

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400412

研究課題名(和文) 一様な系に現れる異なる統計的性質をもつ乱流域の共存機構の解明

研究課題名(英文) Coexistence Mechanism of Turbulent Regions with Different Statistical Properties in a Uniform System

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：乱流ではスケール間の相互作用や混合が活発に行われているにもかかわらず、非一様性が顕在化することがある。本研究では、乱流に現れる異なる統計的性質をもつ乱流域の共存に着目し、以下の成果を得た。平行平板間乱流において、壁垂直方向のエネルギー輸送の階層構造、並びに乱れの各方向成分間のエネルギー輸送を明かにした。弾性薄板の波動乱流において、低(高)波数側に存在する強(弱)乱流の境界波数を見積もる解析表現を得た。また、波動乱流系としては初めてとなる非線形エネルギーの1波数表現を用いてエネルギー詳細釣り合いを満たす形でその流れを調べた。更に活発期と平穏期における実空間構造とエネルギー輸送の関係を明かにした。

研究成果の概要(英文)：Although turbulence has characteristics of active mixing and interaction among scales, non-uniformity sometimes becomes pronounced. In this study, we focus on the coexistence of turbulent regions with different statistical properties in turbulence, and obtain following results. We have clarified that, in turbulent channels, the hierarchical structures of energy transfer in the perpendicular direction to the wall and the energy transfers among each directional component of turbulence. We have obtained an analytical expression for the separation wavenumber between strong turbulence at low wavenumbers and weak turbulence at high wavenumbers in wave turbulence on an elastic thin plate. We have used the one-wavenumber representation of nonlinear energy and clarified the energy flow with satisfying the detailed energy balance for the first time in wave turbulence systems. We further clarified the relation between the real space structure and the energy transfer in active and moderate phases.

研究分野：流体物理学

キーワード：共存機構 弾性波動乱流 平行平板間乱流 数値シミュレーション 冪乗則スペクトル エネルギー輸送 階層構造 非線形エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) 図1は、流体力学の分野で最も有名な Reynolds の実験の結果のスケッチである [Reynolds: Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 174 (1883) 935]。実験は、ガラスの円管を水槽の中に置き、流れを可視化するために水と同時に染料も吸い込まれるようにして行われた。(a)の層流状態から円管内の流れが速く(=Reynolds 数が大きく)なると、(b)のように流れが乱れるようになる。攪乱を円管の入り口で与えると、(c)に示されたように、ある Reynolds 数で乱流が局在化し層流と共存するようになる。この局在化した乱れ(乱流パフ)についての研究は多く、その移流速度や乱れ強度分布や統計的性質が詳しく調べられている。最近では、乱れの生成維持機構を渦力学や不安定周期流により説明しようとする試みが、数値シミュレーションを用いて盛んに行なわれている。

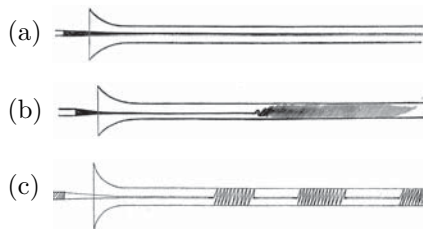


図1: Reynolds による円管内流の実験 (Reynolds の論文の図を編集)
(a)層流、(b)乱流、(c)乱流パフ

近年、地球シミュレータのような計算機を使い、超大型のシミュレーションが行われるようになってきた。一様等方性の流体乱流では、粘性散逸が起こるスケールの太さを持つ管状渦構造(渦管)があることが知られていたが、それらがクラスタを作って大きいスケールで非一様な分布となることが可視化で示されるようになってきた。ただし、この非一様性のスケールは初期条件や外力によるもので、本研究で考えている自発的に現れるスケールとは異なることを注意しておく。

このように、スケール間の相互作用や混合が活発に行われている一様な系において、乱れの非一様な偏在が観測されており、その共存機構の解明が待たれていた。

(2) 高岡と研究分担者の横山は、一様な弾性薄板の波動乱流を数値シミュレーションを用いて調べる中で、弱乱流と強乱流が共存することを見出した。この系は、流体乱流で有名な Kolmogorov 理論 [Kolmogorov: Dokl. Akad. Nauk SSSR 30 (1941) 301] に相当する乱流カスケードが予想されるだけでなく、弱乱流理論の検証もでき、最近では実験的にも活発に研究がおこなわれている。

図2は、低波数に加えた外力の強さを変えた時のエネルギースペクトルで、高波数側では弱乱流理論から予想される冪則 $k^{-1/3}$ を示し、低波数側では次元解析から予想される冪則

$k^{-1/3}$ を示している。つまり、異なる統計的性質を持つ強・弱乱流が共存しているのである。その境界スケールは、初期条件や外力によらず、線形・非線形の時間スケールにより系が自発的に決定していると我々は考えていた。

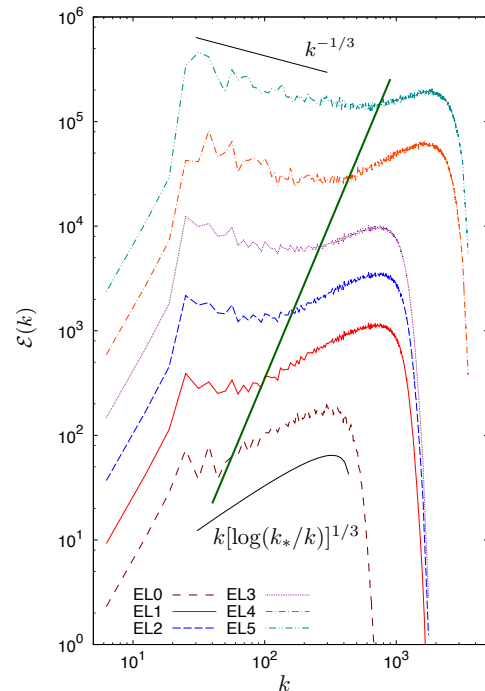


図2: 一様な弾性薄板の波動乱流に現れる強・弱乱流スペクトルの共存
直線は研究成果(6)の境界波数

他方、平板境界層乱流や平行平板間乱流の数値計算で、大規模低速領域の周辺に渦構造のクラスタが生じていることも報告されている。研究分担者の水野も平行平板間乱流で図3のような渦構造場を得ている。系としては壁に平行な平面内で一様であるが、渦管が集まってクラスタを作り大きいスケールで非一様に分布し、激しい乱流と穏やかな乱流(激乱流と穏乱流と呼ぶことにする)とが共存していることがわかる。

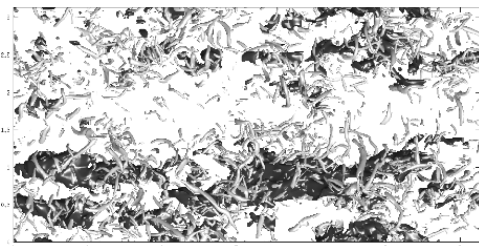


図3: 平行平板間乱流に現れる大スケール渦管クラスタと激・穏乱流の共存

2. 研究の目的

(1) 乱流ではスケール間の相互作用や混合が活発に行われているにもかかわらず、乱れが局在化することがある。我々は、薄板の弾性波動をシミュレーションにより調べ、冪則を示すような十分に発達した波動乱流において、異なる統計的性質を持つ乱流域の共存

を見出した。他方、管内乱流のパフやスラグに関する最近の研究結果は、流体乱流でも同様の現象が起こり得ることを示唆している。

本研究の目的は、このような発達した乱流中に現れる異なる統計的性質を持つ乱流域の共存機構を解明することである。

(2) 具体的には、弾性波動において見出した共存状態を更に詳しく調べ、非線形相互作用の強さと統計的性質との関係を解明する。また、平行平板間乱流のシミュレーションコードを開発し、渦構造クラスタを中心に異なる統計性を有する乱れの動力学を解明する。これらの解析から得られた知見の一般性を検証するための数理モデルを作成する。

3. 研究の方法

(1) 本研究は流体乱流と弾性波動乱流からなり、数値シミュレーションを用いて解析を行った。プログラムの開発やパラメータの探索の為に予備計算には主に研究室のワークステーションを用いて、大規模な数値計算には九州大学情報基盤センターの高性能演算サーバ (PRIMERGY CX400S1) を用いた。

平行平板間乱流は研究分担者の水野が中心となって行った。水野は Jimenez らと境界層乱流の大規模シミュレーションの経験があったからである。弾性薄板の波動乱流は研究分担者の横山が中心となって行った。横山と高岡はこの系に対して本研究の数年前より共同研究してきたからである。

(2) 流れ方向には前例の無いほど長い平行平板間乱流を数値計算するためのコードを作成し、予備計算によりパラメータを決定した後、大規模シミュレーションを行った。渦構造のクラスタの動力学を解析するために細かな時間間隔でデータ処理を行った。また、エネルギー輸送のスケール依存性を明らかにするために、変動速度の Fourier モードに対するエネルギー収支方程式の各構成要素を数値的に調べた。

(3) 弾性薄板の波動乱流においては、既に計算コードは完成していたので、引き続き強・弱乱流の共存状態を調べた。非線形エネルギーに着目し、その Fourier 空間での表現を中心に非線形性を特徴付ける保存量のフラックスを調べた。また、境界条件や外力の影響、並びに実空間の構造との関係も調べた。得られた非線形エネルギーの表現の一般性を解明するために、1次元のモデル方程式におけるエネルギーの流れについても調べた。

4. 研究成果

(1) 平行平板間乱流の予備計算において、非常に長いスケールを持つ大規模低速領域の強さ、並びに、その領域からの運動量輸送

やエネルギー輸送への寄与が比較的大きいことがわかった。これらの振る舞いを正しく評価するには、本研究で実施する長大な計算領域が必要であることが裏付けられた。

(2) 平行平板間乱流において、変動速度の各 Fourier モードに対するエネルギー収支を、大規模シミュレーションから求めた。その結果、対数層におけるエネルギーの大部分を保有する中程度のスケールでは、より壁に近い小さなスケールの乱れからエネルギーを受け取り、より壁から遠い大きなスケールの乱れにエネルギーを受け渡すという、壁に垂直方向のエネルギー輸送の階層構造が明らかになった。また、非常に大きなスケールでは逆に壁に向かってエネルギーが輸送され、Reynolds 数に伴ってその輸送量が増加することもわかった。

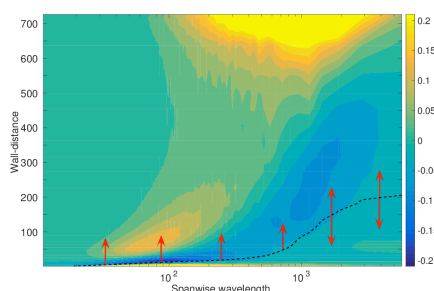


図4：壁垂直方向のエネルギー輸送による収支への寄与の1次元スペクトル

(3) 平行平板間乱流中における壁からの各高さにおけるスケール間のエネルギー輸送については、従来からの予想に反し、対数層では平均的には大から小スケールへの輸送しか見られず、更に、エネルギーの多くを保有し且つ等方的となっているスケールにおいてのみ、変動速度の各方向成分間のエネルギー輸送が発生するという結果となった。

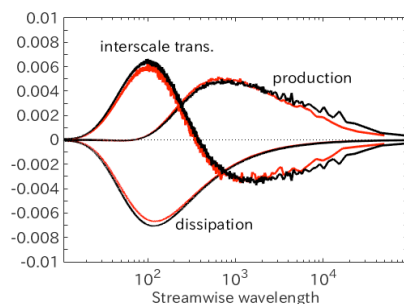


図5： $y^+=110$ におけるエネルギー収支へのスケール間のエネルギー輸送、生成、散逸からの寄与の1次元スペクトル

(4) 平行周期流中の乱流をシミュレーションするコードを作成し、MPI による並列化パフォーマンスを確認した。平均速度の剪断の大きい領域に流れ方向渦が見られたが、平均流速の対数速度分布は確認されず、壁のような不透過性が必要であることがわかった。

(5) 弾性薄板の波動乱流では、非線形性による振動数シフトと線形分散関係が与える振動数の比を、各波数に対する非線形性の指標と定義し、この指標が 0.1~1 程度となる波数が、強乱流状態にある低波数領域と弱乱流状態にある高波数領域の境界となることを見出した。(見積もられた境界波数を図2中に直線で示してある。)これまで系全体の非線形性の指標が用いられることはあったが、スケール毎の非線形性を定量化することに本研究で初めて成功した。

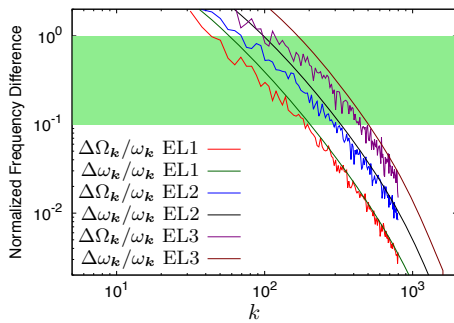


図6：線形振動数により規格化された非線形振動数シフト

(6) 弾性薄板の系において伸縮エネルギーを用いることで、エネルギー保存則と矛盾しない形で1波数に対する非線形エネルギーを定式化することに、波動乱流の系において初めて成功した。この表現を用いることで、エネルギーの詳細釣り合いの成立する表現で、エネルギーフラックスを定量的に調べることが可能となった。エネルギーフラックスが、強乱流状態にある低波数領域と弱乱流状態にある高波数領域を通じて、ほぼ一定の順カスケードであることを見出した。この結果は、強・弱乱流の共存する系での重要な予想である critical balance の描像が、等方な系では不適切であることを示している。

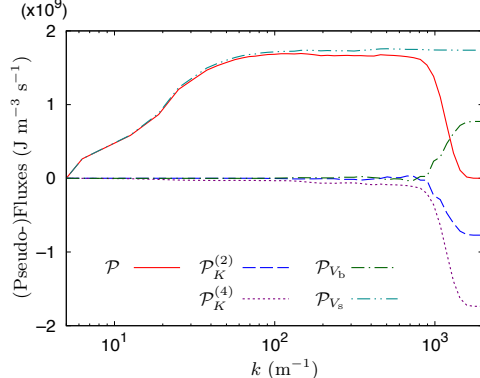


図7：全エネルギーのフラックスと各エネルギーの擬フラックス

更に、このエネルギーの詳細釣り合いを満たす3波相互作用関数を用いて、エネルギー輸送機構を調べた。弱乱流状態にある高波数領域では、共鳴相互作用によって低波数から高波数へとカスケード的にエネルギーが波数空間内を局所的に輸送される。一方、強乱

流状態にある低波数領域では、外力によって励起される伸縮エネルギーが波数空間内を非局所的に運動エネルギーへと輸送される。この強乱流状態におけるエネルギー輸送は、主に系の非線形性が大きい活発期に現れて、系の非線形性が弱い平穏期とは定性的に異なる輸送形態を持っていることがわかった。

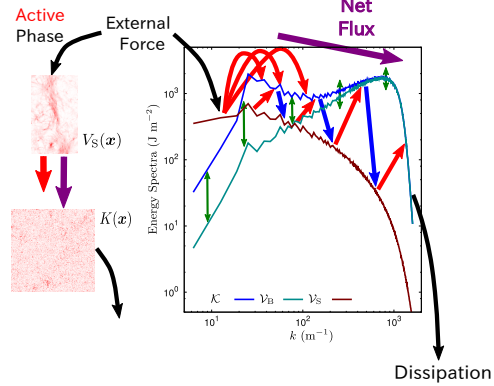


図8：エネルギー輸送の概念図

(7) 弾性波動乱流において、エネルギー輸送を行っている実空間構造の同定も行った。非線形エネルギーである伸縮エネルギー場で見ると、活発期は稜線のクラスタから形成される束状構造により特徴付けられる。この間欠的に現れる構造が強乱流状態でのエネルギー輸送を担っていることがわかった。

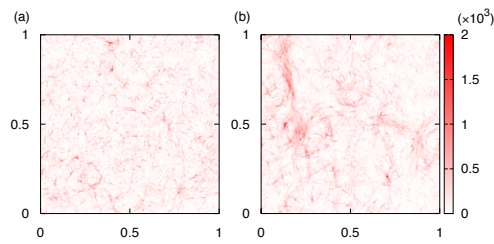


図9：平穏期(左)と活発期(右)の伸縮エネルギーの実場の代表例

(8) 上記(6)の非線形エネルギーの表現の一般性を確認するため、1次元の波動乱流のモデル式を提案し、また弱乱流理論のモデル式として有名な Majda-McLaughlin-Tabak 方程式について(6)と同様の考察を行った。この場合、非線形エネルギーの表現は一意的には定まらず、より適切な表現を得るための物理的考察が必要であることがわかった。

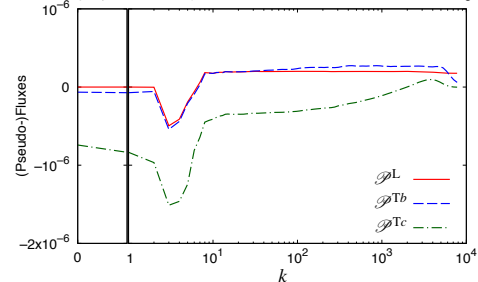


図10：MMTモデルにおける線形(L)と2種類の非線形エネルギーの表現を用いた全(TbとTc)エネルギーフラックス

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 5 件)

- ① 横山 直人、高岡 正憲、強弱非線形性の共存する弾性波動の乱流的性質、数理解析研究所講究録、査読無、2016、印刷中
- ② Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、Nonlinear energy in a wave turbulence system、Proceeding of the Estonian Academy of Science、査読有、Vol. 64、2015、430437
DOI: 10.3176/proc.2015.3S.14
- ③ Masanori Takaoka、Naoto Yokoyama、Bundle structures of stretching-energy and nonlinear interactions among modes in elastic wave turbulence、Journal of Physics: Conference Series、査読有、Vol. 574、2015、12030
DOI: 10.1088/1742-6596/574/1/012030
- ④ Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、Single-wave-number representation of nonlinear energy spectrum in wave turbulence of Foepppl-von Karman equation: energy decomposition analysis and energy budget、Physical Review E、査読有、Vol. 90、2014、63004
DOI: 10.1103/PhysRevE.90.063004
- ⑤ Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、Identification of separation wave number between weak and strong turbulence spectra for a vibrating plate、Physical Review E、査読有、Vol. 89、2014、012909 1-8
DOI: 10.1103/PhysRevE.89.012909

[学会発表] (計 21 件)

- ① 横山 直人、高岡 正憲、回転乱流におけるエネルギースペクトルの初期条件依存性、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日～2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
- ② 高岡 正憲、横山 直人、弾性波動乱流の外力スケール依存性、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日～2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
- ③ 水野 吉規、「チャネル乱流における速度乱れの乱流輸送のスペクトルとそのレイノルズ数依存性」、日本流体力学会年会 2015、2015 年 9 月 26 日～2015 年 9 月 28 日、東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)
- ④ 高岡 正憲、横山 直人、弾性波動乱流の実空間におけるエネルギー収支と秩序構造、日本物理学会秋季大会、2015 年 09 月 16 日～2015 年 09 月 19 日、関西大学吹田キャンパス (大阪府吹田市)
- ⑤ Yoshinori Mizuno、Spectra of turbulent

energy transport in channel flows、JJ70 Conference in honor of Prof. Javier Jimenez (国際学会)、2015 年 09 月 03 日～2015 年 09 月 04 日、Salamanca (Spain)

- ⑥ Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、A numerical analysis of detailed energy transfers in elastic-wave turbulence、15th European Turbulence Conference (国際学会)、2015 年 8 月 25 日～2015 年 8 月 29 日、the Delft University of Technology、Delft (The Netherlands)
- ⑦ Masanori Takaoka、Naoto Yokoyama、Spatial structures of energy transfers in elastic wave turbulence、15th European Turbulence Conference (国際学会)、2015 年 8 月 25 日～2015 年 8 月 29 日、the Delft University of Technology、Delft (The Netherlands)
- ⑧ Yoshinori Mizuno、Spectra of turbulent energy transport in channel flows、15th European Turbulence Conference (国際学会)、2015 年 8 月 25 日～2015 年 8 月 29 日、the Delft University of Technology、Delft (The Netherlands)
- ⑨ Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、Wave turbulence properties of vibration in thin elastic plate、Workshop on Nonlinear Waves and Fluid Mechanics (招待講演) (国際学会)、2015 年 08 月 10 日～2015 年 08 月 13 日、National Institute for Mathematical Sciences、Daejeon (Korean)
- ⑩ 横山 直人、高岡 正憲、強弱非線形性の共存する弾性波動の乱流的性質、京都大学数理解析研究所研究集会「乱流を介在した流体现象の数理」、2015 年 07 月 22 日～2015 年 07 月 24 日、京都大学数理解析研究所 (京都府京都市)
- ⑪ 横山 直人、高岡 正憲、波動乱流における非線形エネルギーを考慮したエネルギー収支、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 03 月 21 日～2015 年 03 月 24 日、早稲田大学 (東京都新宿区)
- ⑫ 高岡 正憲、横山 直人、加法的外力により維持される弾性波動乱流のスペクトルと実空間構造、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 03 月 21 日～2015 年 03 月 24 日、早稲田大学 (東京都新宿区)
- ⑬ 水野 吉規、チャネル乱流における速度乱れのエネルギー輸送のスペクトル、日本流体力学会年会 2014、2014 年 09 月 15 日～2014 年 09 月 17 日、東北大学 (宮城県仙台市)
- ⑭ Naoto Yokoyama、Masanori Takaoka、Nonlinear energy in wave turbulence system、IUTAM Symposium 2014: Complexity of Nonlinear Waves (国際学会)、2014 年 09 月 08 日～2014 年 09 月 12 日、Tallin (Estonia)

- ⑮ 高岡 正憲、横山 直人、Foeppl-von Karman 方程式の波動乱流における実空間構造と非線形相互作用、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 09 月 07 日～2014 年 09 月 10 日、中部大学（愛知県春日井市）
- ⑯ Masanori Takaoka、Naoto Yokoyama、Bundle structures of stretching-energy and nonlinear interaction among modes in elastic wave turbulence、IC-MSQURE 2014（国際学会）、2014 年 08 月 28 日～2014 年 08 月 31 日、Madrid（Spain）
- ⑰ 横山 直人、高岡 正憲、弾性波動における強非線形相互作用の同定、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 03 月 28 日、東海大学湘南キャンパス（神奈川県平塚市）
- ⑱ 高岡 正憲、横山 直人、弾性波動における外力・散逸に対するスペクトル形状の依存性、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 03 月 28 日、東海大学湘南キャンパス（神奈川県平塚市）
- ⑲ 水野 吉規、乱れのダイナミクスにおける大規模構造の役割、九州大学応用力学研究所研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」、2014 年 09 月 22 日、九州大学応用力学研究所（福岡県福岡市）
- ⑳ 高岡 正憲、横山 直人、弾性薄板における強・弱乱流スペクトルの共存に対する外力・散逸の影響、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 25 日、徳島大学常三島キャンパス（徳島県徳島市）
- ㉑ 横山 直人、高岡 正憲、弾性波動におけるエネルギースペクトルと非線形相互作用の構造、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 25 日、徳島大学常三島キャンパス（徳島県徳島市）

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：

取得月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

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

水野 吉規 (MIZUNO Yoshinori)
 同志社大学・理工学部・助教
 研究者番号：70402542

横山 直人 (YOKOYAMA Naoto)
 京都大学・工学研究科・助教
 研究者番号：80512730

(3) 連携研究者

()

研究者番号：