

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月25日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540402

研究課題名（和文）数値計算と実験による乱流の大スケール運動の統計則と空間構造の解明

研究課題名（英文）Numerical and Experimental Elucidation of Statistical Laws and Spatial Structures for Large-Scale Motion in Turbulence

研究代表者

高岡 正憲（TAKAOKA MASANORI）

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：20236186

研究成果の概要（和文）：

乱流は身の回りの至る所にあり古くから研究されてきたが、普遍的な統計則に従う小スケールが中心であった。本研究では大スケール運動に着目し、以下の成果を得た。

- (1) 大スケールにおける運動エネルギーの揺らぎの理論的枠組みを提案した。
- (2) 相関長で規格化すると種々の統計則を普遍的に記述できることを示した。
- (3) 流体方程式や確率過程方程式の数値計算から大スケール対数正規性を再現した。
- (4) ある波動乱流系では異なる統計則を持つ乱流状態が存在することを示した。

研究成果の概要（英文）：

Although turbulence, which is ubiquitous around us, has been studied through the ages, the dynamics at small scales where the statistical law is universal has been the main target. In this study, we focus on the large-scale dynamics and obtain following results.

- (1) We have proposed the theoretical framework for the fluctuation of kinetic energy at large scales.
- (2) We have shown that statistical laws can be described universally by normalizing them with their correlation length.
- (3) We have reproduced the log-normality at large scales by numerically simulating the fluid equation and the stochastic process equation.
- (4) We have shown that in some wave-turbulence system, two turbulence states which have different statistical laws coexist.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：流体物理、乱流、シミュレーション、風洞実験、確率過程、統計熱力学形式

1. 研究開始当初の背景

(1) 乱流では、外力により供給された運動エネルギーが、非線形相互作用を介して小スケール側に輸送され、最小スケール η で粘性のため熱として散逸する[図1]。外力が作用しているスケール L の近傍の運動は、外力に依存して多様な振舞を示すが、この依存性はエネルギー輸送の過程で消失し、小スケールの運動は普遍的な統計則に従う[Kolmogorov: Dokl. Akad. Nauk SSSR 30, 301 (1941)]。よって小スケール運動は注目を集め、過去数十年間の研究から詳細な知見が得られている。

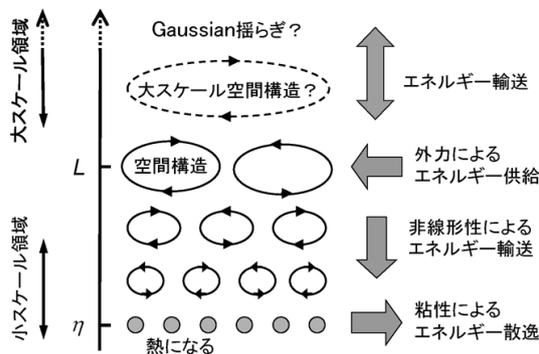


図1：空間構造とエネルギー輸送の概念図

非線形相互作用は全スケール間で存在するから、供給された運動エネルギーは大スケール側にも輸送され運動を引き起こす[図1]。この大スケール運動は定常乱流中では平衡状態にあり、Landau [Fluid Mechanics (1959)] によれば、乱流の全運動エネルギーに大きな割合を占めるほど顕著である。

しかし大スケール運動は未解明のままである。理論的研究は続いてきたが[Davidson: J. Fluid Mech. 632, 329 (2009) など]、乱流のような非線形系の理解に必要な数値的・実験的研究は成功していない。発達した乱流に対し広大な空間領域まで確保して、統計量の収束に必要な大量のデータを得ることは、現在まで不可能だったのである。

このように乱流についての理解は外力が作用しているスケール L 以下のスケールに限られており、乱流の全体像の把握に向けて、大スケール運動の解明が待たれている。

(2) 我々は、上記の全体的な背景状況を鑑み、気象庁気象研究所が所有する大型風洞装置を用いた実験的研究に着手した。この風洞は国内有数の大きさを持ち、測定部の寸法は長さ18m、幅3m、高さ2mである[図2]。乱流が十分に発達した点での流速の時系列データを取得し、大スケール運動が上記のLandauの予想通り顕著であることを確認した[Phys. Fluids 18, 015103 (2006)]。

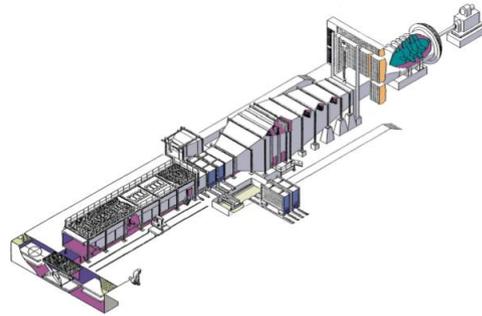


図2：気象研究所の大型風洞装置の全体図

運動エネルギー（揺らぎ速度成分の2乗）やエネルギー散逸率などの非線形な揺らぎを大スケールで粗視化した量を、格子乱流や境界層乱流や噴流で調べたところ、それらの確率密度分布が一様性や等方性によらず普遍的に対数正規分布で近似できることも見出した[Phys. Fluids 20, 035108 (2008), Phys. Fluids 21, 065107 (2009)]。しかしながら、この分布の普遍性およびその起源や成立条件は未解明であり、様々な系において詳細に調べることが不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 乱流についてのこれまでの理解は、外部から運動エネルギーが供給される空間スケール以下のスケールに限定されてきた。これに対し、より大きな空間スケールの運動は未解明のままである。この大スケール運動の統計則や空間構造を、数値計算と実験から解明することが、本研究の目的である。

(2) 数値計算は制御された条件のもと詳細な情報が得られるが、計算機の演算速度や記憶容量の制約から、空間領域の大きさや瞬時データの総数では実験に及ばない。他方、実験では計測可能な物理量は限られている。こうした相補性を考慮して計算結果と実験結果を解析し、大スケールにおける速度場の空間相関や揺らぎの確率密度分布など統計則を解明する。更に空間構造を検出して統計則との関係も明らかにする。

(3) 風洞実験の様々な外力により生成された乱流で観測された統計則の普遍性、特に、正定値の揺らぎを大スケールで粗視化した量の対数正規性の普遍性と成立条件を、モデルも含めた様々な系において数値計算および理論解析により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 気象庁気象研究所が所有する大型風洞装置の測定部断面に角材を組んだ格子を設置して、一様等方乱流を生成した。乱流が十分に発達した場所で、熱線流速計の小型センサーを用いて流速の時間変動 $v(t)$ を長時間にわたり測定した。乱流が変化せず平均流 V に流されてセンサーを通過する場合の関係 $x=Vt$ を仮定し、仮想的な瞬時1次元の空間変動 $v(t)$ に換算した。得られたデータを用いて、大スケールにおける速度場の空間相関や運動エネルギー揺らぎの確率密度分布など統計則の解析を行った。なお比較のために境界層乱流や噴流など一様等方性を持たない乱流の実験も同様に行った。

(2) 風洞実験の時間変動データから、揺らぎの2乗を粗視化した量の統計を調べると、粗視化スケールが相関長付近で遷移がみられた。このメカニズムを詳細に調べるために、相関を持つ最もシンプルな1次元の確率過程である Ornstein-Uhlenbeck 過程 (OU 過程) を数値シミュレーションし長大な時系列データを得た。また、低次モーメントの解析表現を得るために数式処理ソフトも利用した。

(3) 風洞における熱線流速計や OU 過程の数値計算で得られるのは1次元の時系列データである。乱流の空間的大スケール揺らぎの統計を調べるため、Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーション (DNS) をした。現有計算機の能力では空間3方向ともに十分なサイズをとれないので、 $8192 \times 256 \times 256$ の格子点数で計算した。また、空間多次元の粗視化を行なった大スケール揺らぎを調べるために、大スケール乱流のシミュレーションを可能にする Large Eddy Simulation (LES) のコードを複数モデル作成して計算した。

(4) モデルを用いない DNS で乱流の大スケール揺らぎを調べるには空間次元を下げる必要がある。大スケール揺らぎの普遍性に対する知見を得るために、横断的研究として、弾性薄板の波動乱流を記述する Föppl-von Kármán 方程式の DNS を行なった。この計算結果を、弱乱流理論や Navier-Stokes 乱流にも適用される Kolmogorov 理論と比較した。

4. 研究成果

(1) 乱流において相関長を超えるような大スケール変動は大自由度を持つが故に統計熱力学における熱的揺らぎと類似点を持つことを指摘し、大スケールにおける運動エネルギーの揺らぎを記述する理論的枠組みを提案した。実験結果との比較から、この理論が、大スケールにおけるエネルギー変動を流

れ場の種類に関係なく普遍的に記述し得ることを示した。

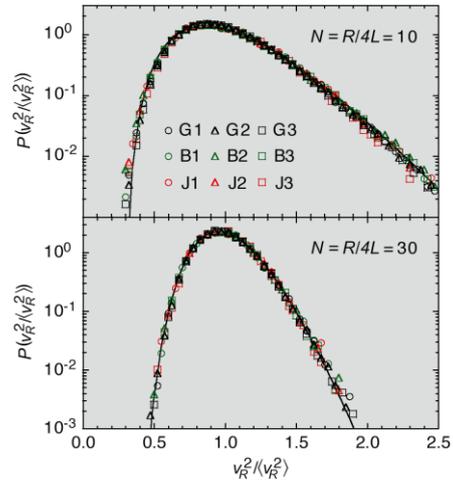


図3：速度2乗場の大スケール揺らぎの確率密度関数。Gi、Bi、Ji (i=1, 2, 3) は格子、境界層、噴流の乱流、Rは粗視化スケール。

(2) 実験結果の解析から、乱流運動エネルギーの2点相関関数を積分して得られた相関長を用いて長さスケールを規格化すると、大スケール変動だけでなく小スケール側のエネルギー散逸率など様々な統計則を、流れ場の種類に関係なく普遍的に記述できることを示した。相関長がエネルギー保有渦の平均径に対応していることが理由であると考えられる。

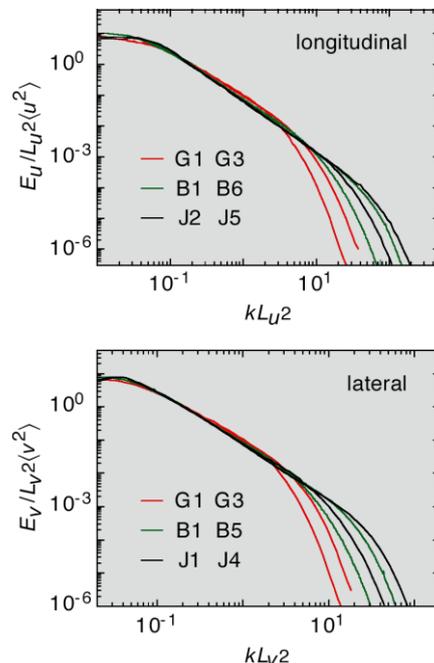


図4：縦速度および横速度の相関長で規格化したスペクトル。G、B、Jは格子、境界層、噴流の乱流を示す。

(3) 相関を持つ最もシンプルな系として Ornstein-Uhlenbeck 過程 $X(t)$ を数値計算および理論解析により調べた。粗視化スケール R を大きくすると、実験同様に相関スケール T_L 付近で遷移が現れ、対数正規分布に近い分布を経て正規分布に漸近することを示した。 X^2 および $(\delta X_r)^2 = (X(t+r) - X(t))^2$ の粗視化量に対する 4 次までのモーメントの厳密な解析表現を求めることができた。これにより、実験や数値計算では区別できなかった統計性の違いが明らかになった。

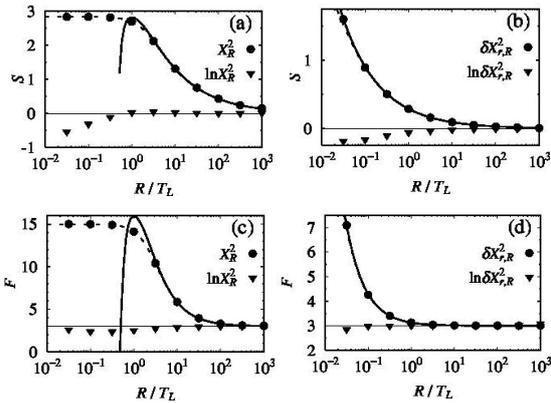


図 5 : X^2 および $(\delta X_r)^2$ の粗視化量およびその対数の歪度 S と尖度 F のスケール依存性。水平の直線は正規分布の値、太曲線は漸近表現、破線は厳密な解析表現の結果を示す。

(4) 現有計算機の能力も考え、 $8192 \times 256 \times 256$ の格子点数で計算をし、1 方向のみではあるが大スケールを調べることができ、風洞実験や OU 過程でみられた大スケール揺らぎのスケールリング則を再現できた。

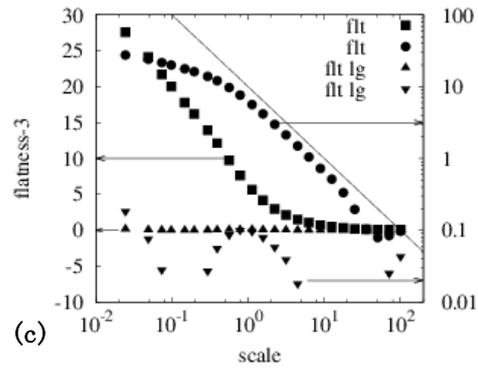
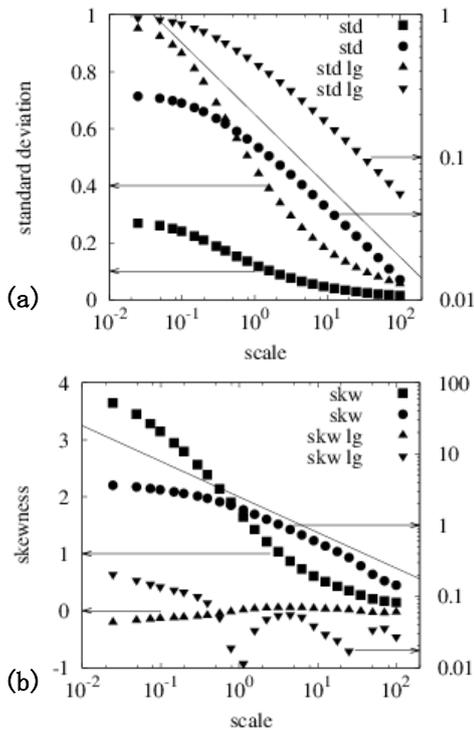


図 6 : 散逸場およびその対数の粗視化した量の標準偏差 (a)、歪度 (b)、尖度 - 3 (c) のスケール依存性。直線は漸近スケールリング則。

LES により空間 1 ~ 3 次元の粗視化が可能となり、大スケールの対数正規性には外力にある種の乱雑さが必要であることが分かった。

(5) 弾性薄板の波動に関する実験および数値計算の先行研究では様々な巾のエネルギースペクトルが報告され、弱乱流理論や次元解析から予想されるスペクトルも含め、統一的理解は得られていない。我々は系のエネルギーをコントロールしたシミュレーションをすることにより、これまでに得られたスペクトルを統一的理解できることを示した。また、大・小スケールではそれぞれ次元解析および弱乱流理論で予想されるスペクトルの中則が共存していることを見出した。この論文は Asia Pasific Physics Newsletter 誌の Research Highlights に選出された。

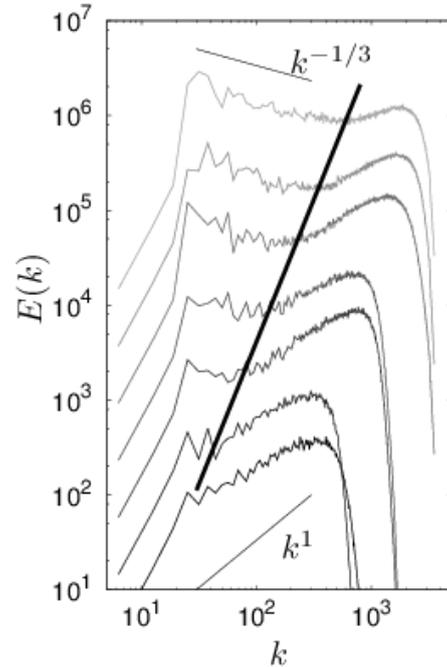


図 7 : 種々のエネルギーレベルにおけるエネルギースペクトル。太線は共存の境を示す。

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 13 件)

- ① N. Yokoyama, M. Takaoka, Weak and strong turbulence spectra for elastic thin plate, Physical Review Letter, 査読有, vol. 110, 2013, 105501 (5pages)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.105001
- ② T. Matsumoto, M. Takaoka, Large-scale lognormality in turbulence modeled by the Ornstein-Uhlenbeck process, Physical Review E, 査読有, vol. 87, 2013, 013008 (6 pages)
DOI: 10.1103/PhysRevE.87.013008
- ③ 横山直人, 高岡正憲, 弾性波動乱流のスケール依存性と異種乱流の共存について, 九州大学応用力学研究所研究集会報告, 査読有, 24A0-S3, 2013, 1-7
<http://hdl.handle.net/>
- ④ 高岡正憲, Navier-Stokes 乱流での大スケール揺らぎについて, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1882, 2013, 1-6
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1822-01.pdf>
- ⑤ 毛利英明, 乱流エネルギー散逸率の規格化について, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1822, 2013, 18-23
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1822-03.pdf>
- ⑥ K. Hashimoto, A. Hori, T. Hara, S. Onogi, H. Mouri, Dual-camera system for high-speed imaging in particle image velocimetry, Journal of Visualization, 査読有, vol. 15, 2012, 193-195
DOI: 10.1007/s12650-012-0127-0
- ⑦ H. Mouri, A. Hori, Y. Kawashima, K. Hashimoto, Large-scale length that determines the mean rate of energy dissipation in turbulence, Physical Review E, 査読有, vol. 86, 026309 (7pages)
DOI: 10.1103/PhysRevE.86.026309
- ⑧ H. Mouri, Large-scale velocity fluctuations of turbulence, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, vol. 318, 2011, 042007 (6pages)
DOI: 10.1088/1742-6596/318/4/042007
- ⑨ H. Mouri, A. Hori, Y. Kawashima, K. Hashimoto, Statistical mechanics and large-scale velocity fluctuations of turbulence, Physics of Fluids. 査読有, vol. 23, 2011, 125110 (7pages)
DOI: 10.1063/1.3667268

- ⑩ 高岡正憲, 松本剛, Ornstein-Uhlenbeck 過程での大スケール揺らぎの統計則について II, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1771 巻, 2011, 1-9
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1771-01.pdf>
- ⑪ 毛利英明, 乱流 2 点測度 and の統計的特徴, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1721 巻, 2010, 12-18
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1721-02.pdf>
- ⑫ 松本剛, 高岡正憲, Ornstein-Uhlenbeck 過程での大スケール揺らぎの統計則について, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1721 巻, 2010, 19-27
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1721-03.pdf>
- ⑬ H. Mouri, A. Hori, Two-point velocity average of turbulence: Statistics and their implications, Physics of Fluids, 査読有, vol. 22, 2010, 115110 (7pages)
DOI: 10.1064/1.3504376

[学会発表] (計 16 件)

- ① 横山直人, 高岡正憲, 弾性薄板での強弱乱流のスケール依存性と臨界波数, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 7 日, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京
- ② T. Matsumoto, Large-scale lognormality in turbulence modeled by the Ornstein-Uhlenbeck process, ICTS talk on Feb. 7 2013, International center for theoretical sciences, TATA institute for fundamental research, Bangalore, India
- ③ 横山直人, 高岡正憲, 弾性波動乱流のスケール依存性と異種乱流の共存について, 九州大学応用力学研究所研究集会「非線形波動研究の最前線—構造と現象の多様性—」, 2012 年 11 月 1 日, 九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所, 福岡県
- ④ 毛利英明, 堀晃浩, 川島儀英, 橋本孔佑, 乱流エネルギー散逸率の規格化について, 日本流体力学会 年会 2012, 2012 年 9 月 17 日, 高知大学, 高知県
- ⑤ 高岡正憲, 乱流の空間大スケール揺らぎについて, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学常盤台キャンパス, 神奈川県
- ⑥ H. Mouri, A. Hori, Y. Kawashima, K. Hashimoto, Normalization of the mean rate of energy dissipation in turbulence, 23rd International

Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2012年8月23日, 国家会議中心, 北京, 中国

- ⑦ 高岡正憲, Navier-Stokes 乱流での大スケール揺らぎの統計法則, 2012年日本物理学会年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学, 兵庫県
- ⑧ 毛利英明, 乱流エネルギー散逸率の規格化について, 2012年日本物理学会年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学, 兵庫県
- ⑨ 高岡正憲, Navier-Stokes 乱流での大スケール揺らぎ, 第61回 理論応用力学講演会, 2012年3月9日, 東京大学生産技術研究所, 東京都
- ⑩ 毛利英明, 乱流エネルギー散逸率の規格化について, 研究会「乱流の普遍性と個別性」, 2012年1月13日, 京都大学数理解析研究所, 京都府
- ⑪ 高岡正憲, Navier-Stokes 乱流での大スケール揺らぎについて, 研究会「乱流の普遍性と個別性: 流体乱流を通して宇宙を見る」, 2012年1月11日, 京都大学数理解析研究所, 京都府
- ⑫ 松本剛, 高岡正憲, 乱流の大規模スケール揺らぎの対数正規性に関するモデル, 九大応用力学研究所 共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011年11月10日, 九大応用力学研究所, 福岡県
- ⑬ H. Mouri, Large-scale velocity fluctuations of turbulence, 13th European Turbulence Conference, 2011年9月14日, Warsaw University, Warsaw, Poland
- ⑭ 毛利英明, 乱流速度場における大スケール変動の統計熱力学形式による記述, 研究会「乱流研究 次の10年: 乱流の動的構造の理解へ向けて」, 2011年1月14日, 京都大学数理解析研究所, 京都府
- ⑮ 高岡正憲, Ornstein-Uhlenbeck 過程での大スケール揺らぎの統計則についてII, 研究会「乱流研究 次の10年: 乱流の動的構造の理解へ向けて」, 2011年1月12日, 京都大学数理解析研究所, 京都府
- ⑯ 毛利英明, 乱流速度場における大スケール変動の統計則, 2010年秋季物理学会, 2010年9月25日, 大阪府立大学, 大阪府

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高岡 正憲 (TAKAOKA MASANORI)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 20236186

(2) 研究分担者

毛利 英明 (MOURI HIDEAKI)
気象庁気象研究所・物理気象研究部・主任
研究官
研究者番号: 10354490

松本 剛 (MATSUMOTO TAKESHI)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号: 20346076

(3) 連携研究者

()

研究者番号: