

平成21年 5月17日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17068009
 研究課題名（和文） マイクロリングフィルタ回路による波長スイッチングと波長ラベル符号多重化
 研究課題名（英文） Wavelength Selective Switch and Wavelength Label Coding Circuits Using Microring Resonators
 研究代表者
 國分 泰雄 (KOKUBUN YASUO)
 国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：60134839

研究成果の概要：

波長チャンネルをスイッチして光信号の自在なルーティングを実現するため、本研究では直列結合マイクロリング共振器の個々の共振器を個別にチューニングしてドロップ波長を一旦 OFF にさせ、バスラインを流れる他の波長信号を遮断せずに他の波長を新たに ON に出来るヒットレス波長選択スイッチと、この基本素子を並列に配置して波長スペクトルを符号多重化してルーティング制御を行うための波長ラベル符号化回路を開発・実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	24,000,000	0	24,000,000
2006年度	30,200,000	0	30,200,000
2007年度	24,000,000	0	24,000,000
2008年度	19,500,000	0	19,500,000
年度			
総計	97,700,000	0	97,700,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光スイッチ、微小共振器、フォトニックネットワーク、非遮断性、波長ラベル符号、波長選択スイッチ、直列結合、マイクロリング

1. 研究開始当初の背景

新世代光通信では、1ビットにより多くの情報を載せて、ビット列は小さなパケット単位で高速に経路をスイッチングし、また無駄な電気信号への変換を介さずに光信号のみでパケット制御を行うためのラベル符号化とスイッチングなどの、高度な光信号処理技術が必須になる。とくに波長をラベル情報として光信号のルーティングを行う波長選択スイッチと波長ラベル符号化回路が必要と

されていた。

2. 研究の目的

本研究では、波長ラベルを用いてフレキシブルかつスケラブルにパス制御を行う Reconfigurable optical Add/Drop multiplexer (ROADM)の基本要素であるヒットレス波長スイッチとその大規模集積化スイッチ回路、およびそれを多段縦列接続して波長スペクトルを符号多重化するための

波長ラベル符号化・識別回路の実現を目指した。

3. 研究の方法

ヒットレス波長選択スイッチとは、チューナブル波長フィルタの中心波長を変化させた時に他の波長チャンネルを遮断（ヒット）せずに、新たな波長チャンネルにドロップ波長（フィルタ中心波長）を切り替える新機能デバイスである。この新機能を実現するため、本研究では図1に示すような高次直列結合マイクロリング共振器の中心波長を熱光学（TO）効果によって個別に制御して、中心波長が全て一致したときにだけドロップポートにスペクトルピークが出現し（ON 状態）、中心波長をずらした状態では全波長チャンネルがスルーポートに伝達される（OFF 状態）原理を考案した。そして初年度の平成 17 年度は、誘電体材料（ $\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ ）を用いてこの素子を製作し、クロストーク -20dB、消光比 40dB、中心波長再現性 0.01nm 以下、応答速度 15 μsec と、いずれも前年度に製作したポリマー材料を用いた素子よりも優れた特性を実証した。また、2 種類の異なる半径をもつマイクロリングの直列結合によるバーニャ効果を用いて、FSR および波長選択範囲を約 10 倍の 23nm に大幅に拡大して、また正負の両方向へのスイッチングも可能なることを実証した。

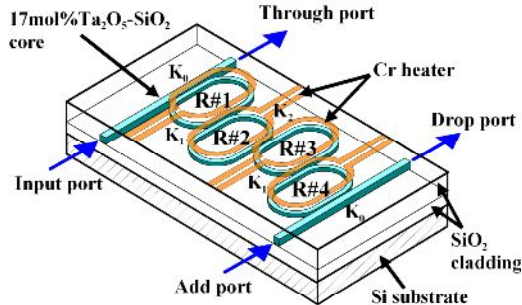


図1 直列結合マイクロリング共振器の個々の要素を個別に制御して実現したヒットレス波長選択スイッチの構造

平成 18 年度には、この 2 次直列結合マイクロリングによる波長選択スイッチの基本要素を集積化した多波長多ポート・スイッチ回路の実現を目指して、まず基本要素を 3 段縦続接続した 3 波長選択スイッチを製作し、3 波長～0 波長の多波長選択特性を実証した。さらに、基本要素を並列接続した 3 ポートスイッチ回路を製作し、スイッチの 2 段通過による高消光費 44dB を実証した。一方、コア層成膜時に意図的に内部応力を発生させて、基板温度の変化による内部応力の変化を介した光弾性効果によって

屈折率温度係数を補償して共振波長の温度依存性を除去するアサーマル化法を新たに考案して、共振波長温度係数を従来よりも 15 分の 1 に低減することに成功した。

平成 18 年度に実証した 2 次直列結合マイクロリングを用いた基本回路（4 波長選択および 3 × 3 ポートスイッチ）は、クロストークが十分ではなかった。そこで平成 19 年度には、スペクトル応答をより箱形にしてクロストークを低減すると共に、隣接チャンネル間隔も狭間隔化するため、図1に示すような 4 次直列結合マイクロリングによる波長選択スイッチを製作し、箱形スペクトル応答を実証した。さらに、図2のような多波長スイッチ回路も構成して、図3に示すような多波長選択特性を実証した。

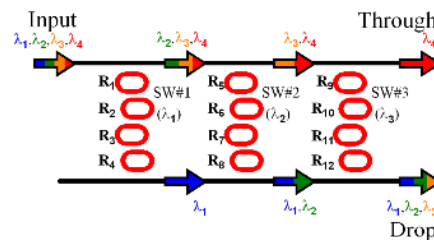
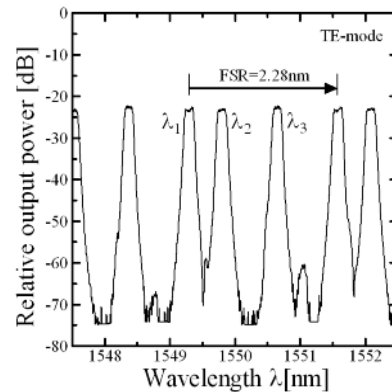
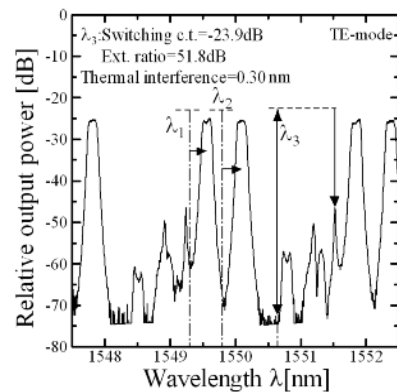


図2 3波長選択スイッチ回路



(a) 3波長を全て ON にした状態



(b) 2波長を ON にした状態

図3 波長スイッチング特性の測定結果

また、平成18年度に偶然発見した内部応力によるフィルタ中心波長の温度依存性制御技術は、スパッタ成膜によって製作したコア（材料は $\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ ）においてのみ実証できていたが、プラズマCVD成膜によって製作したコア（材料は SiON ）においても同様に温度係数を制御出来ることを示した。この SiON は紫外線感光性をもつので、応力制御による温度係数制御および温度係数の偏光依存性と組み合わせて、共振波長の高精度トリミングと温度制御による偏光無依存化を同時に実現した。

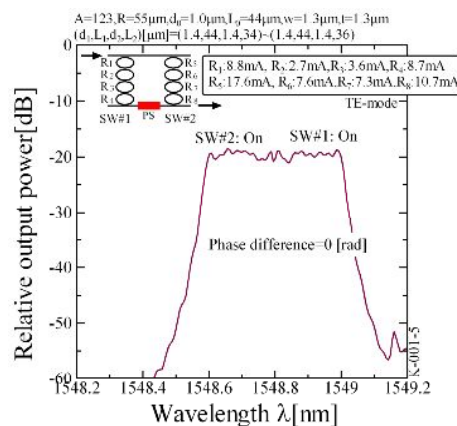
平成19年度に実証した4次直列結合マイクロリングを用いた基本要素回路（3波長選択および 3×3 ポートスイッチ）は、箱形スペクトル特性を実証出来たものの結合効率が最適化されていないために透過帯域内のリップルが大きかった。また熱干渉による共振波長移動が大きかった。そこで最終年度である平成20年度では、十分に熱伝導性の良好な基板ホルダーに、さらに温度センサとペルチェ素子を用いた温度制御機構を導入して熱干渉を襲来の60分の1にまで低減した。次に、多波長多ポート・フルマトリックスWSS回路の基本構成として 3×3 ポートスイッチのバスライン導波路とマイクロリング間の結合効率最適化設計を行い、30dB以上の高い消光比と-25dB以下の低クロストーク特性、およびスイッチ一段あたりの低損失化（1.5dB）などを実証した。

最後に、本研究のもう1つの目標であった波長スペクトル領域での符号化を用いて多重化するOCDM (Optical Code Division Multiplexing) 回路を設計・試作して、並列配置した波長選択スイッチ間の一方のアームの位相を制御することによってスペクトル領域の符号化を試みた。その結果、図4に示すように位相制御によってスペクトル符号化を出来ることを実証し、さらには波長選択スイッチを3dB帯域幅が連続して並ぶように配置してデジタル的に帯域幅を変えられる帯域幅可変フィルタ回路も実証した。

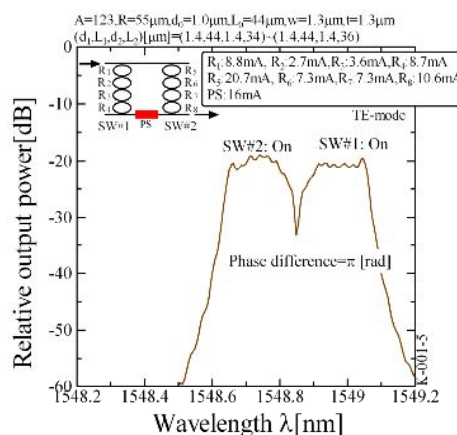
4. 研究成果

本研究では、以下の成果を得た

- (1) 多波長・多ポート波長選択スイッチ回路
 - ① 2次直列結合マイクロリング共振器の個々の共振器を熱光学効果によって個別にチューニングして、ヒットレス波長選択特性を実証した。
 - ② 半径の異なる2次直列結合マイクロリング共振器のバーニャ効果によって、共振波長間隔 (FSR) を拡大し、かつ長波長側と短波長側の両方向へのチューニングを



(a) 位相差 $\varphi = 0$



(b) 位相差 $\varphi = \pi$

図4 波長選択スイッチを2個縦列に配置した最も簡単なOCDM符号化回路の位相制御特性

可能にした。

- ③ 4次直列波長選択スイッチによって、透過帯域が平坦でロールオフが急峻な箱形のスペクトル応答を実現した。
 - ④ 3波長および3ポート波長選択スイッチ回路を実証し、消光比30dB以上、クロストーク-25dB以下、スイッチ1段あたりの損失1.5dBなどの高性能を実証した。
 - ⑤ 4次直列結合マイクロリング共振器を個別にチューニングする際の、最適なチューニングの組み合わせを理論的に明らかにして、また実験によって実証した。
- (2) OCDM符号化回路
- ① 4次直列結合マイクロリング波長選択スイッチを2縦列配置して、3dB帯域幅が連続して重なるようにスペクトル応答をチューニングして間の位相を制御することによって1ビットのOCDM符号化回路を構成し、位相制御によってスペクトル符号化出来ることを実証した。
 - ② 同じスイッチ回路において2個のスイッチをそれぞれONおよびOFF状態に制御して、帯域幅をデジタル的に変更出来る帯域幅可変フィルタを実証した。

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 21 件)

- (1) Masanori Koshiba, Kunimasa Saitoh, Yasuo Kokubun, "Heterogeneous Multi-Core Fibers: Proposal and Design Principle", IEICE Electronics Express, vol.6, no.2, pp.98-103, 2009, 査読有.
- (2) Takuji Ikemoto, Yasuo Kokubun, "Driving voltage analysis for fast response of waveguide optical switch based on movement of droplet driven by electrostatic force", IEICE Trans. Electronics, vol.E91-C, no.12, pp.1923-1932, 2008, 査読有.
- (3) Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Bessel-Thompson filter using double-series-coupled microring resonator," IEEE/OSA J. Lightwave Technology, vol.26, no.22, pp.3694-3698, 2008, 査読有.
- (4) Yoshimi Shioya, Hideki Takagi, Ryutaro Maeda, Yasuo Kokubun, "Analysis of stress in plasma enhanced chemical vapor deposition silicon nitride film irradiated with ultraviolet light", Jpn. J. Appl. Phys., vol.47, no.9, pp.7081-7088, 2008, 査読有.
- (5) Kazunori Takahashi, Yoshiaki Kanamori, Yasuo Kokubun, Kazuhiro Hane, "A wavelength-selective add-drop switch using silicon microring resonator with a submicron comb electrostatic actuator", OSA Optics Express, vol.16, no.19, pp.14421-14428, 2008, 査読有.
- (6) Yasutomo Johraku, Yasuo Kokubun, "Low loss vertical optical path conversion using 45-degree mirror for coupling between optical waveguide devices and planar devices", Jpn. J. Appl. Phys. (Special issue on MOC'07), vol.47, no.8, pp.6744-6749, 2008, 査読有.
- (7) Yuta Goebuchi, Masahiko Hisada, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optimal detuning combination of hitless wavelength selective switch using quadruple series coupled microring resonator", Jpn. J. Appl. Phys. (Special issue on MOC'07), vol.47, no.8, pp.6733-6738, 2008, 査読有.
- (8) Yuta Goebuchi, Masahiko Hisada, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optical cross-connect circuit using hitless wavelength selective switch", OSA Optics Express, vol.16, no.2, pp.535-548, 2008, 査読有.
- (9) Naoki Kobayashi, Nobuhiro Zaizen, Yasuo Kokubun, "Athermal and Polarization Independent Microring Resonator Filter by Stress Control", Jpn. J. Appl. Phys., vol.46, no.8B, pp.5465-5469, 2007, 査読有.
- (10) Tomoyuki Kato, Yuta Goebuchi, Yasuo Kokubun, "Improvement of switching characteristics of hitless wavelength selective switch using double-series-coupled microring resonator", Jpn. J. Appl. Phys., vol.46, no.6A, pp.3428-3432, 2007, 査読有.
- (11) Yasuo Kokubun, "High index contrast optical waveguides and their applications to microring filter circuit and wavelength selective switch"(Invited paper), IEICE Trans. Electronics (Special Selection on Recent Advances in Integrated Photonic Devices), vol.E90-C, no.5, pp.1037-1045, 2007, 査読なし.
- (12) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Multi-wavelength and multi-port hitless wavelength selective switch using series-coupled microring resonators", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.19, no.9, pp.671-673, 2007, 査読有.
- (13) Takuji Ikemoto, Yasuo Kokubun, "Fabrication of microchannel with thin cover layer aiming toward optical waveguide MEMS switch based on microfluidics", IEICE Trans. Electronics (Special Issue on MEMS), vol.E90-C, no.1, pp.78-86, 2007, 査読有.
- (14) Satoshi Ueno, Takashi Tatewaki, Toshiyuki Ohdaira, Yoshimi Shioya, Yasuo Kokubun, "Reversal of UV sensitivity and loss reduction of SiON microring resonator by annealing", Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, no.11, pp.8691-8695, 2006, 査読有.
- (15) Go Sekiguchi, Naoki Kobayashi, Yasuo Kokubun, "Coupling efficiency control of vertically coupled microring resonator filter by micro-actuator", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.20, pp.2141-2143, 2006, 査読有.
- (16) Tomoyuki Kato, Yuta Goebuchi, Yasuo Kokubun, "Experimental study of optimum coupling efficiency of double series coupled microring resonator", Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, no.10A, pp.7741-7745, 2006, 査読有.
- (17) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optimum arrangement of high-order series coupled microring resonator for crosstalk reduction", Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, no.7, pp.5769-5574, 2006, 査読有.
- (18) Toshinobu Ito, Yasuo Kokubun, "Fabrication of 1×2 interleaver by parallel-coupled microring resonator", Electronics and Communications in Japan (John Wiley), Part

- 2, vol.89, no.3, pp56-64, 2006, 査読有.
- (19) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Fast and stable wavelength selective switch using double-series coupled dielectric microring resonator", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.3, pp.538-540, 2006, 査読有.
- (20) Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optimum coupling coefficients is second-order series-coupled ring resonator for non-blocking wavelength channel switch", IEEE/OSA J. Lightwave Technology, vol.24, no.2, pp.991-999, 2006, 査読有.
- (21) Toshiki Naganawa, Satoshi Ueno, Yasuo Kokubun, "Spectrum response improvement of higher-order series coupled microring resonator filter by UV trimming", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.17, no.10, pp.2104-2106, 2005, 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

- (1) Yasuo Kokubun, "Integrated wavelength selective switch circuit based on microring resonator" Asia-Pacific Optical Communications (APOC2008), October 28, 2008, Hangzhou.
- (2) Yasuo Kokubun, Naoki Kobayashi, Takashi Tatewaki, Tomoyuki Sato, "UV Trimming and Temperature Coefficient Control of Resonant Wavelength of Microring Resonator with SiON Core", 14th Microoptics Conference (MOC'08), September 26, 2008, Brussel.
- (3) Yasutomo Johraku, Yasuo Kokubun, "Low loss vertical optical path conversion using 45-degree mirror for coupling between optical waveguide devices and planar devices", 13th Microoptics Conference (MOC'07), October 29, 2007, Takamatsu.
- (4) Yuta Goebuchi, Masahiko Hisada, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optimum combination of tuning of hitless wavelength selective switch using quadruple series coupled microring resonator", 13th Microoptics Conference (MOC'07), October 29, 2007, Takamatsu.
- (5) Yasuo Kokubun, "Microring resonator devices"(Invited talk), Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference (AOE) 2007, October 19, 2007, Shanghai.
- (6) Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Optimum coupling efficiency condition of quadruple-series-coupled microring resonator", 12th OptoElectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), July 13, 2007, Yokohama.
- (7) Masahiko Hisada, Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Box-like filter response of quadruple series coupled microring resonator by coupling efficiency control", 12th OptoElectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), July 13, 2007, Yokohama.
- (8) Naoki Kobayashi, Nobuhiro Zaizen, Yasuo Kokubun, "Polarization independent microring resonator filter using internal stress and temperature control", 12th OptoElectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), July 12, 2007, Yokohama.
- (9) Yuta Goebuchi, Masahiko Hisada, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Multi-wavelength channel selective switch by cascading TO-tunable quadruple series-coupled microrings", 12th OptoElectronics and Communications Conference / 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC2007), July 12, 2007, Yokohama.
- (10) Nobuhiro Zaizen, Naoki Kobayashi, Yasuo Kokubun, "Athermal microring resonator filter by stress control", Twelveth Microoptics Conference (MOC'06), September 13, 2006, Seoul.
- (11) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Multi-wavelength channel selective switch by cascading hitless tunable microring resonators", Twelveth Microoptics Conference (MOC'06), September 11, 2006, Seoul.
- (12) Yasuo Kokubun, "Integrated microring resonator circuits for large scale optical cross-connects"(Invited talk), Asia-Pacific Optical Communications (APOC2006), September 5, 2006, Gwangju.
- (13) Satoshi Ueno, Takashi Tatewaki, Toshiyuki Ohdaira, Yoshimi Shioya, Yasuo Kokubun, "Reversal of UV sensitivity and loss reduction of SiON microring resonator by annealing", 11th Opto-Electronics and Communications Conference, July 7, 2006, Taiwan.
- (14) Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Lossless Bessel-Thompson filter by double series

coupled microring resonator", 11th Opto-Electronics and Communications Conference, July 6, 2006, Taiwan.

- (15) Go Sekiguchi, Naoki Kobayashi, Yasuo Kokubun, "Coupling efficiency control of vertically coupled microring resonator filter by micro-actuator", 11th Opto-Electronics and Communications Conference, July 5, 2006, Taiwan.
- (16) Satoshi Ueno, Toshiki Naganawa, Yasuo Kokubun, "Filter response improvement of higher-order series coupled microring resonators by selective UV trimming", Eleventh Microoptics Conference (MOC'05), October 31, 2005, Tokyo.
- (17) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Non-blocking wavelength switch using TO effect of double series coupled dielectric microring resonator", Eleventh Microoptics Conference (MOC'05), October 31, 2005, Tokyo.
- (18) Yasuo Kokubun, "Photonic integration - From ARROW and microring toward VLSI photonics - "(Plenary talk), Eleventh Microoptics Conference (MOC'05), October 31, 2005, Tokyo.
- (19) Yuta Goebuchi, Tomoyuki Kato, Yasuo Kokubun, "Expansion of tuning range of wavelength selective switch using Vernier effect of series coupled microring resonator", The 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 27, 2005, Sydney.
- (20) Tomoyuki Kato, Yuta Goebuchi, Yasuo Kokubun, "Optimum design of double series coupled microring resonator for wavelength selective sitch", The 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 25, 2005, Sydney.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：光導波路波長フィルタの形成方法および光導波路波長フィルタ

発明者：國分泰雄，小林直樹

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特願 2007-219862

出願年月日：2007 年 8 月 27 日

国内外の別：国内

名称：光導波路

発明者：國分泰雄，財前宣浩

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特願 2006-71730

出願年月日：2006 年 3 月 15 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 4 件)

名称：直列結合リング共振器波長フィルタの中心波長制御方法

発明者：國分泰雄

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特許第 4083045 号

取得年月日：2008 年 2 月 22 日

国内外の別：国内

名称：光記録方法、光記録媒体、および光記録装置

発明者：國分泰雄，豊岡武裕，正木明

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特許第 3995149 号

取得年月日：2007 年 7 月 6 日

国内外の別：国内

名称：偏光特性・伝搬特性制御方法、およびリング共振器、光導波路、導波路型光デバイス、ならびに各種光デバイスの製造方法

発明者：國分泰雄，久保田慎也

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特許第 3883377 号

取得年月日：2006 年 11 月 24 日

国内外の別：国内

名称：非対称方向性結合器型光導波路波長フィルタ

発明者：朱世徳，潘伍根，Brent E. Little，國分泰雄，佐藤信也，前田剛志，加藤隆

権利者：横浜国大

種類：特許

番号：特許第 3762940 号

取得年月日：2006 年 1 月 27 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

國分泰雄 (KOKUBUN YASUO)

国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：6 0 1 3 4 8 3 9

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

