

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360065

研究課題名(和文)量子性を考慮した水素流動現象解析のための分子動力学シミュレータの構築

研究課題名(英文)Construction of molecular dynamics simulator for analyses of flow phenomena of hydrogen by considering quantum effect

研究代表者

徳増 崇 (TOKUMASU, Takashi)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：10312662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：水素分子の量子性が液体水素の熱物性や輸送特性に与える影響について解析を行った。計算にはセントロイド分子動力学法および古典分子動力学法を用いた。その結果、熱物性に関しては古典的に評価したのでは表現できない液体水素の特性の対応状態原理からのずれを量子効果を考慮することによって非常によく説明できることが明らかとなった。また輸送特性については拡散係数に対する量子効果の影響は現れないこと、熱伝導率に関しては、量子効果を考慮することによって、古典分子動力学法の範疇で予想される熱伝導率よりも小さくなることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The effect of quantum effect of hydrogen molecule on the thermal properties and transport phenomena of liquid hydrogen was analyzed. Both the centroid molecular dynamics method and classical molecular dynamics method was used. As for the thermal properties, the difference of its characteristics from principle corresponding state which cannot be explained on the standpoint of classical dynamics was clearly explained by considering the quantum effect of hydrogen molecule. As for the transport phenomena, diffusion coefficient of hydrogen molecule do not change even though the quantum effect was considered. The thermal conductivity of liquid hydrogen by considering the quantum effect become smaller than that by evaluating the standpoint of classical dynamics.

研究分野：流体工学

キーワード：分子流体工学 水素 量子効果 熱物性

### 1. 研究開始当初の背景

現在のエネルギー枯渇問題、二酸化炭素の増大による地球温暖化問題により、自然エネルギーの利用が強く求められている。この自然エネルギーを回収して貯蔵し、必要な場所へ輸送して使用する物質として水素が注目を集めている。この水素を効率よく貯蔵・輸送・使用するためにはこの水素の流動特性を正確に把握する必要がある。特に、水素は比重が軽く、気体状態では極めて少量しか貯蔵・輸送することができないため、水素を-250 以下に冷却して液体状態で貯蔵・輸送を行う方法がしばしば用いられる。この水素の流動現象は、そのスケールが通常のサイズであれば、実験から得られた物性値を用いて予測することが可能である。しかしながら、その代表長さがナノスケールのオーダーになると、ナノスケール特有の流動特性が発現し、実験から得られたマクロな物性値ではその挙動を予測できなくなることが予想される。このような流れはロケットポンプ軸受けの摺動面や亀裂からの液体水素の漏れ流れなどに見られ、また近年注目を集めている燃料電池において、触媒表面上での解離反応を伴う流れに見られる。

このようなナノスケールの流動現象の解析には、分子動力学(MD)法が有効な手法であるが、これを水素に適用する際に問題となるのが水素の量子性である。水素は約 30K 以下になるとド・ブロイの熱的波長が分子径ほどの長さになり、水素原子の空間的な広がりを考慮しなければならない。このため、通常分子動力学法ではその特性を正確に予測できなくなる。また水素は回転・振動運動が量子化されているため、回転運動や振動運動を連続的に取り扱う通常分子動力学法では比熱や熱伝導などの流体特性を定性的にも予測することができない。また触媒表面上での水素の解離現象については、解離エネルギーを乗り越えて水素が解離することへの零点振動の寄与やトンネル効果の影響などが明らかになっていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究課題において、申請者は水素の量子性を考慮した流動現象解析のための分子動力学シミュレーション手法を開発し、その手法を用いて、様々な水素の流動現象のシミュレーションを行い、水素の量子性がその流動現象のミクロ・マクロ特性に与える影響やその発現メカニズムを明らかにする。具体的には、以下の3点について研究を行う。

(1) 水素の量子性を考慮した流動現象解析のための分子動力学シミュレータの開発

水素の流動特性を正確に再現するために、その量子性を考慮した分子動力学シミュレータの開発を行う。まず大規模分子軌道計算により厳密な水素分子間ポテンシャルのデータベースを構築し、分子配向や多体効果がポテンシャルに及ぼす影響について定量的

に解析を行う。次にこのポテンシャルをモデル化して分子動力学シミュレータに組み込む。量子効果の近似計算方法としては経路積分 Centroid Molecular Dynamics(CMD)法を用い、この手法を分子の回転自由度が取り扱えるように拡張する。また回転運動・振動運動の量子性や零点振動・トンネル効果の影響については、Wave packet 法を用いて計算を行う。

(2) 水素のマクロな静的・動的熱物性に対する量子効果の影響の解析

まず、(1)で開発されたシミュレータを用いて水素のマクロな静的物性(状態線図、比熱、表面張力)および動的物性(粘性係数、熱伝導率)を計算し、実験結果と比較することによりシミュレータの妥当性の検証を行う。また、同一の分子間ポテンシャルを用いてこれらを古典的に計算することにより水素の量子性がこれらの熱物性に及ぼす影響を定量的に明らかにする。さらに動的熱物性に関しては、各物理量(運動量、エネルギー)の流束を生じさせる分子論的メカニズムに対する検討も行い、これらのメカニズムに対する量子効果の影響についても解析を行う。

(3) 水素のナノスケール流動現象に対する量子効果の影響の解析

(1)で開発されたシミュレータを用いて水素のナノスケール流動現象のシミュレーションを行い、(2)で明らかにされた水素の量子性の静的・動的特性に対する影響が、ナノスケールの構造を有する領域でどのように変化するかを定量的に明らかにする。具体的には気液界面や固液界面が存在する状態での運動量・エネルギー輸送や金属表面での水素解離現象をシミュレートし、その界面領域での運動量やエネルギーの輸送特性、解離確率についての知見を得る。また古典 MD 法の結果と比較することにより、水素の量子性がこれらナノスケールの界面領域での流動に及ぼす影響やその発現メカニズムに対する知見を取得し、(2)で得られた結果との比較を行う。

### 3. 研究の方法

本研究課題では各課題について、下記の方法により研究を遂行する。

(1)分子軌道法によるポテンシャルデータの取得およびモデル関数の構築

水素分子の分子間ポテンシャルエネルギーを分子軌道法により求める。分子軌道計算には GAUSSIAN03 を用いる。Schrödinger 方程式を解く際の電子相関関数ならびに基底系の組み合わせとしては、これまでの申請者らの研究により CCSD(T)/aug-cc-PVQZ で求められたポテンシャルでは液体水素の状態線図の実験結果を再現できないことが判明しているため、aug-cc-PVXZ の基底で計算し、これらの結果を外挿して Complete Basis Set limit のエネルギーを求めることにより計算精度の向上を図る。この計算を様々な水素分子の分子間距離、分子配向について行い、水

素分子の分子間ポテンシャルのモデル関数を構築するための参照データベースを作成する。また、これらの系に別の水素分子1分子を近傍に配置した計算も同時に行い、ポテンシャルエネルギーの差異を比較することにより多体効果の影響の度合いを定量的に評価する。次に取得したデータから分子動力学計算に用いる分子間ポテンシャルのモデル関数を構築する。分子間ポテンシャルは水素分子の相対位置および相対配向の関数とし、配向に関する成分は球面調和関数を用いて表現する。このようにして得られた関数の各項に現れるパラメータは、このモデル関数が分子軌道計算から得られた参照データと一致する様に決定する。

#### (2) 量子性を考慮した液体水素の分子動力学シミュレータの開発

経路積分 CMD 法では、P 個のビーズからなるネックレスを一つの単原子分子とみなしている。各ビーズは調和ポテンシャルでつながれており、各ビーズは他の分子から粒子間相互ポテンシャルによって力を受ける。この各ビーズの受ける力をネックレスの質量中心に働く力として、各原子の運動方程式を解く。この手法において、本申請課題では、分子の配向による影響を考慮するため、ネックレスの質量中心を2つに分割し、その2つのネックレスの質量中心を拘束条件によって拘束することによって二原子性を表現し、分子配向を考慮することを試みる。拘束条件は完全に質量中心を固定する条件と、原子間の揺らぎ効果を再現するために、調和振動子やモースポテンシャルで拘束する二つの拘束条件で検証を行う。また Wave Packet 法では分子を質点としてではなく波束として捉え、この波束の時間変化を Schrödinger 方程式に基づいて計算する。本申請課題では、この波束分布から得られる力の平均場を古典分子動力学法で用いる力として用いることにより、Schrödinger 方程式と Newton 運動方程式を接合して計算を行う。

#### (3) 量子性を考慮した液体水素の分子動力学シミュレータの改良

構築されたシミュレータを用いて、水素の温度・密度状態や内部エネルギーの計算を行い、過去に報告されている経路積分 CMD 法での計算結果や実験結果と比較することでこのシミュレータの妥当性の検証を行う。また、水素の比熱を計算し、回転・振動準位の量子化を考慮していない経路積分 CMD の結果や実験値と比較することにより、手法の妥当性についても検証する。実験結果との良好な一致が得られない場合には、前年度に構築されたポテンシャルの妥当性や回転・振動準位の量子化の取り扱い方を再検討してモデルの改善を行う。また、多体効果の影響は、ビーズ間の相互作用ポテンシャルに(1)で得られた他の分子の影響を付加して熱物性の計算を行い、その結果を2体間のみの分子間ポテンシャルによる結果と比較することに

より定量的に評価する。また、大規模数値計算に備えて、シミュレータの最適化および並列化も行う。これにより、最終的に量子性、分子配向を考慮した水素の流動現象解析シミュレータを確立する。

#### (4) 水素のマクロな静的熱物性に対する量子効果の影響の解析

構築されたシミュレータを用いて、水素のマクロな静的熱物性の計算を行い、古典 MD 法を用いてシミュレートされた結果と比較することにより水素の量子性がマクロな物性に与える影響について解析を行う。静的熱物性については、様々な温度・密度条件における系の圧力および内部エネルギーを計算し、Kataoka の方法を用いて状態線図(Equation of State: EOS)を作成する。また各温度における系の全エネルギーから水素の比熱を求め、古典 MD との結果との比較により、量子効果の影響を明らかにする。

#### (5) 水素のマクロな動的熱物性に対する量子効果の影響の解析

静的熱物性と同様に、水素の動的熱物性についても計算を行い、水素の量子性がその熱物性に及ぼす影響を解析する。動的熱物性としては粘性係数、熱伝導率について解析を行い、実験結果と比較してその妥当性を検証するとともに、古典 MD 法による結果と比較してその量子効果の影響を明らかにする。計算は Green-Kubo の式を用いた平衡分子動力学法と、計算系の内部に各物理量の勾配を設定した非平衡分子動力学法の2通りで行う。二原子分子液体が運動量やエネルギーを輸送するメカニズムには分子移動による機構と分子衝突による機構が存在するが、液体水素の運動量・エネルギー輸送特性ではどちらの機構が卓越しており、またどの機構に量子効果の影響が顕著に現れるかを定量的に明らかにする。

## 4. 研究成果

まず p-V-T (圧力 体積 温度) 関係に対する水素分子の量子効果の影響について調べた。計算は幅広い温度・密度条件で行い、その結果を用いて Kataoka の手法により状態線図を作成し、気液飽和線と臨界点を計算した。得られた臨界点により、状態線図を無次元化し原子核の量子効果の影響を調べた。その結果、量子効果が低温水素の熱物性に与える影響は、定量的にも定性的にも大きく、古典分子動力学法が低温水素の熱物性を再現できない要因は、量子効果である事が明確となった。この経路積分セントロイド分子動力学法と古典分子動力学法の差異の要因を明らかにするために、密度一定のもとで圧力に対するベリアル項の寄与度の温度変化を調べた。これにより、量子効果を考慮する事で古典的な場合よりもベリアル項を大きく見積もる事が明らかとなり、またその差異は温度が上がる(量子効果が弱くなる)につれて小さくなる事が明らかとなった。さらに、force

matching 法より導出した水素分子間ポテンシャルを比較した結果、ポテンシャルの井戸が浅くなり、井戸の位置が離れている事が明らかとなった。これは、量子効果により水素分子が空間的に広がって存在する事で、斥力範囲が広くなり、分子間相互作用が小さくなることを意味している。これにより量子効果を考慮する事で圧力のビリアル項が大きくなると考えられる。また、動径分布関数(RDF)を比較した結果、量子効果を考慮する事でRDFが広がることを確認し、第一ピークの位置が古典の場合よりも離れる事や、第一溶媒和殻内の分子数の減少より、量子効果を考慮する事で、斥力範囲が広くなり分子間相互作用が小さくなる事が明らかとなった。

また、拡散係数や熱伝導率などの輸送物性に対する量子効果の影響の解析を行った。計算にはセントロイド分子動力学法および古典分子動力学法を用いた。拡散係数はGreen-Kuboの方法を用いて評価した。計算は様々な温度条件にて行い、拡散係数に対する量子効果の影響が温度条件によりどのように変化するかを解析した。この2つの計算結果は、対応状態原理に基づいて還元密度、還元温度が一致する条件で比較を行った。この両者を比較した結果、セントロイド分子動力学法の計算結果と古典分子動力学法の計算結果はほとんど変化がなく、拡散係数に対する量子効果の影響は現れないことが明らかとなった。しかしながら、これは分子の拡散メカニズムに対する量子効果の影響の影響が小さいことを意味しているのではなく、水素分子の量子効果は分子間ポテンシャルの井戸および分子径に大きく影響するが、その効果が拡散係数に相反して現れるため、全体として影響が少なく見えることが明らかとなった。また熱伝導率に関しては、量子効果を考慮することによって、古典分子動力学法の範疇で予想される熱伝導率よりも小さくなることが明らかとなった。この傾向は実験結果とも一致するものである。さらに、量子効果を考慮することによってエネルギー輸送量が減少することも確認された。また、そのエネルギー流束を構成するそれぞれの項の寄与を評価したところ、量子効果を考慮したことによる分子間ポテンシャルの変化のために、分子移動による分子間ポテンシャルエネルギーの輸送量と分子間相互作用によるエネルギー輸送が減少し、これが系全体のエネルギー輸送の減少の原因となっていることが明らかとなった。

##### 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 20 件)

1. S. Tsuda, M. Tomi, N. Tsuboi, S. Ikawa and T. Tokumasu, "Extraction of the Density Fluctuations in Diatomic Fluids Around the Critical Points Using Molecular Dynamics Simulation", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 15, No. 4, (2015), pp.3117-3120. 査読有り, DOI: 10.1666/jnn.2015.9623
2. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "A Nuclear Quantum Effect on the Transport Properties of Liquid Hydrogen", Proceedings of CONV-14: International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer, (2014), CONV-14-36. 査読有り
3. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "An Analysis of Quantum Effects on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen Using the Path Integral Method", The Journal of Chemical Physics, Vol. 140, (2014), 134506-1-10. 査読有り, DOI: 10.1063/1.4870036
4. H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi, "Limits of Classical Molecular Simulation on the Estimation of Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen", Molecular Simulation, Vol. 38 (2012), pp.404-413. 査読有り, DOI: 10.1080/08927022.2010.548385
5. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "An Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen using Path Integral Centroid Molecular Dynamics Method", Proceedings of the 22nd International Conference on Chemical Thermodynamics and 67th Calorimetry Conference, (2012), CO-MS-08. 査読有り
6. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "A Molecular Dynamics Study on the Thermodynamic Analysis of Cryogenic Hydrogen", Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics, (2012), pp.586-587. 査読無し
7. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "An Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen", Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, (2012), IFHT2012-181. 査読無し
8. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, "An

Effect of Quantum Nature of Cryogenic Hydrogen on the Thermodynamic Properties of Liquid hydrogen”, Proceedings of the Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2012), FR19-012. 査読有り

9. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 量子分子動力学法を用いた低温水素の量子効果の影響解析, 第 26 回数値流体力学シンポジウム 講演予稿集, (2012), E02-3. 査読無し
10. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 経路積分セントロイド分子動力学法を用いた液体水素の熱物性評価, 第 49 回日本伝熱シンポジウム 講演論文集, (2012), H224. 査読無し
11. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 経路積分セントロイド分子動力学法を用いた低温水素の熱物性解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会 講演予稿集, (2012), J053033. 査読無し
12. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 水素分子の量子効果が熱物性に与える影響解析, 第 26 回分子シミュレーション討論会 講演要旨集, (2012), 19-19. 査読無し

〔学会発表〕(計 24 件)

1. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “An analysis of Nuclear Quantum Effect on Thermodynamic and Transport Properties of Hydrogen using Molecular Dynamics Method”, 20<sup>th</sup> European Conference on Thermophysical Properties, Porto, Portugal, 平成 26 年 9 月 1 日.
2. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “A Nuclear Quantum Effect on the Transport Properties of Liquid Hydrogen”, International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer, Kusadai, Thailand, 平成 26 年 6 月 10 日.
3. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 液体水素の輸送物性における量子効果発現メカニズムの分子動力学解析, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 浜松, 日本, 平成 26 年 5 月 23 日.
4. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “A Molecular Dynamics Study of the Nuclear Quantum Effect on the Transport Properties

of Liquid Hydrogen”, the 5<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Marseille, France, 平成 26 年 4 月 24 日.

5. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “A Molecular Dynamics Study of Nuclear Quantum Effect on the Diffusion of Hydrogen in Condensed Phase”, the tenth International Conference of Computational Methods in Science and Engineering, Athens, Greece, 平成 26 年 4 月 5 日.
6. 井川祥平, 徳増崇, 坪井伸幸, 津田伸一, 分子動力学計算による二原子分子流体の臨界点近傍における密度揺らぎの評価, 日本航空宇宙学会北部支部 2014 年講演会, 仙台, 日本, 平成 26 年 3 月 10 日.
7. S. Ikawa, T. Tokumasu, N. Tsuboi and S. Tsuda “A Molecular Dynamics Simulation of the Density Fluctuation in the Diatomic Fluids around the Critical Points”, Americal Physical Society March Meeting 2014, Colorado, USA, 平成 26 年 3 月 4 日.
8. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “A Molecular Dynamics Study on the Thermodynamic and Transport Properties of Liquid Hydrogen”, The Tenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 平成 25 年 11 月 26 日.
9. S. Tsuda, M. Tomi, N. Tsuboi, S. Ikawa and T. Tokumasu, “Extraction of the Density Fluctuations in Diatomic Fluids around the Critical Points Using Molecular Dynamics Simulation”, The 4<sup>th</sup> International Symposium on Micro and Nano Technology, Shanghai, China, 平成 25 年 10 月 10 日.
10. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “An analysis of the quantum effect on the thermodynamic and transport properties of cryogenic hydrogen using molecular dynamics method”, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences 2013, Prague, Czech Republic, 平成 25 年 9 月 13 日.
11. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 量子効果が低温水素の熱・輸送物性メカニズムに与える影響の分子動力学解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会 岡山, 日本, 平成 25 年 9 月 9 日.

12. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “Molecular Dynamics Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Liquid Hydrogen”, ASME 11<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Sapporo, Japan, 平成 25 年 6 月 17 日.
13. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 水素分子の量子効果が熱物性に与える影響解析, 第 26 回分子シミュレーション討論会, 福岡, 日本, 平成 24 年 11 月 17 日.
14. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “An Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen”, The 3rd International Forum on Heat Transfer, Nagasaki, Japan, 平成 24 年 11 月 15 日.
15. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “A Molecular Dynamics Study on the Thermodynamic Analysis of Cryogenic Hydrogen”, The Ninth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 平成 24 年 9 月 20 日.
16. 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇, 経路積分セントロイド分子動力学法を用いた低温水素の熱物性解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会 金沢, 日本, 平成 24 年 9 月 10 日.
17. H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi and T. Tokumasu, “An Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen using Path Integral Centroid Molecular Dynamics Method”, The 22nd International Conference on Chemical Thermodynamics, Buzios, Brazil, 平成 24 年 8 月 8 日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

徳増 崇 (TOKUMASU, Takashi)

東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号：10312662

### (2)研究分担者

坪井 伸幸 (Tsuboi, Nobuyuki)  
九州工業大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：40342620

津田 伸一 (Tsuda, Shin-ichi)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：00466244