

平成21年6月19日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760477

研究課題名（和文） 伝統組物技術を応用したスポーツ用品の開発

研究課題名（英文） Development of Sporting Goods by Using Traditional Braiding Technology

研究代表者

仲井 朝美 (NAKAI ASAMI)

京都工芸繊維大学・伝統みらい研究センター・准教授

研究者番号：10324724

研究成果の概要：

組物技術を用いると、複合材料1層中に、種類の異なる繊維や、異なる種類の樹脂を含浸させた繊維を用いることが可能である。すなわち、新規ハイブリッド複合材料の概念を適用し、要求性能に応じた組物複合材料の開発を行うことが可能である。本研究においては、組物技術により作製される組物複合材料円筒の力学的特性評価を行い、力学的特性を支配する因子の相互関係を明らかにし、最終的には、要求性能に応じた組物複合材料の設計手法を確立し、伝統組物技術を応用したスポーツ用品の開発へと展開した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	0	2,700,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

研究分野：複合材料工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 複合材料・物性

キーワード：(1) 複合材料 (2) 繊維加工 (3) 組物技術

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料で作られたスポーツ用品（例えばゴルフシャフトなど）は、軽量で高強度な材料として広く使用されている。一般的な複合材料ゴルフシャフトの製造方法は、シートワインディング方法で、プリプレグシートとよばれる炭素繊維を一方に引き揃えたシートを巻きつけて作製する。これらの手法においては、シャフトの設計因子は、主に材料の選択およびシートの巻き付け方向（繊維配向角度）のみであり、限界がある。

組物複合材料円筒の構造および力学的特性を支配する因子は、材料の特性（繊維および樹脂の特性）、繊維配向角度に加えて、繊維束形状、繊維束間距離、組構造、繊維体積含有率、クリンプ率など数多く挙げられる。これらの因子は、独立したパラメータではなく、相互に影響を及ぼすため、設計が困難である。例えば、同じ繊維、同じ条件で組物を作製しても、繊維配向角度を変化させると、繊維束形状、繊維束間距離、繊維体積含有率、クリンプ率が大きく異なる。言い換えると、

これらの因子を最適に設計することで、要求性能に応じた複合材料の設計が可能である。また、組物技術の特長として、製品長手方向にその構造を変化させることが可能である。

さらに、複合材料1層中に、種類の異なる繊維（例えば炭素繊維とガラス繊維の組み合わせなど）や、異なる種類の樹脂を含浸させた繊維を用いることが可能である。すなわち、新規ハイブリッド複合材料（繊維ハイブリッド、樹脂ハイブリッド組物複合材料）の概念を適用し、要求性能に応じた組物複合材料の開発を行うことが可能である。

2. 研究の目的

本研究課題においては、組物技術により作製される組物複合材料円筒の力学的特性評価を行い、力学的特性を支配する因子の相互関係を明らかにし、最終的には、要求性能に応じた組物複合材料の設計手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 組物複合材料円筒の力学的特性評価

①材料および作製条件を変化させた組物複合材料円筒を作製する。

②断面観察により、作製条件と組物構造の関係を明らかにする。

③組物複合材料円筒の力学的特性評価を行い、組物構造と力学的特性の関係を明らかにする。

④破断面観察により、破壊メカニズムを解明する。

以上の結果を元に、組物複合材料の力学的特性を支配する因子の相互関係を明らかにする。

(2) 力学的特性の予測手法の確立（剛性予測）

①材料および作製条件から組物構造を予測する手法を確立する。

②組物構造を考慮した有限要素モデルを構築し、組物の構造から複合材料の剛性を予測する手法を確立する。

以上の結果を元に、材料および作製条件から組物複合材料の剛性を予測する手法を確立する。

(3) 力学的特性の予測手法の確立（初期破壊応力予測）

①組物構造を考慮した有限要素モデルを構築し、初期破壊発生箇所および初期破壊を予測する手法を確立する。モデル化の概念は右図の通りである。

②実験により得られた破壊メカニズムと比較検討する。

(4) 新規ハイブリッド組物複合材料円筒の開発

①繊維ハイブリッド複合材料の作製、評価
2種類以上の繊維束（例えば炭素繊維とガラ

ス繊維）を用いて組物複合材料円筒を作製し、力学的特性を評価する。

②樹脂ハイブリッド複合材料の作製、評価
本研究では、プリプレグヤーンを用いる予定であり、繊維束にはあらかじめ樹脂が含浸している。特性の異なる樹脂（例えば、汎用樹脂と柔軟性樹脂）を含浸させた繊維を組み合わせることにより、樹脂ハイブリッド組物複合材料円筒を作製し、力学的特性を評価する。以上の結果より、要求性能に応じた新規組物複合材料の開発を行う。

(5) 組物複合材料円筒のスポーツ用品への応用

①ゴルフシャフトへの応用を目的として、テーパーを有する組物複合材料円筒を作製し、力学的特性を評価する。

②アイスホッケースティックへの応用を目的として、角型断面を有する中空組物複合材料を作製し、力学的特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 組物複合材料円筒の力学的特性

本研究では、円筒形状を有する炭素繊維強化組物複合材料を作製した。繊維配向角度が組物の内部構造および曲げ特性に与える影響を検討した。

①供試体および実験方法

供試体には、日石三菱(株)製炭素繊維プリプレグヤーン（東レ(株)製 T700S-6k および変成エポキシ樹脂 25SX3）を使用し作製した組物複合材料パイプを用いた。図1に組物の模式図を示す。直径20mmのマンドレルに48打の丸打組機を用いてプリフォームを作製し、パイプ外径が約23mmとなるように積層した。組糸の長手方向に対する配向角度である組角度を30、45、60度とした3種類の供試体（それぞれN30、N45、N60と呼ぶこととする）を作製した。

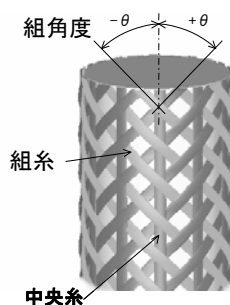


図1 組物構造模式図

内部構造を定量的に把握するために断面観察を行った。供試体を組糸に沿って切断、研

磨し、繊維配向角度、繊維束断面形状（アスペクト比および断面積）を定量化した。ここで、丸打組物場合は繊維束間距離がマンダレル直径および繊維束本数によって決定され、値が既知であるため、測定を行っていない。

4点曲げ試験は、パイプを200mmに切断し、圧子点直下の圧縮破壊を防ぐためにパイプの両端に直径20mm、長さ200mmの中実のステンレス丸棒を50mm入れ、スパン間を300mm、圧子間を100mmとした。すなわち支持点はステンレス棒のみとなる。試験速度は1mm/minとした。荷重支持点および圧子には、パイプを安定させ、かつ応力集中による破壊を防ぐためにV溝形状のローラーを用いた。

②実験結果

断面観察によって得られた結果を表1に示す。繊維束断面のアスペクト比 (b/a ; 図2参照) は、組角度が 30° と 45° で同じ値となり、 60° で増加している（繊維束断面形状が円に近づいている）事がわかった。また繊維束断面形状を楕円近似したときの断面積は、組角度の増加と共に減少している事がわかった。したがって、繊維束内の繊維体積含有率（繊維束内 Vf）は組角度の増加と共に増加している事になる。

表1 内部構造

	組角度	アスペクト比	面積 mm ²	繊維束内 Vf(%)
30	30	0.127	0.40	54.6
N45	45	0.127	0.38	58.2
N60	60	0.195	0.35	62.9

曲げ試験によって得られた曲げ弾性率 E_{exp} と積層理論により得られた理論弾性率 E_{theo} および、曲げ弾性率を理論弾性率で除した達成率 E_{exp}/E_{theo} を表2に示す。積層理論においては、繊維束が一方向に配向していることを仮定しているため、繊維のクリンプが発生している場合においては、理論達成率は低下する。長手方向に対して繊維配向角度が大きくなるほど曲げ弾性率は減少している。また、達成率は、組角度 30° で85%を超えていたが、 45° では約75%に減少し、 60° になると再び85%付近にまで増加していることがわかった。N30では、繊維束のアスペクト比およびクリンプ率が小さいため、達成率が高いと考えられる。一方で、周方向の剛性が低い場合、圧子点直下において局所的な扁平が生じることが知られており、この形状因子によっても達成率は低下する。N60ではクリンプ率は大きいものの周方向の剛性が高いため、局所的な

変形が抑制されN45と比較して達成率が高くなったと考えられる。

表2 弾性率

	曲げ弾性率 E_{exp} (GPa)	理論弾性率 E_{theo} (GPa)	達成率 E_{exp}/E_{theo} (%)
N30	40.6	47.2	86.0
N45	15.4	20.7	74.4
N60	10.8	12.9	83.7

③組物の内部構造

以上の結果から、組物の曲げ弾性率を予測するには、組物の内部構造を知ることがまず重要である。そこで、断面観察の結果をもとに、組物内部構造の検討を行った。組物の組糸に沿った断面の模式図を図2に示す。過去の研究から、マンダレル上の組物の構造は Case I、Case II の状態に分類することが可能である。Case I では、繊維束間の距離が十分に長く、繊維束同士が接触するまでは繊維束断面の楕円形状はほとんど変化しない。この場合、繊維束間距離はマンダレル径と繊維束本数によって決まる。Case II は繊維束間距離が減少し、これ以上繊維束の相対的な位置が変化できない状態を示している。

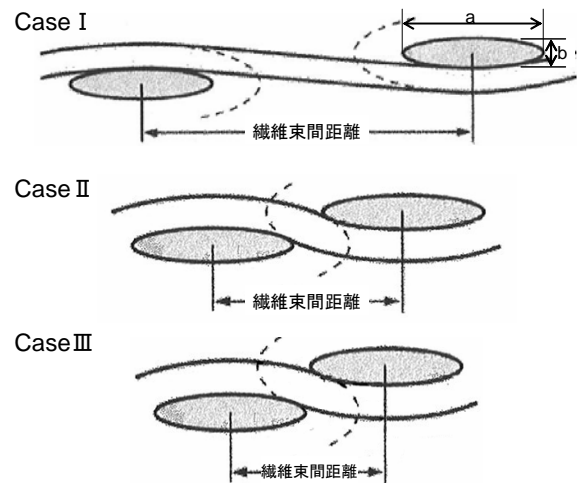


図2 組糸に沿った断面の模式図

繊維束形状とマンダレル径から得られる繊維束間距離は、N30、N45、N60でそれぞれ5.7、4.0、3.3(mm)であった。一方、Case IIを仮定して算出した最短繊維束間距離はそれぞれ4.8、4.0、3.6(mm)となった。以上より、N30はCase I、N45はCase IIといえる。しかし、N60では、最短繊維束間距離がマンダレル径から得られる長さよりも長い場合、最も繊維束が接近したCase IIの繊維束配置で

も成り立たない事がわかる。したがって、厚さ方向への移動も考慮に入れれないといけない事がわかる。そこで、図3のCase IIで右上の繊維束の圆心を厚さ方向にシフトさせたCase IIIを提案する。繊維束間距離とシフト量との関係を図3に示す。また、マンドレル周長と等しくなる繊維束間距離を点線で示す。これらの交点より、繊維束の厚さ方向のシフト量が0.11mm以上である事がわかる。このことは60°の各層の厚さと対応している。

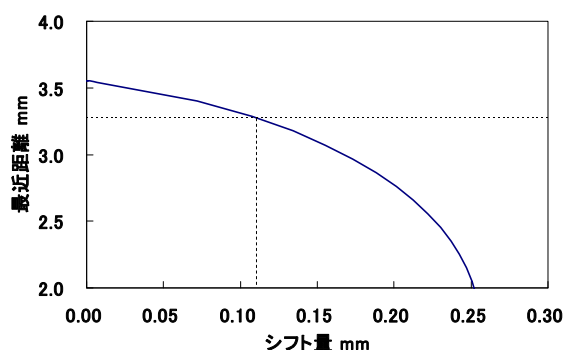


図3 最近距離とシフト量の関係

(2) 新規ハイブリッド組物複合材料円筒の開発

組物複合材料は、斜めに配向した組糸の角度を自由に設定し、かつ組物の長手方向に中央糸と呼ばれる繊維束を挿入できる。また、組糸と中央糸にそれぞれ異なった種類の繊維を挿入することでハイブリッド組物が作製可能である。これらの特長により要求性能に応じた複合材料が自由に設計できる。この繊維ハイブリッドの概念は、異なる樹脂を含浸させた繊維を使用する樹脂ハイブリッド組物複合材料へと展開することが可能である。

本研究では異なる特性を有するマトリックス樹脂を用いた「樹脂ハイブリッド」、および異なる力学的特性を有する炭素繊維を中央糸に用いた「繊維ハイブリッド」組物複合材料円筒を作製した。3点曲げ衝撃試験、および断面観察を行いハイブリッド複合材料の繊維配置が衝撃特性に及ぼす影響について検討した。

①材料および試験方法

本研究では、強化繊維が同じでマトリックス樹脂の特性が異なるものと、マトリックス樹脂が同じで強化繊維が異なるものを2種類用い、4種類のプリプレグヤーンを使用した。1つはPAN系の炭素繊維T700(東レ(株)製)に標準グレードのエポキシ樹脂が含浸されたプリプレグヤーン(T700-12-RC38-SX3:株新日本石油)である。また、標準グレードよりも柔

軟性を有するとされるエポキシ樹脂が含浸されたプリプレグヤーン(T700-12-RC34-25HS-3:株新日本石油)である。それぞれのプリプレグヤーンをNおよびSと呼ぶこととする。さらに、強化繊維にピッチ系の炭素繊維で、弾性率が低く破断ひずみ大きいXN05、および、弾性率が高く破断ひずみ小さいXN80を用いたプリプレグヤーン(XN05-3-RC34-SX3, XN80-6-RC34-SX3:株新日本石油)を使用した。使用した繊維の物性表を表3に示す。この4種類のプリプレグヤーンを使用して、組糸を24本、中央糸を12本用いて作製した丸打組物複合材料円筒の、挿入する繊維束の組み合わせを変えて9種類の試験片を作製した。各試験片名と、それぞれの組糸と中央糸の組み合わせを表4に示す。また、NとSの組み合わせの模式図を図4に示す。

試験片のサイズは内径20mm、組角度は25°とし、試験片の厚さが約1.5mmになるように4層積層して作製した。動的力学的特性の評価方法として3点曲げ衝撃試験を用い、スパン長さは200mm、衝撃エネルギー100Jの条件で行った。

また、3点曲げ衝撃試験後の破断箇所を中央糸に沿って切断し、断面観察を行なうことで、その破壊様相を把握し、各試験片の衝撃破壊メカニズムを解明した。各試験片の引張側の断面写真を比較し、衝撃試験によるエネルギー吸収量と破壊様相との関連性を明らかにした。

表3 繊維の物性

Sample name	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Breaking strain (%)	Filament diameter (μm)
T700	230	4900	2.1	7
XN05	54	1100	2	10
XN80	780	3430	0.5	10

表4 試験片種類

試験片名	組糸	中央糸
N12		N
N6S6	N	N6S6
S12		S12
In N Out S	Inner 2 layers N Outer 2 layers S	N
NS Stripe	Stripe in N6S6	
NS A	Alternateness N1S1	
N6(XN05)6		N6(XN05)6
(XN05)12	N	(XN05)12
(XN80)12		(XN80)12

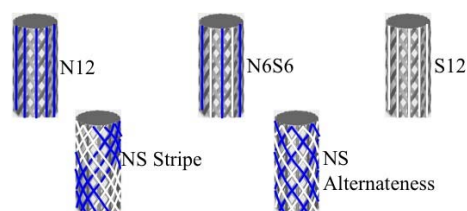


図4 試験片模式図

②結果および考察

試験より得られた各試験片の全エネルギー吸収量、最大荷重、最大荷重までのエネルギー吸収量、最大値以降のエネルギー吸収量を表5に示す。全エネルギー吸収量はNS Stripe、最大荷重は(XN05)12、ピーク前のエネルギー吸収量はN12、ピーク後のエネルギー吸収量はNS Stripeがそれぞれ高い値を示した。全エネルギー吸収量に関しては柔軟性樹脂を用いた樹脂ハイブリッドの方が、ピッチ系炭素繊維を用いた繊維ハイブリッドよりエネルギー吸収量が大きかった。

表5 衝撃曲げ試験結果

	Total energy (J)	Load (N)	Energy to max load (J)	Energy after max load (J)
N12	29.15	2.97	5.56	23.60
Hybrid "Matrix" in MEF				
N6S6	30.43	3.33	3.00	27.44
S12	28.56	3.13	4.08	24.48
Hybrid "Matrix" in braiding fiber				
NS A	27.89	3.06	2.82	25.07
NS Stripe	30.46	2.99	2.83	27.63
inN outS	28.95	3.21	3.12	25.07
N6(XN05)6	26.28	4.77	1.17	25.11
Hybrid "fiber" in MEF				
(XN05)12	27.94	5.26	1.22	26.72
XN80	27.17	2.54	5.06	22.11

次に試験後の破断箇所の断面観察を行なった。いずれの試験片においても図5に示す繊維破断、座屈破壊、繊維束間での離れの3種類の破壊が観察された。各試験片の断面写真より、それぞれの試験片の破壊を定量的に評価するため、それぞれの破壊の長さを測定した。各試験片のそれぞれの破壊長を表6に示す。

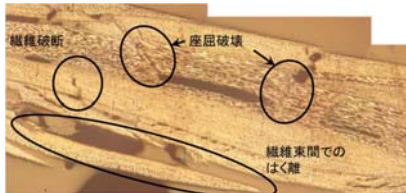


図5 破壊の種類

表6 各破壊の長さ

Sample name	Fiber fracture (mm)	Buckling fracture (mm)	Deramiation between fiber bundle (mm)
N12	4.8	3.6	25.7
Hybrid "Matrix" in MEF			
N6S6	9.9	5.6	35.0
S12	6.4	5.1	34.5
Hybrid "Matrix" in braiding fiber			
inN outS	6.4	1.6	18.1
NS-stripe	9.0	1.4	10.0
NS-A	7.4	0.4	20.0
Hybrid "fiber" in MEF			
N6(XN05)6	7.2	1.4	43.4
(XN05)12	4.2	0.8	60.4
(XN80)12	9.1	0.1	35.5

これらの結果より、樹脂および繊維ハイブリッド組物複合材料円筒におけるエネルギー吸収量と破壊の関係を明らかとした。繊維破断に要するエネルギーと比較して、はく離や座屈破壊に要するエネルギーは小さいと考えられるため、全エネルギー吸収量にほとんど影響しないと考えられる。また、衝撃試験の荷重変位線図において、最大荷重を示した後、破壊の進展によるエネルギー吸収が行われる

と考えられることから、ピーク後のエネルギー吸収量と破壊長さとの関係について検討した。図6は、ピーク後のエネルギー吸収量と繊維破断の破壊長さの関係を示している。この図より断面観察より得られた破壊長とエネルギー吸収量は線形関係であることが明らかとなった。

そこで、図6の破断長とピーク後のエネルギー吸収量の関係を線形近似で表した。エネルギー吸収量と破断長さの関係は式①で表される。このとき、Eはエネルギー吸収量、 l_b は組物の破壊の長さ、 l_m は中央糸の座屈破壊を除いた破壊の長さとする、繊維がT700の場合、aは0.82、bは19.44、XN05の場合、aは0.50、bは22.82となった。

今回使用した炭素繊維T700の弾性率230GPa、および破断ひずみ2.1%からフィラメント1本の破断エネルギーを算出すると、 $1.95 \times 10^{-3} \text{J}$ となった。そして、今回の組物複合材料円筒の繊維束内Vfの平均が61%より、単位長さのフィラメントを破壊するのに必要なエネルギーは1.48J/mmとなった。この値は傾きaとほぼ近い値を示していることから、繊維束の材料定数よりその破壊エネルギーが推定可能であるといえる。

また、XN05およびXN80のaの値がT700と比較して小さいのは、フィラメントを破壊するのに必要なエネルギーが0.32J/mmおよび0.28J/mmでありT700よりも低いためである。低くなった理由として、XN05は弾性率が低く、XN80は破断ひずみが小さいことが挙げられる。このため、繊維ハイブリッドによる衝撃特性の向上が顕著に現れなかったと考えられる。

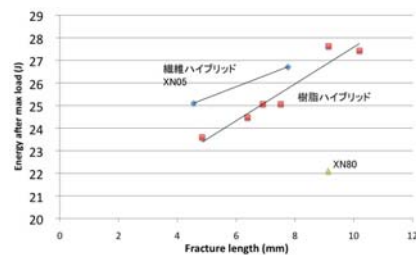


図6 吸収エネルギーと破壊長さの関係

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1件)

1) A. Ohtani, Y. Sasaki, Y. Kobayashi, A. Nakai, H. Hamada Heterogeneity of the Internal Structure of Braided Composites, Design and manufacturing of Composite, 7, 2008, pp.188-195, 査読あり

〔学会発表〕(計14件)

1) 佐々木勇希、大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以、ハイブリッド組物複合材料円筒の内部構造観察および力学的特性の解明、第33回複合材料シンポジウム、2008年10月27日、北海道大学

2) Y. Sasaki, Y. Kobayashi, A. Ohtani, A. Nakai and H. Hamada, Design of Carbon Fiber Hybrid PAN/Pitch Flat Braided Fabric Composites, American Society for Composites 23rd Technical Conference, September 11, 2008, Memphis, TN

3) 佐々木勇希、小林由佳、大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以、ハイブリッド組物複合材料円筒の内部構造観察および力学的特性の解明、日本複合材料学会 2008年度研究発表講演会、2008年6月5日、東京大学 山上会館

4) 佐々木勇希、大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以、ハイブリッド組物複合材料円筒の内部構造観察および力学的特性の解明、日本繊維機械学会 第61回年次大会、2008年5月29日、大阪科学技術センター

5) 佐々木勇希、小林由佳、大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以、樹脂ハイブリッド組物複合材料円筒の内部構造観察、第16回複合材料界面シンポジウム、2008年4月24日、信州大学

6) Akio Ohtani, Asami Nakai, Hiroyuki Hamada, Design of Braided Composite Pipes, 10th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-10), 2007年11月28日、東京ビックサイト

7) Akio Ohtani, Asami Nakai, Fabrication and Mechanical Properties of Braided Composite Tube, International Conference on Kumihimo, 2007年11月14日、京都工芸繊維大学

8) 大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以、組物複合材料円筒の内部構造の不均一性が力学的特性に与える影響、第32回複合材料シンポジウム、平成19年10月19日、長崎総合科学大学

9) Akio Ohtani, Asami Nakai, Internal structure and mechanical properties of Braided Composite Tube, 22nd Annual American Society for Composites Technical Conference, 2007年9月18日、University of Washington Seattle, WA

10) 大谷章夫、仲井朝美、組物複合材料の内部構造と力学特性、日本実験力学学会 2007年度年次講演会、2007年8月6日、埼玉大学

11) Akio Ohtani, Asami Nakai, Mechanical Properties of Braided Composite Pipe, Sixteen International Conference on Composite Materials (ICCM-16), 2007年7月10日、京都国際会議場

12) 比果良太郎、大谷章夫、仲井朝美、中央糸を挿入した組物複合材料円筒の内部構造と力学的特性、日本繊維機械学会 第60回年次大会、平成19年6月1日、大阪科学技術センター

13) 大谷章夫、仲井朝美、内部構造を考慮した組物複合材料の有限要素法解析、日本繊維機械学会 第60回年次大会、平成19年5月31日、大阪科学技術センター

14) 大谷章夫、小林由佳、仲井朝美、中央糸を挿入した組物複合材料の力学的特性、日本複合材料学会 2007年度研究発表講演会、平成19年5月21日、日本大学理工学部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲井 朝美 (NAKAI ASAMI)

京都工芸繊維大学・

伝統みらい研究センター・准教授

研究者番号：10324724

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：