

平成22年5月27日現在

研究種目： 基盤研究（C）

研究期間： 2007～2009

課題番号： 19560355

研究課題名（和文） 細線光導波路解析法の開発と新機能デバイス設計への応用

研究課題名（英文） Numerical method for the analysis of a silicon wire optical waveguide and its application to the design of novel functional devices

研究代表者

山内 潤治 (YAMAUCHI JUNJI)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号： 50174579

研究成果の概要（和文）：

シリコン細線導波路では、三角形導波路を用いれば、わずか数 $\mu\text{m}$ の軸長で偏波回転し得ることを、理論的に明らかにし、動作のメカニズムを明示した。マイクロ波におけるモデル実験で動作を実証した。表面プラズモンが伝搬する導波路解析を能率よく行える、陰的有限差分時間領域法(FDTD)法を開発した。金属材料を含む光デバイスの周波数応答を、パルス波を用いて一度の計算で実行できるアルゴリズムを構築し、導波路型センサを設計した。

研究成果の概要（英文）：

A silicon wire waveguide with a triangular cross section can rotate the polarization with a short device length of a few micrometers. The operation mechanism is theoretically explained together with an experimental demonstration at a microwave frequency. A novel implicit finite-difference time-domain method has been developed, which allows us to evaluate the frequency response of various optical devices at a one-time solution. The method is applied to the design of a waveguide-type sensor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード： 光デバイス、細線光導波路、偏波変換器、表面プラズモン共鳴、光センサ

## 1. 研究開始当初の背景

光回路の高密度集積化に向けて、簡便かつ自由に光を誘導できるコンパクトな光配線

が必要になっている。特に近年、シリコン微細加工と表面プラズモンを利用した細線光導波路に注目が集まっている。

シリコン導波路のような高屈折率差導波路の課題の一つに偏波依存性の除去がある。この目的のために、TE波とTM波を相互に変換する偏波回転器を利用した回路を形成することが考えられる。しかしながら、偏波回転器に関する検討は少なく、デバイスの小型化は実現できていない。申請者は、傾斜リブ導波路の偏波回転機構を解明する過程で、導波路構造を三角形にする新たな着想に至った。

表面プラズモンを利用した導波路研究も国内外で盛んになっている。表面プラズモンは、光センサデバイスに応用できる。特に、プリズムに金属薄膜を付加した、いわゆるクレッチマン配置のセンサは、バイオセンサとしてすでに実用化されている。クレッチマン型センサは、表面プラズモン共鳴の特性を利用し、リアルタイムで高感度に屈折率を測定できる利点がある。しかしながら、プリズムを利用しているため構造が大型であり、光回路へモノリシックに集積することは困難である。そこで、集積可能で高感度なセンサ構造ができれば、光源、検出器を一体化した小型なセンサの実現につながると期待される。

上記の細線光導波路の検討には、理論的解析が欠かせない。これまで光導波路の理論的検討には、ビーム伝搬法 (BPM) や差分時間領域 (FDTD) 法が使用されてきた。しかしながら、従来の手法では、精度を確保するには極端に小さな空間刻み幅を選ぶ必要がある。これに伴い、FDTD 法では、時間刻み幅も極端に小さくしなければならず、効率よく解析を行うことは不可能であった。従って、シリコンや金属のような高屈折率をもつ光回路を効率よく解析できる手法の開発が急務である。

## 2. 研究の目的

### (1) FDTD法とBPMの改良

FDTD法に関しては、金属媒質を含む光導波路の時間領域解析を効率よく行える陰的FDTD法を開発する。特に、局所的1次元法 (LOD) に基づくLOD-FDTD法は、過去に提案された陰的ADI-FDTD法と同等の計算精度を有しつつ、アルゴリズムが極めて簡素で、結果として計算時間の短縮が可能である。金属媒質を時間領域で取り扱う場合、周波数依存の定式化が必要になる。本研究では、時間領域手法の利点を生かし、金属媒質を含む光デバイスの周波数応答を、パルス波を用いて一度の計算で実行できるLOD-FDTD法に基づくアルゴリズムの確立を目指す。

BPMに関しては、複素パデ近似を導入することで、金属媒質を含む導波路を安定に解析できるようにする。

### (2) 偏波回転器の最適設計

すでに $2\mu\text{m}$ 以下のデバイス長での動作を確認しているが、三角形導波路の幅と入出力導波路の幅との比を最適化することは接

続損失を減らす意味で重要な課題である。そこで、虚軸BPMとFDTD法により接続損失を0.5dB以下に抑える構造を見出す。特に、波長特性に注目し、 $1.25\mu\text{m}$ から $1.65\mu\text{m}$ の超広帯域にわたって、低損失な偏波回転 (消光比が20dB以上) を目指す。さらに、マイクロ波でのモデル実験から数値結果の妥当性を確認する。

### (3) 高感度な導波路型センサ

クレッチマン配置の光の入出力部を導波路に置き換えることにより、光回路への集積化を可能にする。屈折率変化に対する表面プラズモン共鳴のピーク波長の移動量と共鳴の強さが、従来のクレッチマン型センサと同等になる構造設計を目指す。高精度なBPMや、FDTD法を駆使し、構造の最適化を図り、周波数領域手法と、時間領域手法との結果の比較から、数値結果の妥当性について詳細に検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 07年度

周波数依存型LOD-FDTD法の性能評価を詳細に行う。金属媒質を含む場合の性能評価も同様に、陽的FDTD法、ADI-FDTD法を用いた場合の結果と比較する。従来の手法に比べ、どれだけ計算効率が改善されるかを明らかにしLOD-FDTD法の優位性を示す。さらにLOD-FDTD法の適用限界も見極めていく。

開発する数値解法は、汎用のパーソナルコンピュータでも十分に実行できるほど効率がよいと期待される。しかし、様々な構造を検討し、データを蓄積するためには、数値計算に特化した高速CPUを搭載した演算装置が必要不可欠である。そこで、本申請により高速演算処理装置を整備する。

初年度では、国際会議に出席し成果の途中経過の報告、情報の収集を行う。19年度の米国光学会 (OSA) 主催の Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications (IPNRA) には、大学院生とともに出席し、成果の一部を報告するとともに、研究動向を詳細に調査する。

### (2) 08年度

導波路センサは、従来のセンサに比べて、屈折率変化に対する表面プラズモン共鳴の波長シフトの感度は同等であるものの、プラズモン共鳴の弱い欠点がある。そこで、金属薄膜で共鳴を強くする方法の検討に力点を置く。また、数値結果の妥当性を検討するため、BPMを用いた周波数領域解析に加え、時間領域解析も行う。

さらに、3次元構造のセンサを取り上げ、申請者らが以前に開発した高精度3次元BPMを用いて詳細な解析を行う。2次元解析で得られた知見を基に、3次元構造においても高感度なセンサ構造を構築していく。

偏波回転器に関しては、改良されたBPMとFDTDを用いて、広帯域化がどこまで得られるかに力点を置いて検討する。デバイス長をわずかに最適値からずらすことで、広帯域化が達成される目処を得ているので、具体的にどの程度最適値からずらすべきかを評価する。その際、20dB以上の消光比の達成を目標とする。また、光回路はマイクロ波帯でのモデル実験が可能であるので、数値結果の妥当性を既存の測定装置によっても検証する。

### (3)09年度

研究の総まとめを行う。特に、国内外の論文誌への投稿と国際学会、国内発表に力点を置く。論文は、電子情報通信学会、米国電気電子学会、米国光学学会に投稿する。

## 4. 研究成果

### (1)FDTD法の改良

陽解法である従来のFDTD法を陰解法であるLOD-FDTD法に変形する。この際に、金属のような分散性媒質をも取り扱えるように拡張する。金属媒質の影響を考慮するために、従来からある補助微分方程式(ADE)法、帰納的畳み込み(RC)法、線形近似帰納的畳み込み(PLRC)法、台形則に基づいた帰納的畳み込み(TRC)法に加えて、Z変換(ZT)に基づく手法も取り上げ、5種類のLOD-FDTD法を従来の陽的FDTD法と比較しながら、性能を議論した。

図1は、Drudeモデルで表された、銀クラッドプラズモン光導波路において、伝送特性を比較したものである。ここで、CFLNは、時間刻み幅 $\Delta t$ を陽解法における最大時間刻み幅 $\Delta t_{CFL}$ で割ったもので定義されている。図より、RC法の精度は他の手法に比べて劣ることが見出せる。他の手法では、 $CFLN < 1$ では、陽的FDTD法と殆ど同じ結果を与えているが、陰解法の利点により、 $CFLN = 10$ に選んでも、精度よく解けていることが見出せる。

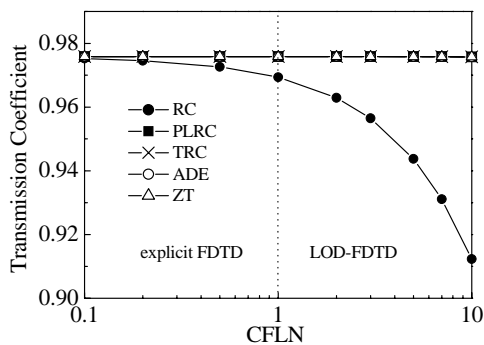


図1 伝送係数の比較

各手法の計算時間(CPU time)を図2に、使用メモリを図3に示す。図より、LOD-FDTD法により、計算時間が30%以下に短縮されていることが見出せる。但し、メモリ使用量は陰

解法のため、従来の陽的FDTD法に比べて約2倍に増える。また、定式化の点では、ZT法が極めて簡略に行える利点がある。

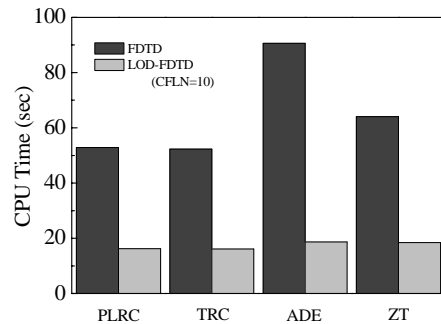


図2 計算時間の比較

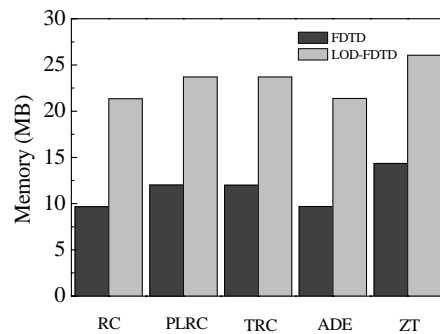


図3 使用メモリの比較

### (2)偏波回転器の最適設計

図4に本研究で検討した偏波回転器の構造を示す。第1モードと第2モードとの伝搬定数差が大きく取れるので、偏波変換長が短くなる利点がある。1.55 $\mu\text{m}$ 帯で約2 $\mu\text{m}$ の変換長である。

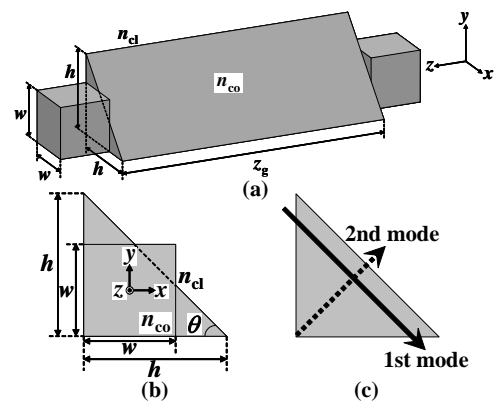


図4 偏波回転器の構造

図5は、三角形導波路の辺の長ささと導波路幅の比 $w/h$ に対する挿入損失の計算結果を示す。屈折率差 $\Delta n$ が約41%と大きい場合でも、損失を、0.5dB以下に抑えられる寸法比の存

在することが見出せる。

決定した寸法比における、消光比と損失の波長特性を図6に示す。デバイス長を適切に選ぶと、偏波変換特性は双峰性になり、結果として、広帯域に動作させることができる。この場合、 $1.25\mu\text{m}$  から  $1.65\mu\text{m}$  の帯域で、20dB以上の消光比を保つことが分かる。また、この際に損失は0.5dB以下である。

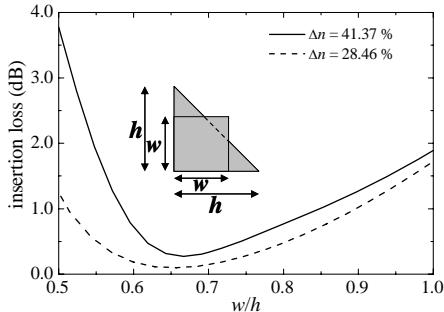


図5 挿入損

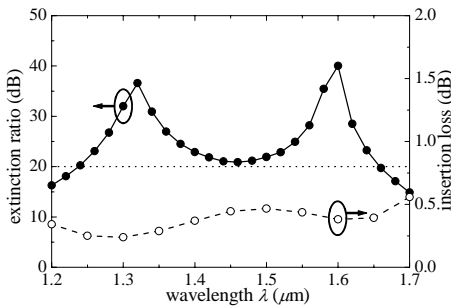


図6 消光比と挿入損の波長特性

### (3) 高感度な導波路型センサ

図7に導波路型センサの構造を示す。計測試料(analyte)は、金属膜の表面に分布しているとする。試料の屈折率の微小変化を最大吸収波長の変化で観測する。

図8に波長変化に伴う、吸収パワーの変化を示す。本研究で開発された各種計算法による結果を比較している。BPMの結果はFDTD法の結果とよく一致している。

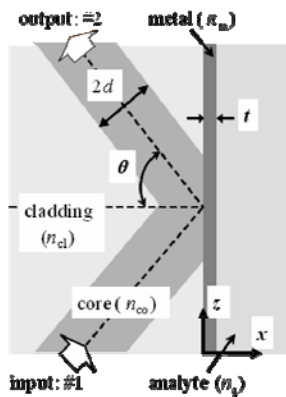


図7 導波路型センサの構造

図9に試料の屈折率変化に伴う最大吸収波

長の変化を示す。屈折率 0.004 の変化が、 $0.609\mu\text{m}$  ~  $0.623\mu\text{m}$  の波長シフトとして観察され、高感度のセンサとして動作することが見出せる。

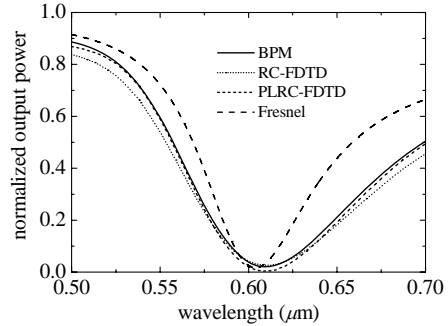


図8 パワーの波長特性

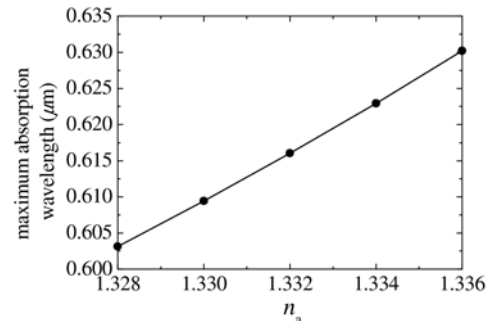


図9 試料の屈折率に対する最大吸収波長

### 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 18 件)

1. J. Shibayama, A. Nomura, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, A frequency-dependent LOD-FDTD method and its application to the analysis of plasmonic waveguide devices, IEEE J. Quantum Electron., 査読有, Vol.46 No.1, pp.40-49, 2010
2. J. Yamauchi, S. Harada, S. Kobori, and H. Nakano, Semivector finite difference formula for the analysis of a step-index waveguide with a tilted interface, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol.21, No.24, pp.1867-1869, 2009
3. J. Yamauchi, S. Harada, and H. Nakano, Minimum loss condition of a bent rectangular hollow waveguide, Microw. Opt. Technol. Lett., 査読有, Vol.51, No.12, pp.2901-2902, 2009
4. J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, An LOD-FDTD method for the analysis of periodic structure at normal incidence, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 査読有, Vol.8,

- pp. 890-893, 2009
5. 山内潤治, 駒田隆明, 中野久松, 金属装荷導波路型偏光子のビーム伝搬解析, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J92-C, No. 7, pp. 241-248, 2009
  6. J. Yamauchi, Y. Nito, and H. Nakano, A modified semivectorial BPM retaining the effects of the longitudinal field component and its application to the design of a spot-size converter, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 27, No. 13, pp. 2470-2476, 2009
  7. J. Yamauchi, N. Shibuya, and H. Nakano, Polarization coupling between strongly guiding waveguides stacked laterally, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 27, No. 13, pp. 2433-2438, 2009
  8. J. Shibayama, B. Murakami, J. Yamauchi, and H. Nakano, LOD-BOR-FDTD algorithm for efficient analysis of circularly symmetric structures, IEEE Wireless Compon. Lett., 査読有, Vol. 19, No. 2, pp. 56-58, 2009
  9. J. Yamauchi, N. Shimada, Y. Nito, and H. Nakano, Transverse-magnetic BPM analysis of a step-index slab waveguide expressed by a sigmoid function, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 21, No. 24, pp. 149-151, 2009
  10. J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. Yamauchi, and H. Nakano, Simple trapezoidal recursive convolution technique for the frequency-dependent FDTD analysis of a Drude-Lorentz model, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 21, No. 2, pp. 100-102, 2009
  11. T. Yamazaki, H. Aono, J. Yamauchi, and H. Nakano, Coupled waveguide polarization splitter with slightly different core widths, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 26, No. 21, pp. 3528-3533, 2008
  12. 柴山純, 高橋達也, 山内潤治, 安田元気, 中野久松, 水平方向広角アルゴリズムを用いた三次元セミベクトルADI-BPMによる光導波路解析, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J91-C, No. 10, pp. 479-488, 2008
  13. J. Shibayama, A Kretschmann-type absorption-based surface plasmon resonance waveguide sensor, Microw. Opt. Technol. Lett., 査読有, Vol. 50, No. 10, pp. 2497-2500, 2008
  14. J. Shibayama, R. Takahashi, A. Nomura, J. Yamauchi, and H. Nakano, Concise frequency-dependent formulation for LOD-FDTD method using Z transforms, IET Electron. Lett., 査読有, Vol. 44, No. 16, pp. 949-9650, 2008
  15. J. Yamauchi, M. Yamanoue, and H. Nakano, A short polarization converter using a triangular waveguide, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 26, No. 12, pp. 1708-1714, 2008
  16. J. Shibayama, R. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency-dependent locally one-dimensional FDTD implementation with a combined dispersion model for the analysis of surface plasmon waveguide, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 20, No. 10, pp. 824-826, 2008
  17. J. Shibayama, T. Takeuchi, N. Goto, J. Yamauchi, and H. Nakano, Numerical investigation of a Kretschmann-type surface plasmon resonance waveguide sensor, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 25, No. 9, pp. 2605-2611, 2007
  18. J. Yamauchi, Y. Kamei, K. Murase, and H. Nakano, Analysis of polarization splitters composed of multilayer thin-film waveguides using the beam-propagation method based on Yee's mesh, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 25, No. 9, pp. 2345-2351, 2007
- [学会発表] (計 12 件)
1. J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a photonic bandgap structure using a periodic LOD-FDTD method, Asia Pacific Microwave Conference, 2009 年 12 月 8 日, Singapore
  2. Y. Wakabayashi, S. Kimura, J. Yamauchi, and H. Nakano, A broadband mirror using a two-dimensional subwavelength grating, 15<sup>th</sup> Microoptics Conference, 2009 年 10 月 27 日, Tokyo
  3. Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, FDTD analysis of all-dielectric planar chiral metamaterials with large optical activity, Int. Symp. on Antennas and Propag., 2009 年 10 月 21 日, Bangkok
  4. J. Yamauchi, T. Iguchi, and H. Nakano, Analysis of enhanced transmission through an annular slit surrounded by periodic grooves, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009 年 7 月 15 日,

- Honolulu
5. J. Yamauchi, S. Harada, S. Kobori, and H. Nakano, Modified finite-difference formula for the analysis of a step-index waveguide with a tilted interface, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009年7月13日, Honolulu
  6. J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a plasmonic microcavity using the frequency-dependent LOD-FDTD method, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009年7月13日, Honolulu
  7. J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Unconditionally stable locally one-dimensional FDTD methods for efficient electromagnetic simulations, Applied Computational Electromagnetics, (Invited), 2009年3月12日, Monterey
  8. J. Yamauchi, Y. Nito, and H. Nakano, A modified semivectorial beam-propagation method retaining the longitudinal field component, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2008年7月16日, Boston
  9. J. Shibayama, A. Nomura, R. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Study of the sidelobe suppression in a plasmon waveguide grating filter using the FDTD method, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2008年7月14日, Boston
  10. J. Yamauchi, Numerical modeling of polarization converters, The Third Research Forum of Japan-Indo Collaboration Project on Infrastructural Communication Technologies Supporting Fully Ubiquitous Information Society, (Plenary Talk), 2007年12月13日, New Delhi,
  11. J. Yamauchi, M. Yamanoue, and H. Nakano, An extremely short polarization converter using a triangular waveguide, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2007年7月10日, Salt Lake City
  12. J. Yamauchi, T. Yamazaki, K. Sumida, and H. Nakano, TE/TM wave splitters using surface plasmon polaritons, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications,

(Invited), 2007年7月10日, Salt Lake City

〔図書〕(計1件)

山内潤治監修、藪哲郎著、光導波路解析入門、森北出版社、2007

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称：誘電体導波路を用いた偏波変換器及び偏波分離・変換器

発明者：山内潤治、山之上雅弘、中野久松

権利者：山内潤治

種類：特許

番号：特願第2008-226286

出願年月日：2008年9月3日

国内外の別：国内

名称：誘電体導波路を用いた偏波変換器及び偏波分離・変換器

発明者：山内潤治、山之上雅弘、若林佑、中村正志、中野久松

権利者：山内潤治

種類：特許

番号：特願第2009-195955

出願年月日：2009年8月26日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profiles/0004/0001152/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山内 潤治 (YAMAUCHI JUNJI)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：50174579

### (2) 研究分担者

柴山 純 (SHIBAYAMA JUN)

法政大学・理工学部・専任講師

研究者番号：40318605

(2007年4月1日→2009年9月18日：  
連携研究者)