

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249136

研究課題名(和文) 二軸及び重畳応力変動载荷条件下における疲労亀裂の高精度な成長履歴推定

研究課題名(英文) Noble estimation procedure of fatigue crack growth under in-plane biaxial or superimposed stress conditions

研究代表者

後藤 浩二 (GOTOH, Koji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60274487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：船舶や海洋構造物では、波浪変動外力を考慮した疲労強度評価が行われているが、高周波弾性振動成分が重畳する影響を考慮すべきとの指摘がなされ、従来の疲労強度評価手法を適用すると過度に安全側に評価されるという問題が生じた。また、従来の疲労強度評価は単軸繰返し負荷条件下での試験結果に基づいているが、実際の構造物は複数方向から異なる位相差を有する負荷履歴に曝されている。本研究では(1)重畳応力履歴条件下における疲労亀裂成長挙動評価手法、(2)位相差を有する面内二軸繰返し応力履歴に曝される表面亀裂の成長挙動評価に取り組み、それぞれについて、精度良く疲労亀裂成長履歴を推定する方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Although the fatigue strength evaluation for ships and offshore structures is performed in consideration of external force induced by sea state, it has been pointed out that the influence of superimposed high-frequency elastic vibration components should be considered. However, the conventional fatigue strength evaluation procedure gives a safe side evaluation results. Furthermore, the fatigue strength is evaluated based on the test results under uniaxial cyclic load condition, although the actual structure is exposed to the biaxial or multiaxial with different phase differences. In this research, the following two research subjects were conducted. (1) Estimation method of fatigue crack propagation under superimposed stress history condition, (2) Estimation method of the growth behavior of surface crack under in-plane biaxial cyclic stress history with phase difference. We established a method to estimate fatigue crack growth history well under these complicated load conditions.

研究分野：溶接構造物の疲労及び破壊強度評価

キーワード：疲労 破壊力学 船舶工学 機械材料・材料力学

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋構造物では、外力推定・応力解析精度の向上並びに鋼材・溶接材の高靱性化の結果、脆性破壊事故は激減した。一方で疲労損傷は従来にも増して多発し続けている。この対策として、「耐疲労損傷鋼」も開発・供用され始めたが、就航船の大半には従来材料が用いられている上、就航期間延長が志向される現状を勘案すれば、就航中の船舶・海洋構造物における疲労損傷の危険性はむしろ増大していると懸念される。また、船舶の大型化に伴う極厚板適用の拡大に伴い、疲労損傷の不適切な管理が脆性破壊事故を誘発する可能性も懸念される。さらに、海洋構造物は船舶以上に外洋で長期間係留されるが、損傷発生時の甚大な経済損失を考慮すれば、海洋構造物には船舶以上の疲労強度に対する定量的な検討が必要である。

船舶や海洋構造物の耐疲労設計では、波浪変動外力に起因する繰返し負荷を考慮した疲労強度評価が行われてきたが、近年、Whipping や Slamming 等に起因した高周波の弾性振動成分が重畳することを考慮すべきであると指摘する論調が出てきた。この影響を従来の線形累積損傷則と S-N 曲線に基づく疲労強度評価手法で取り扱おうと、従来の疲労損傷実績と比較して過度に安全側の評価が与えられることから、これをどのように取り扱うべきかという問題が提起され、研究代表者らは、重畳応力履歴中で疲労亀裂成長に有効な応力履歴を抽出する手法を提案していた。

一方、従来の疲労強度評価では、単軸の繰返し負荷が与えられる疲労試験結果を基にしているものの、実際の構造体は、複数方向から異なる位相差を有する負荷履歴に曝されていることから、これに対する評価手法の確立が要請されていた。当然ながら、複数方向成分の負荷に弾性振動応力が重畳した状態も生じている。

2. 研究の目的

本研究では上述の研究背景に対応するため、(1) 重畳応力履歴条件下における疲労亀裂成長挙動評価手法のさらなる改善、(2) 船体の損傷において沈没等の致命的損傷に直結する外板の健全性評価を念頭に、位相差を有する面内二軸繰返し応力履歴に曝される表面亀裂の成長挙動評価、を研究課題として取り上げた。

3. 研究の方法

(1) 重畳応力問題：研究代表者が既に提案している、重畳応力履歴下において疲労亀裂の成長に有効な応力履歴の抽出アルゴリズムを再度検証して問題点を抽出した上で、必要な改良を行う。また、波浪変動外力履歴に高周波弾性振動が重畳した、いわゆる重畳応力状態は全負荷履歴中で継続しているのではなく、重畳状態が「間欠的」に出現してい

ることが、実際の船体での応力履歴測定結果より判明している。一方、先行研究ではこの間欠状態を考慮していない。(全負荷区間で連続的に重畳応力状態が継続している状態を評価していた。)そこで、複数の間欠的に重畳応力期間が生じる負荷履歴を付与した疲労亀裂伝播試験を行うと共に、本研究でさらなる改良を施した疲労亀裂伝播解析コードを用いて数値シミュレーションを行うことで、重畳応力状態が間欠的に出現する場合の疲労亀裂成長挙動を評価する。

(2) 二軸応力問題：研究代表者らによる先行研究の結果、二軸繰返し負荷問題を等価な単軸繰返し負荷問題に置き換える手法が開発されたが、これは、ある程度の大きさを有する板厚貫通亀裂問題に対してのみ妥当性が検証されている。一方、船体のような板殻構造で問題となる疲労亀裂の形態は、角回し溶接部のような応力集中部から発生・成長する表面亀裂である。そこで、本研究では(2a) 平板に複数の寸法パターンを有する楕円状初期欠陥を導入した十字形試験片、及び(2b) 面外ガセット継手を有する十字形試験片(角回し溶接部から疲労亀裂が発生するようにしたもの)、に位相差及び二軸荷重比が異なる繰返し負荷を与え、疲労亀裂の成長を観察すると共に、亀裂成長履歴を推定する手法を検討する。推定手法検討に際して重要と成るのは、二軸繰返し負荷状態での表面亀裂形状変化則であり、最初にこれの検討を行い、その後、先行研究の手法と組み合わせることで、疲労亀裂成長履歴を推定する。

4. 研究成果

(1) 重畳応力問題

中央貫通亀裂試験片(CCT 試験片)に、Fig.1 に例示するような複数周波数成分を有する応力履歴を付与した疲労亀裂伝播試験を実施し、亀裂成長履歴を測定した。なお、Fig.1 は低周波成分 2 サイクルの図となっているが、実験ではこれを継続して付与している。また、Fig.1 中で平均応力は 65MPa となっているが、低周波数成分 20,000 サイクルごとに平均応力を 65 95 65 35 65・・・MPa と変化した。

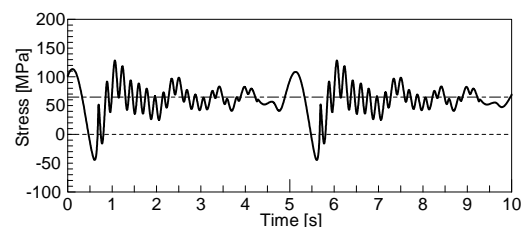


Fig.1 An example of applied stress history.

次に、疲労亀裂伝播に寄与する応力履歴を抽出するアルゴリズムを構築し、これを研究代表者・分担者が提案している疲労亀裂伝播

シミュレーション (Toyosada M, Gotoh K, Niwa T., 2003, Fatigue crack propagation for a through thickness crack tip, Int. J. of Fatigue, 26(9), 983-992.) に実装させて伝播解析を行い, 上記の亀裂伝播履歴測定結果と比較することで提案アルゴリズム及び疲労亀裂伝播履歴推定手法の妥当性を検証した.

提案アルゴリズムでは, 「疲労亀裂伝播を起こすために寄与するエネルギーは亀裂先端近傍で生じている繰返し塑性仕事 (ξ) から供給される」との考えに基づき, 亀裂伝播に必要な ξ の下限値 (ξ_{limit}) を一定かつ一周波数成分の応力振幅のみが付与された疲労亀裂伝播試験と数値シミュレーションの比較より同定し, これを上回る ξ 値を示す応力履歴を全負荷履歴から抽出するというものである. 提案アルゴリズムの概念を Fig.2 に示す.

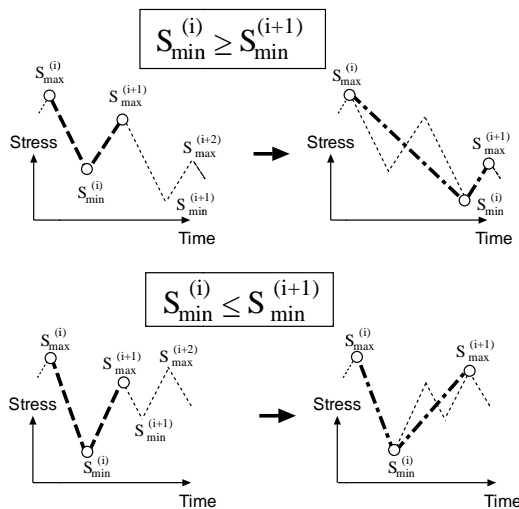


Fig.2 Extracting procedure for the effective stress sequence during random loading.

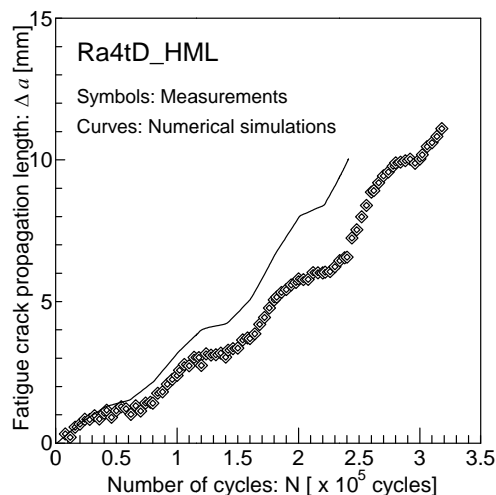


Fig.3 Comparison of measured crack growth curves and estimated ones under variable stress sequences.

この機能を研究代表者・分担者が提案している疲労亀裂伝播シミュレーションに実装させ, 抽出された履歴に対する疲労亀裂伝播に関する数値シミュレーションを実施した. 結果の一例として, Fig.1 に示す応力履歴に対する実測結果と数値シミュレーション結果の比較を Fig.3 に示す. また, 同解析において疲労亀裂の伝播に有効として抽出された応力履歴の一例を Fig.4 に示す.

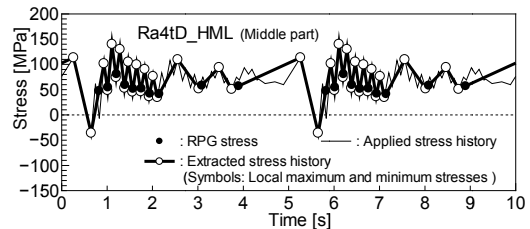


Fig.4 An example of the extracted effective stress sequences under variable loadings.

以上に示した結果より, 複数周波数成分を有する疲労亀裂伝播履歴を精度良く推定できることが確認されると共に, 複数周波数成分を有する応力履歴が付与される場合, 一部の高周波成分は疲労亀裂伝播に寄与しないことも確認された.

(2) 面内二軸繰返し応力問題

(2a) 平板に存在する表面亀裂問題

面内二軸繰返し荷重を受ける表面亀裂の形状変化履歴を検討するため, 十字型試験片中央部に表面亀裂 (点状および扁平形状) を導入し, Fig.5 に示す4機の独立したアクチュエータを制御することで位相差を有する二軸面内繰返し負荷を与えて, 表面亀裂の成長に伴う形状変化を調査した. 実験により得られた亀裂面の一例を Fig.6 に示す.

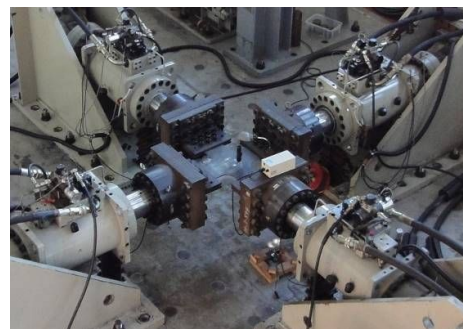


Fig. 5 Set-up of fatigue test under biaxial loading.

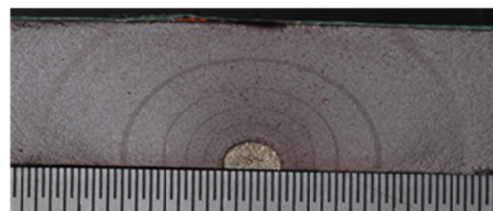


Fig.6 An example of observed crack surface.

(Specimen S-2)

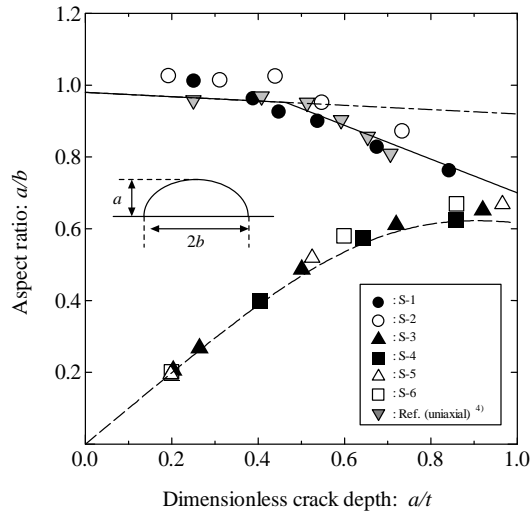


Fig.7 The aspect ratio evolution of a surface crack in the various test conditions.

Table 1 Applied specimen geometries and loading conditions.

ID	Initial defect		Plate thickness [mm]
	Depth: a_0 [mm]	Length: $2b_0$ [mm]	
S-1	4	8	16
S-2	2	4	10
S-3		20	
S-4			
S-5			
S-6			

ID	R	$\Delta\sigma_{x0}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{y0}$ [MPa]	ϕ [rad]
S-1	0.05	120		π
S-2		172		
S-3		190		0
S-4		133		π
S-5		190	95	0
S-6		150	75	π

Note:

- 1) R means the applied stress ratio defined by $\sigma_{x0}^{\min} / \sigma_{x0}^{\max}$ or $\sigma_{y0}^{\min} / \sigma_{y0}^{\max}$.
- 2) $\Delta\sigma_{x0}$ and $\Delta\sigma_{y0}$ are the applied stress range of x and y component, respectively.
- 3) ϕ means the phase difference of biaxial loading.

Fig. 7 は、測定された亀裂形状成長変化であり、試験条件（初期欠陥寸法、負荷条件）を Table 1 に示した。Fig.7 中の薄墨逆三角記号は、川原ら（川原、栗原、日本造船学会論文集、Vol.137, pp.297-306, 1975）により測定された単軸繰返し負荷を受ける場合の表面亀裂形状変化履歴（初期欠陥は点状）である。この結果から、表面亀裂の形状変化は負荷軸および負荷位相差には依存しない

ことが確認された。

(2b) 面外ガセット継手問題

大型溶接構造物の実機では疲労亀裂は溶接止端部から発生、成長することを考慮し、Fig.8 に示す面外ガセット溶接試験片に位相差を有する二軸繰返し負荷を与え、疲労亀裂成長履歴を測定した。

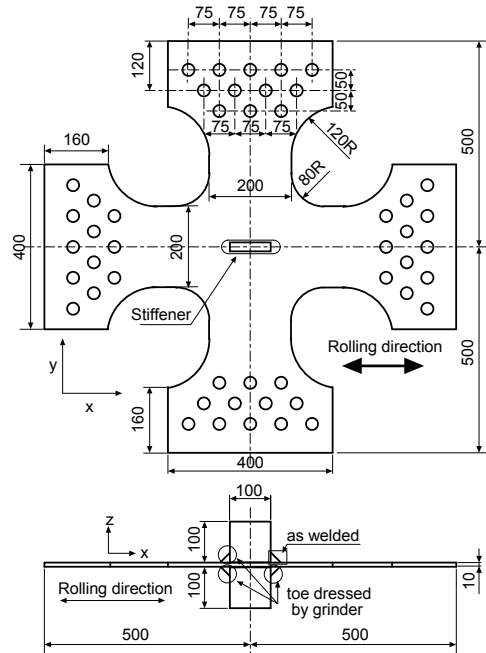
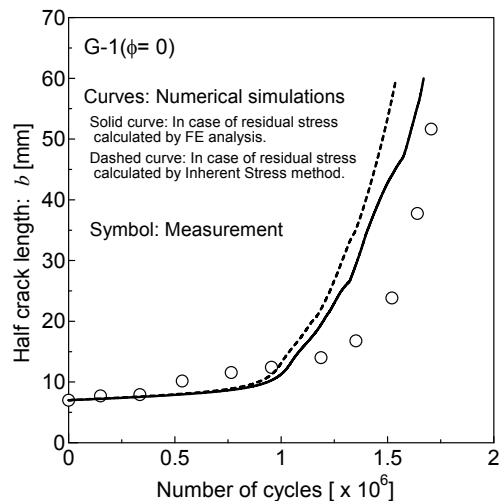


Fig. 8 Specimen configuration used (unit in mm).

また、本研究グループが板厚貫通亀裂に対して有用性を確認している位相差を有する面内二軸繰返し負荷条件下における疲労亀裂伝播解析手法（Gotoh, K., Niwa, T., Anai, Y., Marine Structures, Vol.42, pp.53-70, 2015.）を適用して亀裂成長履歴を推定し、実測結果と比較した。この際に、溶接残留応力分布の影響を定量的に考慮している。



$R (= \sigma_{x0}^{\min} / \sigma_{x0}^{\max})$	0.05
x direction stress range: $\Delta\sigma_{x0}$	110 MPa
y direction stress range: $\Delta\sigma_{y0}$	110MPa

Fig.9 Fatigue crack growth curves.

亀裂成長履歴の推定結果と測定結果の比較例を Fig.9 に示す。同図より、本研究により提案する手法により、溶接継手に対しても比較的良好的な精度で亀裂成長履歴を推定できることが確認された。

(3) 将来課題

(3a) 重畳応力問題

実際に構造物が曝される重畳応力状態は間欠的に生じており、この程度が疲労亀裂伝播履歴に及ぼす影響についての定量的な検討が必要である。また、構造物中に存在する亀裂の形状は板厚未貫通の表面(または埋没)亀裂形状であることが多いため、表面(埋没)亀裂が重畳応力履歴に曝される場合の成長予測に本研究で提案した手法が適用できるか否かの検証が必要である。

(3b) 面内二軸繰返し応力問題

研究成果(2b)に示した面外ガセット継手では、表面亀裂伝播解析に必要な表面亀裂形状(アスペクト比)変化履歴は実測結果から与えている。一般に溶接止端部では複数の微小表面亀裂が発生し、溶接残留応力分布の影響も受けつつ合体しながら成長している。このように溶接止端部での亀裂成長は複雑な履歴を経ていることもあり、形状変化履歴に及ぼす初期欠陥及び位相差影響の定量化には至っていない。したがって、溶接止端部で成長する疲労表面亀裂の成長履歴を定量的に予測する手法の構築が必要不可欠である。加えて、実際の構造物に生じる二軸繰返し負荷では、負荷方向で周波数が異なる場合や複数周波数成分を有する重畳応力が作用することが一般的であるので、これらに対して本提案手法の適用可能性の検証も必要である。

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 6 件)

1. 後藤浩二, 清水啓司, 穴井陽祐, 丹羽敏男, 位相差を有する面内二軸繰返し荷重下における面外ガセット溶接継手の疲労亀裂成長挙動, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読あり, Vol.26, 2017, pp157-164, <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.26.157>.
2. 高木芳史, 後藤浩二, 圧縮荷重作用時に生じる初期欠陥面閉口挙動を考慮した疲労亀裂伝播解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読あり, Vol.26, 2017, pp131-143, <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.26.131>
3. Yosuke ANAI, Toshio NIWA and Koji

GOTOH, Practical Formula of the Shape Evolution of a Surface Crack Under Fatigue Loading, Proceedings of OMAE 2015, 査読あり, 2015, OMAE2015-41978.

4. 松田和貴, 後藤浩二, 複数周波数成分を有する重畳応力履歴の単一周波数応力履歴への置き換えに関する一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 査読なし, Vol.20, 2015, pp.489-492.

5. Kazuki Matsuda and Koji Gotoh, Numerical simulation of fatigue crack propagation under superimposed stress histories containing different frequency components with several mean stress conditions, Marine Structures, 査読あり, Vol.41, 2014, pp.77-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.12.005>

6. 松田和貴, 後藤浩二, 平均応力が変動する重畳応力条件下における疲労亀裂伝播挙動解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読あり, Vol.20, 2014, pp.131-137.

[学会発表](計 10 件)

1. 高木芳史, 後藤浩二, 表面亀裂に対する応力拡大係数重み関数の拡張と Paris の相反定理に基づく亀裂開口変位の推定, 溶接構造シンポジウム 2017, 2017 年 12 月 6 日, 大阪府吹田市
2. 穴井陽祐, 丹羽敏男, 後藤浩二, 面内二軸繰返し荷重下における疲労表面亀裂の形状変化, 日本船舶海洋工学会平成 29 年秋季講演会, 2017 年 11 月 27 日, 広島県広島市.
3. Keishi Shimizu, Koji Gotoh, Yosuke Anai and Toshio Niwa, Numerical Simulation of Fatigue Crack Propagation in an Out-of-plane Gusset Welded Joints under Biaxial Tensile Loadings with Different Phases, 30th Asia Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM2016), 2016 年 10 月 10~13 日, Mokop National University, South Korea.
4. 高木芳史, 後藤浩二, 過大圧縮荷重作用時に生じる初期亀裂面閉口挙動を考慮した疲労き裂伝播挙動, 日本船舶海洋工学会 2016 年秋季講演会, 2016 年 11 月 21 日, 岡山県岡山市.
5. 清水啓司, 後藤浩二, 穴井陽祐, 丹羽敏男, 位相差を有する二軸載荷条件を受ける面外ガセット溶接継手の疲労亀裂伝播解析, 日本船舶海洋工学会 2016 年秋季講演会, 2016

年 11 月 21 日，岡山県岡山市。

6. 山下紘平，後藤浩二，表面亀裂に対する亀裂結合力モデル構築に向けた基礎検討，日本船舶海洋工学会 2016 年春季講演会，2016 年 5 月 26 日，福岡県福岡市。

7. 穴井陽祐，丹羽敏男，江島翔太，後藤浩二，単一疲労表面亀裂の成長挙動に関する研究，日本船舶海洋工学会平成 27 年春季講演会，2015 年 5 月 25 日，兵庫県神戸市。

8. Yosuke ANAI，Toshio NIWA and Koji GOTOH，Practical Formula of the Shape Evolution of a Surface Crack Under Fatigue Loading，ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2015) 2015 年 6 月 2 日 St. John's, NL, Canada.

9. 松田和貴，後藤浩二，複数周波数成分を有する重畳応力履歴の単一周波数応力履歴への置き換えに関する一考察，日本船舶海洋工学会平成 27 年春季講演会，2015 年 5 月 25 日，兵庫県神戸市。

10. 松田和貴，後藤浩二，等価疲労応力を用いた複数周波数成分を有する重畳応力履歴の単一周波数応力履歴への置き換えに関する一考察，溶接構造シンポジウム 2014，2014 年 12 月 4 日，大阪府吹田市。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 浩二 (GOTOH, Koji)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：6 0 2 7 4 4 8 7

(2) 研究分担者

丹羽 敏男 (NIWA, Toshio)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：1 0 2 0 8 2 6 7

(3) 連携研究者

穴井 陽祐 (ANAI, Yosuke)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：6 0 4 7 0 0 5 1