

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390097

研究課題名(和文) 高速応答位相共役鏡共振器におけるセルフポンプ発振の研究

研究課題名(英文) Study on self-pumped oscillation in phase conjugate optical cavity with fast response time

研究代表者

向井 孝彰 (MUKAI, TAKAAKI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10419674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：広ストライプ半導体レーザへの斜め光フィードバックにより高速応答の位相共役鏡を構成したが、その位相共役反射率は最大でも80%にとどまり、セルフポンプ位相共役共振器での自励発振をまだ実現できていない。自励発振前の現状での光スペクトルは、多数の素子モードが存在していたため、反射鏡に回折格子を用いて素子モードを単一化することにより、外部鏡モードも同時に単一化されることを明らかにした。遅延自己ヘテロダイン法を用いてその線幅を測定し、210kHzを実測した。

研究成果の概要(英文)：Self-pumped phase conjugate mirror having fast response time was successfully constructed using a broad-area laser diode with angled feedback configuration. Measured phase conjugate reflectivity has been at most 80%. Therefore, self-oscillation of the phase conjugate optical cavity is not yet experimentally realized. Since optical spectra of the present phase conjugate cavity exhibited multiple LD-longitudinal modes, blazed grating was employed as wavelength selective reflector, which led to the demonstration of the single longitudinal mode operation both in LD-longitudinal and external cavity modes. The linewidth was measured to be 210 kHz using delayed self-heterodyne method.

研究分野：光エレクトロニクス、量子エレクトロニクス

キーワード：位相共役 セルフポンプ位相共役鏡 広ストライプ半導体レーザ ブロードアリア半導体レーザ 位相共役光共振器 発振線幅 半導体増幅媒質

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体増幅媒質を用いた位相共役鏡

半導体増幅媒質[1][2]は、高利得性の故に高効率な非線形材料であり[3]、広ストライプ半導体レーザ(broad-area laser diode: BA-LD)増幅媒質中で反射率が1を超えるセルフポンプ形の位相共役鏡を実現できれば、図1に示すように斜め方向に設置した外部の平面鏡との間でレーザ発振が生じることが報告されていた[4]。

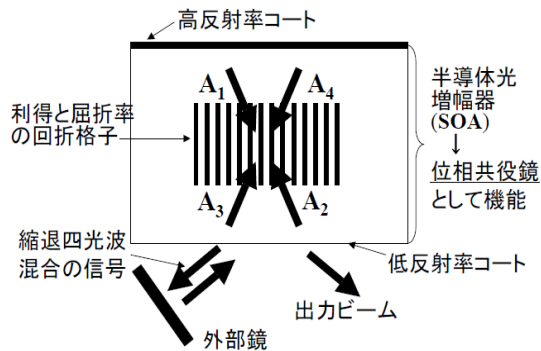


図1. セルフポンプ位相共役鏡半導体レーザ

文献[4]の実験結果では、出力ビーム方向へのレーザ発振が報告されているのみであり、位相共役鏡としての特性は明らかにされていなかった。このセルフポンプ形のレーザは位相共役鏡の作用により温度や光学アライメントの変化などのゆっくりした擾乱に対しても安定であるばかりでなく、半導体増幅媒質中のキャリア寿命がサブナノ秒の高速で応答する[3]ため、発振線幅の大幅な狭窄化が可能になると期待している。これは、サブナノ秒で応答する半導体増幅媒質で位相共役鏡を構成すれば、数GHzまでの帯域内で周波数雑音が抑圧され、輝線スペクトルに近い発振線幅を持つ高性能半導体レーザを実現できるのではないかと着想したためである。実際、瞬時に応答する位相共役鏡でフィードバックされた半導体レーザでは、これが可能となることが理論解析により示されている[5]。

(2) 広ストライプ半導体レーザ(BA-LD)を用いたセルフポンプ位相共役鏡の実験の現状

我々は、主として共振器長  $250\mu\text{m}$ 、ストライプ幅  $50\mu\text{m}$ 、裏面反射率 95%、前面反射率 15%を持つ AlGaAs-BA-LD(動作波長 825nm 付近)を、位相共役鏡を構成する半導体増幅媒質として用いてきた。図1の光学配置を光学定盤上で実装するために、図2に示す平行平面波による光フィードバック実験系を構築した。ここでは、BA-LDの出力光を活性層に平行方向に設置したロッドレンズにより垂直(y)方向の広がりを抑え、シート状の光とした上で、LD端面から焦点距離の位置に設置した円柱レンズにより水平面内の発散球面波を平行平面波に変換している。さらに、その後方に設置したスリットのx方向位置によ

って選択したの角度成分のみの光を、外部平面鏡でフィードバックしている。

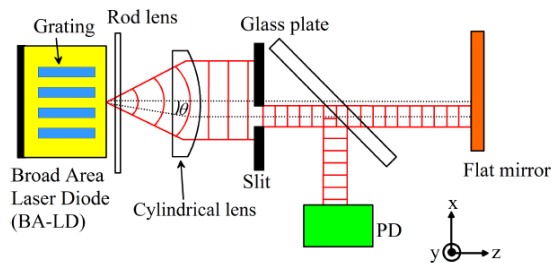


図2. 平行平面波のフィードバック実験系

この実験系で、 $\theta = 0^\circ$ の垂直フィードバック実験と  $\theta = 4^\circ$ の斜めフィードバック実験におけるCW動作時の光出力対注入電流特性を測定したところ、光フィードバックが無い場合に比べて有る場合には、垂直フィードバック実験では光出力が増加するのに対して、斜めフィードバック実験では逆に光出力が減少することを観測した[6][7]。これは、斜め光フィードバックによって位相が反転した位相共役波が発生し、これがフィードバックの無い場合の光出力に destructive に干渉するために光出力の低下が観測されたものである。フィードバック光入力に対して発生する位相共役光出力の比として定義される位相共役反射率  $R_{PC}$  の値として、30~40%程度を実測した。図1および図2に示すように、角度  $\theta$  からの斜めフィードバックによりBA-LDの活性層内にキャリア密度の空間回折格子を形成することが位相共役鏡形成の本質である。

また、図2の実験系を用いて外部共振器長  $L=75\text{cm}$ の共振器内を周回する光のビートスペクトルを、 $\theta = 0^\circ$ および  $\theta = 4^\circ$ の光フィードバック下で観測したところ、縦モード間隔周波数が、 $\theta = 0^\circ$ の垂直フィードバックでは通常ミラー共振器の  $c/2L$  で決まる 200MHz であるのに対し、 $\theta = 4^\circ$ の斜めフィードバック実験では上記の半分の 100MHz が観測された。これは、位相共役共振器内では光が2往復して初めて元の位相に戻ることに対応して、通常の半分の縦モード間隔周波数 ( $=c/4L$ ) が現れる [8]ことを、セルフポンプの半導体増幅媒質の実験で初めて検証したのものとなっている[7]。

図3の発散球面波実験系で、BA-LDから5cm

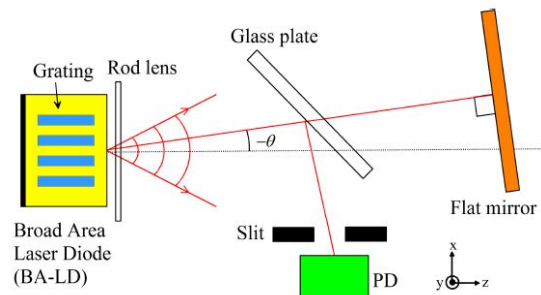


図3. 発散球面波のフィードバック実験系

の位置に平面鏡を設置し、 $\theta = 0^\circ$ 、 $-4^\circ$ において、フィードバックの有る場合と無い場合の光出力対注入電流特性を測定したところ、 $\theta = 0^\circ$ の垂直フィードバックでは、波面が広がり続ける発散球面波のために光フィードバック効率が激減したのに対し、 $\theta = -4^\circ$ の斜め光フィードバックでは、発散球面波を用いているにもかかわらず、平行平面波を用いた実験と同程度の位相共役波の発生に伴う光出力の減少を確認し、光フィードバック効率、すなわち、位相共役反射率として、平行平面波の場合と遜色の無い30~40%程度の値を実現した。これは、発散球面波が位相共役鏡で反射された後に収束球面波として厳密に入射光の経路を逆向きにたどるといった位相共役鏡に特徴的な「波面の反転作用」を直接実証したものである[9][10]。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノ秒以下の高速に応答する半導体増幅媒質のみからなるセルフポンプ（自己励起形）位相共役鏡共振器でレーザ発振を実現し、その動作機構を明らかにして高効率化を図ると共に、位相共役鏡の特徴である発振周波数の長期安定性と狭い発振線幅を実験的に検証することである。特に、高速応答の位相共役鏡でしか実現できない輝線スペクトルに近い狭発振線幅を実験的に検証できれば、半導体レーザにとって革命的な性能改善であるため、実用上のインパクトは計り知れない。

## 3. 研究の方法

(1)セルフポンプ型位相共役共振器の自励発振に必要な100%を超える位相共役反射率 $R_{PC}$ を達成するための種々の実験的取り組みを行うと共に、より望ましいBA-LDの構造定数を検討する。

(2)自励発振にはまだ至っていないが、現状の位相共役共振器から発生する出力光スペクトルを観測した結果、複数のLD素子モードで発振していることが明らかとなったため、このスペクトルを素子モードと外部鏡モードの両方で単一化する光学配置を考案し、そのスペクトル線幅の測定に取り組む。

## 4. 研究成果

### (1)位相共役反射率の向上に向けた取り組み

図3の発散球面波を用いた斜め光フィードバック実験で、共振器長 $L$ を短縮化することによりフィードバックパワーを増大させ、位相共役反射率の増大を追及したが、図4に示すように共振器長を $L=10\text{cm}$ 以下に減少させると位相共役反射率の増大が飽和の傾向を示した[10]。これは $L$ の短縮化に伴いフィードバックされる角度成分が増大し、活性層内で形成されるキャリア密度の空間回折格子の周期に、多数の周期の異なる成分が含まれるようになり、空間回折格子の実効長が減少したためと考えられる。

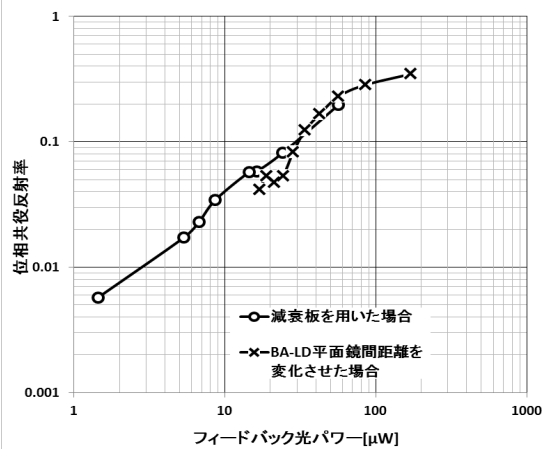


図4.  $R_{PC}$ のフィードバックパワー依存性

通常のBA-LDは双峰性の出力光角度分布を持つが、出力光が左右に分かれず、片側に偏った単峰性出力のBA-LDを用いて実験を行ったところ、光フィードバックを行う $\theta = -4^\circ$ 付近では通常の約2倍の光出力が得られた。このBA-LDを用いて、図2の実験系で斜め光フィードバックによる位相共役光発生実験を行うと、図5のI-L特性に示すように、光フィードバックがある場合には、無い場合の光出力に比べて20%にまで減少するため、位相共役反射率 $R_{PC}$ として80%の値が得られた[11]。

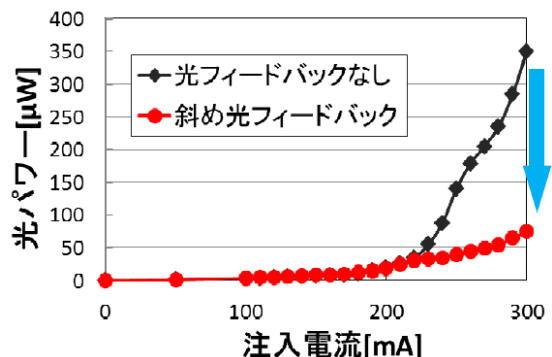


図5. 斜め光フィードバックによる光出力減少

位相共役反射率の構造定数依存性を検討するため、前面側4%、裏面側98%の反射率構造を持つ長さ $2000\ \mu\text{m}$ 、幅 $50\ \mu\text{m}$ の広ストライプ半導体レーザの位相共役反射率を実測すると、最適の斜めフィードバック角は $\theta = 0.6^\circ$ で、位相共役反射率も10%~20%程度まで減少した。これは、レーザ共振器長の増加に伴って、両端面間でストライプ幅内を斜め方向に伝搬できる自然放光の入射角度が減少すると共に、LD端面から出射する時の増幅された自然放光(ASE)光の利得帯域幅が狭くなるため、遠視野像の広がり角度も狭まり、最適な角度方向に伝搬するASE光強度が低下することが位相共役反射率が低く抑えられている原因である。

逆に、レーザ長をより短縮化し、ストライ



幅を 100  $\mu\text{m}$  まで広げると、斜めフィードバック角 を大きく出来るためストライプ幅内に形成できる空間回折格子の本数を倍増できることになり、自励発振に必要な 100% を超える位相共役反射率を実現できる見込みがある。その際、前面側反射率を 0.1% 程度まで抑圧して、現状では生じてしまっている共振器方向の通常のレーザ発振を抑圧することが重要である。

**(2)位相共役共振器出力光のスペクトル特性の観測と単一モード化および線幅測定**

図 2 の広ストライプ半導体レーザの発振スペクトルが、発振しきい値以上の注入電流では、垂直および斜め光フィードバック時の両方で、多数の LD 素子モードで発振していることを観測したため、位相共役共振器内を周回する光のスペクトルを、素子モードと外部共振器モードに区別して観測し、縦モードの単一化を図った。平面反射鏡からの  $\approx 5^\circ$  の斜めフィードバック実験では 3~4 本の素子モードが発振していたが、図 6 上部に示すように、リトロ配置のブレード回折格子に 11 倍のビームエクパンダを組み合わせた 30GHz の分解能を持つ波長選択斜めフィードバック光学系の構築により、サイドモード抑圧比 15dB 以上で素子モードを単一化できることを明らかにした。

次に、3GHz の自由スペクトル間隔(FSR)を持つファブリ・ペロ(FP)分光器を用いて、より詳細な外部鏡モード(モード間隔 0.27GHz)の観測を行った。 $\approx 0^\circ$  の垂直フィードバック時には約 10 本の外部鏡モードが発振して

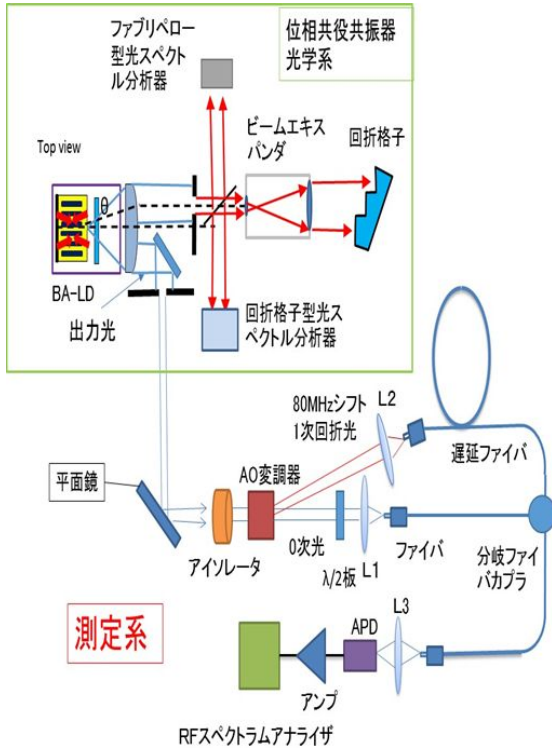


図 6 .位相共役共振器の構成・観測系(上部)と線幅測定系(下部)

いる(図 7 上図)のに対し、 $\approx 5^\circ$  の斜めフィードバック実験に移行するだけで、図 7 下図に示すように単一の外部共振器モードで動作することを初めて実証した。これは、斜めフィードバック実験でのみ実装されるキャリア密度の空間的回折格子に起因する位相共役共振器の効果であると考えられる。

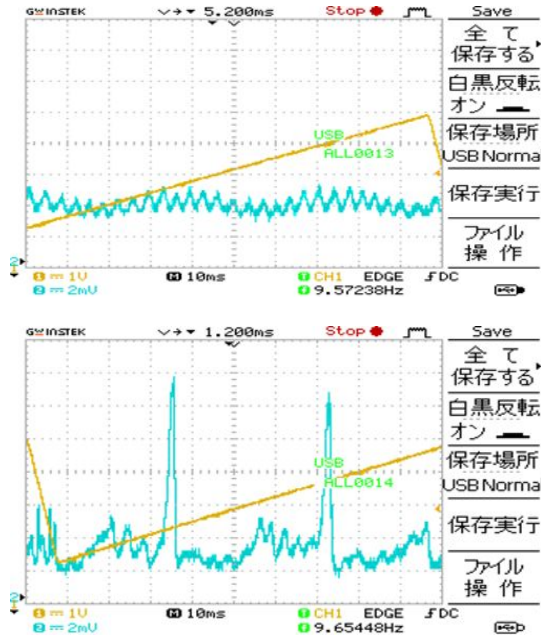


図 7. 垂直(上図)および斜めフィードバック(下図)時の外部鏡モードスペクトル

現状のセルフポンプ型位相共役フィードバックで動作する単一外部共振器モードの発振スペクトルをより高分解能で観測するために、図 6 下部に構築した遅延自己ヘテロダイン測定系[8]を用いて実測したスペクトルを図 8 に示す。

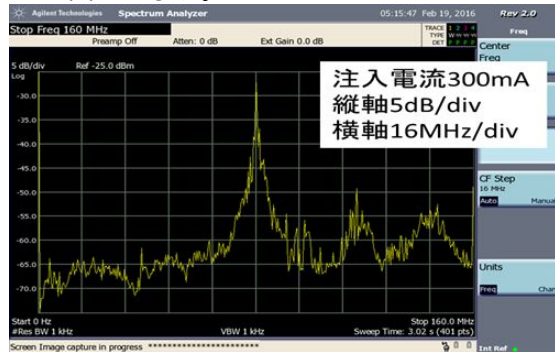


図 8. スペクトル測定結果(ファイバ長 7km)

AO 変調器を用いて片方の光に 80MHz の周波数シフトを与えているため、図 8 中央部のスペクトルが単一外部鏡モードスペクトルを表しており、このスペクトル形状はローレンツ型関数で良くフィットすることができ、そのスペクトル線幅(半値全幅:FWHM)は 210kHz と求められた。遅延用光ファイバの長さは 7km であり、この測定系の分解能は 14kHz であるため、実測された線幅は測定分解能より

も十分大きく、本研究で狙った輝線スペクトルに近い狭線幅は確認されなかった。これは、現状の位相共役共振器が、セルフポンプ型の自励共振条件に未だ達していないためであり、更なる位相共役反射率の向上が必須である。

従来は、平面鏡からの斜めフィードバック実験において多数の素子モードが同時に存在するスペクトル状態で位相共役反射率  $R_{pc}$  を測定し、 $R_{pc}=40\% \sim 80\%$  の実測値を得てきた。今回、ブレード回折格子とビームエクスパンダを組み合わせた波長選択斜めフィードバックにより実現した単一素子モード動作時の位相共役反射率を実測してもほぼ同等の値が得られた。これは光波を斜め方向からフィードバックし空間的回折格子を形成することが位相共役鏡の核心部であり、この光波に複数の波長成分が含まれていてもその波長差が中心波長の 1% 以下では空間回折格子の周期にほとんど差を生じないためである。

#### 【参考文献】

- [1] T. Saitoh and T. Mukai, "1.5  $\mu\text{m}$  GaInAsP Traveling-Wave Laser Amplifier," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-23, No. 6, pp. 1010-1020, June 1987.
- [2] T. Saitoh and T. Mukai, "Recent Progress in Semiconductor Laser Amplifiers (invited)," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 11, pp. 1656-1664, November 1988.
- [3] T. Mukai and T. Saitoh, "Detuning Characteristics and Conversion Efficiency of Nearly Degenerate Four-Wave Mixing in a 1.5  $\mu\text{m}$  Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifier," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 26, pp. 865-875, 1990.
- [4] P. M. Petersen, E. Samsoe, S. B. Jensen, and P. E. Andersen, "Guiding of laser modes based on self-pumped four-wave mixing in a semiconductor amplifier," Opt. Express, Vol. 13, pp. 3340-3347, 2005.
- [5] L. Petersen, U. Gliese, and T. N. Nielsen, "Phase Noise Reduction by Self-Phase Locking in Semiconductor Lasers Using Phase Conjugate Feedback," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, pp. 2526-2533, 1994.
- [6] K. Hara, M. Inoue, D. Miyazaki and T. Mukai, "Phase conjugate wave generation based on self-pumped four-wave mixing in a broad-area laser diode," 22nd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC2010), September 26-30, 2010, Kyoto Japan, Paper: P31.

[7] T. Mukai, K. Hara, M. Inoue, S. Nagiyama, and D. Miyazaki, "Self-Pumped Phase Conjugate Mirror Using a Broad-Area Laser Diode", Int. Quantum Electronics Conference/ Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011), August 28-September 1, 2011, Sydney, Australia, Paper:3230-CT-6.

[8] P. Kuerz and T. Mukai, "Frequency Stabilization of a Semiconductor Laser by External Phase-Conjugate Feedback," Opt. Lett., Vol. 21, pp. 1369-1371, 1996.

[9] 覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 井上 誠, 宮崎大介, 「発散球面波を用いたセルフポンプ位相共役鏡」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29p-B4-15, 2013 年 3 月 27 日~3 月 30 日.

[10] S. Kakuno, T. Mukai, N. Iwasaki, M. Inoue, and D. Miyazaki, "Self-Pumped Phase Conjugate Mirror Using the Divergent Spherical Wave," IEEE Photonics Conference 2013 (IPC2013), September 8-12, 2013, Bellevue Washington, U.S.A. Paper: WB1.2

[11] 覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 大槻明広, 宮崎大介, 「角度分解出力光の増加による位相共役反射率の改善」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A8-16, 2013 年 9 月 16 日~9 月 20 日.

#### 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 0 件)

[学会発表](計 3 件)

覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 大槻明広, 宮崎大介, 「角度分解出力光の増加による位相共役反射率の改善」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A8-16, 2013 年 9 月 16 日~9 月 20 日, 同志社大(京都府京田辺市).

S. Kakuno, T. Mukai, N. Iwasaki, M. Inoue, and D. Miyazaki, "Self-Pumped Phase Conjugate Mirror Using the Divergent Spherical Wave," IEEE Photonics Conference 2013 (IPC2013), September 8-12, 2013, Bellevue Washington, U.S.A. Paper: WB1.2

覺野重誠, 向井孝彰, 岩崎直紀, 井上 誠, 宮崎大介, 「発散球面波を用いたセルフポンプ位相共役鏡」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29p-B4-15, 2013 年 3 月 27 日~3 月 30 日, 神奈川工科大(神奈川

県厚木市).

〔図書〕(計 1 件)

齋藤 正, 向井孝彰, "第 2 章・第 15 節  
導波光の反射防止技術 (pp. 184-191)"  
【分担執筆】 in 『『光』の制御技術とその  
応用 事例集』(A4 判 601 頁), 技術情  
報協会 (2014 年 3 月 17 日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 孝彰 (MUKAI TAKAAKI)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10419674

(2) 研究分担者

なし