

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：15501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22434

研究課題名(和文) ステンレス鋼を桁端部へ適用した高耐久橋梁に向けた異種金属接触腐食抑制手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of galvanic corrosion prevention method for the high-durability bridge by applying stainless steel into the end of the bridge girder

研究代表者

蓮池 里菜 (Hasuike, Rina)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教(テニユアトラック)

研究者番号：80886218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋の腐食防止のため、耐久性に優れたステンレス鋼材(SUS)を普通鋼材(SM)と併用したLCCに優れた高腐食耐久性橋梁の実現を目指す。SUSとSMの接合部で懸念される異種金属接触腐食の大気環境下における腐食程度を明らかとし、抑制手法の提案を試みた。0.1%NaCl溶液供給による腐食促進試験144サイクル後の溶接余盛近傍のSMの平均さび厚は、SUS-SM試験体でSM-SM試験体と比較し約4.7～4.9倍大きくなった。また、SUS-SM試験体の溶接部近傍では、試験体端部の約1.6倍であった。以上より、溶接部近傍(0-1cm範囲)を塗装により防食することで、異種金属接触腐食抑制の可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既設橋梁に一般的に用いられている普通鋼材(SM)を対象に材料を選定しており、本成果からステンレス鋼材(SUS)と組み合わせた場合の耐食性が確保できれば、新設、補修問わず高腐食耐久性橋梁の実現に繋がる。これは老齢化が進む我が国の橋梁の維持管理において社会的意義のある成果と考える。また、鋼種および供給溶液塩分量にパラメータを設け、かつさび厚と自然電位双方の計測を試みており、大気環境下における異種金属接触腐食発生要因、発生条件の明確化、適用環境ならびに劣化評価手法の提案に繋がる学術的意義のある成果と考える。

研究成果の概要(英文)：In order to prevent corrosion of steel bridges, this research aims to realize a highly corrosion-resistance bridge by using stainless steel (SUS) in combination with ordinary steel (SM). To achieve this goal, the level of corrosion in the atmospheric environment of galvanic corrosion, which is a concern at the joint between SUS and SM, attempted to propose a suppression method. The average rust thickness of SM near the welding after 144 cycles of the corrosion acceleration test by supplying 0.1% NaCl solution was about 4.7 to 4.9 times larger in the SUS-SM test piece than in the SM-SM test piece. In the vicinity of the welding of the SUS-SM test piece, the average rust thickness was about 1.6 times that of the end part of the test piece. From the above, it was suggested that galvanic corrosion between SUS and SM could be suppressed by painting near the welded part (range 0-1 cm).

研究分野：鋼構造

キーワード：異種金属接触腐食 ステンレス鋼材 さび厚

1. 研究開始当初の背景

鋼橋で発生する腐食は、鋼材の断面減少、すなわち耐力の低下に繋がる。この腐食を防ぐため、鋼種を耐食性に優れたステンレス鋼材 (SUS 材) へ変更することが考えられる。しかし、SUS 材は材料費が高価であることから、橋梁全体への適用は現実的ではない。橋梁の腐食状況に着目すると、桁中間部は健全であっても桁端部では著しい腐食が確認されるなど (図-1)、曝される環境により腐食劣化状況が大きく異なる。そこで、腐食環境の厳しい桁端部のみに耐食性に優れた SUS 材を適用し、普通鋼材 (SM 材) と併用 (図-2) することで、材料費と維持管理費において LCC に優れた橋梁の実現が期待される。



図-1 橋桁端部の腐食状況

近年、橋梁部材としての SUS 材の活用が注目され¹他)、SUS 材同士や SM 材と接合した場合の耐荷力の検討が進み²他)、未腐食の状態であれば SM 材と同等の性能を有することが明らかとなってきた。一方、鋼材を溶接接合した際、溶接部近傍の熱影響部で金属組織が鋭敏化し選択腐食が発生³することで局所的に腐食することが報告されている。さらに SUS 材と SM 材の接合部では、各鋼材の自然電位の差に起因した異種金属接触腐食の発生が懸念される。これに対し、淡水中および海中での研究は進められているものの⁴他)、橋梁が曝される環境、すなわち大気環境下における研究は少ない。このように、大気環境下での異種金属接触腐食性状は未だ明らかとなっておらず、異種金属の溶接部近傍の腐食性状に着目した研究はほとんど例を見ない。

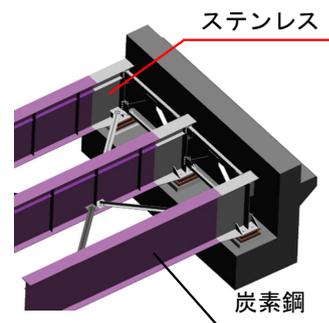


図-2 橋桁端部へのステンレス鋼材の適用

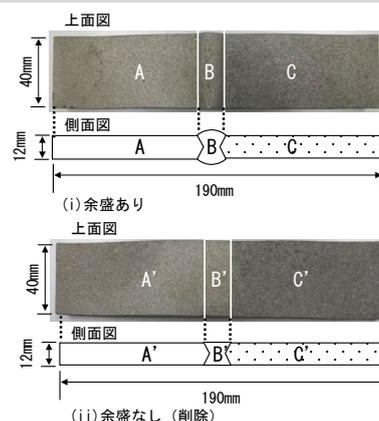
2. 研究の目的

本研究では、橋梁が曝される大気環境下における、SUS 材と SM 材の異種金属接触腐食性状の明確化とその抑制手法の提案を目的とした。この達成に向け、申請者の普通鋼および耐候性鋼を対象とした先行研究成果を基に、SUS 材と SM 材並びに SM 材同士の溶接接合試験体の腐食促進試験を実施した。

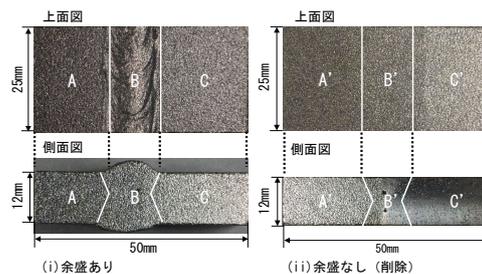
3. 研究の方法

図-3 に作成した試験体 Group1, Group2 それぞれの外観、表-1 に使用鋼材を示す。本研究では、強度、経済性などにおいて実橋梁での適用可能性があると考えられるオーステナイト系ステンレスの SUS304、二相系ステンレスの SUS821L1 を対象に、それぞれと同等の強度を持つ普通鋼である SM400, SM490 と組み合わせた。また、異種金属の組合せと比較するため、試験体 Group1 では溶接接合していない SM 材のみ試験体を、Group2 では SM 材同士での組合せも検討した。腐食促進範囲の検討のため、無塗装にて促進試験を実施した。また、試験体表面のみを観察対象とするため、防食テープで試験体表面以外にテーピングを施した。

図-4 に本試験で適用した乾湿サイクル²他)を示す。時間経過による腐食状況の違いを検討するため、試験体 Group1 では 63 サイクル、Group2 では 72 サイクルおよび 144 サイクル実施し、さび厚を計測した。供給する溶液は、Cl による腐食程度の違いを検討するため、試験体 Group1 では水道水と 5%NaCl 水溶液、Group2 では水道水と 0.1%NaCl 水溶液 (以下、塩水) を使用した。なお、使用した水道水の Cl イオン濃度は約 0.03%である。Group2 では、24 サイクル経過後は 12 サイクルに 1 回溶液を供給し、溶液の滴定量は既往の研究²を参考に、試験体面積に対し 40 μ L/cm² となるように決定した。



(a) 試験体 Group1 (長さ 190mm)



(b) 試験体 Group2 (長さ 50mm)

図-3 試験体外観

既往研究³⁾では、SUS材とSM材の溶接接合試験体において、溶接部近傍にて最大腐食深さとなる事が報告されている。よってここでは、溶接部近傍と試験体端部におけるさび厚の違いを検討した。図-5にさび厚計測範囲を示す。対象範囲のさび厚を10回計測し、最大値と最小値を除いた平均値を計測値とした。加えて、試験体のSM材側の腐食断面を低真空走査電子顕微鏡(SEM)で観察するため、精密砥石切断機により切断後、エポキシ樹脂にて包埋し、表面を研磨した。包埋後の各試験体の最大さび厚とその発生箇所の溶接部からの距離を画像計測により測定した(図-6)。ただし今回の計測では、画像計測により得たさび厚計測値は、試験体によってはサイクル数の増加に伴い小さくなった。これは機械加工時に、生成したさびが剥落したためと考えられたため、電磁膜厚計で得たさび厚計測結果に基づき検討した。

4. 研究成果

(1) 試験体 Group1 (63 サイクル)

図-7に水道水供給、5%塩水供給試験体の電磁膜厚計で得た平均さび厚計測結果を示す。図-7(a)より、水道水供給の63サイクル経過時点で腐食はほとんど進行しなかった。図-7(b)より、5%塩水供給のSUS-SM溶接接合試験体とSM材のみ試験体において、さび厚に大きな違いはなかった。また、余盛の影響が考えられる領域1において、余盛有無によるさび厚の違いはなかった。また、余盛有無に関わらず領域1(溶接部近傍)のさび厚は領域2(SM材中央)、領域3(SM材端部)と比較し21~45 μm 大きく、領域2と領域3では大きな差は無かった。

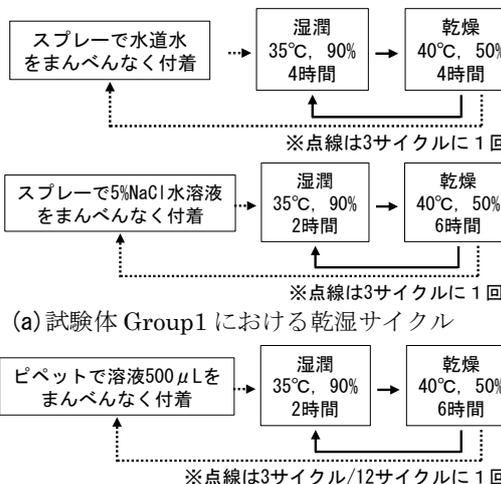
以上より、水道水、5%塩水供給ではSUS-SM試験体がSM材のみ試験体より腐食が激しく進行するような、異種金属接触腐食は発生しなかった。これは水道水供給では腐食程度が十分でなく、5%塩水供給では塩化物による腐食促進が激しかったためと考えられる。よって試験体Group2では、比較対象としての水道水供給と、5%塩水と比較し塩化物濃度を抑えた0.1%塩水を供給溶液とした。また、材質の違いによる影響を検討するため、SM400-SUS304、SM490-SUS821Lの組合せに対し試験を行った。

(2) 試験体 Group2 (72 サイクル)

図-8に水道水供給、0.1%塩水供給試験体の72サイクル経過時点の試験体外観を、図-9に電磁膜厚計で得た平均さび厚計測結果を示す。図-8

表-1 使用鋼材

組合せ	A, A'	B, B'	C, C'	
試験体 Group1	SUS-SM	SUS304	GFW309	SM400
試験体 Group2	SUS-SM (1)	SUS304	GFW309	SM400
	SUS-SM (2)	SUS821L	GFW309	SM490
SM-SM	SM400	YM55C	SM400	



(a) 試験体 Group1 における乾湿サイクル

(b) 試験体 Group2 における乾湿サイクル

図-4 乾湿サイクル

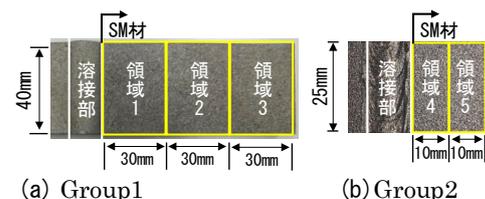


図-5 さび厚計測範囲

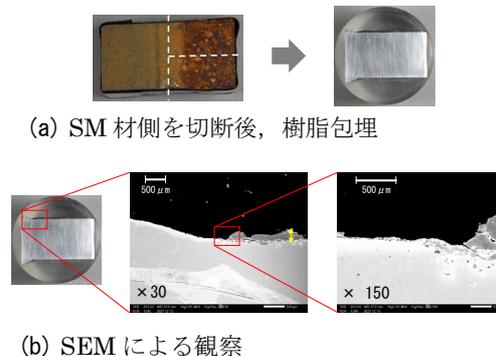
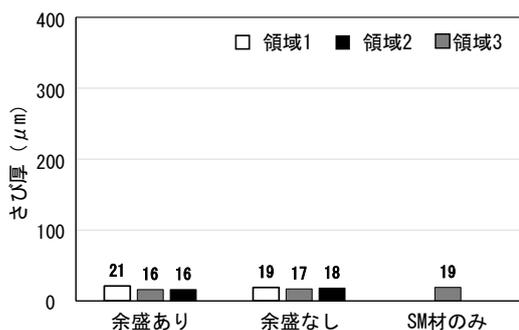
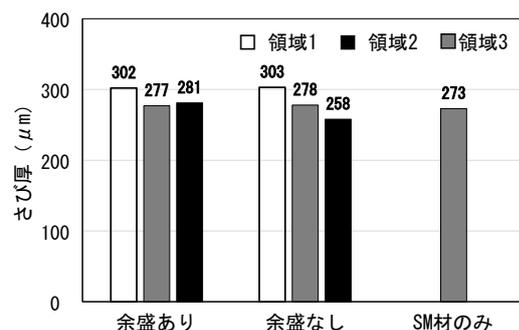


図-6 断面分析手法



(a) 水道水供給試験体

図-7 さび厚計測結果 (Group1)

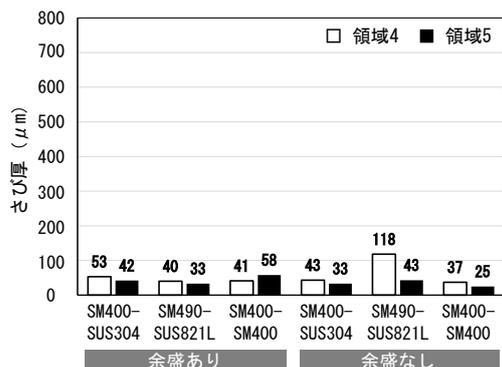


(b) 5%塩水供給試験体

より 0.1%塩水供給試験体において、異種金属接合試験体では SM 同士試験体と比較し暗い褐色のさびが生成していた。図-9 (a) より、水道水供給で生成したさび厚は 27~58 μm と薄く腐食の進行は緩やかであり、余盛有無、鋼材の組合せおよび鋼種による差はほとんど無かった。一方図-9 (b) より、0.1%塩水供給により SM 同士試験体に比べて異種金属接合試験体でさび厚が 49~87 μm 大きくなった。また、異種金属接合試験体においてのみ、溶接部近傍 0~10mm 範囲の領域 4 のさび厚は、10~20mm 範囲の領域 5 と比較し大きくなっていった。これらは異種金属接触腐食の発生に伴う腐食促進に起因するものと考えられる。また、余盛有無を比較すると、全ての試験体において余盛ありでさび厚がわずかに大きくなっていった。なお、異種金属接合 SM 同士試験体のさび厚は 83~187 μm であり、耐候性鋼材のさび外観評点⁴⁾では最も健全な評点 5 に分類される程度の軽微な腐食であった。

(3) 試験体 Group2 (144 サイクル)

図-10 に水道水供給、0.1%塩水供給試験体の 144 サイクル経過時点の試験体外観を、図-11 に電磁膜厚計で得た平均さび厚計測結果を示す。図-10 より 0.1%塩水供給試験体において、72 サイクル時点と同様に、異種金属接合試験体では SM 同士試験体と比較し暗い褐色のさびが生成していた。図-11 (a) より、余盛なし SM490-SUS821L 試験体の溶接部近傍のみ 118 μm と他と比べて大きな値となったものの、その他は 25~58 μm と薄く腐食の進行は緩やかであった。また、余盛有無、鋼材の組合せおよび鋼種による差はほとんど無かった。図-11 (b) より、0.1%塩水供給により SM 同士試験体に比べて異種金属接合試験体でさび厚が 358~388 μm 大きくなった。また、72 サイクルの結果と同様に、異種金属接合試験体においてのみ、溶接部近傍 0~10mm 範囲の領域 4 のさび厚は、10~20mm 範囲の領域 5 と比較し大きくなっており、領域 4 は領域 5 の約 1.6~2.5 倍大きなさび厚となった。これより、試験期間の増加に伴い異種金属接触腐食が進行したと考えられる。また、余盛有無によるさび厚の差は少なく、腐食進行と共にその影響は小さくなると考えられる。なお、異種金属接合試験体のさび厚は 201~506 μm 、SM 同士試験体は 98~118 μm であり、耐候性鋼材のさび外観評点⁴⁾ではそれぞれ評点 3~4 に分類される中程度の腐食、評点 5 に分類される程度の軽微な腐食であった。



(a) 水道水供給試験体

図-11 さび厚計測結果 (Group2, 144 サイクル)

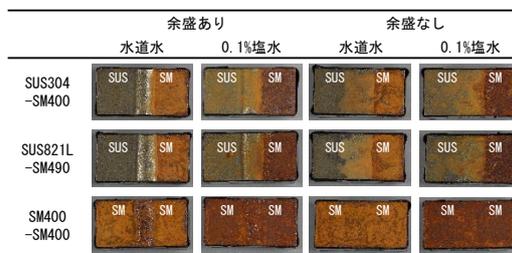
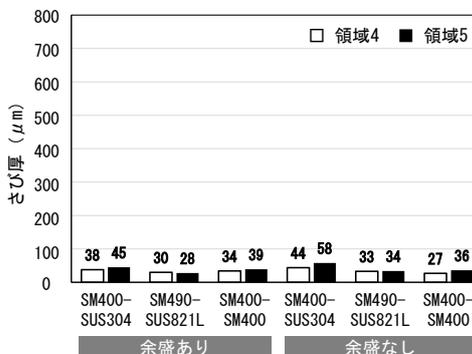
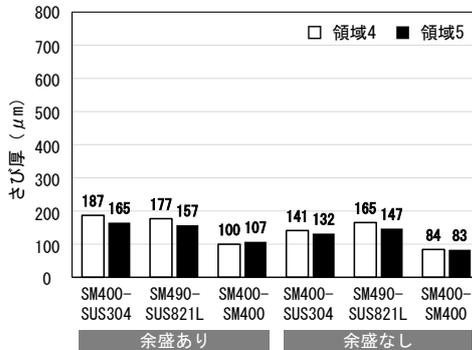


図-8 72 サイクル時点試験体外観



(a) 水道水供給試験体



(b) 0.1%塩水供給試験体

図-9 さび厚計測結果 (Group2, 72 サイクル)

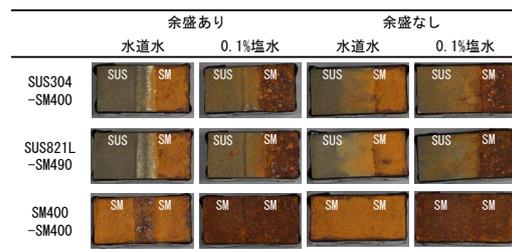
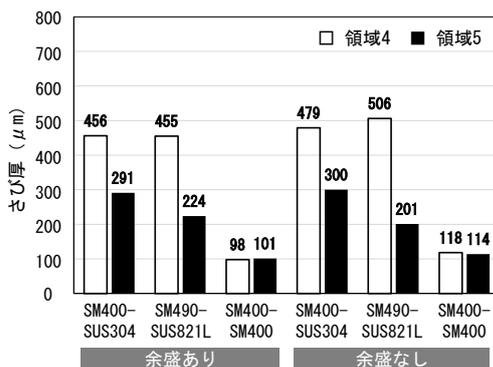


図-10 144 サイクル時点試験体外観



(b) 0.1%塩水供給試験体

(4) 自然電位計測

異種金属接触腐食の発生有無について、発生要因である自然電位の差から判断するため、計測手法について検討した。SUS材をSM材と溶接接合する場合、一般に溶接金属にはSUS材が用いられる。よって、異種金属接触腐食はSM母材・溶接金属間、SM母材-SUS母材間で発生し得る。また、ステンレス鋼は溶接時の熱影響部(HAZ)において母材と比較し耐食性が劣る。そこで本研究ではSM母材、SM材HAZ、溶接金属、SUS材HAZ、SUS母材の5か所に分けた自然電位計測を試みた。

図-12に電位計測試験体模式図を、図-13にSM400-SUS304試験体の促進試験前の自然電位計測結果を示す。図-12に示すように、試験体Group2で用いた試験体(図-3(b))を上述の5か所の範囲に切断し、各々が溶媒や銅線を介さずに接触しないようエポキシ樹脂に包埋し、試験体表面のみが露出するよう切断、研磨した。図-13よりSM材、SUS材はそれぞれ既往研究⁵⁾で示されている自然電位と同程度の値を示し、本測定方法は妥当と考えられる。一方、溶接金属がSM材に近い電位となっており、電位以外の分析を進めている。また、現在(i)切断後包埋した試験体、および(ii)溶接接合まま試験体に対し促進試験を実施しており、腐食進行後に電位を計測し検討を進める。

(5) まとめ

本研究では、大気環境下におけるSUS材とSM材の異種金属接触腐食性状の明確化とその抑制手法の提案に向け、SUS材とSM材並びにSM材同士の溶接接合試験体の腐食促進試験を実施し、主にさび厚計測結果により検討した。腐食促進試験環境下における異種金属接触腐食は、0.1%濃度NaCl供給環境下において著しく、溶接余盛近傍、すなわちSUS材近傍のSM材においてSM材端部と比較し大きくなることが分かった。以上より溶接部近傍0mmから10mm範囲において塗装による防食を施すことで、異種金属接触腐食を抑制できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集 No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 2) 三木千尋, 市川篤司, 鶴飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案, 土木学会論文集 No.738/I-64, pp.271-281, 2003.
- 3) 西脇天太, 宮崎靖大, 小見恒介, 中野幸広: ステンレス鋼と炭素鋼を接合した厚板の2年間大気暴露試験, 鋼構造年次論文報告集 Vol.25, 2017.
- 4) (社)日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート No.86 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全, 2009.
- 5) 伊藤公夫, 松橋亮, 加藤敏朗, 三木理, 紀平寛: 自然海水中に浸漬したステンレス鋼の電位貴化メカニズムの検討, 材料と環境, 50, pp.285-291, 2001.

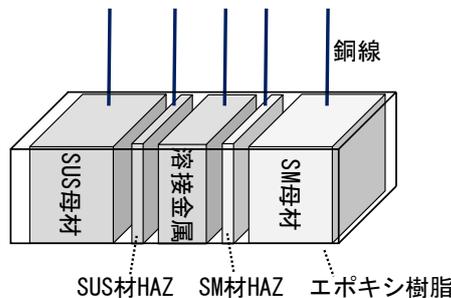


図-12 電位計測試験体模式図

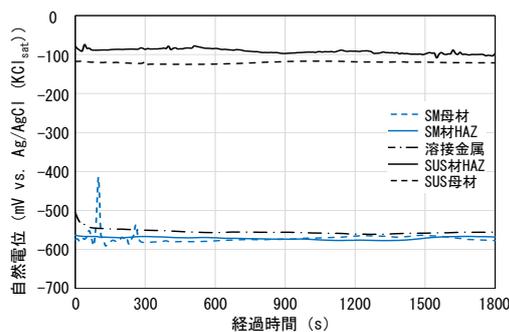


図-13 促進試験前試験体の自然電位計測結果 (SM400-SUS304)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木下実梨, 蓮池里菜, 下里哲弘
2. 発表標題 突合せ溶接された炭素鋼材とステンレス鋼材の異種金属反応特性に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会西部支部沖縄会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下実梨, 蓮池里菜, 下里哲弘, 荒牧聡
2. 発表標題 ステンレス鋼と炭素鋼の突合せ溶接継手における異種金属接触反応特性に関する研究
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 筒井皓太, 蓮池里菜, 麻生稔彦
2. 発表標題 ステンレス鋼に溶接された炭素鋼の異種金属接触腐食性状のさび厚に基づく検討
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------