

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2010
 課題番号：19360065
 研究課題名（和文） ナノ秒/連続発振レーザによる透過性硬脆材料の精密微細加工とその知能化
 研究課題名（英文） PRECISION MICROPROCESSING OF PERMEABLE HARD BRITTLE MATERIAL BY NANOSECOND- OR CW-LASER AND ITS INTELLECTUALIZATION
 研究代表者
 大村 悦二（OHMURA ETSUJI）
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号：90144435

研究成果の概要（和文）：

透過性のナノ秒パルスまたはCWのレーザビームを材料表面または内部に集光することによって誘電体や半導体などの硬脆材料の精密微細加工を試み、加工メカニズムの解明、加工品質に関わるパラメータの究明と制御について、学術的な立場から以下の点について検討した。(1) 吸収係数の温度依存性の測定、(2) 透過性材料の表面および内部加工と加工品質評価、(3) 熱伝導解析と熱弾塑性解析による温度履歴および熱衝撃現象の解析、(4) 破壊力学解析

研究成果の概要（英文）：

The precision microprocessing of a hard and brittle materials such as a dielectric or a semiconductor was tried by focusing a permeable nanosecond pulse or CW laser beam in the material surface or the inside. The following matters about elucidation of the processing mechanism and investigation and control of parameters about processing quality were examined from the scientific situation: (1) The measurement of the temperature dependency of the absorption coefficient. (2) Surface or inside processings of permeable materials, and their processing quality assessment. (3) The analysis of a temperature history and a thermal shock phenomenon by the heat transfer analysis and the thermo-elastic-plastic analysis. (4) Fracture mechanics analysis

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：知的加工，加工数理，レーザ加工
 科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：レーザ加工，硬脆材料，レーザスクライブ，レーザ内部加工，吸収係数，亀裂

1. 研究開始当初の背景

液晶パネルやプラズマディスプレイ、スマートフォンなどの切断などに用いられているレーザスクライビングや、シリコンウェハなどの切断に用いられているレーザダイシングは、従来のブレードによる機械的なスクラ

イビングやダイシングと異なり、飛散粒子がほとんどなく、抗折強度が優れている上、切断幅が極めて狭いので切り出し効率が高いなどの特長があり、電子デバイスの分断技術として大いに期待されつつあった。ダイヤモンドのように、機械加工では切断できないよ

うな硬い材料をレーザーアブレーションで切断することも次第に用いられつつあった。これらのほとんどは、レーザー光が透過する材料の内部あるいは表面にビームを集光して局所的に蒸発または昇華させることで溝切りしたり、熱衝撃波の伝播を利用して高転位密度層を生成するとともに、転位を核として亀裂を発生させることなどで内部改質層を生成し、これに垂直に引張応力を作用させて分断するものである。透明材料の内部に屈折率の異なる領域を生成して光導波路を作成する試みも行われつつある。透過性の誘電体や半導体のレーザー精密微細加工は、今後ますます盛んになると考えられた。しかし、これらの加工メカニズムはまだ明確にはわかっておらず、経験的な試行錯誤で研究開発が行われているのが現状であった。このような加工法がどのような材料に、どのような照射条件で行えば有効であるか、まったく予測できないという問題があった。

2. 研究の目的

上記の精密微細加工技術を確固たるものとするには、加工メカニズムの解明、加工品質に関わるパラメータの究明と制御などが必要不可欠であった。産業界からの要望も非常に大きいものがあつた。産業界では、レーザーの安定性とビーム品質の点から、ナノ秒パルスレーザーや CW(連続発振)レーザーがよく用いられていた。そこで本研究では、透過性のナノ秒パルスまたは CW のレーザービームを材料表面または内部に集光することによって誘電体や半導体などの硬脆材料の精密微細加工を試み、加工メカニズムの解明、加工品質に関わるパラメータの究明と制御について、学術的な立場から検討し、産業界の要望に応えることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 吸収係数の温度依存性の測定・・・測定方法を確立するとともに、測定精度の検討を進めた。(2) 透過性材料の表面および内部加工と品質評価・・・CO₂ レーザ、Nd:YAG レーザを用いて表面加工と内部加工を行った。これまで、主にガラス、Si、SiC、サファイアを対象としてきた。加工した試料は、クロスセクションポリシャによって断面試料を作成し、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、レーザー顕微鏡などを用いて、断面の観察、品質評価を行った。また、三点曲げ試験を行って分断強度も測定した。(3) 熱伝導解析と熱弾塑性解析による温度履歴および熱衝撃現象の解析・・・吸収係数の温度依存性を考慮した熱伝導解析によって集光点近傍の温度場を解析し、吸収熱量(内部発熱量)の解析結果を汎用ソフト ANSYS に入力して熱衝撃現象を解析した。ガラス、シリコンについては、

実際のレーザースクライビングやレーザーダイシング結果との比較検討を行った。(4) 破壊力学解析・・・CW レーザによる初期亀裂からの亀裂進展現象、パルスレーザーによる熱衝撃に起因する亀裂進展を、破壊力学に基づいて解析した。(5) 透過性材料を基板とする実電子デバイスの表面および内部加工と加工品質評価・・・数社企業の協力を得て、CO₂ レーザ、YAG レーザなどを用いて、透過性材料を基板とする実電子デバイスの表面加工や内部加工を行った。

4. 研究成果

(1) ガラスのレーザースクライブにおける亀裂の局所進展・・・レーザー照射を遮へいすることで亀裂が深く進展することを予測し、実験で亀裂が局所的に深くなる現象を確認した。遮へい幅とほぼ比例して亀裂深さは増加するが、遮へい幅が大きくなるとスクライブ方向の亀裂進行が停止する実験結果を三次元熱弾性解析により定性的に説明した。(2) ガラスのクロスレーザースクライブ機構・・・1 次スクライブ線のエッジに初期亀裂を導入していないにも関わらず 2 次スクライブが進行するが、その進行メカニズムとして、2 次スクライブの加熱域で 1 次スクライブ面が圧接される場合と、2 次スクライブの冷却域において、1 次スクライブ面に生じる摩擦力によって引張応力が伝達される場合の二つの形態があることを明らかにした。(3) レーザ重ね照射によるレーザースクライブ亀裂伸長・・・レーザースクライブ後にスクライブ線に沿って重ね照射を行うとレーザースクライブ亀裂が深さ方向に伸長することを、熱弾性解析によって、ガラス表層に大きな圧縮応力が生じ、ガラス内部に発生した引張応力が亀裂先端に集中することで亀裂が伸長するメカニズムを明らかにした。適切なレーザー重ね照射条件を推定できることも示した。(4) レーザースクライブにおける板厚と線膨張係数の影響・・・提案したレーザースクライブ可能条件の推定方法が板厚 0.4~1.1 mm であれば板厚に関わらず適用できること、線膨張係数がソーダガラスより小さい液晶ディスプレイ用アルミノシリケートガラスにも適用できることを示した。セラミックスなどの硬脆材料のレーザースクライブ可能性を検討し、アルミナセラミックについて実証した。(5) ガラスのレーザースクライブにおける亀裂進展解析・・・亀裂深さを予測し、最適なスクライブ条件を簡易に推定するため、有限要素法による二次元熱弾性解析を行った。スクライブ可能な最高速度の推定は、応力拡大係数に静的しきい値を導入することで、亀裂深さの推定は、応力拡大係数に動的しきい値を導入してそれぞれを可能にした。その結果、最適なスクライブ条件を破壊力学に基づく二

次元熱弾性解析によって絞り込むことができるようになった。

(6) ガラスのレーザスクライブにおける加工可能条件の繰り返し周波数を考慮した推定・・・亀裂深さを予測し、最適なスクライブ条件を簡易に推定するため、繰り返し周波数の影響を考慮した有限要素法による二次元熱弾性解析を行った。その結果、引張応力の最大値を調査することで、スクライブ可能な最高速度を推定でき、最大せん断応力の最大値を調査することで、スクライブ可能な最低速度を推定できることを明らかにした。

(7) ナノ秒レーザによる単結晶シリコンの内部改質層形成機構の解析・・・吸収係数の温度依存性を考慮した熱伝導解析と、その結果に基づく簡単な熱応力解析によって、内部改質層の形成機構を検討した。その結果、吸収係数の温度依存性のため、集光点近傍で突如急激なレーザ光吸収が生じること、初期の急激なレーザ光吸収領域でボイドが生成し、その後熱衝撃波が表面方向に伝播すること、熱衝撃波先端の高温領域が強い圧縮応力を受け、熱衝撃波が通過した領域に高転位密度層が生成すること、前のパルスで生成した高転位密度層を熱衝撃波の先端が伝播する際、高転位密度層内の転位が核となって亀裂が生成し、単結晶領域まで進展することなどを示した。

(8) 透過性パルスレーザによる極薄シリコンウェハの内部改質・・・50 μm 厚の Si ウェハを対象とした熱伝導解析を行って、焦点深さによる加工結果の違いを予測し、実験でその妥当性を確認した。その結果、本解析によって加工結果を予測することができること、半導体プロセスで不可欠なダイシングの前工程として、ナノ秒パルスレーザを照射してウェハ内部に改質層を形成するステルスダイシング(SD)加工を行うには適切な焦点深さがあり、熱衝撃波が表面に達しない条件でレーザ照射を行う必要があることが明らかとなった。

(9) ステルスダイシング(SD)におけるシリコンウェハ表裏面への熱影響・・・SD 加工では、ウェハ表面または裏面に形成されているデバイスへの熱影響が十分小さいことを理論的に示した。

(10) ステルスダイシングにおける亀裂進展解析・・・SD 加工について、前述した吸収係数の温度依存性を考慮した熱伝導解析結果を基に二次元熱弾性解析を行い、亀裂進展機構を解析した。その結果、内部亀裂生成の可能性および亀裂進展プロセスを示すことができ、これまでの熱伝導解析結果から推測された内部亀裂進展に関する仮説の妥当性が示唆された。

(11) ステルスダイシングの内部改質層近傍における動径方向の亀裂進展解析・・・SD 加

工では、吸収係数の温度依存性に起因して生成する熱衝撃波が伝播する領域は高転位密度層になると推測してきたが、熱応力解析の結果、最大せん断応力は結晶のすべりにおける臨界せん断応力より十分大きく、高転位密度化する可能性が裏付けられた。また、高転位密度層では、レーザ照射プロセスにおいて生成したランダムな方向の亀裂群が、テープエクspansionによる分断プロセスにおいて相互連結すること、その結果、分断後の高転位密度層表面に凹凸が生じることが示された。

(12) 単結晶ダイヤモンドのレーザ加工メカニズム解析・・・ダイヤモンドに対して透過性である Nd:YAG レーザを表面に集光照射したアブレーション加工について熱伝導解析を行い、加工メカニズムを検討した。(a)レーザがダイヤモンド表面または表面層で吸収される場合、(b)レーザがダイヤモンド内で吸収される場合、(c)レーザがダイヤモンドの表面層および材料内で吸収される場合を扱った。その結果、(c)が実験結果を最もよく説明できることを明らかにした。

(13) 光吸収性媒質中における超短パルスレーザの自己集束現象と温度場の解析・・・光吸収性カー媒質中の近軸波動方程式を導出し、数値計算によって、超短パルスレーザ照射による溶融石英中の光吸収エネルギー分布を求めた。吸収エネルギー分布を初期条件として、溶融石英中の伝熱解析を行った。Kudriašov らの実験結果と比較して、解析方法および解析結果の妥当性を確認した。

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 22 件)

(1) Etsuji Ohmura, Yuta Kawahito, Kenshi Fukumitsu, Junji Okuma and Hideki Morita, Analysis of Internal Crack Propagation in Silicon Due to Permeable Laser Irradiation — Study on Processing Mechanism of Stealth Dicing、査読有、Journal of Material Science and Engineering, Vol. 5, (2011). 掲載予定

(2) Keisuke Yahata, Koji Yamamoto and Etsuji Ohmura, Crack Propagation Analysis in Laser Scribing of Glass、査読有、Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol.5, (2010), pp.109-114.

(3) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura, Thermal Stress Analysis on Laser Cross Scribe of Glass、査読有、Journal of Laser Applications, Vol.22, No.1 (2010), pp.29-36.

(4) 大村悦二、小川健輔、熊谷正芳、中野 誠、

福満憲志、森田英毅、ステルスダイシングにおける応力拡大係数を用いた亀裂進展解析、査読有、日本機械学会論文集、A編、Vol. 76, No. 764 (2010), pp. 446-448.

(5) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura、Influence of thermal expansion coefficient in laser scribing of glass、査読有、Precision Engineering, Vol. 34, (2010), pp. 70-75.

(6) Etsuji Ohmura, Katsuko Harano, Kenichi Watatani and Keiji Ebata, Laser Processing Mechanism of Monocrystalline Diamond、査読有、Proceedings of the 14th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT 2010), 2010, Suita, Osaka, (2010), pp. 82-87.

(7) 八幡恵輔、山本幸司、大村悦二、ガラスのレーザスクライブにおける亀裂進展解析、査読有、日本機械学会論文集、C編、Vol. 75, No. 759 (2009), pp. 3339-3346.

(8) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura、Crack Propagation in Glass by Laser Irradiation along Laser Scribed Line、査読有、Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME, Vol. 131, (2009), 051002.

(9) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura、Partial Growth of Crack in Laser Scribing of Glass、査読有、Journal of Laser Applications, Vol. 21, No. 2 (2009), pp. 67-75.

(10) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura、Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass、査読有、Journal of Laser Applications, Vol. 20, No. 4 (2008) pp. 193-200.

(11) 山本幸司、羽阪 登、森田英毅、大村悦二、レーザ重ね照射によるガラスのレーザスクライブ亀裂の伸長、査読有、精密工学会誌、Vol. 74, No. 11 (2008) p. 1182-1187.

(12) 山本幸司、羽阪 登、森田英毅、大村悦二、ガラスのレーザスクライブにおける板厚の影響、査読有、レーザ加工学会誌、Vol. 15, No. 4 (2008) pp. 276-281.

(13) 山本幸司、羽阪 登、森田英毅、大村悦二、ガラスのレーザスクライブにおける線膨張係数の影響、査読有、レーザ加工学会誌、Vol. 15, No. 4 (2008) pp. 269-275. 【レーザ加工学会誌ベストオナー賞受賞論文】

(14) 山本幸司、羽阪 登、森田英毅、大村悦二、ガラスのレーザクロススクライブにおける熱応力解析、査読有、精密工学会誌、Vol. 74, No. 9 (2008) pp. 937-943. 【精密工学会高城賞受賞論文】

(15) Etsuji Ohmura, Masayoshi Kumagai, Makoto Nakano, Koji Kuno, Kenshi Fukumitsu

and Hideki Morita, Analysis of Processing Mechanism in Stealth Dicing of Ultra Thin Silicon Wafer、査読有、Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 2, No. 4 (2008) pp. 540-549.

(16) 大村悦二、熊谷正芳、福満憲志、中野誠、内山直己、森田英毅、透過性パルスレーザによる極薄シリコンウェハの内部改質、査読有、精密工学会誌、Vol. 74, No. 3 (2008) pp. 275-281.

(17) 大村悦二、福満憲志、熊谷正芳、森田英毅、ナノ秒レーザによる単結晶シリコンの内部改質層形成機構の解析、査読有、日本機械学会論文集、C編、Vol. 74, No. 738 (2008) pp. 446-452.

(18) M. Kumagai, N. Uchiyama, E. Ohmura, R. Sugiura, K. Atsumi and K. Fukumitsu, Advanced dicing technology for semiconductor wafer—Stealth Dicing—、査読有、IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 20, No. 3 (2007) pp. 259-265.

(19) 山本幸司、羽阪 登、森田英毅、大村悦二、ガラスのレーザスクライブにおける亀裂の局所進展、査読有、精密工学会誌、Vol. 73, No. 8 (2007) pp. 917-923.

(20) 福世文嗣、大村悦二、福満憲志、森田英毅、査読有、単結晶シリコンの吸収係数温度依存性測定、レーザ加工学会誌、Vol. 14, No. 1 (2007) pp. 22-26.

(21) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura、Partial Growth of Crack in Laser Scribing of Glass、査読有、Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2007, Fukuoka Japan, (2007), pp. 873-878.

(22) Etsuji Ohmura, Masayoshi Kumagai, Makoto Nakano, Koji Kuno, Kenshi Fukumitsu and Hideki Morita, Analysis of Processing Mechanism in Stealth Dicing of Ultra Thin Silicon Wafer、査読有、Proc. the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2007, Fukuoka Japan, (2007), pp. 861-866. 【LEM21 The Best Paper Award 受賞論文】

〔学会発表〕(計 15 件)

(1) 大村悦二、ステルスダイシングの加工メカニズム【特別講演】、第 75 回レーザ加工学会講演会、(2011-5-11)、吹田。

(2) Etsuji Ohmura、Analyses of Self-Focusing Phenomenon and Temperature Field in Light Absorption Medium with Ultrashort Pulse Laser Irradiation、The 29th International Congress on

Application of Laser and Electro-Optics 2010 (ICALEO2010)、(2010-9-27)、Anaheim.

(3) Etsuji Ohmura, Takashi Okazaki, Keiichi Kishi, Toshio Kobayashi, Masahiro Nakamura, Satoshi Kubo and Komei Okatsu: Crack Propagation Analysis in Underwater Laser Drilling 【招待講演】、The 4th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2010)、(2010-7-8)、Paris.

(4) Etsuji Ohmura, Yuta Kawahito, Kenshi Fukumitsu, Junji Okuma and Hideki Morita, Analysis of Internal Crack Propagation in Silicon Due to Permeable Pulse Laser Irradiation — Study on Processing Mechanism of Stealth Dicing —、International Conference on Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN-10)、(2010-7-6)、St. Petersburg.

(5) 大村悦二、レーザプロセスによる知的ナノ加工 【依頼講演】、日本太陽エネルギー学会関西支部 2009 年度シンポジウム、(2009-12-3)、生駒。

(6) Etsuji Ohmura, Kensuke Ogawa, Masayoshi Kumagai, Makoto Nakano, Kenshi Fukumitsu and Hideki Morita, Crack Propagation Analysis During Pulse Duration in Stealth Dicing, The 28th International Congress on Application of Laser and Electro-Optics 2009 (ICALEO2009)、(2009-11-3)、Orlando.

(7) Etsuji Ohmura, Kensuke Ogawa, Masayoshi Kumagai, Makoto Nakano, Kenshi Fukumitsu and Hideki Morita: Analysis of Crack Propagation Induced by Laser Irradiation in Stealth Dicing, The Fifth International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2009)、(2009-6-2)、神戸。

(8) Keisuke Yahata, Koji Yamamoto, Etsuji Ohmura and Yoshinori Hirata, Crack Propagation Analysis in Laser Scribing of Glass, The Fifth International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2009)、(2009-6-1)、神戸。

(9) Etsuji Ohmura, Masayoshi Kumagai, Kenshi Fukumitsu, Makoto Nakano, Kazuhiro Atsumi and Hideki Morita, Temperature field analysis of silicon wafer in stealth dicing, The 27th International Congress on Application of Laser and Electro-Optics 2008 (ICALEO2008)、(2008-10-22)、Temecula.

(10) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura, Influence of

Thickness in Laser Scribing of Glass and Crack Propagation by Laser Irradiation along Laser Scribed Line, Ninth International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2008)、(2008-6-18)、Quebec City.

(11) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura, Partial Growth of Crack and Cross Scribe in Laser Scribing of Glass, Ninth International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2008)、(2008-6-18)、Quebec City.

(12) E. Ohmura, Masayoshi Kumagai and Hideki Morita, Innovative Laser Technology for Semiconductor Manufacturing —Stealth Dicing— 【招待講演】、The 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2008 (PICALO2008)、(2008-4-17)、北京。

(13) Etsuji Ohmura, Masayoshi Kumagai, Makoto Nakano, Koji Kuno, Kenshi Fukumitsu and Hideki Morita, Analysis of Processing Mechanism in Stealth Dicing of Ultra Thin Silicon Wafer, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)、(2007-11-9)、福岡。

(14) Koji Yamamoto, Noboru Hasaka, Hideki Morita and Etsuji Ohmura, Partial Growth of Crack in Laser Scribing of Glass, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)、(2007-11-9)、福岡。

(15) Masayoshi Kumagai, Takeshi Sakamoto and Etsuji Ohmura, Laser processing of doped silicon wafer by the Stealth Dicing, 2007 International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM2007)、(2007-10-16)、Santa Clara.

〔図書〕 (計 1 件)

(1) E. Ohmura and S. Noguchi (分担執筆)、Materials with Complex Behaviour —Modelling, Simulation, Testing, and Applications (ed. by A. Öchsner, L.F. Martins da Silva and H. Altenbach), (2010), Springer.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

名称: レーザ加工方法及びレーザ加工装置

発明者: 渥美貴文・池田優二・大村悦二

権利者: アイシン精機(株)

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/065448

出願年月日：2010-09-10
国内外の別：外国

名称：雷射加工方法及雷射加工装置
発明者：渥美貴文・池田優二・大村悦二
権利者：アイシン精機(株)
種類：特許
番号：099130502（未公開）
出願年月日：2010-09-10
国内外の別：国外(台湾)

名称：レーザー加工方法及びレーザー加工装置
発明者：渥美貴文・池田優二・大村悦二
権利者：アイシン精機(株)
種類：特許
番号：特願 2009-208789
出願年月日：2009-9-10
国内外の別：国内

○取得状況（計2件）

名称：Laser Processing Method and Laser Processing System
発明者：Fumitsugu Fukuyo, Etsuji Ohmura, Kenshi Fukumitsu, Masayoshi Kumagai, Kazuhiro Atsumi, Naoki Uchiyama
権利者：浜松ホトニクス(株)
種類：特許
番号：WO/2007/105537
取得年月日：2007-9
国内外の別：国外

名称：レーザー加工方法及びレーザー加工装置
発明者：福世文嗣・大村悦二・福満憲志・熊谷正芳・渥美一弘・内山直己
権利者：浜松ホトニクス(株)
種類：特許
番号：2007-245173
取得年月日：2007-9
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大村 悦二 (OHMURA ETSUJI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：90144435

(2) 研究分担者

中野 元裕 (NAKANO MOTOHIRO)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号：40164256