

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686029

研究課題名(和文) PIV、DNS、レオロジーの融合による界面活性剤水溶液の乱流抵抗低減機構の解明

研究課題名(英文) Study on turbulent drag reduction of surfactant solution by PIV, DNS, and rheology

研究代表者

玉野 真司 (TAMANO, SHINJI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40345947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,400,000円

研究成果の概要(和文)：高レイノルズ数での平板上乱流境界層流れに、壁面から抵抗低減界面活性剤水溶液を注入した場合の抵抗低減メカニズムを解明することを目的として、染料による可視化観察、レーザードップラー流速計(LDV)計測、粒子画像流速測定法(PIV)計測、新しい構成方程式モデル(BMP-Gモデル)を用いたチャンネル乱流の直接数値シミュレーション(DNS)、および一軸伸長流れの過渡特性によるレオロジー計測を実施した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the drag-reducing mechanism for the case of the turbulent boundary layer flow at the high-Reynolds number following the injection of the surfactant solution, we performed the flow visualization, LDV and PIV measurements of turbulent boundary layer flow, the DNS of turbulent channel flow with new constitutive equation model (BMP-G model), and rheological measurements based on transient property of uniaxial elongational flow.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 非ニュートン流体 乱流境界層 抵抗低減 省エネルギー PIV DNS レオロジー

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は陽イオン性および非イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層の実験的研究により、乱流渦構造に関して有用な知見を数多く得ているが、レーザーシート光源の不足から壁面ごく近傍については高精度な PIV 計測が行えていない。また、現在の実験装置では装置の構造上、主流速度を今以上に大きくすることが出来ず、高レイノルズ数（運動量厚さレイノルズ数 $Re_{\theta} > 1000$ ）での知見が得られていない。さらなる抵抗低減メカニズムの解明には、新実験装置において、高レイノルズ数での壁面ごく近傍における乱流構造の解明が不可欠である。

また、研究代表者は抵抗低減乱流境界層の DNS により、レオロジーと乱流渦構造の関係に関して有用な知見を数多く得ているが、用いた構成方程式モデルが高分子水溶液に適したモデルであるため、実験的研究で得られた界面活性剤水溶液に特有の乱流渦構造を予測し、そのメカニズムを解明するには至っていない。そこで、SIS を含む界面活性剤水溶液に特有のレオロジー特性を考慮可能な BMP モデルを使用した壁乱流の DNS を考え付いた。また、BMP モデルの DNS への適用においては、そのモデルパラメータ決定のためのレオロジー計測が必要不可欠となる。

2. 研究の目的

上記の実験的および数値的研究背景より、高レイノルズ数での高精度 PIV、BMP モデルに基づく DNS、レオロジー計測の 3 つの知見を融合して、界面活性剤水溶液に特有の抵抗低減メカニズムを解明することを研究目的とする。

3. 研究の方法

初年度においては、高レイノルズ数乱流境界層の実現のための実験装置を構築し、BMP モデルを用いた DNS コードを構築する。2 年目以降においては、界面活性剤水溶液の乱流境界層流れの高精度 PIV 計測、LDV 計測を行うとともに、レオロジー計測により BMP モデルパラメータ決定し、使用する界面活性剤水溶液のレオロジー特性に対応した大規模な DNS を実行する。

4. 研究成果

本研究で製作した実験装置の概略図を図 1 に示す。装置は回流水槽であり、400 mm × 400 mm × 3000 mm のアクリル製閉水路測定部（テストセクション）を持つ。遠心式ポンプ（2001FWM2015、荏原製作所（株）製）をインバータ（FR-A720-11K、三菱電機（株）製）で周波数制御することにより作動流体の流速を設定する。また装置内の作動流体は循環式冷水器（RKL-5500-D、オリオン機械（株）製）により水温がほぼ一定（ ± 0.3 ）に保たれる。テストセクションには底面に垂直な全長 2796 mm、幅 387 mm、厚さ 20 mm のアク

リル製テストプレート（図 2）が設置されている。作動流体は整流格子を通過することで一様化される。測定部内の座標は、テストプレート前縁からの流れ方向距離を x 、テストプレート壁面からの垂直方向距離を y 、後述の注入口中心からのスパン方向距離を z とする。界面活性剤水溶液はテストプレート内に設けられたスロットより注入される。注入口の大きさは、主流方向に 1.0 mm、スパン方向に 200 mm であり、注入口の流路幅は 0.5 mm である。注入口位置は $x = 400$ mm であり、流れ方向に対して壁面垂直方向に 30 度傾けられている。

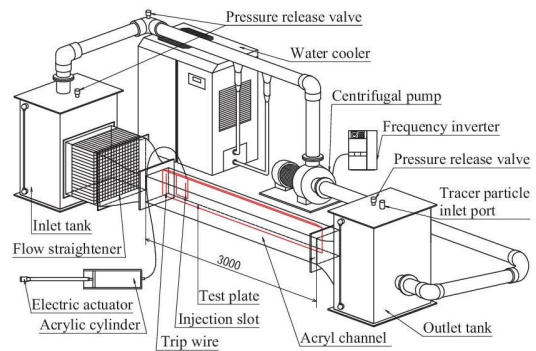


図 1 製作した大型回流式水槽

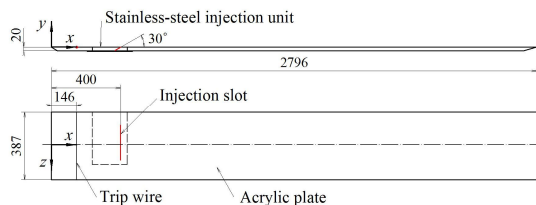
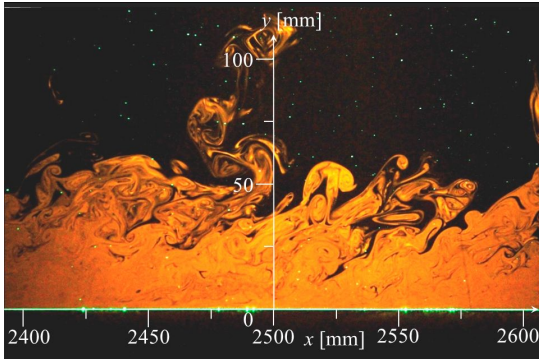


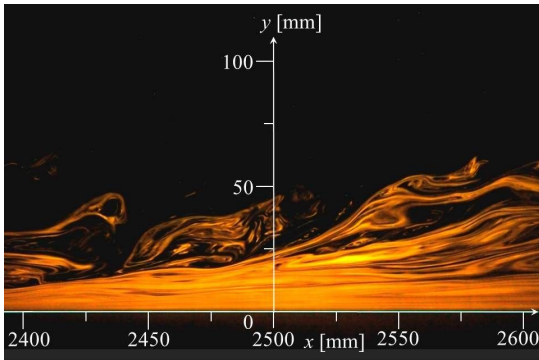
図 2 テストプレート

主流速度を $U_0 = 300, 400$ mm/s、作動流体と注入流体の温度を $T = 20 \pm 0.3$ ，注入流量を $Q_i = 1.45 \times 10^{-2}$ L/s とした。使用する界面活性剤は生分解性に富む非イオン性界面活性剤 AROMOX [主成分：オレイルジメチルアミノオキシド (ODMAO)、ライオン・アクゾ（株）製] である。界面活性剤水溶液の濃度は 500 ppm とした。溶液を注入する際には、注入流体が測定位置に到達した後、十分に定常状態になってから（注入を開始して約 25 秒後に）測定を行った。

可視化観察により得られた、平板上より水および ODMAO を注入した流れ場の x - y 断面を図 3 に示す。図 3 より、ODMAO を注入することで乱流境界層の乱れ構造が壁面垂直方向に抑制され、流れ方向に引き伸ばされる様子が確認できる。



(a) 水注入の場合



(b) 界面活性剤水溶液注入の場合

図3 可視化観察結果

図4に抵抗低減率（DR）と流れ方向距離 x の関係を示す．図より，主流速度に依らず下流に向かうにつれて抵抗低減率が増加することが判る．ただし，上流位置（ $x = 800$ mm）においては， $U_e = 300$ mm/s では抵抗低減（ $DR > 0$ ）， $U_e = 400$ mm/s では抵抗増加（ $DR < 0$ ）と両者で大きく異なる．また， $U_e = 400$ mm/s の抵抗低減率は全ての測定位置において $U_e = 300$ mm/s の値よりも低いことが判る．

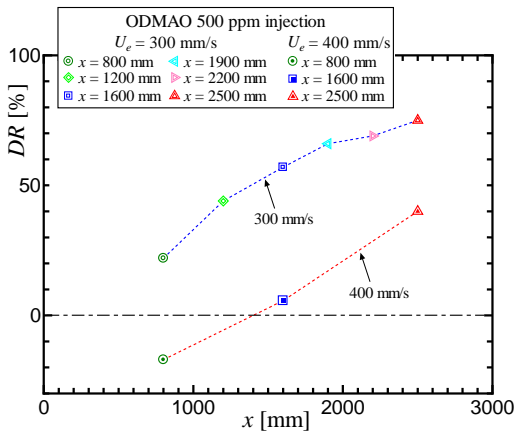
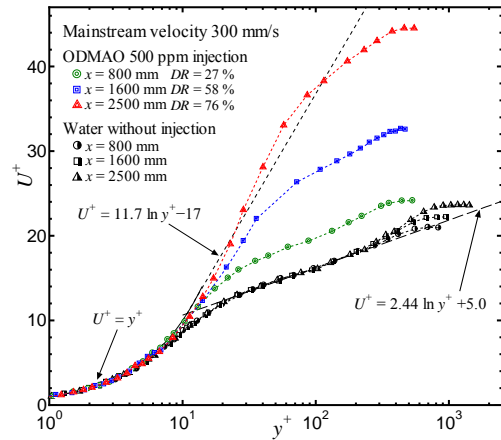
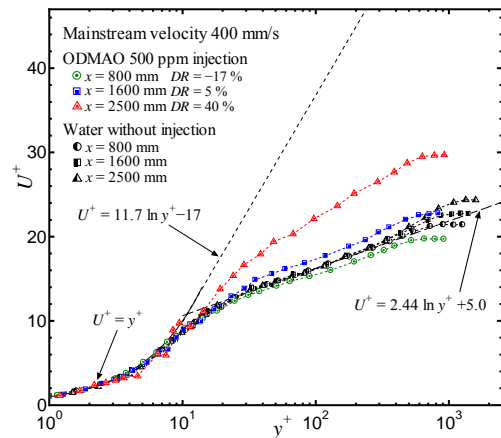


図4 抵抗低減率の流れ方向変化

図5(a)および5(b)に $U_e = 300$ mm/s および 400 mm/s における，内層スケールで正規化された主流方向平均速度分布を示す．図には，Virk によるポリマー溶液における最大抵抗漸近線（ $U^+ = 11.7 \ln y^+ - 17$ ）も示されている．水流では壁法則（ $U^+ = y^+$ ， $U^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.0$ ）とよく一致しており，壁近傍まで精度良く測定が行われていることが確認できる．ODMAO 溶液を注入した場合， $U_e = 300$ mm/s（図5(a)）では， $y^+ > 10$ での U^+ が水流よりも大きくなり，下流に向かうにつれて分布形状が Virk の最大抵抗漸近線に近づき，最下流位置（ $x = 2500$ mm）において最大抵抗漸近線よりも値が大きくなることが判る．一方， $U_e = 400$ mm/s（図5(b)）では，抵抗増加位置（ $x = 800$ mm）においては， $y^+ > 10$ での U^+ が水流よりも小さく，抵抗低減位置（ $x = 1600, 2500$ mm）においては， U^+ が水流よりも大きくなる．同じ測定位置において， $U_e = 400$ mm/s の U^+ は $U_e = 300$ mm/s のものよりも小さい．このことは，DR の大小と U^+ の大小が対応するとした従来の知見と整合する．

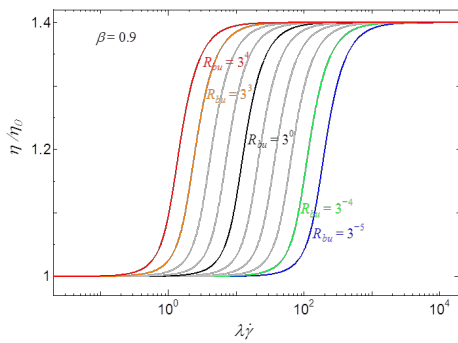


(a) $U_e = 300$ mm/s

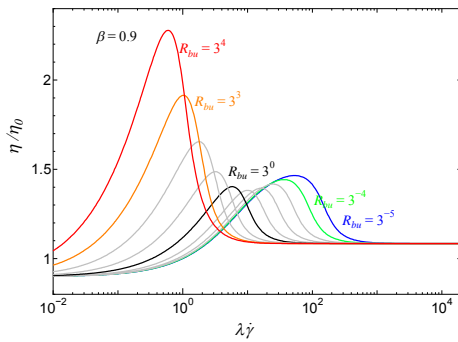


(b) $U_e = 400$ mm/s

図5 内層スケールで正規化された平均速度分布



(b) BMP モデル



(b) BMP-G モデル

図 6 せん断粘度特性

図 6 (a)および 6 (b)にそれぞれ BMP モデルおよび BMP - G モデルの定常せん断流れにおける、代表的なせん断粘度特性を示す。ここで、パラメータ R_{bd} は界面活性剤ミセルのネットワーク構造の破壊に関する無次元緩和時間である。図より、本研究で提案する BMP-G モデルを用いることで、せん断粘度の shear-thinning 特性と shear-thickening 特性の両方を併せ持った、希薄界面活性剤水溶液の特徴的なレオロジー特性を再現できることが判る。

構成方程式モデルとして BMP - G モデルを用いた、抵抗低減チャネル乱流の DNS の計算例を図 7 に示す。図には、速度勾配テンソルの第二不変量の等値面により可視化された壁面近傍の縦渦構造、瞬時の速度ベクトル、ならびに流動性のコンターが示されている。図より、せん断速度が大きい壁面近傍の乱流渦近傍において、流動性が局所的に小さくなっている様子が見て取れる。

図 8 に一軸伸長流れの過渡特性を調査するために新たに製作した実験装置の概略図を示す。シリンジに接続された毛細管から液滴を押し出し、液滴と毛細管の間に生じるフィラメントの直径を測定する。毛細管の外径は 1.26, 2.40, 4.20 mm の 3 種類とする。これらの内径はそれぞれ 0.90, 1.90, 3.64 mm である。高速度カメラによりフィラメントを可視化し、Green-LED 光を用いた高精度寸法測定器(LED マイクロメータ)によってフィラメントが破断するまでの直径の変化を記録する。

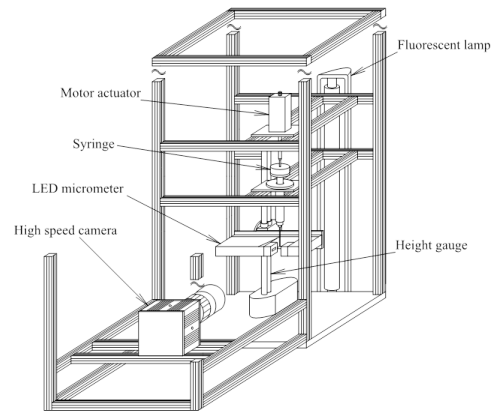


図 8 一軸伸長流れの実験装置

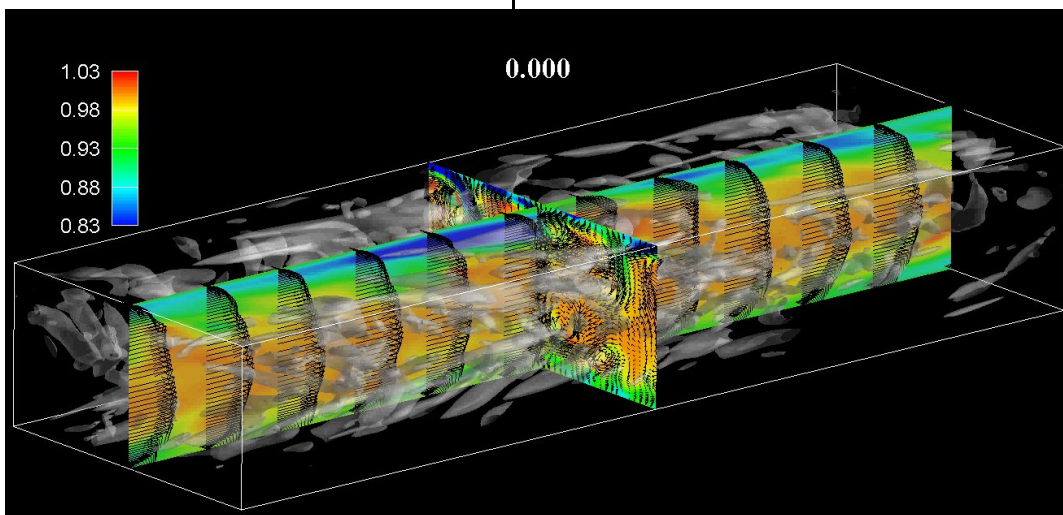


図 7 BMP - G モデルを用いた抵抗低減チャネル乱流の DNS による計算例

図9に、高速度カメラにより撮影した可視化画像を示す。ここで毛細管外径は 2.40 mm とする。界面活性剤水溶液 ($C_s = 1000$ ppm) の場合、水と比較してゆっくりと変化するフィラメントが観察される。

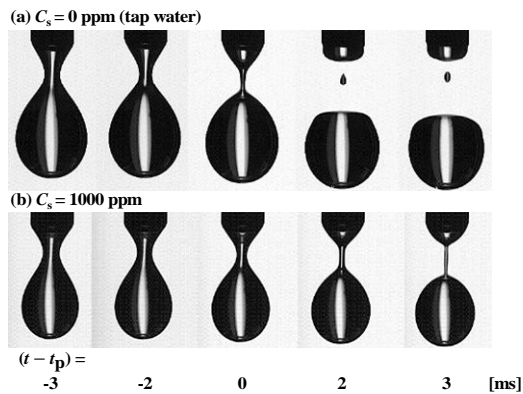


図9 水と界面活性剤水溶液の液滴落下挙動

図10に過渡伸長粘度 η_e^+ を示す。図中の点線は $T = 20$ における水の伸長粘度である。過渡伸長粘度はヘンキーひずみの増加に従い、指数関数的に増加し、溶液の濃度の増加に伴い大きくなる。またこれらの値は水のものと比較して 10~1000 倍のオーダーを示している。これより、抵抗低減効果を有する非イオン性界面活性剤水溶液の過渡伸長粘度は水のものよりも桁違いに大きいことが明らかになった。

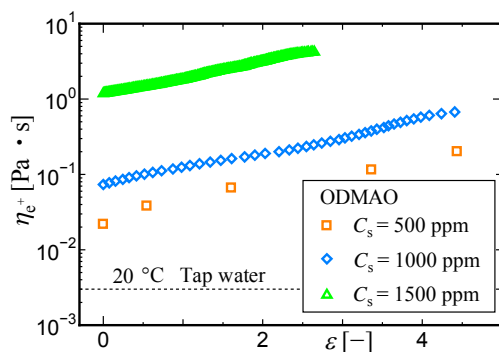


図10 過渡伸長粘度とヘンキーひずみの関係

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5件)

Shinji TAMANO, Hiroki IKARASHI, Yohei MORINISHI, and Keijiro TAGA, Drag reduction and degradation of nonionic surfactant solutions with organic acid in turbulent pipe flow, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol.215, 2015.1, pp.1-7. (審査有)

Shinji TAMANO, Takuya KITAO, and Yohei MORINISHI, Turbulent drag reduction of boundary layer flow with non-ionic surfactant injection, Journal of Fluid Mechanics, Vol.749, 2014.5, pp.367-403. (審査有)

Shinji TAMANO, Takuya KITAO, and Yohei MORINISHI, Streamwise variation of turbulent dynamics in boundary layer flow with drag-reducing surfactant injection, Proceedings of the eighth International Symposium of Turbulence and Shear Flow Phenomena, Poitiers, France, 28-30 August, 2013.8, pp.1-6. (審査有)

Shinji TAMANO, Michael D. GRAHAM, and Yohei MORINISHI, Role of viscoelastic stresses in turbulent boundary layer flow of drag-reducing fluid, Proceedings of the XXIII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, China, 19-24 August, 2012.8, No. FM12-018, pp. 1-2. (審査有)

Shinji TAMANO, Takuya KITAO, and Yohei MORINISHI, Turbulence statistics of drag-reducing boundary layer flow with injection of nonionic surfactant aqueous solution, Proceedings of the XVIth International Congress on Rheology 2012, Lisbon, Portugal, 5-10 August, 2012.8, p.1. (審査有)

[学会発表](計16件)

内川裕貴, 伊藤惇, 玉野真司, 森西洋平, 抵抗低減乱流境界層流れの主流速度依存性, 日本機械学会東海支部第62期総会講演会, (2015.3.14-15), pp. 1-2.

玉野真司, 希薄粘弾性流体のレオロジーと乱流抵抗低減, 日本機械学会北海道支部特別講演会, 北海道大学, (2015.1.6), (依頼講演)

改田隼, 玉野真司, 森西洋平, BMPモデルを用いた粘弾性流体のチャネル乱流のDNS, 日本流体力学会第28回数値流体力学シンポジウム, (2014.12.9-11), pp. 1-3.

伊藤惇,内川裕貴,玉野真司,森西洋平, 界面活性剤注入による乱流境界層流れの抵抗低減に関する実験的研究,日本機械学会第92期流体工学部門講演会(2013.10.25-26), No. 0419, pp.1-2.

大橋陽太,玉野真司,森西洋平,希薄界面活性剤水溶液の一軸伸長流れの過渡特性に関する研究,第62回レオロジー討論会,(2014.10.15-17), pp. 1-2.

大橋陽太,玉野真司,森西洋平,液滴落下法による希薄界面活性剤水溶液の伸長特性に関する研究,第14回複雑流体研究会,(2014.6.21), pp. 1-2.

大橋陽太,玉野真司,森西洋平,抵抗低減効果を有する希薄界面活性剤水溶液の伸長粘度計測,日本レオロジー学会第41年会,(2014.5.15-17), pp. 67-68.

五十嵐大輝,玉野真司,森西洋平,非イオン性界面活性剤の実用化に向けた抵抗低減水溶液の劣化特性に関する実験的研究,日本機械学会東海支部第63期総会講演会,(2014.3.18-19), No. 213, pp. 1-2.

玉野真司,粘弾性流体の乱流境界層流れにおける抵抗低減効果,第7回I2plusセミナー,東京理科大学,(2013.11.12).(依頼講演)

五十嵐大輝,玉野真司,森西洋平,円管内乱流の抵抗低減効果の劣化に及ぼす非イオン性界面活性剤と添加剤のモル比の影響,第61回レオロジー討論会,(2013.9.25-27), pp.1-2.

玉野真司,粘弾性流体の乱流境界層流れにおける抵抗低減メカニズムの解明,日本流体力学会年会2013(2013.9.12-14), pp.1-4.(受賞講演)

玉野真司,粘弾性流体の流動と抵抗低減,日本レオロジー学会通常総会および第40年会,(2013.5.16-17), pp.1-4.(受賞講演)

北尾拓也,玉野真司,森西洋平,平板からの界面活性剤注入による抵抗低減乱流境界層流れのPIV計測,日本機械学会第90期流体工学部門講演会,(2012.11.17-18), pp.317-318.

五十嵐大樹,玉野真司,森西洋平,円管内乱流の抵抗低減に及ぼす非イオン性界面活性剤水溶液と添加剤のモル比の影響,日本機械学会第90期流体工学部門講演会,(2012.11.17-18), pp.315-316.

玉野真司,希薄界面活性剤水溶液の乱流抵抗低減効果とレオロジー特性,第43回中部化学関係学協会支部連合秋季大会,(2012.11.10-11), p.165.(依頼講演)

玉野真司,北尾拓也,中田夏樹,森西洋平,非イオン性界面活性剤水溶液の注入による抵抗低減乱流境界層流れにおける統計平均量の流れ方向変化,日本機械学会東海支部第61期総会講演会,(2012.3.15-16), pp.1-2.

〔その他〕
ホームページ等
<http://tamano.web.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO, Shinji)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40345947