

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560585

研究課題名(和文) 離半島地域における小規模橋梁の実態調査と三次元写真計測・FE解析による健全度評価

研究課題名(英文) Study on corrosion status and health evaluation of small steel bridge in island peninsula area by using 3D photograph measurement and FE analysis

研究代表者

森田 千尋 (MORITA, Chihiro)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60230124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、塩害の影響を大きく受け、腐食環境の厳しい離半島地域として、長崎県内にある小規模鋼橋の腐食状況の実態調査を行った。次に、調査した橋梁の中から代表的な数橋には、ワッペン式曝露試験片を設置し、腐食環境および腐食減耗量を測定した。これにより、長崎県内にある小規模鋼橋の実態を明らかにした。さらに、腐食が進行している橋梁の健全度を評価するため、鋼橋梁の三次元FE解析のためのモデル化を行った。

研究成果の概要(英文)：The corrosion situation of the small steel bridge which a local government manages is not grasped much. In this study, corrosion survey and health evaluation of small steel bridge in island peninsula area was carried out. Moreover, the extracted bridge at island was performed long-term corrosion predicted by exposure test using small samples. Next, three-dimensional FE analysis was performed for different structural forms of steel bridges, the results were compared with the natural frequencies recorded using LDV (Laser Doppler Velocimeter). These results obtained by 3D-FE analysis are verified to be in good agreement with measurement results.

研究分野：構造力学、維持管理工学

キーワード：長寿命化 維持管理 小規模鋼橋梁 ワッペン式曝露試験 三次元FE解析

1. 研究開始当初の背景

全国に橋長 15m 以上の道路橋は約 15 万橋あるが、今後 20 年で約半分の橋梁は橋齢 50 年を超える。これらの橋梁は鋼及びコンクリートの経年劣化が進み、劣化損傷が多発する危険があり、全国各地で落橋に至らないまでも鋼材の破断などの報告がなされている。さらに、道路統計年報 2006 によれば、橋長 2m 以上の道路橋の数は、全国で約 67.7 万橋あり、その約 3/4 の橋梁を市町村が管理している。しかしながら、市町村では技術力不足、財政的な問題、技術者の人材不足の 3 つを主な理由として、約 83% (約 1,500 の市町村) が定期点検を実施していないと言われている。このように、道路橋の保全是、対象とする橋の現況を把握する点検から始まるが、実際のところは橋を診ていないのが現状である。

塗装橋に限定すれば、鋼橋の塗替え潜在需要量は総鋼重量約 25,000 千トンあり¹⁾、塗替え周期を 25 年としても年間 1,000 億円が必要となる。しかしながら、塗替え塗装の実績は、年間 150 ~ 200 億円程度の試算²⁾となり、約 1/5 の予算でしかない。したがって、塗装橋の長寿命確保の手段としては、1) 塗替え予算を 5 倍に増やす、2) 4/5 の橋は放置する、3) 全橋を 1/5 の予算で保全する、のいずれかとなる。一方で、近年、無塗装の場合でも優れた防食性を発揮し、LCC の少ないミニマムメンテナンス橋梁が実現できると期待されているのが、耐候性鋼である。耐候性鋼は、普通鋼に少量の合金元素を添加することにより、年月の経過とともに表面に緻密で密着性の高い保護性さびが形成され、腐食速度が普通鋼に比べ低下する鋼材である。しかしながら、普通鋼の腐食量は耐候性鋼の高々 2 倍程度であるため、塗装橋の長寿命確保の手段としては普通鋼においても塗替えは行わず、「4/5 の橋は放置する」処置が考えられる。

2. 研究の目的

本研究においては、塩害の影響を大きく受け、腐食環境の厳しい離半島地域として、長崎県内にある小規模鋼橋の腐食状況の実態調査を行う。次に、調査した橋梁の中から代表的な数橋には、ワッペン式曝露試験片を設置し、腐食環境および腐食減耗量を測定する。これにより、長崎県内にある小規模鋼橋の実態を明らかにする。さらに、腐食が進行している橋梁の健全度を評価するため、鋼橋梁の三次元 FE 解析のためのモデル化を行う。これらのことより、小規模塗装橋梁の「4/5 の橋は放置する」処置の妥当性を検討するのが本研究の目的である。小規模塗装橋梁の「4/5 の橋は放置する」処置の実現可能性を検証するため、以下の点について検討する。

(1) 長崎県内にある小規模鋼橋の実態調査

長崎県内の市町が管理している橋長 15m 以下の鋼橋梁を主な対象とし、長崎県が定める橋梁点検マニュアル(案)³⁾に準じて実際

に点検を行う。それらの橋梁諸元および腐食状況を調査する。

(2) ワッペン式曝露試験片による腐食環境および腐食減耗量の測定・予測

調査した橋梁の中から、腐食環境が異なる数橋を選び、普通鋼と耐候性鋼のワッペン式曝露試験片を設置し、腐食環境および腐食減耗量を測定する。測定結果より異なる腐食環境における腐食減耗量を予測し、塗装橋における塗替え不要の可否を検討する。

(3) 三次元 FE 解析による健全度評価

腐食が進行している橋梁の健全度を評価するため、実橋梁の三次元 FEM モデルを構築する。解析モデルの妥当性評価には、非接触かつ長距離で計測が可能なレーザドップラ速度計(LDV)を使用し、構築した解析モデルを用いた固有値解析と実際の橋梁の振動計測の結果の比較を行う。

3. 研究の方法

(1) 長崎県内にある小規模鋼橋の実態調査

小規模鋼橋の実態調査では、長崎県が定める定期点検のうち、主要部材の損傷状況を目視で判断・記録することを目的としている概略点検を行った³⁾。概略点検では、橋梁規模により適切なレベルで実施する必要があるため、橋長 15m 以上と 15m 未満で区分される。

概略点検を行った橋梁の損傷状況の記録を基に詳細点検結果に変換し、健全度(HI; Health Index)を算出する。以下に健全度の算出方法を示す。

点検で得られた損傷等級を基に「損傷種類の重大性」を評価した重み係数を考慮し損傷評価点(DG; Damage Grade)を算出する。ただし、損傷評価点の上限は 100 点とする。

全く損傷がなく健全な状態を 100 とし、100 から損傷評価点を減点したものを部材の健全度(HI; Health Index)とする。

部材別の損傷評価点および部材・工種の重要性を評価した重み係数を基に、減点統合法により[橋梁/径間/工種/部材]の 4 段階で健全度を算出する。

表 1 に減点統合法を用いた際の損傷評価点算出の一例をあげる。表 1 に示した点数より(1)式を基に健全度を算出する。このとき橋梁の健全度は、径間ごとに算出された健全度の最小値を対象橋梁の健全度とする。

表 1 減点統合法による損傷評価点の例

部位	径間別評価		工種別評価		部材別評価	
	評価点	補正係数	評価点	補正係数	評価点	補正係数
上部工	床板	1.00	59.4	0.80	0.0	
	主構			1.00	49.5	
	床板・主構以外 (主要な部材)			0.20	49.5	
下部工	躯体	0.50	50.0	1.00	50.0	
	基礎			1.00	0.0	
	本体			1.00	50.0	
支承部	音座	0.50	50.0	0.43	0.0	

$$\text{健全度(HI)} = 100 - \Sigma \text{損傷評価点(DG)} \quad (1)$$

(2) ワッペン式曝露試験片による腐食環境および腐食減耗量の測定・予測

長崎県の大半は、太平洋沿岸部に区分され、その地域での耐候性鋼材を無塗装で適用するにあたり、飛来塩分量の測定を省略しても良い地域が2km以上である⁴⁾。そのため、概略点検を行った橋梁の中から、海岸部(離岸距離2km以内)と山間部(離岸距離2km以上)に分けた環境条件の異なる4橋(Th橋、In橋、Tu橋、Sa橋)を選出し、写真1に示すようなワッペン式曝露試験(以降、曝露試験と呼ぶ。)片を貼り付けた。鋼種は、写真2に示す耐候性鋼(SMA400AW)と普通鋼(SM400A)の2種類である。曝露試験片の設置位置は、図1に示すように、外側ウェブ、下フランジ下面、内側ウェブとし、図2に示すように支承からの距離をL、下フランジ上面からの距離をHとすると、各橋梁の数値は表2のとおりであり、桁端部付近に設置した。なお、Sa橋は近年、補強工事が行われており、補強桁に設置した。

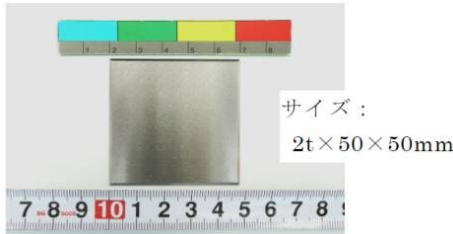


写真1 ワッペン式曝露試験片

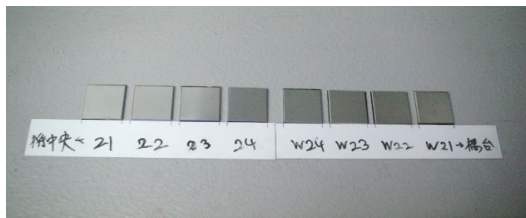


写真2 曝露試験片の設置状況

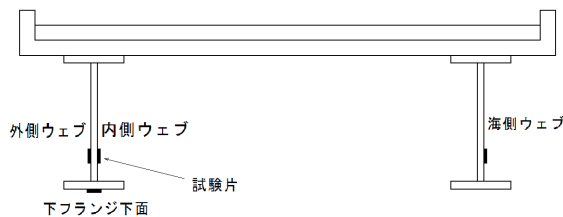


図1 曝露試験片の設置位置

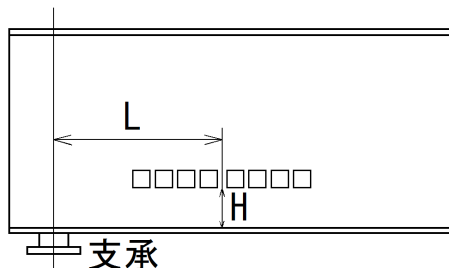


図2 ウェブの曝露試験片設置位置

表2 各橋梁の曝露試験片設置位置

	支間長	L	桁高	H	架設方向
Th橋	8.44	1.63	0.50	0.20	東西
In橋	13.90	1.80	0.59	0.20	南東
Tu橋	21.50	1.90	0.75	0.15	東西
Sa橋	12.65	1.67	0.39*	0.15	北西

*Sa橋については補強桁に設置 単位:m

離島において曝露試験片を設置した4橋を表3と写真3に示す。

表3 曝露試験片を設置した離島の4橋

	海岸部 [離岸距離]	山間部 [離岸距離]
五島	Th橋 [0.1km]	In橋 [3.0km]
壱岐	Tu橋 [0.1km]	Sa橋 [2.9km]



Th橋 (海岸部)



In橋 (山間部)



Tu橋 (海岸部)



Sa橋 (山間部)

写真3 離島の橋梁

これらの曝露試験片を半年、1年、2年、3年の4水準にかけて回収して腐食減耗量を算出する。次に、腐食減耗量より(2)式をもとに100年間長期腐食予測を行う。

$$Y = AX^B \quad (2)$$

ここでXは経過年数、YはX年後の腐食減耗量を示す。A及びBは腐食速度パラメータである。

(3) 三次元FE解析による健全度評価

三次元FE解析には、汎用非線形構造解析プログラムMSC.Marc Mentat 2008⁵⁾を使用した。既設12橋の鋼橋梁を対象として解析モデルを構築しているが、代表例として、写真4に示すA橋のモデル構築について述べる。A橋は鋼単純I桁橋(支間長26m、幅員8.45m)であり、モデルの全容を図3に示す。対傾構と補剛材などの部材の節点位置が合うように要素分割を行い、床版と主桁の結合は節点共有による剛結とした。モデル作成に使用した各部位の要素タイプ、材料定数を表4に示す。また、境界条件は、一端は3方向の変位を固定とし、他端は橋軸方向を除く2方向変位のみを固定とした。



写真4 A橋

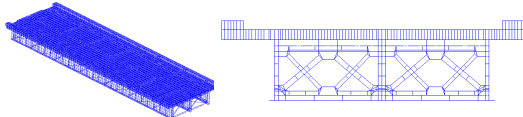


図3 A橋の解析モデル

表4 要素タイプ・材料定数

部材	要素タイプ	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
床板	ソリッド	28,600	0.167	2.32
壁高欄				
主桁	シェル	200,000	0.30	7.90
対傾構				
補剛材				
横構	梁			

橋梁の振動数を計測する手段として、遠距離・非接触で振動計測が可能なレーザドップラ速度計(図4)を採用した。本計測器は構造物に照射したレーザの入射波と反射波のドップラー効果を利用して、物体の速度を非接触で検出するものである。さらに得られた速度をフーリエ変換することで物体の固有振動数を求めることが出来る。計測に際しては、反射光量の確保のために再帰性反射シールを貼付し、サンプリング周波数 200Hz、計測時間 1 分間に設定した。計測は複数回行い、得られた結果の平均値を固有振動数とした。なお、全ての橋梁において交通規制等は行わず通行する一般車両を加振源として計測を実施した。



図4 レーザドップラ速度計 (LDV)

4. 研究成果

(1) 長崎県内にある小規模鋼橋の実態調査

離島 44 橋の概略点検結果と、長崎市内 61 橋の概略点検結果より、各橋梁の健全度を算出し、点数ごとにまとめたものを図5、6にそれぞれ示す。

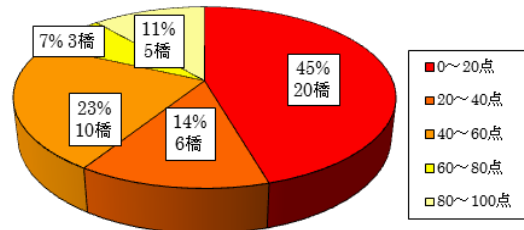


図5 離島の橋梁の健全度

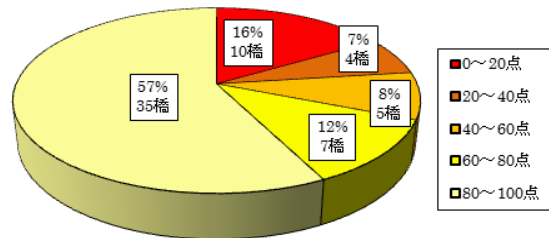


図6 長崎市内の橋梁の健全度

離島の橋梁においては、健全度 80 ~ 100 点の橋梁の 1 割程度と少なく、健全度 0 ~ 40 点の橋梁の半数以上を占めている。点数の低い橋梁のほとんどが腐食による減点であり、山間部の橋梁であっても日当たりの悪さが影響しているものや、埋立地付近の橋梁で水位の上昇によって下フランジが海水に浸ってしまう橋梁もあった。離島では重度の損傷を持つ橋梁が多く、早急な詳細点検や補修が必要だと考えられる。離島の橋梁において概略点検を行った際の損傷状況を写真5に示す。



鉄筋露出

遊離石灰

支承の腐食

層状剥離さび

写真5 離島の橋梁の損傷状況

長崎市内の橋梁においては、健全度 80 ~ 100 点の橋梁の割合が半数以上であり、0 ~ 40 点の割合が 1/4 程度であった。海岸部に腐食による点数の低いものが多く分布しており、山間部は比較的に良好なものが多かった。損傷は、鋼支承、主桁の腐食や床板のひび割れがほとんどで、下部工の損傷は漏水以外あ

まり見られなかった。市街地だけでなく山間部においても長崎市内の橋梁の主食状況は特に問題ない状態であったが、離岸距離の少ない橋梁では塗膜の劣化や床板ひび割れなども目立った。

(2) ワッペン式曝露試験片による腐食環境および腐食減耗量の測定・予測

離島の橋梁の、鋼材別(耐候性鋼、普通鋼)部位別(ウェブ、フランジ)での1年および2年の曝露試験片を回収し、腐食減耗量を算出した結果を図7に示す。鋼材別、部位別、架設位置では、明らかな差異は見られなかった。しかしながら、壱岐の橋梁の2年目の腐食量は、最大でも0.03mmを若干越える程度であったのに対し、五島の橋梁は、0.04mmを越えるものもいくつかあり、壱岐と比べると厳しい環境であることがわかった。

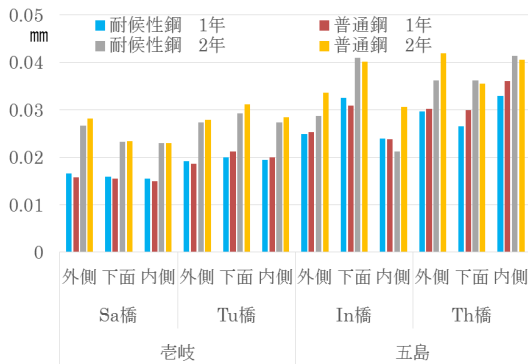


図7 離島の橋梁の腐食減耗量

また、下フランジ下面の耐候性鋼材の1年曝露と2年曝露の腐食減耗量を用いて、(2)式におけるA値、B値を算出し、50年後および100年後の腐食減耗量を表5に示す。離島のいずれの橋梁においても100年後の腐食減耗量は0.5mm以下であり、許容損傷度(100年後の腐食減耗量が0.5mm以下)⁶⁾の範囲に収まっている。

したがって、今回曝露試験片を設置した離島の橋梁については、将来にわたり腐食減耗量は僅少であり、半永久に塗替えを回避できる可能性が高いものと推定され、小規模塗装橋梁の「4/5の橋は放置する」処置は、実現可能であると考えられる。

表5 離島の橋梁の腐食量および長期腐食予測(耐候性鋼)

	Sa橋	Tu橋	In橋	Th橋
1年腐食量	0.016	0.020	0.033	0.027
2年腐食量	0.023	0.029	0.041	0.036
A値	0.016	0.020	0.033	0.027
B値	0.541	0.543	0.333	0.444
50年予測	0.133	0.168	0.120	0.151
100年予測	0.193	0.244	0.151	0.205

単位: mm

(3) 三次元FE解析による健全度評価

固有値解析から得られたA橋の振動モード形状を図8に示す。また、固有振動数の解析値と計測値を表6に示す。解析結果から1次振動モードが曲げモード形状、2次がねじり振動モード形状であることが確認できる。また、固有振動数の比較結果から、解析値と計測値は概ね一致しており、解析モデルが対象橋梁の振動特性をよく再現できていることが確認できる。

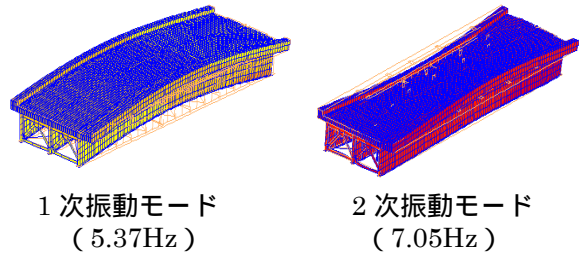


図8 A橋の振動モード

表6 解析モデル一覧

橋梁	次数	解析値 (Hz)	計測値 (Hz)	誤差 (%)
A橋	1次	5.37	5.38	-0.19
	2次	7.05	7.15	-1.40
B橋	1次	3.86	3.96	-2.53
	2次	5.39	5.52	-2.36
C橋	1次	4.90	4.79	+2.30
	2次	5.33	5.18	+2.90
D橋	1次	4.88	4.83	+1.04
	2次	5.21	5.26	-0.95
E橋	1次	2.20		
	2次	2.55	2.50	+2.00
F橋	1次	0.80	0.80	0.00
	2次	1.05	1.10	-4.55
G橋	1次	2.15	2.01	+6.97
	2次	2.96	2.49	+18.9
H橋	1次	3.39	3.43	-1.17
	2次	4.83	4.98	-3.01
I橋	1次	2.39	2.08	+14.9
	2次	4.51	4.52	-0.22
J橋	1次	2.92	2.93	-0.34
	2次	3.41	3.22	+5.90
K橋	1次	2.36	2.36	0.00
	2次	4.63	4.35	+3.63
L橋	1次	3.18	3.20	-0.63
	2次	3.54	3.40	+4.12

さらに表6には、構築した12橋の三次元FEMモデルの解析値と計測値の一覧を示している。一部を除き解析値と計測値の誤差は数%程度である。この結果から、これらの解析モデルは対象橋梁の振動特性をよくシミュレートできており、構造物全体の剛性を再現できていると考えられる。

今回構築した三次元 FEM モデルをデータベース化することにより、損傷発見時に迅速に解析できるため、早期対策が可能となる。これらは、技術力不足、財政的な問題、人材不足などの問題がある市町への展開が期待できる。

<引用文献>

- 1) 飯田眞司:新設橋梁実績の変遷から読み取る塗替え工事の展望、Structure Painting、Vol.36、No.2、pp.22-31、2008
- 2) 高橋権衛:鋼道路橋塗装工事実態調査報告と技術課題、Structure Painting、Vol.30、No.3、pp21-32、2002
- 3) 長崎県土木部道路維持課:橋梁点検マニュアル(案)、2009
- 4) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説、鋼橋編、2012
- 5) MSC Software : MSC.Marc 2008 r1 VolumeA ~ E 2008
- 6) (社)日本鋼構造協会:耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術、テクニカルレポート、No.73、2006

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

森田千尋、梅崎俊樹、山口栄輝、松田浩、武崎啓太、セロファンテープ試験の画像解析による耐候性鋼材のさびの外観評価、構造工学論文集、査読有、Vol.61A、2015、pp.429-438

草野吉俊、緒方宇大、松田浩、森田千尋、古賀掲維、薄肉円筒シェル部材の座屈挙動に関する実験・解析的研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.22、2014、pp.95-101
森田千尋、平田司、松田浩、出水享、牧野高平、長崎県内の小規模鋼橋の腐食状況調査と健全度評価に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.21、2013、pp.856-861

奥松俊博、山崎晃、中村聖三、小松正貴、西川貴文、温度変化に伴う鋼ランガ-トラス桁橋の固有振動数の変化に関する検討、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.21、2013、pp.484-491

牧野高平、森田千尋、松田浩、松山嘉親、渡部祐介、長崎県内にある鋼橋の三次元有限要素解析、土木構造・材料論文集、査読有、第28号、2012、pp.32-38

[学会発表](計16件)

清崎大貴(森田千尋)、離島における耐候性鋼材の腐食環境評価について、平成26年度土木学会西部支部研究発表会、2015年3月7日、琉球大学(沖縄県・中頭郡西原町)

梅崎俊樹(森田千尋)、画像解析を用いた耐候性鋼橋梁におけるさび外観評価について、土木学会第69回年次学術講演会、

2014年9月10日、大阪大学(大阪府・豊中市)

吉浦啓太(奥松俊博)、現地観測記録に基づく伊王島大橋の振動特性に関する研究、平成25年度土木学会西部支部研究発表会、2014年3月8日、福岡大学(福岡県・福岡市)

杉山拓巳(松田浩)、非接触振動計測を用いた既設橋梁の構造振動特性の評価法に関する研究、土木学会第68回年次学術講演会、2013年9月6日、日本大学生産工学部(千葉県・習志野市)

平田司(森田千尋)、離島地域における小規模鋼橋の腐食状況調査、平成24年度土木学会西部支部研究発表会、2013年3月9日、熊本大学(熊本県・熊本市)

平田司(森田千尋)、長崎県内における小規模鋼橋の健全度評価と長期腐食予測について、土木学会第67回年次学術講演会、2012年9月5日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 千尋 (MORITA, Chihiro)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 60230124

(2)研究分担者

松田 浩 (MATSUDA, Hiroshi)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号: 20157324

奥松 俊博 (OKUMATSU, Toshihiro)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30346928

(3)連携研究者

出水 享 (DEMIZU, Akira)
長崎大学・工学研究科・技術職員
研究者番号: 00533308

牧野 高平 (MAKINO, Kohei)
長崎大学・工学研究科・産学官連携研究員
研究者番号: 80568478

渡部 祐介 (WATANABE, Yusuke)
長崎大学・工学研究科・産学官連携研究員
研究者番号: 20600555