

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560803
 研究課題名（和文） 4000m水深科学掘削用 CFRP 製ライザー管の引張・疲労強度に関する研究
 研究課題名（英文） Tensile and Fatigue Strengths of CFRP Riser Pipe for Scientific Drilling in 4000 m deep waters
 研究代表者
 渡辺 喜保 (WATANABE YOSHIYASU)
 東海大学・海洋学部・教授
 研究者番号：20384935

研究成果の概要：平成 17～18 年度の科学研究費補助金を得て開発して来た CFRP 製ライザー管について、模型の疲労実験を実施し、続いて時刻歴応答解析による CFRP 製ライザー管が受ける動的荷重および弾塑性解析により破壊のプロセスと破断荷重を検討した。さらに、これまでの結果を 4000m 水深科学掘削用 CFRP 製ライザー管の設計の考え方としてまとめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：ライザー管、CFRP、継手構造、4000m 水深、科学掘削、疲労強度、引張強度

1. 研究開始当初の背景

研究代表者等が提案してきた CFRP 製ライザー管は、CFRP 製の管本体とその両端に位置する鋼製コネクタから構成され、CFRP 製管と鋼製コネクタが機械的に結合する継手構造を有している。また、CFRP 製管と鋼製コネクタとの継手構造として、互いにかみ合う 7 組の山を設けた構造を採用し、CFRP 製管を構成する 7 層のヘリカル層の各層を対応する鋼の山に引っ掛け、周方向に巻いたフープ層で押さえる層構造を採用している。平成 17 年度には、山の接触部の半径、山の傾斜角、山と山との間隔（ピッチ）、ヘリカル層を締め付けるフープ層の厚さと配置位置をパラメタとし、有限要素法解析を実施し最適化を

行い、ライザー管内直径が 100mm となる、実機ライザー管の約 1/5 縮尺モデルでは、各山の形状は山の半径が中央部から端部に向かい 14mm から 8mm へと変化し、山の傾斜角は 60°、ピッチは 14mm で、層構成は 0.4mm のヘリカル層の間に 0.4mm のフープ層をサンドイッチ状に配置する継手構造が最適形状の一つであることを示した。平成 18 年度には、平成 17 年度の研究成果を用いて最適化された継手形状をもつ、ライザー管内直径が 100mm となる、実機ライザー管の約 1/5 の縮尺モデルの引張実験を実施し、実験時に得られた 94.1tonf の引張強度は、実機に換算すると 2352.5tonf に相当する、十分な引張強度を有することを示した。

2. 研究の目的

科学研究費補助金の平成 17、18 年度の研究所の経過を受けて、提案している 4000m 水深科学掘削用 CFRP 製ライザー管の設計をより信頼性の高いものに進めるためには、CFRP 製ライザー管の疲労強度の検討および引張荷重に対する破壊のプロセスと破断荷重を求める一般性の高い手法の検討が重要と考えられ、これらを平成 19、20 年度の研究の中核とする。

平成 19 年度の主研究目的として、科学研究費補助金の平成 18 年度の研究所で引張実験に供した、最適化された CFRP 製ライザー管模型と同じ層構成、山谷の形状をもつ模型を製作し、引張の繰返し荷重を負荷する疲労実験を実施し、疲労強度を検討する。19 年度のもう一つのテーマは、有限要素法解析により、ライザー管上端に種々の周期の上下方向の正弦波形の振動を与え、時刻歴応答解析を行い、ライザー管の動的挙動を検討することである。

平成 20 年度の主研究目的はヘリカル層繊維部、フープ層繊維部およびフープ層樹脂部の各々に破壊のクライテリアを設定し、設定したクライテリアに達した要素の剛性を低下させる、より一般性の高い弾塑性解析により、継手部の破壊のプロセスおよび破断荷重を求めることである。そして、最後に、これまでの成果をまとめて、4000m 水深科学掘削用 CFRP 製ライザー管の設計の考え方を提案することである。

3. 研究の方法

(1) CFRP 製ライザー管の疲労強度の検討

疲労試験に供する試験模型の形状寸法を図 1 に示す。疲労試験模型は、引張実験に供した模型と同一の継手構造および内径の縮尺を有する (1/5 縮尺)。中央部の長さは、継手部の応力が変化しないことを FEM 解析により確認したうえで、疲労試験機に取り付けられるように 100 mm に縮められている。鋼製コネクタの山の半径 R1~R7 は、14、12、10、8、8、8、8 mm であり、山のピッチは 14 mm である。CFRP 製管の層構成は、 $\pm 20^\circ$ の繊維方向をもつ厚さ 0.38 mm のヘリカル層 7 層およびヘリカル層を締め付ける厚さ 0.38 mm のフープ層 7 層である。フープ層は、谷部では、谷底全体まで配置されたヘリカル層を締め付けるため増厚されている。使用した CFRP および鋼製コネクタの材料特性を表 1 に示す。

実験は東海大学海洋学部 6 号館の東京衡機製 630 kN 疲労試験機で行う。模型の上下端はユニバーサルジョイントで試験機に結合することにより、曲げの発生を防止している。実験では、最初の半サイクルは荷重 1 kN のときを零点とし、10 kN から最大荷重 450 kN

まで 10 kN 毎に荷重を停止し、荷重、変位および歪の計測を行う。その後の 100 サイクルは 10~450 kN の引張荷重を静的に荷重し、1~5、8~10、20、40、80、100 サイクルにおいて、計測を行う。100 サイクル以降は自動で繰返し荷重を荷重し、計測を行う時のみ試験機を停止し静的に荷重する。変位および歪の計測位置を図 1 に示す。荷重は試験機の荷重計により検出する。また、変位は計測位置の変位をレーザー変位計で計測することにより、継手構造部を含む模型の相対変位、すなわち伸びを求める。歪は管長さ中央に 3 軸歪ゲージを貼付し、中央における CFRP 製管最外層の歪を計測する。各山に対応する CFRP 製管最外層に 7 枚の単軸歪ゲージ (ライザー管中央から端部に向け F1~F7 と名付ける) を軸方向に貼付することにより、継手構造部の歪を計測する。なお、変位および歪は管断面において 180° の間隔で A 面および B 面と名付けた 2 箇所計測する。

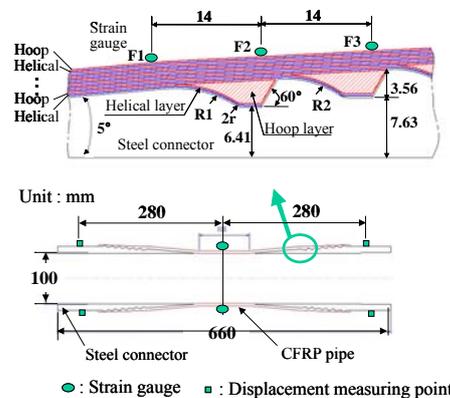


図 1 疲労試験模型の形状寸法と変位と歪の計測位置

表 1 疲労試験模型の材料特性

Item	Helical $\pm 20^\circ$	Hoop 90°	Item	Steel
E ₁₁	86930	8775		
E ₂₂	8759	8775	E	199075
E ₃₃	9093	134701		
v ₂₁	0.1396	0.4003		
v ₃₁	-0.0194	0.2606	v	0.29
v ₃₂	0.3634	0.2606		
G ₁₂	16780	2806		
G ₁₃	3881	4023	G	77161
G ₂₃	2949	4023		

(Unit E, E₁₁, E₂₂, E₃₃, G, G₁₂, G₁₃, G₂₃:N/mm²)

(2) CFRP 製ライザー管の時刻歴応答解析による動的挙動の検討

平成 17 年度の軸方向振動特性の検討では、ライザー管のばね剛性と質量を求め、ばねの固有周期の式から鋼製、アルミニウム製および FRP 製ライザー管の固有周期を求めた。平成 19 年度の研究所では、有限要素法解析により、ライザー管上端に種々の周期の上下方向

の正弦波形の振動を与え、時刻歴応答解析を行い、ライザー管の動的挙動を求めらる。

(3) CFRP 製ライザー管の弾塑性解析による引張強度の検討

科学研究費補助金の平成 17、18 年度の研究では、有限要素法解析モデルのフープ層樹脂部に亀裂の発生・進展経路を仮定することにより、フープ層樹脂部の破壊のプロセスを明確にした。しかしながら、この方法では、フープ層樹脂部の破壊のみを取り扱い、ヘリカル層繊維部およびフープ層繊維部の破壊を取り扱っていないため、破断荷重を求めることはできない。

平成 19 年度の研究では、ヘリカル層繊維部、フープ層繊維部およびフープ層樹脂部それぞれに破壊クライテリアを設定し、設定したクライテリアに達した要素の剛性を低下させる、より一般性の高い弾塑性解析を行い、継手部の破壊プロセスおよび破断荷重を求める。弾塑性解析に使用する解析モデルは、平成 17、18 年度の研究において引張実験に使用した、継手構造および層構造が最適化された CFRP 製ライザー管である。解析モデルの形状寸法は、図 1 と同様で、継手部については同一で、中央部 CFRP 製管部分のみ長く、全長が 842.4mm である。解析では、模型の軸方向の対称性を考慮し、管中央から軸方向の半分について軸対称問題として扱う。鋼製コネクタと CFRP 製管の継手構造部で接触が予想される部分には接触要素を用い、その際の摩擦係数はゼロとする。境界条件は管中央の対称軸上において軸方向の変位を拘束し、载荷は、治具とのネジ結合部である鋼製コネクタ内側の節点に、軸方向荷重を与える。使用する要素は 4 接点軸対称要素、3 節点軸対称要素および、接触要素である。

材料特性は表 1 に示したものと同一である。なお、MARC で使用されている座標系は、軸方向、半径方向および周方向がそれぞれ 11、22 および 33 であり、表 1 の値はこの座標系のものである。

(4) 4000m 水深科学掘削用 CFRP 製ライザー管の基本設計の考え方

平成 17、18 年度および平成 19、20 年度の研究で得られた成果を、CFRP 製ライザー管の基本設計の考え方としてまとめる。

4. 研究成果

(1) CFRP 製ライザー管の疲労強度の検討

図 2 に、最大荷重 450 kN までの 1/2 サイクルにおける、模型上側A面のF1～F7 の歪の荷重に対する関係を示す。図には比較のため既報³⁾の引張実験による荷重・歪関係も示されている。荷重が小さい範囲では、疲労試験で得られた荷重・歪関係は引張実験によるものと良

い相関を示している。引張実験において、荷重が 500 kN 前後で歪が水平方向に大きく変化しているが、疲労試験においては、荷重が 400 kN 前後で大きく変化している。この変化は、谷部でヘリカル層を締め付けるフープ層に亀裂が発生したことによると考えられる。

図 3 に、疲労試験による繰返し数が 58251 回までに計測した全ての荷重・歪関係を示す。引張歪の大きい F2、F3、F1 および F4 の最大歪は、変動が小さく、荷重・歪関係は安定している。また、既報³⁾における 100 回までの繰返し载荷実験による荷重・歪関係と傾向が良く一致している。

図 4 に、繰返し数が 133977～200790 回までに計測した全ての荷重・伸び関係を示す。伸びの平均は 2.5 mm 程度で FEM 解析結果との相関も良く、ある程度の変動はあるが、安定していることがわかる。

疲労試験は 1 体目の試験が現在進行中であり、繰返し数は 70 万回を越えている。「ちきゅう」のデリックの最大吊り荷重は 1250 tf であり、本疲労試験における最大引張荷重 450 kN は、実機に換算すると、最大吊り荷重とほぼ等しい 1148 tf に相当し、本 CFRP 製ライザー管は十分な疲労強度を有していると考えられる。

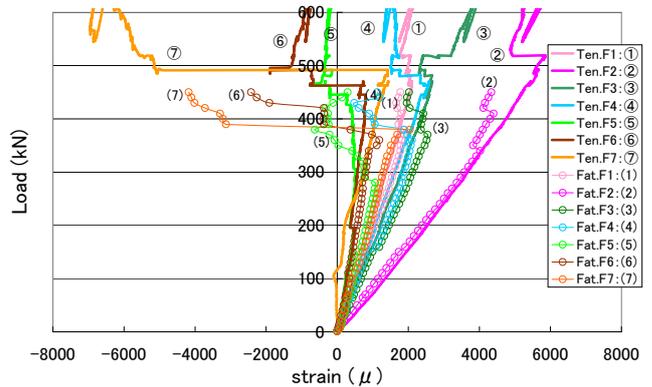


図 2 疲労試験および引張実験による荷重-歪関係 (Fat. : 疲労試験, Ten. : 引張実験)

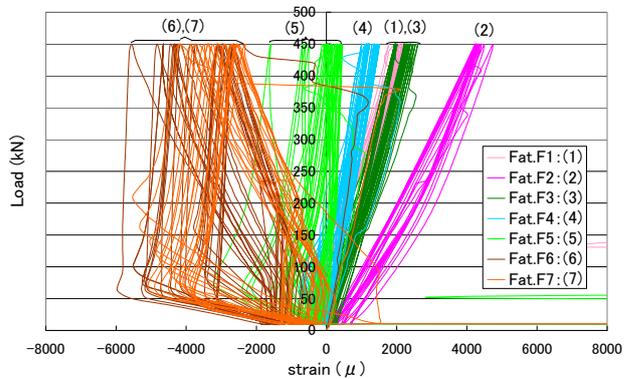


図 3 疲労試験による荷重-歪関係 (N= 1～58251 サイクル)

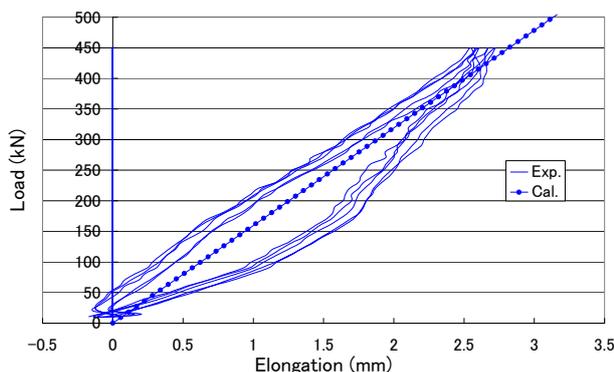


図4 疲労試験による荷重-伸び関係
(N= 1~58251 サイクル)

(2) CFRP 製ライザー管の時刻歴応答解析による動的挙動の検討

2500m 水深用鋼製ライザー管について、有限要素法解析により、ライザー管をビーム要素でモデル化し、ライザー管上端に種々の周期の上下方向の正弦波形の振動を与え、時刻歴応答解析を行い、ライザー管の動的挙動を求めた。得られた固有周期は、ライザー管をバネと質点でモデル化した官位解析結果と良い一致を示した。また、有限要素法による固有値解析による固有周期とも良い一致を示した。最適化された CFRP 製ライザー管の動的解析は、ライザー管内側のライナーおよび付属管の設計を終了してから行う予定である。

(3) CFRP 製ライザー管の弾塑性解析による引張強度の検討

フープ層繊維部、ヘリカル層繊維部、フープ層樹脂部のそれぞれに対する破壊クライテリアを単独に設定した場合の解析結果を図5~10に示す。破壊クライテリアのチェックは、鋼製コネクタの外側を覆う要素全てについて行っている。図は、CFRP 製管表面の F1~F7 の7点の歪計測位置における軸方向歪と引張荷重との関係である。

図5はフープ層繊維部に対し破壊クライテリアを設定した場合の荷重-歪関係である。荷重がおよそ 600kN を超えてから荷重-歪関係に非線形性が現れ、800kN を超えると非線形性が著しくなる。図6は No.1~No.7 の谷部についての、計算停止直前の破壊状況を示したものであるが、鋼製コネクタの各山に巻付いているヘリカル層を押さえつけている谷部のフープ層は、No.1 谷から No.7 谷において、それぞれ 1/2~1/10 の数の要素が破壊クライテリアを満たし、塑性化している。

図7はヘリカル層繊維部に対し破壊クライテリアを設定した場合の荷重-歪関係である。荷重-歪関係は計算が停止するまで、ほぼ線形性を保っていることがわかる。図8は計算が停止した時の破壊状況図で、計算が停

止する直前のインCREMENTでは、要素の塑性化は発生していないが、計算が停止したインCREMENTでは、No.1 山の上側のヘリカル層に破壊が発生、進行し、計算が停止した。

図9はフープ層樹脂部に対し破壊クライテリアを設定した場合の荷重-歪関係である。引張荷重が 208kN で計算が停止しており、この荷重は実験値と較べて大幅に小さい。この理由は、有限要素法の構造モデルにおいては、フープ層樹脂部と繊維部が一体で分離できないため、樹脂部の破壊が同時に繊維部の破壊とみなされ、破断荷重は実験値より大幅に小さい荷重で破断すると判定されたためと考えられる。図10は計算停止直前のインCREMENTにおける破壊状況図である。

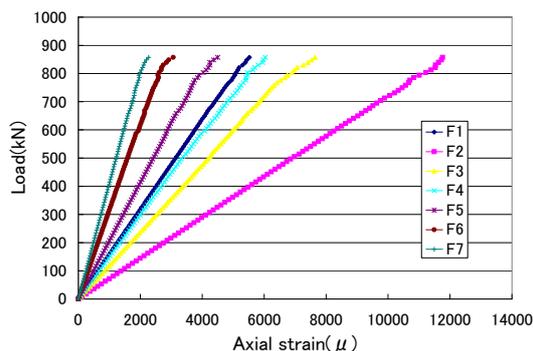


図5 荷重-歪関係 (フープ層繊維部)

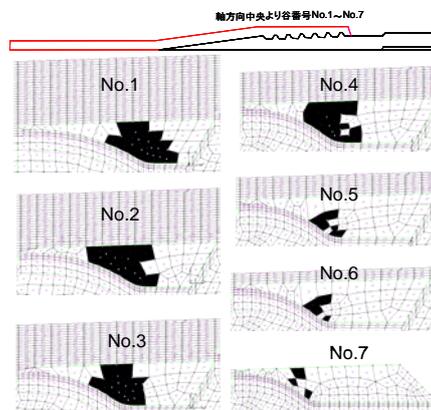


図6 塑性化要素 (フープ層繊維部)

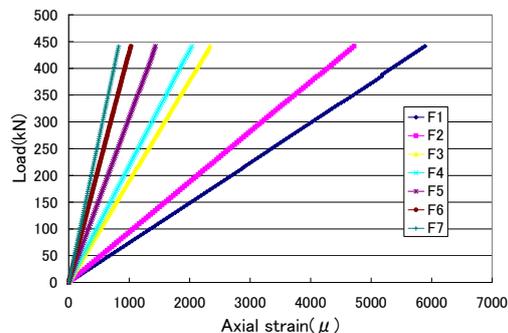


図7 荷重-歪関係 (ヘリカル層繊維部)

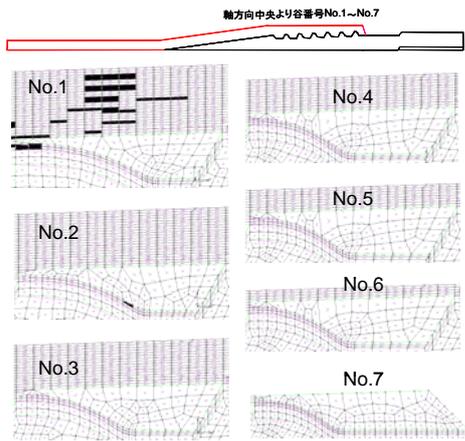


図8 塑性化要素 (ヘリカル層繊維部)

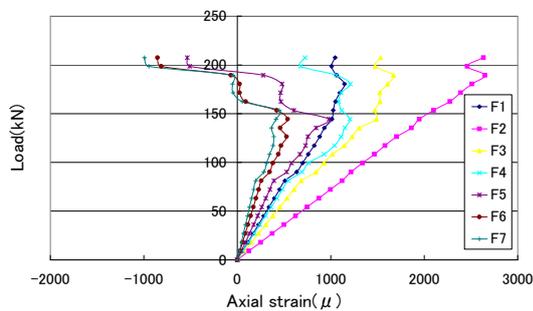


図9 荷重-歪関係 (フープ層樹脂部)

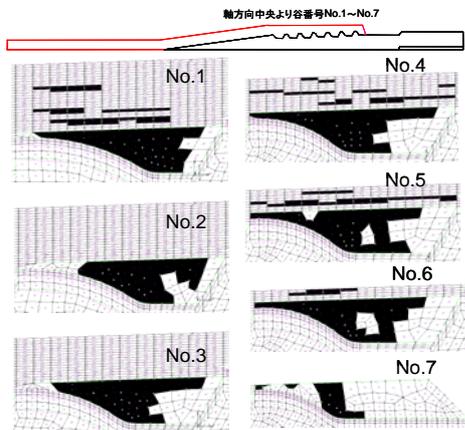


図10 塑性化要素 (フープ層樹脂部)

ヘリカル層繊維部、フープ層繊維部およびフープ層樹脂部に対し、対応する破壊クライテリアを設定し解析した荷重-歪関係は、図9および10に示すものと同一で、フープ層樹脂部の破壊により最終強度が支配されるため、実験結果とは異なる。

そこで、フープ層樹脂部の破壊のチェックは除外し、ヘリカル層繊維部およびフープ層繊維部について破壊クライテリアを設定し

解析を行った結果、引張荷重が722kNで、No.1山の上側のヘリカル層に破壊が発生、進行し、計算が停止した。しかしながら、この場合の引張荷重および破壊プロセス両方共に実験結果とは異なるため、ヘリカル層繊維部の破壊応力 σ_1 を920 N/mm²から1212 N/mm²に上昇させた結果、図5および6に示した結果と同じものを得た。この理由は、ヘリカル層繊維部に対する破壊応力を上昇させたため、ヘリカル層繊維部の破壊は発生せず、フープ層繊維部に破壊が発生、進行し、計算が停止したためである。この結果より、ヘリカル層繊維部およびフープ層繊維部に対する破壊応力を微調整することにより、解析による破壊荷重および破壊プロセスは、実験によるものと良い対応を示すと推定される。

今後の課題として、フープ層樹脂部の破壊には平成18年度の研究で行った予め亀裂を仮定する方法を使用し、同時にヘリカル層繊維部およびフープ層繊維部については本年度に行った破壊のクライテリアを設定することにより、より実際に近い破壊プロセスと破壊荷重が求まると考えられる。

(4) 4000m水深科学掘削用CFRP製ライザー管の基本設計の考え方

ここまで述べたことを、提案しているCFRP製ライザー管の基本設計の考え方に適用すると、その流れは以下のフロー図のようになる。

- (1) CFRP製ライザー管に作用する荷重の推算
- (2) 継手構造およびCFRP層構造の決定
- (3) 引張荷重に対する破壊強度の推定
- (4) 繰返し荷重に対する疲労強度の推定
- (5) 外水圧に対する圧壊強度の推定
- (6) CFRP製管内のライナーの決定
CFRP製管外側の保護方法の決定
付属管詳細の決定
- (7) 軸方向固有周期の確認

図11 CFRP製ライザー管の設計手順

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

1. 渡辺喜保、鈴木英之：深海掘削用CFRP製ライザー管の疲労強度、日本船舶海洋工学会講演会論文集第8号、5月、2009(発表予定)。
2. 渡辺喜保、鈴木英之、宇都正太郎：最適化された深海掘削用CFRP製ライザー管継手

構造の引張強度－模型実験結果と亀裂を考慮したFEM解析結果との比較－、第20回海洋工学シンポジウム論文集、日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会、3月、2008.

3. 渡辺喜保、伊藤成正、鈴木英之、宇都正太郎：最適化された深海掘削用CFRP製ライザー管継手構造の引張強度、日本船舶海洋工学会講演会論文集第4号、5月、2007、pp.471-472.

4. Yoshiyasu Watanabe, Narimasa Ito, Hideyuki Suzuki, Kenkichi Tamura : Optimization of a Multiple Traplock Structure of CFRP Riser Pipe for Deep Sea Drilling, Proceedings of the 17th ISOPE, Lisbon, 2007, pp.864-870.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 喜保 (WATANABE YOSHIYASU)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：20384935

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)

東京大学・新領域創成科学研究所・教授

研究者番号：00196859