

平成 21 年 4 月 28 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560409
 研究課題名 (和文) 波長多重走査型半導体レーザ光源によるインプロセス形状計測システムの実現
 研究課題名 (英文) In-process profile measurement system based on a multiple wavelength scanning laser diode
 研究代表者
 氏 名：鈴木孝昌 (SUZUKI TAKAMASA)
 所 属：新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号：40206496

研究成果の概要：

機械的駆動要素を必要としない静的波長走査光源を提案・構築し、AOD による波長走査が可能であることを実証した。波長走査幅は、約 1(nm)、周波数応答は約 300(Hz)であった。また、高速度 CCD カメラを用い、インプロセスでの鮮明な干渉縞画像検出ができることを確認した。これにより、外乱にロバストな干渉計測システムの実現が可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,400,000	0	1,400,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	570,000	3,870,000

研究分野：工学 (電気電子工学)

科研費の分科・細目：計測工学

キーワード：半導体レーザ，干渉計，波長走査，光外部共振器，インプロセス計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体レーザを用いた干渉計測系は、1980 年代後半から提案され始め、光出力の向上、発振波長の短波長側へのシフト、コヒーレンシーの向上など半導体レーザの性能向上とともに、干渉計自体の性能も上がってきた。これに伴い、外乱を除去できる干渉計など機能性を備えたものが提案されていた。しかし、単一波長型の干渉計では測定レンジが非常に狭く、生産現場での使用が著しく制限されていた。

(2) 一方、低コヒーレンス干渉計や波長走査干渉計に代表されるように、測定レンジが大幅に改善できる干渉計測系が近年注目を集め、生体医療の分野等で大きな成果を収めていた。

(3) しかし、波長走査型干渉計の場合、極めて高価なレーザ光源を必要とするため、一般に普及させるのは困難であった。これに対し、半導体レーザの外部に機械的に回転するミラーを配置し、回折格子との組み合わせで波長走査を可能とする波長走査光源が注目を浴びていた。

2. 研究の目的

(1) 広範囲な波長走査を可能とする波長走査型半導体レーザ光源の開発を行い、安定性や波長走査性能の評価を行う。ここで重要な点は、波長走査を行う際に従来の光外部共振器で必要とされていた機械的なミラー走査系を用いることなく、静的な波長走査系を構築するための検討を行うことである。これに

より再現性の高い安定な波長走査系を実現する。

(2) 外乱にロバストで測定ダイナミックレンジが広く、インプロセスでの粗面、動的物体、あるいは生体の測定をも可能とする干渉計測システムを実現する。

3. 研究の方法

(1) 本研究の全体構想を図1に示す。

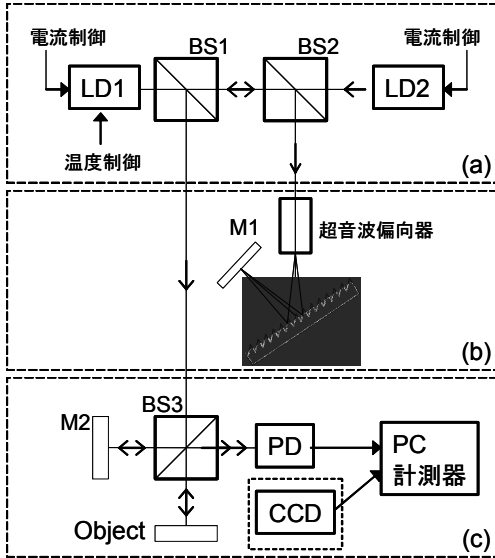


図1 研究の全体構想

(2) 上図(a)の実験系では、光源レーザLD1に温度・電流同時制御を施すとともに、外部光源LD2による光熱変調を行い、外部共振によらない波長走査型半導体レーザ光源の構築を目指す。

レーザを2つ用いて、図2のようにLD1にLD2のレーザ光を照射させることによりLD2の熱エネルギーによりLD1の共振器長を変化させてLD1のレーザ光の発振波長を変化させる。

ここで、LD2を使わず、LD1への注入電流を変化させても発振波長は変化するが、そうすると光強度も変化させることになり測定の際にそれが誤差の原因となる。だが、この熱変調を用いた新たな波長走査方法は、LD1の光強度をあまり変化させることなく波長を変化させることができる。

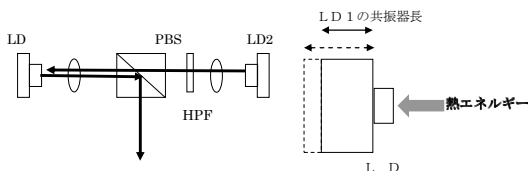


図2 熱変調の原理

(3) 図(b)の実験系では、超音波偏向器を利用した静的なビーム走査系を用い、広範囲な波長走査を実現する光外部共振器を構成す

る。図3に示す従来型の光外部共振器ではミラーを回転するために、機械的な操作が必要である。図3における回折光の式は、

$$\lambda = d(\sin \theta_i + \sin \theta_d) \quad (1)$$

で与えられ、回折角の変化 $\Delta\theta_d$ によって波長は $\Delta\lambda$ だけ変化することから、

$$\lambda + \Delta\lambda = d[\sin \theta_i + \sin(\theta_d + \Delta\theta_d)] \quad (2)$$

となる。したがって、この2式より、

$$\Delta\lambda = d[\sin(\theta_d + \Delta\theta_d) - \sin \theta_d] \quad (3)$$

が得られ、波長変化 $\Delta\lambda$ は、回折格子の回折角 θ_d と回折角の変化量 $\Delta\theta_d$ すなわちミラーにおける回転角変化に依存して変化する。

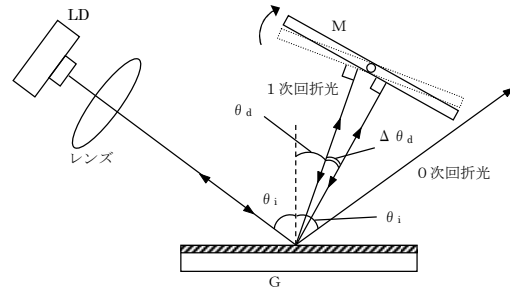


図3 従来型の光外部共振器

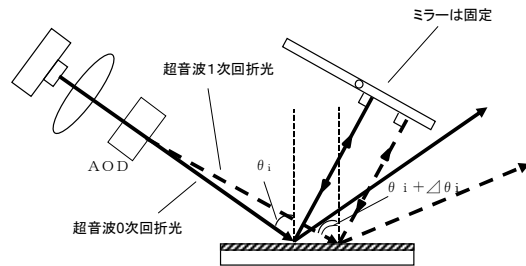


図4 本提案の光外部共振器

一方、本方法では、図4に示すように機械的な稼働部分はなく、経年劣化やアライメントのずれ、振動などの影響を考慮する必要はない。図4においては、入射角の変化 $\Delta\theta_i$ によって波長は $\Delta\lambda$ だけ変化することから、

$$\lambda + \Delta\lambda = d[\sin(\theta_i + \Delta\theta_i) + \sin \theta_d] \quad (4)$$

となる。したがって、式(1)および式(4)より、

$$\Delta\lambda = d[\sin(\theta_i + \Delta\theta_i) - \sin \theta_i] \quad (5)$$

が得られ、波長変化 $\Delta\lambda$ は、回折格子への入射角 θ_i と入射角の変化量 $\Delta\theta_i$ すなわち超音波偏

向器における回折角変化に依存する。この光学系について、波長を走査するための条件、波長走査範囲、そして走査した波長を安定に保持するための方策を理論的、実験的に検討する。

(4) 図(c)の実験系では、光源の波長走査特性を利用し、測定のダイナミックレンジが極めて大きな干渉計測システムおよび粗面あるいは段差面の形状計測を可能とする干渉計測システムを実現する。また、波長走査光源と超高速 CCD カメラを組み合わせ、たとえば切削加工中あるいは移動中の物体に対するインプロセスでの表面形状計測など、これまで干渉計で測定することが困難とされてきた対象物に対する計測を行い、本干渉計の適用可能範囲を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 実験装置の構成

図5に実験装置の構成を示す。回折格子の手前には超音波偏向器(AOD)を設置し、AODドライバへの印加電圧により回折角を変化させ、回折格子への入射角を変化させる。また、熱変調用光源にLD2を用いる。LD1とLD2の2つのレーザ光の偏光方向は互いに垂直であり、PBSを用いてLD2のエネルギーが損失の少ない状態でLD1に届くようにしている。

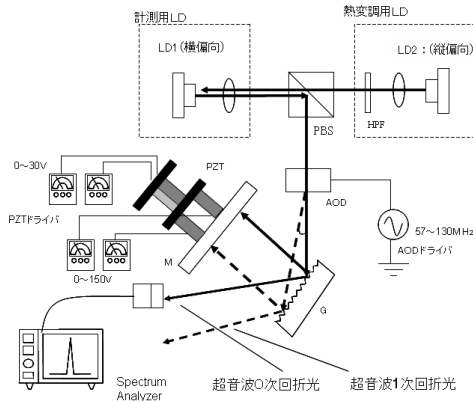


図5 実験装置の構成

(2) 熱変調による波長走査結果

汎用半導体レーザにおける熱変調では、LD2を80(mA)まで注入したときわずかにスペクトルが長波長側へシフトした。しかし、LD2の強度を大きく変えてもスペクトルには大きな変化は見られず、LD2の強度変化だけではスペクトルの細かい制御ができなかった。

次に AR コーティングレーザを用いた熱変調では、80(mA)で0.02(nm)長波長側にはっきりとシフトが確認できた。

(3) ミラーの回転による波長走査

AODによる波長走査を実現するに当たり、

比較および光学系のアライメント確認のため、ミラーの回転による従来型の波長走査機構を構築しスペクトルの確認を行った。

中心周波数684(nm)、最大出力30(mW)の汎用半導体レーザ ML1412Rを用いた場合の結果を図6に示す。

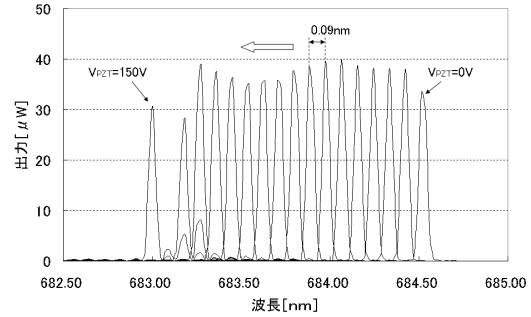


図6 ミラーの水平回転による波長走査 (ML1412R)

シフト間隔は0.09(nm)であり、ミラーの水平方向への回転のみではそれよりも小さい変化は確認されず、離散的な波長走査のみ確認できた。

(4) 超音波偏向器の特性再確認と光学配置の検討

これまでの予備実験の結果を受け、AODを用いて安定な波長走査を実現するための検討を行った。

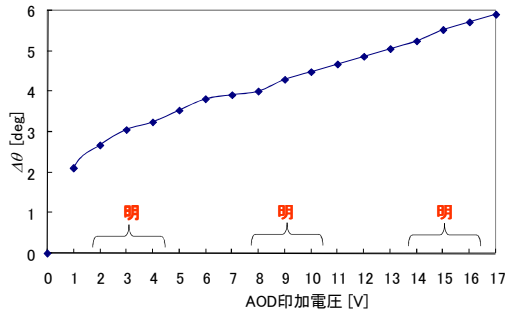


図7 超音波1次回折光の偏向角と強度

図7にAODドライバ印加電圧と回折角の観測結果を示す。印加電圧の増加に伴い、回折光の強度が周期的に変化すること、印加電圧の大きな場合ほど直線性が向上することなどが確認された。

(5) 超音波偏向器による安定な波長走査に関する検討 (汎用レーザ)

安定な波長走査を実現するに当たり、まず汎用の半導体レーザを用い、光外部共振器部分の光学系を図8のように変更後、理論的な検討を加えながら実験を行った。

式(4)をもとに行った理論計算と実験結果を図9に示す。理論値および実験値はよく

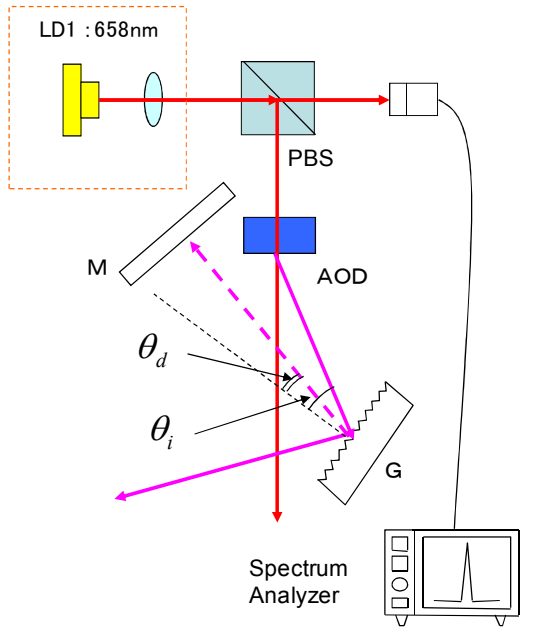


図 8 1 次回折光のみを反射する光学系 (改良光学系)

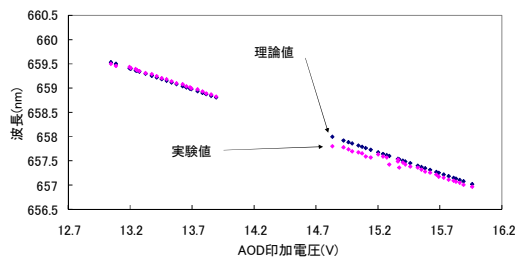


図 9 AOD を用いた波長走査における理論値および実験値の比較

一致し、式 (4) に従って波長が変化することが確認できた。

(6) 超音波偏向器による安定な波長走査に関する検討 (AR レーザ)

汎用レーザと AOD を組み合わせた光外部共振器によって理論通りの波長走査が行えることを確認できたため、次に AR レーザを用いた波長走査に関する実験を行った。結果を図 10 に示す。図 10 (a) は、光外部共振を施さない場合の発振スペクトルであり、きれいなマルチモード発振である。図 10 (b) は、光外部共振器を構成し、AOD ドライバの印加電圧を変化させた場合のスペクトルで、きれいなシングルモードスペクトルが安定に立っているのが確認できる。波長の走査幅は 1.07 (nm)、波長間隔は、0.06~0.08 (nm) であった。

(7) 波長走査によって変調された干渉信号の観測

AOD を用いた静的波長走査光源の波長走査特性および干渉信号の状況を把握するため、

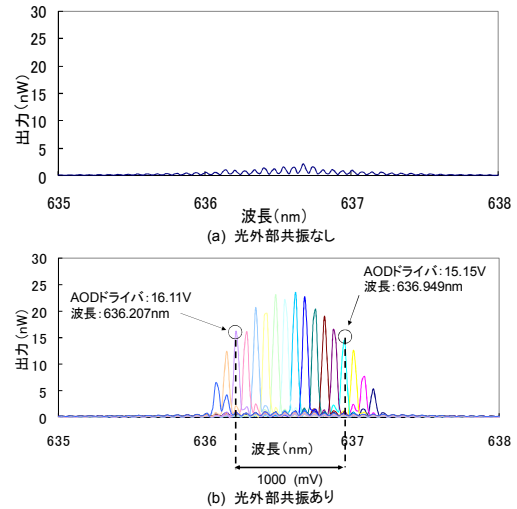


図 10 AOD を用いた AR レーザの波長走査

図 11 に示す実験系により干渉信号の変調と観測を行った。直接変調をかけるに当たり、干渉計の光路差は 300 μ m とした。また、AOD ドライバに印加する電圧は、図 12 に示す回路によって発生させた。

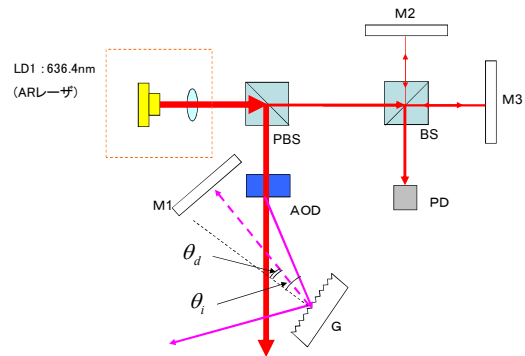


図 11 AOD を用いた波長走査光源による干渉信号の観測系

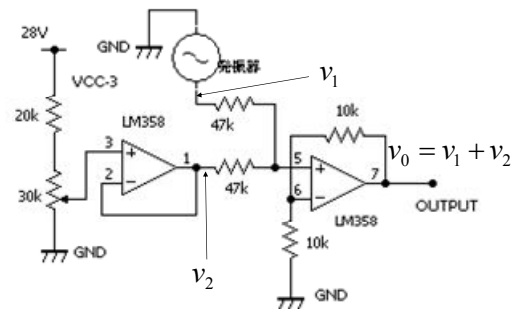


図 12 AOD 駆動信号発生回路

図 13 に、変調信号を正弦波とした場合の干渉信号の観測結果を示す。干渉信号には多少機械的な振動が乗っているが典型的な正弦波位相変調干渉信号が観測された。干渉信号は連続的であり、波長が連続的に走査され

ていることがこの観測の結果からも確認できる。

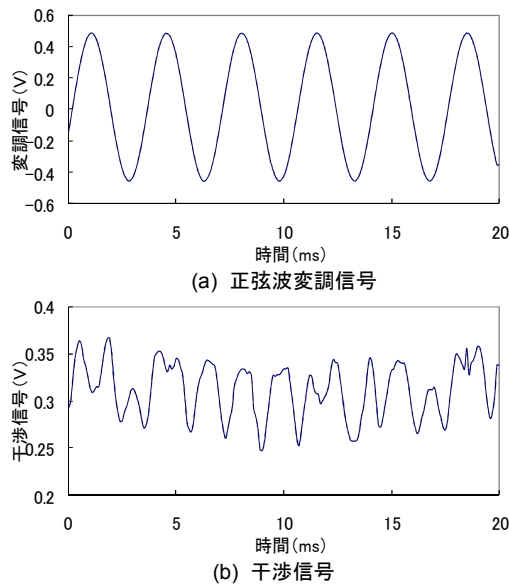


図 1 3 正弦波位相変調干渉信号の観測

(8) 波長走査の周波数特性

次に、波長走査の周波数特性を調べるため、変調信号の周波数を 300 (Hz), 1 (kHz) と変化させ干渉信号の観測を行った。結果を図 1 4 および図 1 5 に示す。

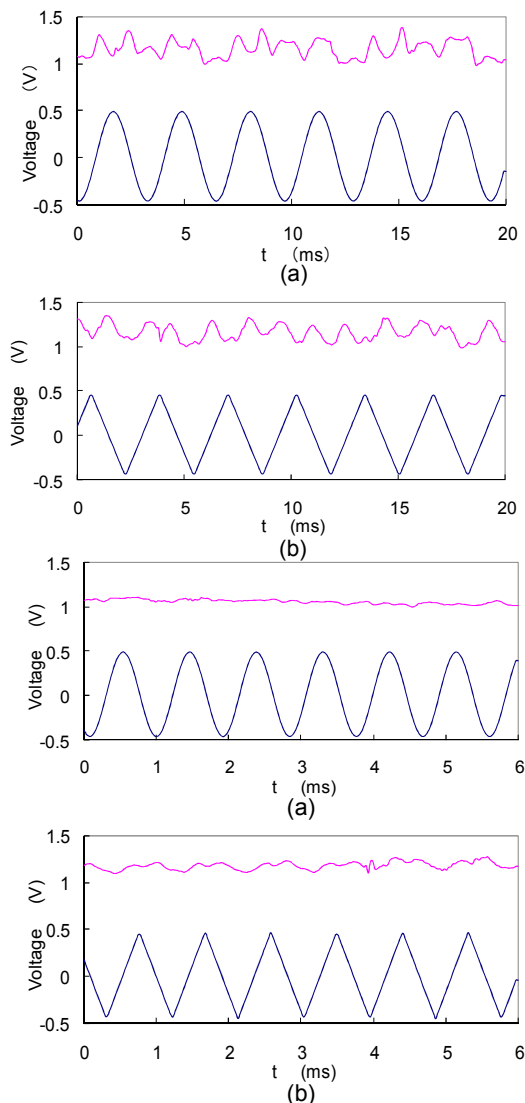


図 1 4 周波数特性 (300Hz)

周波数 300 (Hz) までは、良好な干渉信号が観測されたが、1 (kHz) では、変調のかかった干渉信号を観測することはできなかった。以上の結果より、本システムにおける応答周波数の上限は 300 (Hz) 程度であることがわかった。

図 1 5 周波数特性 (1kHz)

(9) 高速度 CCD カメラによる干渉信号の観測

段差物体をマイクロメータで機械的に変位させ、段差面における干渉縞を高速度 CCD カメラで観測した。干渉計部分の実験系を図 1 6 に示す。段差物体は、1.003mm と 1.03mm の 2 種類のゲージブロックで構成し、段差は 0.297mm である。段差物体は、電動マイクロメータによって毎秒約 1mm の速度で変位させた。CCD カメラのフレームレートを 1000fps (1 秒間に 1000 コマ) とし、干渉縞を取得した。

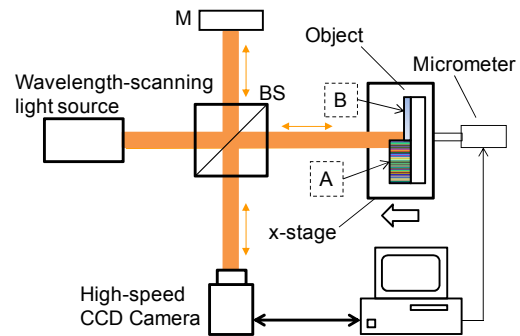


図 1 6 高速度 CCD カメラによる干渉縞計測

マイクロメータの駆動により、物体面 A がコヒーレンス長の範囲内に入り、干渉縞が発生した。次に物体面 B がコヒーレンス長の範囲内に入り、干渉縞を観測することができた。結果の一部を図 1 7 に示す。図 1 7 (a) は物体面 A による干渉縞、図 1 7 (b) は物体面 B による干渉縞を示している。移動中の物体においても干渉縞を鮮明に観測することができており、切削加工中の物体に対しても干渉計測が行えることを確認した。

図 1 7 移動物体で発生した干渉縞の観測

(10) まとめ



(a)



(b)

研究目的の(1)「広範囲な波長走査を可能とする波長走査型半導体レーザー光源の開発」については、機械的駆動要素を必要としない静的波長走査光源を提案・構築し、AODによる波長走査が可能であることを実証した。波長走査幅は、約1(nm)、周波数応答は約300(Hz)である。使用したARコート半導体レーザーが、大きな注入電流で自励的にシングルモード発振してしまうことから、注入電流を低く抑える必要があり、大きな強度のレーザー光を取り出すことはできなかった。AODにおける光の減衰などもあって、光外部共振器を構成するのに必要な光強度が確保できなかった可能性もある。したがって、より大きな強度で発光するARレーザーを用いることによって、波長走査幅をさらに拡大できる可能性はあり、今後の課題となった。目的の(2)「外乱にロバストでインプロセスでの測定も可能な干渉計測システムの実現」については、高速度CCDカメラを用いたインプロセスでの鮮明な干渉縞画像検出ができることを確認しており、外乱にロバストな干渉計測システムの実現が可能であることを明らかにした。(1)で実現した1(nm)の波長走査光源と組み合わせて段差計測、粗面計測など従来の干渉計測系が苦手としてきた物体の測定を可能とする計測系を実現できる見通しが得られた。なお、これまで得られたデータを基に、より具体的な計測例を示していくことが今後の課題として残されている。

5. 主な発表論文等 〔学会発表〕(計3件)

(1) 長崎 慎, 鈴木孝昌, 佐々木修己, “外部共振器型半導体レーザー光源の波長制御に関する検討,” 電気学会東京支部新潟支所研究発表会予稿集, pp. 59 (2007).
平成19年11月23日, 長岡技術科学大学

(2) Takamasa Suzuki, Shin Nagasaki, and Osami Sasaki, “A static wavelength scanning in a tunable external cavity laser diode,” Proc. of IC021-2008 Congress, pp. 237 (2008).
平成20年7月10日, シドニーコンベンションセンター

(3) 永井竜一, 鈴木孝昌, 佐々木修己, “外部共振器型半導体レーザー光源の静的波長制御に関する検討,” 電気学会東京支部新潟支所研究発表会予稿集, pp. 39 (2008).
平成20年11月8日, 新潟大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 孝昌 (SUZUKI TAKAMASA)

所属 新潟大学

・自然科学系・教授

研究者番号: 40206496

(2) 研究分担者

佐々木 修己 (SASAKI OSAMI)

所属 新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 90018911

大平 泰生 (OHDAIRA YASUO)

所属 新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 10361891