

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560657

研究課題名(和文) 光沢度計を用いたスケーリング評価に基づくコンクリートの凍害劣化診断・補修技術

研究課題名(英文) Inspection and repair methods on frost damage of concrete based on evaluation of scaling using gloss meter

研究代表者

長谷川 拓哉 (HASEGAWA, Takuya)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30360465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、コンクリートのスケーリングをはじめとする凍害劣化を対象として、光沢度計を用いた表面粗さ推定によるスケーリング量・深さの推定値から、凍害劣化の進行予測を行い、その劣化状況、適切な補修技術の選定を行う技術を開発することを目的とした。光沢度計を用いたスケーリング測定手法について、適用範囲についての検討を行い、光沢度から質量減少量を推定する予測式を提案した。また、スケーリングの劣化進行予測として、影響要因の分析に基づき予測式の提案を行った。さらに、適切な補修方法について検討を行うとともに、実構造物を対象として提案手法の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we dealt with frost damage of concrete such as scaling, and investigated the inspection and repair methods on frost damage of concrete based on evaluation of scaling using gloss meter with thin aluminum foil. It was obtained surface roughness from the glossiness, and estimated a amount of scaling from the surface roughness. According to the results, we proposed the equation for estimation of concrete weight loss from glossiness, and also proposed the equation for progress prediction of scaling based on results of experiments. We studied appropriate repair methods for deteriorated concrete and carried out field survey of actual structures located in cold region for verification of our proposed methods. The survey results showed that the state of scaling measured by the proposed method matched the results by the RILEM standard method based on visual observation.

研究分野：建築学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：凍害 コンクリート スケーリング 光沢度

1. 研究開始当初の背景

近年、北海道などの寒冷地では、凍結融解作用と融雪剤の影響によるコンクリートのスケールが問題となっている。スケールを生じると、構造物の美観を損ねるとともに、劣化因子の浸透が早くなるなど耐久性に大きな影響を与えると考えられ、寒冷地におけるコンクリート系構造物の維持管理を考える上で、その対策は重要な課題と考えられる。しかし、スケールに対して、調査・診断方法および補修方法が確立していないのが現状である。調査・診断方法に関しては、スケールを簡便に、かつ定量的に測定できる方法が求められている。また、スケールの劣化予測手法についても確立されておらず、スケールを含めた凍害劣化予測手法が求められている。さらに、補修に関しては、凍害劣化を対象として、適切な調査・診断に基づく補修技術の選定方法が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリートのスケールをはじめとする凍害劣化を対象として、光沢度計を用いた表面粗さ推定によるスケール量・深さの推定値から、凍害劣化の進行予測を行い、その劣化状況、適切な補修技術の選定を行う技術を開発することを目的としているものである。具体的には、以下の点の検討を行うことを目的とする。

現場調査に対応した光沢度計を用いたスケール評価方法の提案

各種コンクリートのスケール進行の予測手法の提案

をふまえた凍害劣化診断手法と診断結果に基づく適切な補修方法の提案

3. 研究の方法

本研究では、以下の検討を行った。

(1) 凍害劣化の実態調査

実構造物に発生したスケールやひび割れなどの凍害劣化について、その発生状況とともに、発生部分の水分供給条件、温度条件、塩分の有無などの調査を行った。

(2) 光沢度計を用いたスケール評価の試験方法に関する検討

光沢度計を用いたスケール評価の試験方法¹⁾(以下「銀紙光沢度法」)について検討を行った。この方法は、表面粗さとスケール量との相関に着目し、コンクリート表面に押し付けたアルミホイルの光沢度より中心線平均粗さを求め、さらに質量減少量を推定する方法である。試験法および劣化予測手法を検討するため、各種材料を変えた光沢度とスケール量の関係を求めるとともに、試験方法の違いによる影響について、RILEM CIF 試験を行い、一般的に行われている JIS A 1148 A 法(以下「A 法」)の結果との比較を行った。

(3) 各種環境条件とスケール劣化の関係

の検討

各種コンクリートを対象として、凍結融解時の最低温度、凍結融解時間、凍結持続時間、水分供給条件等の各種環境条件の影響度を検討するとともに、これらに基づきスケールの予測式の構築を行った。

(4) 各種補修工法を適用したコンクリート供試体の凍結融解試験・屋外暴露試験

表面被覆工法、含浸工法等、代表的な補修工法を適用したものに対し、凍結融解試験・屋外暴露試験を行い、その効果の確認を行うとともに、適切な補修方法についての検討を行った。

(5) 光沢度計を用いたスケール評価の実構造物への適用の検討

いくつかの実構造物を選定し、本検討で提案した手法を適用し、その有効性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 凍害劣化の実態調査

札幌市、小樽市周辺の海岸構造物および内陸構造物について、スケールを中心とした劣化調査を行った。その結果として、橋梁、港湾構造物については、スケールが多くみられた。特に内陸部でも著しいスケールがみられ、融雪剤の影響と推察される。

建築物は、打放し部分を除いて、顕著なスケールは少なかった。仕上材による保護があるためと考えられる。打放しの柱脚や、庇その他の水平部では、橋梁、港湾構造物と同様にスケールがみられた。また、自走式駐車場のコンクリート舗装では、スケールが多く見られた(写真1参照)。自動車融雪剤を持ち込んだことが一因と推察される。調査の結果、経年した打放しコンクリートで表面保護がない場合、札幌市、小樽市周辺では、程度の差はあるものの、スケールが観察された。対策として、表面保護を行うか、スケール量の把握による維持管理を行うことの重要性が示唆された。



写真1 自走式駐車場のスケール例

(2) 光沢度計を用いたスケール評価の試験方法に関する検討

銀紙光沢度法に及ぼす影響要因について検討を行った。試験方法の違いとして、A法とRILEM CIF試験の比較を行った。両者の質量減少量と光沢度の関係を図1に示す。同じ質量減少量であれば、ほぼ同じ光沢度を示していることがわかる。銀紙光沢度法は、劣化のさせ方によらず、同様に質量減少量を評価できると考えられる。また、A法の質量減少量は、正確なスケーリング量ではない可能性があるが、この結果から、供試体を乾燥させず水中養生後すぐに試験を開始した場合は、概ねCIF試験によるスケーリング量とほぼ同じであることを示しており、以下、水中養生直後に開始したA法による結果がスケーリング量を表すと仮定して検討を行った。

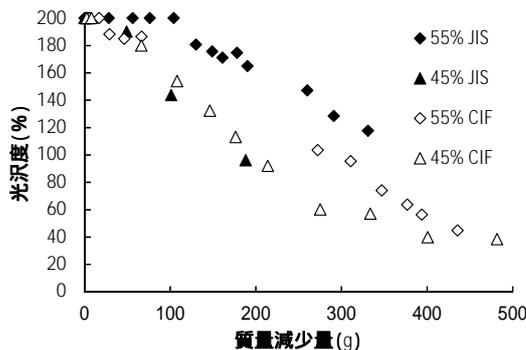


図1 JIS A 1148 A法とCIF試験の結果の比較

銀紙光沢度法に及ぼす材料の影響として、W/C、骨材種類を変えたコンクリート供試体の凍結融解試験から、光沢度と質量減少量の関係の検討を行った。その結果を図2に示す。図より、同じ種類の粗骨材・細骨材を用いた場合、W/Cによらず光沢度と質量減少量は一定の関係を示すことがわかる。

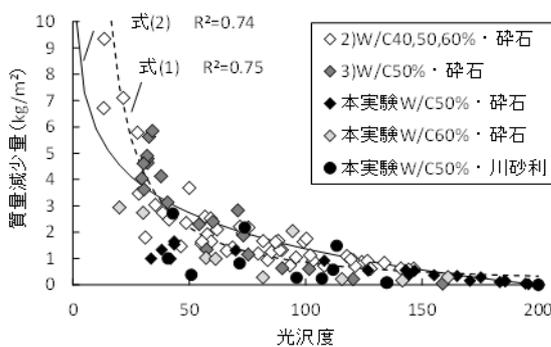


図2 各種骨材を用いたコンクリートの光沢度と質量減少量の関係

また、骨材の形状が異なる碎石と川砂利でも、その違いが光沢度と質量減少量の関係に及ぼす影響は小さかった。図3に、陸砂と高炉スラグ細骨材（以下「BFS」）を用いたコンクリートの光沢度と質量減少量の関係を示す。BFSを用いたものは、陸砂を用いたものよりも、同じ光沢度で質量減少量が小さく

なる傾向を示した。これは、BFSを用いたコンクリートは、凍結融解初期で質量増加しており、十分な飽水状態ではなかったことが考えられる。使用材料で結果が異なる可能性もあるが、ここでは使用材料によって光沢度が大きく変わらないと仮定した。

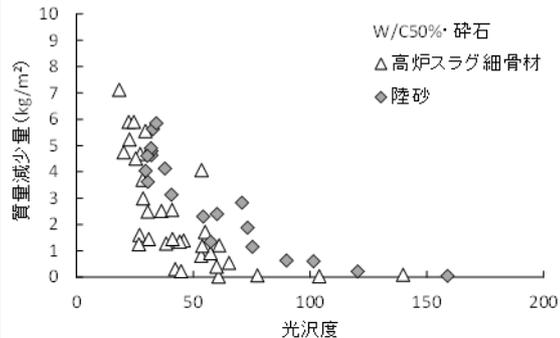


図3 光沢度と質量減少量の関係
(陸砂・高炉スラグ細骨材)

以上の点を考慮し、碎石・陸砂のデータに基づき最小自乗法により式(1)を求めた。

$$Sm = -2.00 \times \ln(X/X_{max}) \quad (1)$$

ここに Sm : 質量減少量 (kg/m^2),
 X : 光沢度,
 X_{max} : 測定器の光沢度の最大値(ここでは200とした)

碎石・陸砂のデータに対しては、重相関係数は0.74と比較的高い結果となった。また、BFSのデータをいれても0.50と比較的良好な重相関係数が得られた。精度の面で未だ課題が残るが、この手法によって一般的なコンクリートに対して、スケーリング進行の傾向をつかむことは可能と考えられる。

(3) 各種環境条件とスケーリング劣化の関係の検討

スケーリングに及ぼす各種影響要因の寄与率について、田畑らの実験²⁾の分析を行うとともに、凍結融解による含水率上昇効果について検討を行った。田畑²⁾は、「耐凍害性に優れたコンクリート」(W/C50% (5A, 5T), W/C70% (7T))を対象として、実験計画法に基づきL16で割り付けられた、養生、最低温度、凍結持続時間、凍結融解の温度勾配、試験装置の違いについて、相対動弾性係数の変化に及ぼす影響要因の分析を行っている。ここではこの実験の質量減少率に着目し、影響要因の分析を行った。分散分析の結果を表1に示す。この結果によれば、有意であるのは、養生の影響のみとなっている。これは、質量変化率はわずかな試験条件でばらつきが生じ誤差が大きいことが原因と考えられる。ここで、考慮すべき要因として養生の影響とともに、分析では有意ではないものの、F値の高い最低温度、温度勾配、凍結持続時間についても考慮することとした。

表 1 スケーリングに及ぼす影響要因の分散分析結果

調査	要因	変動	自由度	分散	F値	有意
5T	養生	8506.25	3	2835.42	3.63	
	最低温度	3752.75	3	1250.92	1.60	
	持続	841.00	1	841.00	1.08	
	勾配	841.00	1	841.00	1.08	
	試験	729.00	1	729.00	0.93	
	誤差	4685.75	6	780.96	-	
5A	養生	3274.75	3	1091.58	11.92	**
	最低温度	1044.75	3	348.25	3.80	
	持続	56.25	1	56.25	0.61	
	勾配	210.25	1	210.25	2.30	
	試験	20.25	1	20.25	0.22	
	誤差	549.50	6	91.58	-	
7A	養生	13781.69	3	4593.90	9.94	**
	最低温度	2134.69	3	711.56	1.54	
	持続	798.06	1	798.06	1.73	
	勾配	5.06	1	5.06	0.01	
	試験	203.06	1	203.06	0.44	
	誤差	2772.38	6	462.06	-	

** : 1% 有意

温度勾配, 凍結持続時間について, 凍結融解作用による含水率上昇効果の確認を行った。W/C50%のコンクリートについて, 吸水させた後, 断熱条件により温度勾配および凍結持続時間を変えて片面吸水凍結融解試験を行った結果を図4に示す。凍結乾燥が見られたが, 凍結融解後, 水中浸漬させるとほぼ同じ飽水度となった。これより, 温度勾配, 凍結持続時間の影響は小さいと考えられる。

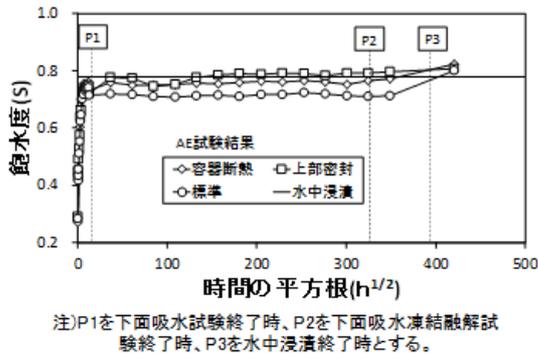


図4 凍結融解による含水率上昇効果

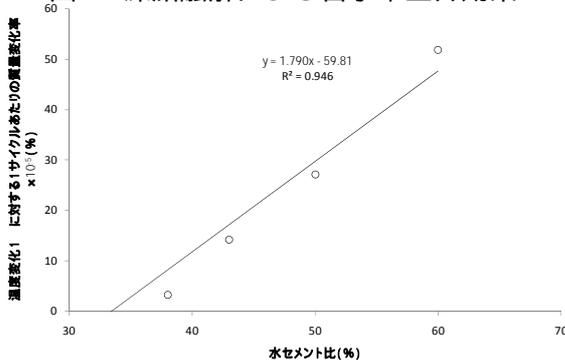


図5 水セメント比と温度1 に対する1サイクルあたりの質量変化率の関係

最低温度の影響について, 桂らの実験³⁾の結果では, 最低温度と質量減少率は直線的に変化しており, この傾きを水セメント比ごと

にプロットしたのが図5である。この傾きは温度1 に対する1サイクルあたりの質量変化率を表している。この図から, 両者の相関は高く, 直線で近似できることがわかる。

また, 塩分の影響について検討を行った。W/C40, 50, 60%のコンクリートを対象としたA法の結果において, 真水とNaCl 3%水溶液を使用した凍結融解の1サイクルあたりの質量減少量の関係を図6に示す。NaCl 3%水溶液は, サイクルの平方根に比例している。両者は良好な相関を示しており, 真水の結果よりNaCl 3%水溶液の結果が推定できると考えられる。

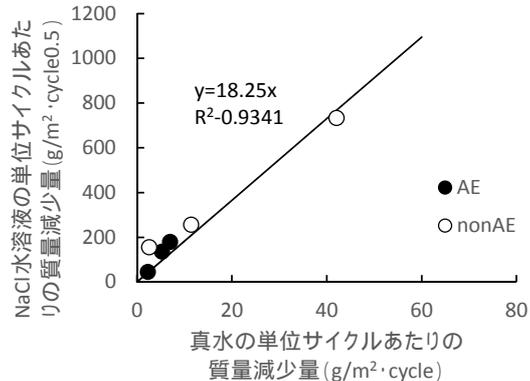


図6 真水とNaCl 3%水溶液の単位サイクルあたりの質量減少量の関係

以上の結果と既往の検討⁴⁾から, スケーリングの進行予測式は, (2)式で表現できる。

$$W_L = a \times \left(\frac{V}{A} \times P \times A \times T \times (0.036(W/C) - 1.208) \times C_y^b \right) \quad (2)$$

ここに W_L : 質量減少量 (kg/m²)

a, b : 塩分に関する係数

真水の場合 a, b : 1

NaCl 3%水溶液の場合 a : 18.3, b : 0.5
: 水中に十分浸漬したコンクリートの密度 (kg/m³)

V : 対象部分のコンクリートの体積 (m³)

A : 対象部分のコンクリートの面積 (m²)

P : 養生に関する係数 次式による。

水中養生: $P=1.0$

気中養生: $P=1.933(C/W)-1.519$

20 乾燥: $P=0.164(C/W)-0.038$

30 乾燥: $P=0.275(C/W)-0.059$

A : 空気量に関する係数

AE コンクリート: 1.0

nonAE コンクリート: 0.6

T : 最低温度 ()

W/C : 水セメント比 (%)

C_y : 凍結融解サイクル (回)

なお, 塩分の影響については, 塩の種類, 濃度によっても異なるため, 実環境では異なる進行となることが考えられる。この点については今後の課題としたい。

また, 凍結融解作用に関するコンクリート

構造物の耐用年数設計として、ISO160204 :2012⁵⁾では、塩分が作用しない凍害劣化と塩分が作用する場合のスケーリングについて、それぞれ次のように規定されている。

塩分のない場合：

$$p\} = p\{ T(t < t_{SL}), S_{cr} - S_{act}(t < t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (3)$$

ここに、 $p\}$ ：凍害発生確率、 S_{cr} ：限界飽水度、 $S_{act}(t)$ ：その時点の飽水度、 $T(t)$ ：その時点のコンクリート温度()、 t_{SL} ：設計耐用年数(年)、 p_0 ：目標とする凍害発生確率

塩分のある場合：

$$p\} = p\{ T(t \leq t_{SL}) - TR(RH, n_{cycles}, t, Cl, \dots) < 0\} < p_0 \quad (4)$$

ここに、 $p\}$ ：スケーリング発生確率、 $TR(t, \dots)$ ：スケーリング発生限界温度()、 Cl ：塩化物イオン濃度(%)、 RH ：相対湿度(%)、 n_{cycles} ：凍結融解回数

このISOと、現在我が国で考えられている凍害劣化に関する限界状態が異なっている。基本的に凍害が発生するかどうかを考えており、相対動弾性係数の低下や、スケーリングの進行は考えられていない。限界状態のあり方については、今後議論が必要と考えられるが、ここではISOとA法に基づく考え方の整理として、ISOの評価は、A法による評価の前段階と考えると、A法による評価の限界状態(劣化の徴候、明確な劣化)は、凍害発生確率の違いとして表現が可能といえる。概念図を図7に示す。今後、さらにデータを蓄積することで両者の関係を明確にする必要があるといえる。

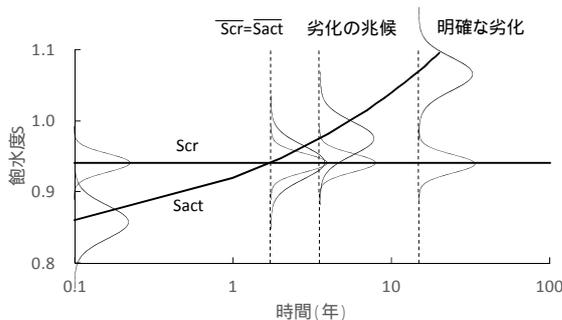


図7 ISOとA法による耐用年数の限界状態に関する概念図

(4)各種補修工法を適用したコンクリート供試体の凍結融解試験・屋外暴露試験

代表的な各種補修工法として、表面被覆(建築用仕上材)および表面含浸材を施工したコンクリート供試体の凍結融解試験および屋外暴露試験を行った。その結果の一例(W/C40%の場合)を図8に示す。この結果から、表面からの水の浸透が抑制できれば、スケーリングを含め凍害劣化の進行を抑制できることが確認できた。ただし、補修材料自体の劣化により、この効果が低下すること

になり、その寿命を考慮して補修する必要があるといえる。また、今回は外側からの水分の供給であるが、内部結露や漏水などのコンクリート内部からの水分供給の場合は、これらが逆効果となることが考えられ、水分供給の方向を考慮した補修を行うことが必要と考えられる。なお、凍害劣化させた後に各種補修工法(表面被覆、表面含浸材、断面修復材)を適用した試験は、早期に母材の方が崩壊し、その有効性について明確な傾向が得られなかった。母材コンクリートの劣化度によって傾向が異なると考えられ、詳細な検討については今後の課題としたい。

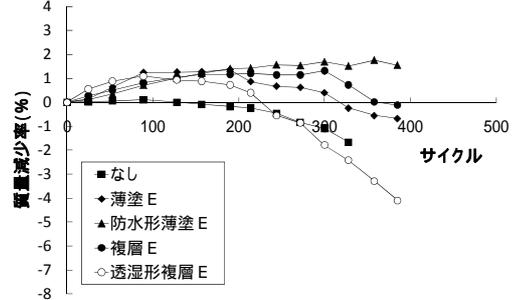


図8 表面被覆材を施工した場合のコンクリートの質量減少率

補修範囲の検討についても行った。A法に準じた凍結融解試験を行い、供試体をひび割れの範囲を墨汁の浸透および金属用浸透探傷剤を浸透させることで、凍結融解による影響範囲の検討を行った。その結果、スケーリングが生じている部分の約10~15mm奥まで凍害劣化の影響が及ぶことがわかった。一例を写真2に示す。この結果より、一般には、凍害劣化の補修は叩いて落ちる範囲まで劣化部分を除去することが行われているが、補修は、この凍害劣化が影響している範囲まで除去することが必要と考えられる。



写真2 凍結融解を受けたモルタルの劣化状況(金属用浸透探傷剤を浸透させた供試体)

(5)光沢度計を用いたスケーリング評価の実構造物への適用の検討

(1)で行った調査の際に得た実構造物の目視によるスケーリング評価と本提案手法によって求めた推定スケーリング深さの関係を図9に示す。なお、スケーリング量からス

ケーリング深さは次式⁶⁾によった。

$$Sd=5.3Sm \quad (5)$$

ここに Sd : 平均ケーリング深さ (mm)
 Sm : スケーリング量 (kg/m²)

この結果から、目視による評価と本提案手法は概ね一致しており、簡易に定量的に実構造物のケーリングを把握する手法として有効であるといえる。また、この結果と式(2)により、今後の予測も可能と考えられる。

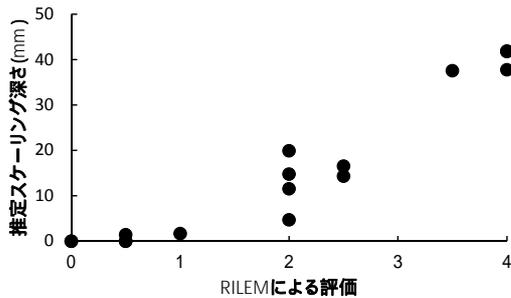


図9 RILEMの基準に基づく目視評価と本手法による推定スケーリング深さ

参考文献

- 1)長谷川拓哉他3名:光沢度計によるケーリング測定手法の検討,日本建築学会北海道支部研究報告集82,CD-ROM,2009.7
- 2)田畑雅幸:コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究,北海道大学学位論文,1986
- 3)桂修:過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究,北海道大学学位論文,1999
- 4)日本コンクリート工学協会:コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書,2008.8
- 5)ISO 16204 Durability -Service life design of concrete structures,2012.9
- 6)池翰相他:凍結融解作用を受けるコンクリートの凍害深さに関する一考察,コンクリート工学年次論文報告集28-1,pp.725-730,2006.7

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 1件)

長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子:コンクリートの凍害を対象とした限界放水度法と JIS A 1148 A 法の試験結果に基づく耐用年数の比較,コンクリート工学年次論文集 No.36, CD-ROM, 2014.7 (査読有・掲載決定)

[学会発表](計 1件)

長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子:骨材種類が光沢度計によるケーリング量推定結果

に及ぼす影響,日本建築学会大会,2014.9.12~9.14,神戸大学

[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]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

長谷川 拓哉 (HASEGAWA, Takuya)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 3 0 3 6 0 4 6 5

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: