におよぼす荷重速度の影響, 地盤工学会全国大会, (2018年7月26日, 高松市)
- (2) 吉濱 佳太, 畑下 侑輝, 荻野 俊寛, 山添 誠隆, 田口 岳志: 泥炭の変形係数におよぼす荷重速度の影響, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2018年3月3日, 郡山市)
- (3) 佐々木 雄登, 荻野 俊寛, 田口 岳志: 大ひびき域における泥炭の異方性, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2018年3月3日, 郡山市)
- (4) 菅原 慎哉, 荻野 俊寛, 田口 岳志: 微小

- ひずみ域における泥炭の異方性, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2018年3月3日, 郡山市)
- (5) 畑下 侑輝, 荻野 俊寛, 高橋 貴之, 山添 誠隆: 三軸繰返しおよび室内弾性波試験による微小ひずみ域での泥炭の変形特性, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2017年3月4日, 仙台市)
- (6) 御手洗 匠, 荻野 俊寛, 柳田 陽平, 高橋 貴之: 盛土併用真空圧密中の泥炭の非排水せん断強度におよぼす載荷条件の影響, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2016年3月5日, 盛岡市)
- (7) 遠藤 紗江, 荻野 俊寛, 柳田 陽平, 高橋 貴之: 盛土併用真空圧密下の泥炭のせん断弾性係数におよぼす載荷条件の影響, 土木学会東北支部技術研究発表会, (2016年3月5日, 盛岡市)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
荻野 俊寛 (OGINO, Toshihiro)
秋田大学・大学院理工学研究科
・准教授
研究者番号 : 80312693