

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360195

研究課題名(和文) 塩害を受けるコンクリート構造物の寿命予測の信頼性に関する研究

研究課題名(英文) Reliability of life prediction on deteriorated concrete structures

研究代表者

横田 弘 (YOKOTA HIROSHI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50344312

研究成果の概要(和文)：塩害により内部鉄筋の腐食が進行した鉄筋コンクリート構造物の劣化進行の変動(ばらつき)を確率論的手法により評価した。また、劣化の進行により構造物の力学性能が低下するが、これらのばらつきが力学性能に与える影響を明らかにした。同時に、材料品質の変動要因と劣化現象の変動要因の関連性を明らかにした。これらの成果をとりまとめ、劣化進行や力学性能のばらつきに関する不確定要因を取り入れ、信頼性を考慮した寿命予測システムを構築した。

研究成果の概要(英文)：Variability in deterioration progress of reinforced concrete structures suffered from chloride-induced corrosion has been evaluated with the probabilistic approach. It has also been made clear how the variability in corrosion of reinforcement affects structural performance taking into account the differences in causes related to variations in materials properties and those in deterioration progresses. A probabilistic life prediction system was proposed based on the reliability on the deterioration progress and structural performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：ライフサイクルマネジメント

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、塩害、信頼性、非一様性、寿命予測、維持管理

1. 研究開始当初の背景

沿岸域に建設される港湾施設等の鉄筋コンクリート(RC)構造物は、他の社会基盤施設と比較して、一般に厳しい自然環境下に置かれている。そのため、材料の劣化、部材の損傷等の変状により、供用期間中に力学性能の低下が生じる。その際、RC構造物に生じる材料の劣化や構造性能の低下には大きな変動(ばらつき)が見られる。そのため、これ

らの評価には不確定性が伴うことは避けられず、これが変状(劣化・損傷)の発見と診断、保有性能評価、予防保全のための性能予測手法の高精度化、対策効果の定量化等の課題の解決の障害となっている。

研究代表者らは、このような劣化現象のばらつきの評価および耐久性に影響する不確定要因の抽出に対するアプローチとして、平成18～19年度科学研究費補助金基盤研究(B)

「海洋コンクリート中の鉄筋腐食分布の空間構造評価に関する研究」において、RC部材内の異方性を考慮した腐食現象の偏在化メカニズム、および鉄筋腐食分布がRC部材の破壊モードや構造的危険度に及ぼす影響の解明に取り組んだ。

本研究では、これまで蓄積されたRC部材の塩害に対する上記の成果に加え、新たに実構造物を対象に得られた変状の調査診断データに基づき、塩害が生じるRC構造物の寿命予測のために必要となる計算パラメータのばらつきを確率論的アプローチにより定量化することとした。また、これらの成果から、RC構造物の寿命予測手法への信頼性手法の導入について検討を行い、栈橋を対象とした寿命予測システムの構築を目指すこととした。

2. 研究の目的

塩害を受けて性能低下が進行するRC構造物の寿命予測に関して、計算パラメータのばらつきを考慮した信頼性手法による確率論的アプローチからの手法を検討する。RC構造物の塩害の発生は、時間的かつ空間的に大きなばらつきを示すことから、次の3項目を主な研究の目的とした。

(1) 塩害発生の変動に関する確率論的評価

寿命予測の際に必要な計算パラメータのばらつきを確率モデルにより定量化する。その際、材料品質のばらつきも考慮して取り扱う。

(2) 部材の保有性能の変動に関する確率論的評価

塩害による劣化が偏在化した部材や構造物の力学性能のばらつきを(1)と同様に定量化し、(1)のばらつきの与える影響を明らかにする。その際、材料品質のばらつきと劣化進行のばらつきとを区別して検討する。

(3) 信頼性を考慮した寿命予測システムの構築

(1)および(2)の成果に基づき、塩害を受けやすい構造物の代表である栈橋の寿命予測システムを構築する。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、RC構造物の劣化に関する現地点検診断、RC構造物の劣化に関する詳細な点検診断・試験等を通して、寿命予測に影響与える各因子のばらつきを定量化し、不確定要因を考慮したRC構造物の構造性能評価手法を構築した。研究項目ごとの研究の方法を具体的に以下に示す。

(1) 塩害発生の変動に関する確率論的評価

①塩害進行のばらつきの定量化と診断手法の検討

約30年間供用された栈橋上部工から切り

出したRC床版の点検診断を実施し、劣化性状のばらつきを定量化するとともに、このばらつきの要因について検討した。点検診断の項目は、目視による劣化度判定、コンクリート中に浸透した塩化物イオン量の測定、鉄筋の残存断面積の測定とした。また、ばらつきの定量化に際しては、ばらつきを最も的確に表現できる確率モデルを明らかにし、これに基づいて、診断の際に測定される塩化物イオン濃度の信頼性を検討した。

②材料品質のばらつきが変状に与える影響の検討

実施工レベルで製作し、実海洋環境に約8年間曝露された大型高性能軽量RC構造体(密度:1.2、1.5、1.8g/cm³)を対象に、構造体内の材料分離特性を把握し、この材料分離が材料品質のばらつきや、構造体の耐久性に及ぼす影響について検討した。

(2) 部材の保有性能の変動に関する確率論的評価

①変状のばらつきがRC部材の力学性能に与える影響の検討

約30年間供用された栈橋上部工から切り出したRC床版(上記(1)①の部材)から腐食した鉄筋を取り出し、腐食状況の詳細な測定・分析を行った。これらの測定結果から、鉄筋残存断面積のばらつきをモデル化し、非線形数値解析を通して、腐食量の分布(場所的な偏り)が部材の構造性能に与える影響を検討した。

②材料品質のばらつきがRC部材の構造性能に与える影響の検討

上記(1)②の試験体を対象に載荷試験を行い、材料品質のばらつきが高性能軽量RC構造体の長期的な力学性能に及ぼす影響について考察した。

③RC部材の確率論的保有性能評価

国内の広範な地域から抽出した栈橋の上部工RC床版について、目視により判定した劣化度と、RC床版から切り出した部材の載荷試験(一部は従前の研究で実施)により得られた力学性能との関係を明らかにした。また、極値統計理論に基づいて、目視により判定した部材の劣化度からRC部材の力学性能(耐荷性)を推定する手法を提案した。

(3) 信頼性を考慮した寿命予測システムの構築

海洋環境で塩害を受けやすい栈橋コンクリート上部工を対象に、(1)および(2)で得られた研究成果を用いて、その寿命予測と性能評価のための計算ツールを作成し、栈橋のライフサイクルマネジメントシステムを構築した。

4. 研究成果

(1) 塩害発生の変動に関する確率論的評価

①塩害進行のばらつきの定量化と診断手法の検討

塩害は、コンクリート中に浸透する塩化物イオンによって引き起こされるため、塩化物イオンの浸透のばらつきが塩害進行のばらつきの原因となる。

塩化物イオンの浸透は、コンクリートの見かけの拡散係数等に依存し、これは点検診断の際に採取するコンクリートコアにより求めることができる。一例として、切り出したRC部材から多数のコアを採取することにより求めた見かけの拡散係数のばらつきを定量化した結果を図1に示す。解析の結果、見かけの拡散係数は Gumbel 分布に最も適合することが明らかになった ($f_g(x)$: Gumbel 分布、 $f_w(x)$: Weibull 分布、 $f_n(x)$: 対数正規分布)。このように、コンクリートの塩化物イオン浸透性状は、同一部材であっても局所的な曝露環境や材料物性のばらつき等によって大きくばらつき、このばらつきの程度を確率論的モデルにより表現した。

上述のばらつきが寿命予測結果に与える影響を明らかにした。RC部材の寿命が鉄筋腐食の開始時期により規定されるとした場合の、寿命予測誤差を図2に示す。コアの採取本数が増加すれば、より精度高く寿命予測パラメータの設定が可能となり、それに伴い、腐食開始時期の予測誤差は減少する。同図に示すように、コア1本採取と4本採取、2本採取と6本採取を比較すると、上限値と下限値の差は半分程度となることが分かった。2本採取の誤差は上限値および下限値ともに T30 の 50%程度、4本採取の誤差は上限値および下限値ともに T30 の 40%程度、6本採取の誤差は上限値および下限値ともに T30 の 30%程度であった。このように、寿命予測計算パラメータのばらつきの中で精度の高い予測を実現するために必要なコアのサンプリング数の設定方法を提示し、1本当たりのコアの信頼性に関する知見を得た。この結果は、実務における詳細点検調査の実施の際に有用な指標となり得るものである。

②材料品質のばらつきが変状に与える影響の検討

本研究で用いた高性能軽量コンクリートは、通常のコンクリートに比べて骨材が相当軽量であるため、コンクリート打込み時に骨材が浮き上がる性状を示す。そのため、構造体内の材料品質のばらつきを議論するのに適している。

コンクリート打込み時に顕著な材料分離は見られなかったが、コンクリートの硬化後では、コンクリートの密度によって異なる材料分離特性を示した。粗骨材にのみ軽量骨材

を使用した場合 (MP1.8)、打設面付近のみ材料分離が生じる傾向を示したが、細骨材にも軽量骨材を使用した場合 (MP1.5、1.2)、構造体の高さ方向に対して全体的に材料分離が生じる傾向を示した。

図3に結果の一例を示すように、高性能軽量コンクリートの圧縮強度は材料分離の程度に応じて変化し、骨材が浮上する打設面に近いほど圧縮強度が低下する傾向を示した。一方、コンクリートのヤング係数は構造体の高さ方向に対しほぼ一定値を示した。また、高性能軽量コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数は、材料分離の影響を大きく受けることなく、ほぼ一定の値を示した。

(2) 部材の保有性能の変動に関する確率論的評価

①変状のばらつきが RC 部材の力学性能に与える影響の検討

(1)①で用いた RC 床版から鉄筋を取り出し、腐食状況の詳細な測定・分析を行った。一例として、RC 床版の梁側から約 2000mm の区間のひび割れ幅と鉄筋の残存断面積の分布を図4に示す。

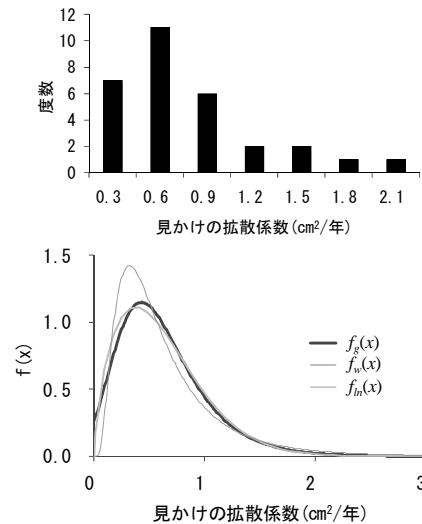


図1 見かけの拡散係数の度数分布と確率密度関数

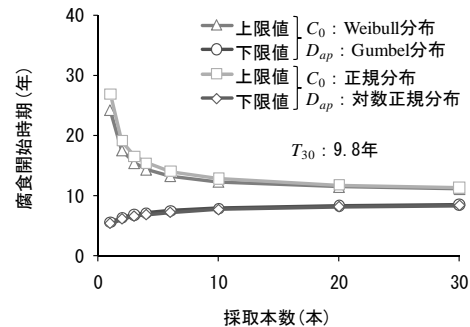


図2 寿命（腐食開始時期）の予測誤差

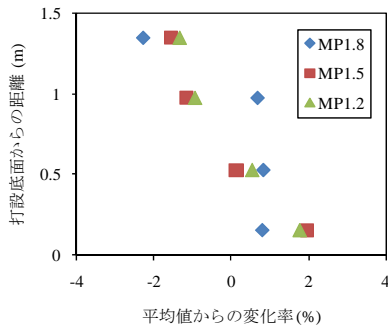


図3 軽量RC構造体の圧縮強度のばらつき

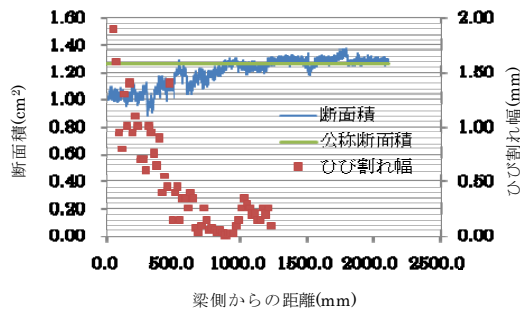


図4 鉄筋の残存断面積とひび割れ幅の分布

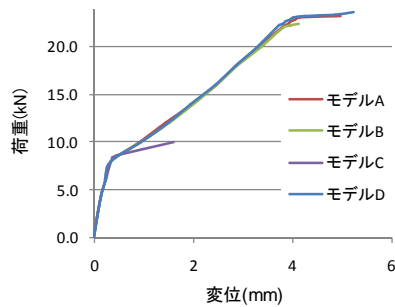


図5 腐食が偏在したRC梁での荷重-変形関係

梁側から約1000mmの区間では、腐食が激しく、腐食ひび割れ幅および鉄筋断面積の減少が著しいことが確認された。梁側から約1200mmより床版中央側の部分では、腐食は概ね発生していなかった。また、ひび割れ幅が大きい場合には鉄筋腐食の程度が大きくなる傾向を示した。このように、1つの部材においても、鉄筋腐食の形態は大きくばらつくことが再確認できた。

この測定結果から得られた鉄筋残存断面積のばらつきを元に詳細な腐食鉄筋の構造モデルを作成した。これがRC梁に埋め込まれていと仮定して、非線形数値解析により、腐食量の分布(場所的な偏り)が部材の構造性能に与える影響を検討した。解析結果を図5に示す。ここで、モデルAは腐食のない健全鉄筋の場合、モデルBは図4に示した分布を再現した場合、モデルCは図4に示す確率

分布を有する腐食鉄筋で、断面積の小さい部分が梁中央部に存在するとした場合、モデルDはモデルCとは逆に梁端部に断面積の小さい部分が存在するとした場合である。モデルAおよびDでは、おおむね同等の耐力を示したが、モデルCでは、モデルAおよびDと比較して耐力が1/2程度まで低下することが確認された。また、モデルAでは全体的にひび割れが発生しているが、モデルCでは断面積が最小の部分に集中的にひび割れが発生している結果が示された。このように、鉄筋の腐食程度場所ごとのばらつきがRC部材の構造性能に大きな影響を与えることが定量的に示された。

②材料品質のばらつきがRC部材の構造性能に与える影響の検討

海洋環境に長期曝露を行った高性能軽量RC構造体の載荷試験の結果、短期間の曝露の結果と比較して、構造体の最大荷重に変化は認められなかったものの、密度が1.5以下の構造体(MP1.5、1.2)では最大荷重時の変位が小さくなり、変形性能が短期材齢よりも低下した。したがって、長期材齢では塩害の進行に伴って、力学性能が変化することが示された。いずれの構造体も打設面側から破壊する傾向を示し、コンクリートの密度が小さくなる(材料品質のばらつきの程度が大きくなる)に従ってその傾向は顕著となった。また、高性能軽量コンクリートは、長期材齢になるとより脆性的な破壊を生じることが分かった(図6)。

本研究の成果は、塩害を受ける高性能軽量RC構造物の長期構造性能を評価する際の参考資料としても有用であり、知見が不足していた本分野において、画期的な成果が得られたものと考えられる。

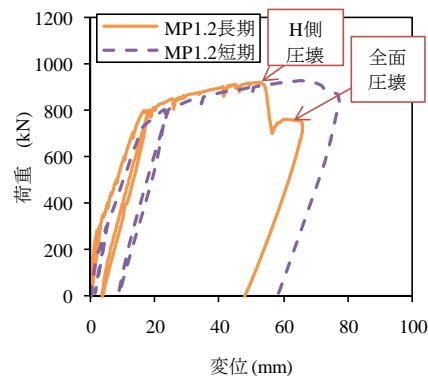


図6 高性能軽量RC構造体の材齢に伴う荷重-変位関係の変化

③RC部材の確率論的保有性能評価

既存の栈橋から採取したRC床版について、目視により判定した劣化度と部材の耐荷性(曲げ耐力)の関係を実験により調べた。劣

化度は、栈橋の実際の点検に用いられている基準を用い、a～dの4段階で判定した。aは補修が緊急に必要なレベルの状態、dは健全な状態を表している。

その結果(図7)、外観に変状が認められるRC部材の耐力は、劣化度cおよびdでは約半数が、劣化度aではほぼ全数が初期値を下回る可能性があることが分かった。ただし、劣化度と耐荷性の関係には広範なばらつきが見られ、これは部材の耐荷性が変状の発生位置や局所的な鉄筋断面減少に影響されることや、劣化度判定基準にこれらの項目が十分に反映されていないためと考えられた。

これらの結果を踏まえて、極値統計理論に基づいて部材の劣化度からRC部材の耐荷性を推定する手法、および栈橋RC上部工全体における部材耐力の極値の推定手法を提案した(図8)。また、これを用いて、施設の対策優先順位を決定するための手法を提案した。

劣化したRC部材の安全性や使用性等の力学性能の指標として耐荷性を評価する際には、荷重作用時の発生応力が大きい部位に位置する鉄筋の腐食性状や腐食形態を把握することが必要であることを示した。さらに、力学性能を目視点検から簡易的に診断するための手法を提案した。これらの結果を、実際の維持管理業務に適用する観点から総合的にとりまとめて提案した。

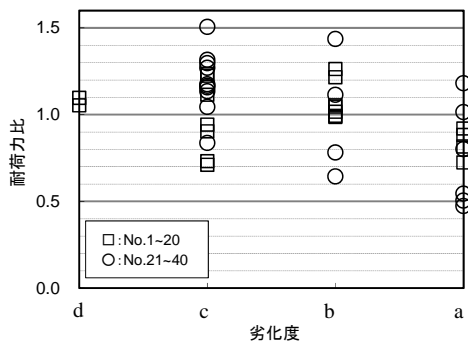


図7 劣化度と耐荷力比の関係

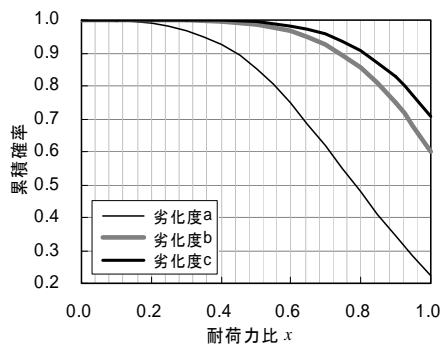


図8 部材の耐荷力比が x 以上となる確率

これらの成果は、点検診断結果の総括および劣化予測の結果を踏まえた工学的知見・判断に基づく施設の性能評価を定量的に行うことに寄与し、それを根拠とした対策優先順位の選定を可能とする点において、RC構造物のライフサイクルマネジメントの実現に有効に寄与するものと考えられる。

(3) 信頼性を考慮した寿命予測システムの構築

上記(1)および(2)で得られた本研究の成果を踏まえ、栈橋RC上部工について、点検診断に基づいた保有性能評価と将来予測、対策工および実施時期の選定手法に関する知見を体系的に取りまとめ、維持管理計画の策定を支援するプログラムとして栈橋ライフサイクルマネジメントシステムを構築した。構築したシステムでは、点検診断結果を入力することにより、マルコフ連鎖モデルに基づく将来の劣化進行予測を行い、コスト比較を行いながら最適な補修時期および工法を選定することを可能とした(図9)。マルコフ連鎖モデルは、塩害の進行を確率論的に取り扱うもので、上記(1)で得られた塩害進行の実際のばらつきを元に適用性を考察した。

本研究の成果および構築したライフサイクルマネジメントシステムは、栈橋あるいは類似のRC構造物の合理的かつ効果的な維持管理の推進に寄与するものである。同時に、寿命予測の精度を向上させるための今後の調査研究の推進に貢献するものである。



図9 栈橋のライフサイクルマネジメントシステム (劣化予測部分の画面表示)

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 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘, 港湾RC構造物の確率論に基づく保有性能評価の試行, 土木学会論文集 E2, 査読有, Vol. 67, No. 1, 2011, pp. 150-159

- ② 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保, 横田弘, 長期供用した栈橋上部工の確率論に基づく保有性能評価の試行, 生産研究, 査読無, Vol. 62, No. 4, 2010, pp. 59-61
- ③ 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築, 海洋開発論文集, 査読有, Vol. 26, 2010, pp. 147-152
- ④ H. Yokota, M. Iwanami and E. Kato, Chloride-induced corrosion of reinforcement and its effect on performance of structures, International Journal of Modeling, Identification and Control, 査読有, Vol. 7, No. 2, 2009, pp. 179-184
- ⑤ 川端雄一郎・岩波光保・加藤絵万・横田弘, 高性能軽量コンクリートの材料分離特性と海洋環境下における長期耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 1807-1812

[学会発表] (計 18 件)

- ① 中村一貴, 横田弘, 橋本勝文, 古谷宏一, コンクリートコア採取による塩分浸透性状評価とその信頼性向上に関する研究, 土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月, 松山市 (投稿済)
- ② E. Kato, Y. Kawabata, M. Iwanami and H. Yokota, Probabilistic Approach for Structural Performance Evaluation of Port RC Structure, 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures ICDCS-2010, 2010 年 11 月 24 日, 札幌市
- ③ 松本直也, 横田弘, RC 床版の鉄筋腐食と腐食による構造性能低下の予測, 土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 2 日, 札幌市
- ④ 古谷宏一, 横田弘, コンクリート構造物における鉄筋腐食発生時期の予測に関する研究, 土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 2 日, 札幌市
- ⑤ H. Yokota, E. Kato and M. Iwanami, Simplified assessment on structural performance of deteriorated concrete members, 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010 年 5 月 25 日, 韓国・済州
- ⑥ E. Kato, M. Iwanami and H. Yokota, Development of life cycle management system for open-type wharf, 8th International Symposium on New Technologies for Urban Safety in Mega Cities in Asia, 2009 年 10 月 16 日, 大韓民国・Incheon

- ⑦ E. Kato, Y. Akira, M. Iwanami and H. Yokota, Chloride penetration in marine concrete structures after 40 years in service, 4th International Conference on Construction Materials, 2009 年 8 月 24 日, 日本・名古屋市
- ⑧ E. Kato, H. Hamada, M. Iwanami and H. Yokota, Influence of Localized Corrosion of Steel Bars on Load Carrying Capacity of Reinforced Concrete Beams, International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS-2008, 2008 年 11 月 26 日, 中華人民共和国・杭州
- ⑨ H. Yokota, E. Kato and M. Iwanami, Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement and Its Effect on Performance of Structures, International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS-2008, 2008 年 11 月 26 日, 中華人民共和国・杭州

[図書] (計 1 件)

- ① H. Yokota, Corrosion of reinforcement and its effect on structural capacity, Handbook of Concrete Durability, Middleton Publishing Inc., 2010, pp. 515-576.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田 弘 (YOKOTA HIROSHI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：50344312

(2) 研究分担者

岩波 光保 (IWANAMI MITSUYASU)
(独) 港湾空港技術研究所・地盤構造部構造研究チーム・チームリーダー
研究者番号：90359232
加藤 絵万 (KATO EMA)
(独) 港湾空港技術研究所・LCM 研究センター・主任研究官
研究者番号：90371765

(3) 連携研究者

下村 匠 (SHIMOMURA TAKUMI)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：40242002
加藤 佳孝 (KATO YOSHITAKA)
東京大学生産技術研究所・准教授
研究者番号：80272516