

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03268

研究課題名(和文)機能性誘電体層集積導波管スロットアレーアンテナとその近接テラヘルツ無線応用の研究

研究課題名(英文) Research on functional dielectric layer integrated with waveguide slot array antenna and its application for proximity terahertz wireless communication

研究代表者

枚田 明彦(Hirata, Akihiko)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：40500674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：平面アレーアンテナ上に集積可能な Split Ring Resonator (SRR)電波吸収体を試作し、125 GHz で 30 dB 以上の電波吸収を実現した。また、送信機単体では電波は外部に漏れないが、SRRと受信機の格子パターンを接触させると、接触したエリアのみ電波が透過する機能性誘電体薄膜を設計・試作し、送信機と受信機が接触した場合のみ10Gbpsエラーフリー伝送を達成した。また、機能性誘電体層への受信アンテナの接触により、電波の受信が可能になる機能性誘電体層のエリアを拡大する誘電体基板導波路を設計試作し、誘電体基板の長さが最大40cmで10Gbpsデータ伝送に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異なる微小金属パタンを周期的に配置した2つの機能性誘電体層を近接させると、機能性誘電体層単体と比較してテラヘルツ信号の透過性を33 dB以上向上できることを実証し、その現象をテラヘルツ帯近接無線での10 Gbpsデータ伝送の制御に応用したのは、世界初である。本成果は、シート上に携帯端末を置くだけでLAN接続を可能にするLANシートの実現だけでなく、超高速データ転送用キオスク端末や、対となる機能性誘電体層を集積した受信アンテナを「物理的鍵」として、決められたペアとなる端末のみ接触通信を可能にするセキュリティ応用などの新たな応用を創造することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We prototyped a split ring resonator (SRR) radio wave absorber that can be integrated on a planar array antenna, and achieved radio wave absorption of over-30 dB at 125 GHz. We designed a functional dielectric thin film that does not leak terahertz waves outside the transmitter in case the transmitter is alone, and allows radio waves to pass only in the contacted area when the SRR and the lattice pattern of the receiver are brought into contact. We achieved 10 Gbps error-free transmission only when the transmitter and the receiver are set close to each other. In addition, we designed and prototyped a dielectric substrate waveguide that expands the area of the functional dielectric layer that enables reception of radio waves by contacting the receiving antenna with the functional dielectric layer, and we have succeeded in 10-Gbps data transmission over 40-cm-long dielectric substrate waveguide.

研究分野：無線通信

キーワード：テラヘルツ 無線通信 機能性誘電体薄膜 アンテナ 平面アレーアンテナ 近接無線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微小パタンを電波の波長より充分小さな距離で等間隔に配置することによって、電磁波に対して均質な媒質として振舞うメタマテリアルの研究が活性化している。既に、誘電体層上に規則的に微小金属パタンを配置することにより電波を急激に屈折させる反射板や、金属パタン形状を誘電体層上で分布させることで電波の集光を行う平面レンズなど、機能を有する誘電体層の研究例が報告されている。

これらの研究では、離れた位置に配置したホーンアンテナ等を平面波の放射源として使用しており、放射源であるアンテナとの一体設計はなされていない。この結果、系全体では厚みがある構成になっている。本研究では、平面アレーアンテナと機能性誘電体層を一体設計することにより、多重反射防止やエリア切替・拡大など、既存アンテナでは実現できない機能を有する薄型のテラヘルツ帯アンテナの設計論の確立を目指す。

2. 研究の目的

アレーアンテナ上に周期的な金属パタンを配置した機能性誘電体層を一体形成したアンテナ構造の設計論を確立し、新奇材料集積平面アレーアンテナという新学術分野を開拓する。更に、本アンテナのテラヘルツ帯超高速近接無線への適用性を実証する。具体的には、広開口かつ近傍界が平面波となる平面スロットアレーアンテナと同一薄層内で急激な誘電率分布の変化を可能にする機能性誘電体層を組み合わせた際に生じる現象を解明することにより、

- (1) 近接アンテナ間で直接波 / 多重反射波の比が 20 dB 以上となる多重反射抑制
- (2) 金属パタンを極近接した際に発生するプラズモン混成共振モードの利用により、送信 受信アンテナが接触したエリアのみ電波透過率が 15dB 向上するアンテナ
- (3) 誘電体層内の電波屈折・伝搬による接触エリア拡大を実現する。

3. 研究の方法

本研究は、10Gbps 超の近接データ転送を実現する薄型・広開口の高機能テラヘルツ帯平面スロットアレーアンテナの実現に向けて、下記の3つの研究課題を実施した。

- (1) テラヘルツ帯での平面アレーアンテナ 機能性誘電体層一体構造の設計論の確立
- (2) 誘電体層形成による平面スロットアレーアンテナの高機能化
- (3) 平面スロットアレーアンテナを使用した超高速近接データ伝送

最初に、規則的な微小金属パタンを配置した誘電体層を導波管スロットアレーアンテナと一体で設計し、多重反射の抑制等、所望の伝送特性を実現するアンテナ設計論を確立する。又、アンテナを試作し、その特性を確認する。更に、送信と受信の誘電体層の接触時と分離時で電波の透過特性が大きく変化する(接触した面のみ電波を通す)誘電体層構成を検討する。又、試作したアンテナで伝送実験を実施し、10Gbps 級のデータ伝送が可能であることを実証する。誘電体層の設計・試作は応募者である千葉工業大学 枚田(代表者)が実施し、アンテナの評価・伝送実験は、大阪大学 永妻教授(研究分担者)と共同で実施する。平面スロットアレーアンテナの検討は、東京工業大学 廣川教授(研究分担者)と連携して進める。

4. 研究成果

本研究では、送信機単体では電波は外部に漏れないが、送信機と受信機を接触させると、送信機と受信機が接触したエリアのみ電波が透過する近接無線システムの実現に向けて、2つの機能性誘電体基板を近接した場合に微小金属パタンの共振モードが分裂する現象を利用して電波透過率を制御するための機能性誘電体基板の設計理論を確立した。また、平面アレーアンテナ同士を近接させた場合での多重反射を抑制するアンテナ構造の検討を実施した。

機能性誘電体基板として Split Ring Resonator (SRR) を規則的に配置した透過型の電波吸収体を設計・試作し、124.8GHz で透過率が -37.8 dB であることを確認した(図1(b))。しかし SRR 基板同士を対向させた場合、混成共振モードの発生および透過率の向上は見られなかった(図1(a))。そこで、新たに格子パタン基板を設計・試作した。SRR 基板と格子パタン基板を近接させた場合、125GHz の透過率は -4.1dB となり、SRR 基板単体と比較し、33dB 以上の透過率の向上が見られた(図1(c))。SRR 基板と格子パタン基板を対向させた基板を電波の伝搬路上に挿入した 125 GHz 帯無線通信リンクでのデータ伝送実験を行い、10Gbps のエラーフリー伝送に成功した(図2)。

(a) 同種誘電体層近接時

(b) 機能性誘電体層単体

(c) 異種誘電体層近接時

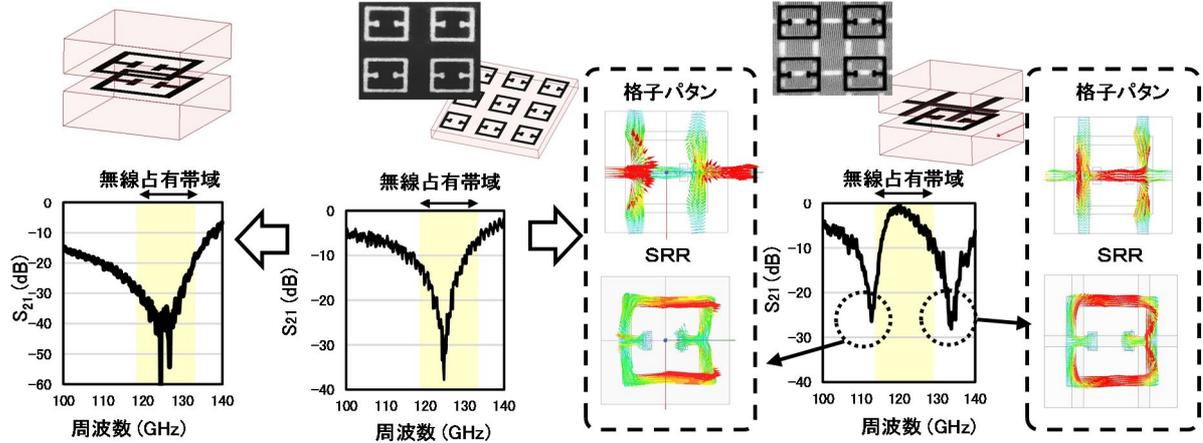


図1 異種機能性誘電体基板の近接配置によるテラヘルツ信号の透過性制御

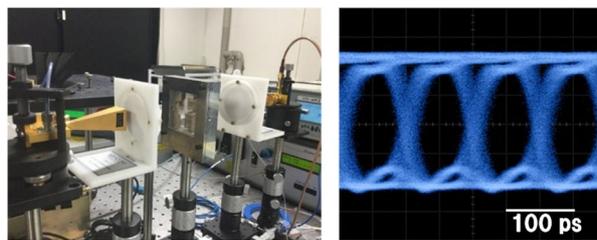


図2 異種機能性誘電体基板近接配置時の 125 GHz 帯無線での 10 Gbps データ伝送

更に、異種機能性誘電体基板接触時の通過帯域の広帯域化を実現するための新たな格子パターンを設計した。この格子パターンを試作し、共振ピーク間隔が従来の 25GHz から 40GHz に拡張することを確認し、10Gbps エラーフリー伝送に必要な送信電力を 3 dB 低下することに成功した（図 3）。また、SRR と格子パターンのアライメントを不要にする格子パターンを設計・試作し（図 4）アライメントフリーで 10Gbps エラーフリー伝送を達成した（図 5）。

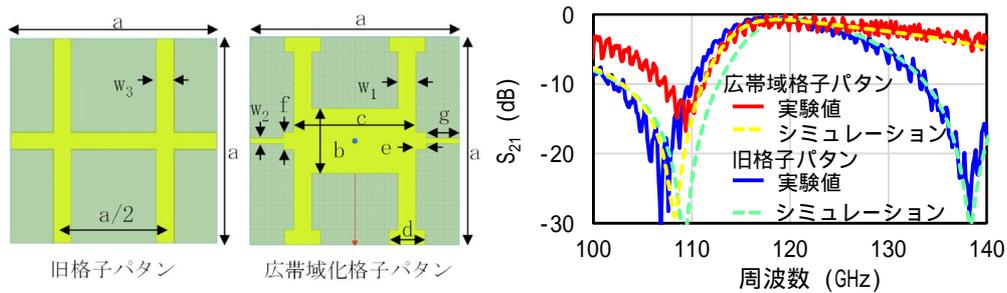


図3 近接時の通過帯域を拡大する格子パターンおよびその透過特性

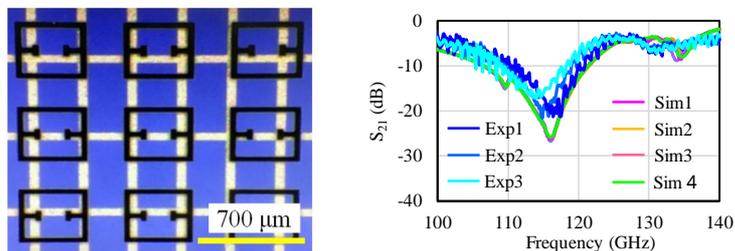


図4 アライメントを不要とする格子パターンとその透過特性

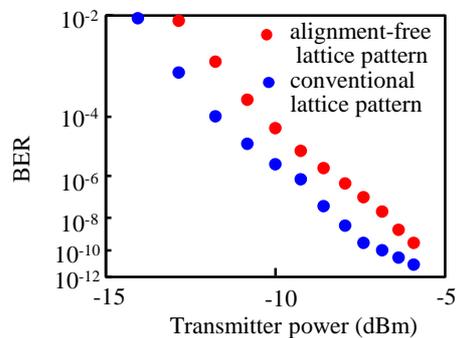


図5 アライメントを不要とする格子パターンを使用した 125 GHz 帯無線システムの 10 Gbps データ信号伝送時の BER 特性

また、機能性誘電体層への受信アンテナの接触により、電波の受信が可能になる機能性誘電体層のエリアが平面スロットアレーアンテナ面積の2倍以上となる 125GHz 帯アンテナの基礎検討として、導波管から機能性誘電体層へ電波を伝送するトランジションの設計・試作を実施した。具体的には、誘電体伝送路 (Rogers RT duroid 5880) を媒体とした 120 GHz 帯 RF 信号でのデータ通信の検討を実施した。長さ 100 mm の誘電体伝送線の挿入損失は 120 ~ 130GHz において約 6dB となった (図6)。この誘電体伝送線を媒体とした 120 GHz 帯 RF 信号でのデータ伝送実験を実施し、データ伝送速度 10 Gbps で 10^{-11} 以下の BER が得られた (図7)。

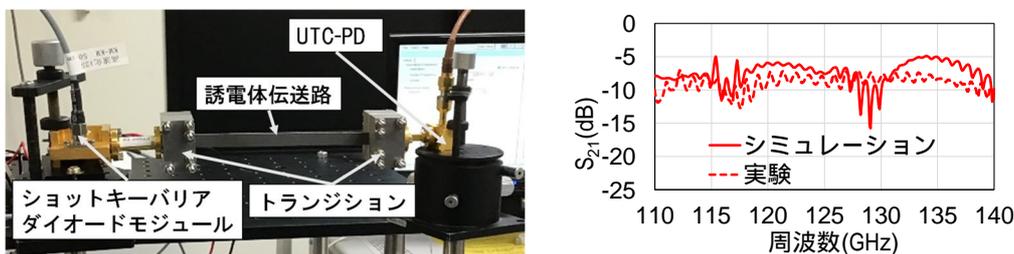


図6 125 GHz における誘電体伝送路の写真およびその透過特性

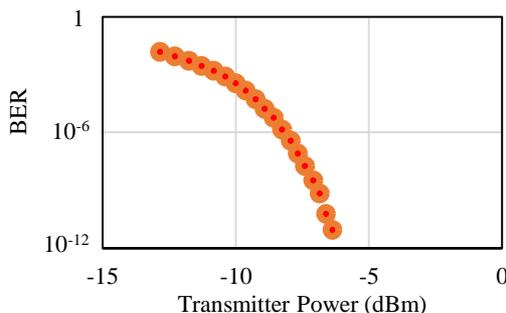


図7 10 cm の誘電体伝送路を伝送した 125 GHz 帯信号の 10 Gbps データ伝送時の BER 特性

平面スロットアレーアンテナ同士を近接させた場合での多重反射を抑制するアンテナの設計を実施した。アレーアンテナの各放射スロット上に設けられたキャビティの大きさを変更することにより、対向距離 0.5 mm での S_{11} が通常の平面スロットアレーアンテナと比較し、約 8 dB 低減させることに成功した。平面スロットアレー間の多重反射抑制に向けて、スロットアレーアンテナに誘電体基板を装荷して相互結合を抑制した。隣接する 2×2 単位素子間の相互結合は、設計周波数において 10 dB 以上改善した。また、アンテナ間距離 1.0 ~ 3.0 mm において、 S_{11} は最大 4 dB、 S_{21} は 2.9 dB 改善した。設計したアンテナを試作し、近接場伝送を測定することにより、Tx アンテナと Rx アンテナ間の反射係数と送信電力の改善が確認された。測定された S_{11}/S_{21} の平均は、1.74 mm の距離で 6.4 dB から 18.1 dB に改善された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akihiko HIRATA, and Jiro HIROKAWA	4. 巻 Vol.E101-C No.10
2. 論文標題 Absorber Integrated Planar Slot Array Antenna for Suppression of Multiple Reflection in 120-GHz-Band Close-Proximity Wireless System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Electronics	6. 最初と最後の頁 pp.791-800
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.E101.C.791	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ITAKURA Koichiro, HIRATA Akihiko, SONODA Masato, HIGASHIMOTO Taiki, NAGATSUMA Tadao, TOMURA Takashi, HIROKAWA Jiro, SEKINE Norihiko, WATANABE Issei, KASAMATSU Akifumi	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Control of 120-GHz-Band Split Ring Resonator Filter by Coupling Lattice Pattern Substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 102 ~ 111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2019ECP5052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirata Akihiko, Itakura Koichiro, Higashimoto Taiki, Uemura Yuta, Nagatsuma Tadao, Tomura Takashi, Hirokawa Jiro, Sekine Norihiko, Watanabe Issei, Kasamatsu Akifumi	4. 巻 E104-C
2. 論文標題 Transmission Characteristics Control of 120 GHz-band Bandstop Filter by Coupling Alignment-Free Lattice Pattern	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2021MMP0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Katsumi Fujii, Norihiko Sekine, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu
2. 発表標題 Characterization of Terahertz Antenna for beyond 5G Systems
3. 学会等名 International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Itakura, Akihiko Hirata, Masato Sonoda, Taiki Higashimoto, and Tadao Nagatsuma
2. 発表標題 Investigation of plasmon hybridization between slot-ring resonator absorber and lattice pattern substrate
3. 学会等名 International Symposium on Antenna and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 健太郎、戸村 崇、広川 二郎、枚田 明彦
2. 発表標題 誘電体基板装荷による並列給電導波管スロットアレーアンテナの素子間相互結合抑圧と非遠方界通信特性改善
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 枚田明彦、田中雄介、久武信太郎、広川二郎、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 4x4平面スロットアレーアンテナの近傍界測定
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉弘一郎、枚田明彦、広川二郎、戸村 崇、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 混成共振モードを利用した 120GHz帯近接無線の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 厚地穂乃佳、加藤圭悟、枚田明彦、戸村 崇、広川二郎、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 120GHz帯反射型SRRバンドストップフィルタの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 板倉弘一郎、枚田明彦、東本大樹、永妻忠夫、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 混成共振モードを利用した 120GHz帯近接無線のデータ伝送特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiko Hirata, and Jiro Hirokawa
2. 発表標題 Terahertz Absorber Technologies for Close-Proximity Wireless System
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Hirokawa, Takashi Tomura, Akihiko Hirata, and Tadao Nagatsuma
2. 発表標題 Progress of Plate-Laminated Waveguide Slot Array Antennas by Diffusion Bonding in 60GHz, 120GHz and 350GHz Bands
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 枚田明彦, 広川二郎, 園田理人, 東本大樹, 黒川 翼, 永妻忠夫
2. 発表標題 平面スロットアレーアンテナにおける近接データ伝送特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Jiro Hirokawa
2. 発表標題 Absorber integrated planar slot array antenna for a 120-GHz-band close-proximity wireless system
3. 学会等名 The International Symposium on Antennas and Propagation 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 櫻井壮一、戸村 崇、広川二郎、枚田明彦
2. 発表標題 120GHz帯16×16素子並列給電積層薄板導波管スロットアレーアンテナの広帯域設計
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 枚田 明彦, 板倉 弘一朗, 戸村 崇, 広川 二郎, 渡邊 一世, 関根 徳彦, 笠松 章史
2. 発表標題 120GHz帯SRRバンドストップフィルタの透過性制御
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牛尾政貴、枚田明彦、上村悠太、永妻忠夫、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 誘電体線路を媒体とする120GHz帯RF信号伝送の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 枚田明彦、板倉弘一郎、上村悠太、永妻忠夫、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 格子パターンとの接触による透過性制御が可能な120GHz帯SRRフィルタの通過帯域広帯域化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichiro Itakura, Akihiko Hirata, Taiki Higashimoto, Yuta Uemura, Tadao Nagatsuma, Issei Watanabe, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu
2. 発表標題 Pass Bandwidth Extension of 120-GHz-band SRR Filter by Coupling Lattice Pattern Substrate
3. 学会等名 2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Ushio, Futa Tokoro, Akihiko Hirata, Taiki Higashimoto, Yuta Uemura, Tadao Nagatsuma, N. Sekine, I. Watanabe, A. Kasamatsu
2. 発表標題 10-Gbit/s Data Transmission over Dielectric Sheet for 120-GHz-band Sheet LAN
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 新井宏之、広川二郎、枚田明彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 370
3. 書名 次世代無線通信に向けたアンテナ開発	

1. 著者名 Kurner, Thomas, Mittelman, Daniel, Nagatsuma, Tadao, Jiro Hirokawa, Akihiko Hirata, et al.,	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 390
3. 書名 THz Communications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://cit-hiratalab.sakura.ne.jp/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	廣川 二郎 (Jiro Hirokawa) (00228826)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	永妻 忠夫 (Tadao Nagatsuma) (00452417)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関