

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249055

研究課題名(和文) シリコンCMOSチップ背面厚膜絶縁体上ミリ波アンテナの高機能化に関する研究

研究課題名(英文) Study of Functionality Enhancement of Millimeter-wave Antenna on a Thick Resin on a Silicon CMOS Chip

研究代表者

廣川 二郎 (Hirokawa, Jiro)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00228826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：平行二線給電構造のシリコンチップ厚膜絶縁体上パッチアンテナを60GHz帯で試作し、200umの厚い誘電体層を用いて79%の高い放射効率を実験で確認した。4x3mm四方の60GHz帯発振器チップに埋め込む構造として、セミリジッド同軸ケーブルを用いたモノポールアンテナを検討した。シリコンチップ上に2x2素子円偏波パッチアレーアンテナを設け別体の発振器チップと接続し、60GHz帯での発振動作を得た。60GHz帯電波で変調された光をファイバで光検出器付きパッチアンテナへ送り、放射したミリ波の指向性を測定するシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：A patch antenna with parallel feed is fabricated on a thick resin (200um) of a silicon chip in the 60GHz band and high radiation efficiency of 79% is achieved in experiment. A monopole antenna using a semi-ridged coaxial cable is discussed in the 60GHz band to bury in a 4x3mm-size oscillator chip. A 2x2-element patch array on a silicon chip is connected with a separated oscillator chip and the oscillation in the 60GHz band is observed. An optical wave modulated with a 60GHz-band wave is sent to a patch antenna with a photo detector by an optical fiber and radiation patterns of the 60GHz-band wave are measured.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：アンテナ ミリ波

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来、RF 回路とアンテナは別体で製作され、ミリ波帯の線路で接続されていたが、線路自身の伝送損や線路と各回路の接続損を合わせるとそれだけで 1~2dB 程度と極めて大きい。また、RF 回路上にアンテナを構成している例も見られるが、RF 回路の絶縁体層がアンテナの高さになるため、その標準的な厚さが  $10\mu\text{m}$  (60GHz での自由空間波長の  $1/500$ ) 程度である。厚さが  $10\mu\text{m}$  では、放射効率は 5% 以下と低く、いかに回路上で工夫しても、アンテナの放射効率の改善は見込めない。そこで、あえて製造法の検討に踏み込み、従来の 20 倍  $200\mu\text{m}$  の厚膜絶縁体層を形成して、効率の飛躍的改善(従来の 10 倍以上)を目指してきた。 $200\mu\text{m}$  の厚膜絶縁体層を用いたシリコンチップ上パッチアンテナを製作し、作成した電波攪拌金属箱を用いて放射効率約 74% を測定した。しかし、同軸線路構造を用いて不平衡素子のパッチアンテナに給電したシングルエンド動作であり、CMOS 回路の差動動作に適した平衡素子への給電まで行うことができなかった。また、アンテナ 1 素子への給電に留まっており、約 5mm 四方のシリコンチップ全体の面積を有効利用するためには  $2 \times 2$  素子のアレーアンテナを構成して、ビーム走査回路あるいはビーム切替回路と接続することで、多機能化を実現できる。さらに、実際の半導体作成プロセスで作成したシリコン CMOS チップの背面へのアンテナ及び給電構造の加工を試みることで、その際に発生すると思われる問題点を明らかにするとともに解決を目指す必要があった。

(2) 治具、筐体等の影響を受けた小型アンテナの電波攪拌金属箱を用いた放射効率測定は 60GHz 帯まで実現できたが、光ファイバを用いた放射指向性測定に関しては使用した RF 増幅器の帯域制限により 50GHz までしか行うことができなかった。

2. 研究の目的

(1) 約 5mm 四方のシリコンチップ上に約  $2\mu\text{m}$  の銅膜と約  $200\mu\text{m}$  の厚膜絶縁体層を形成し、そこにダイポールアンテナのような平衡型アンテナ素子を設けたものを 60GHz 帯で製作し、約 80% の放射効率を実現する。

(2) 実際の半導体作成プロセスで作成したシリコン CMOS チップに、ポストプロセスによりダイポールアンテナおよび平行二線給電構造を加工し動作を確認する。

(3) (1) の厚膜絶縁体層上に  $2 \times 2$  素子アレーアンテナを設けシリコンチップ背面に設けたモノパルス回路と接続し和パターンならびに

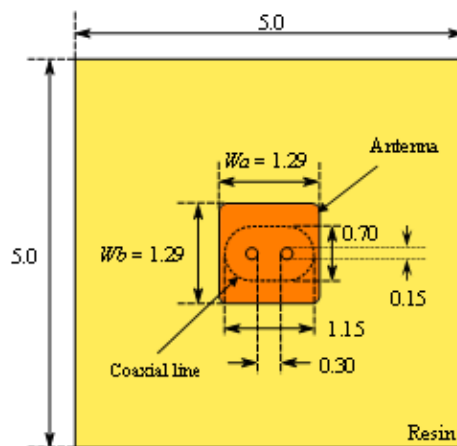
差パターンのビーム切替動作を確認する。

(4) 治具、筐体等の影響を受けた本アンテナの放射指向性を正確に測定するため光ファイバを用いた測定法を 60GHz 帯で構築する。送受間距離約 6m の電波暗室で小型アンテナの測定ができるように目指す。

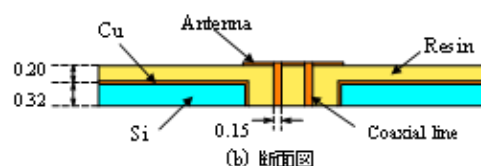
3. 研究の方法

(1) ① 図 1 に示す形状の平行二線給電パッチアンテナを試作し、反射特性、指向性、放射電力を測定した。

② 図 2 にアンテナへの差動給電を行う治具の構造を示す。アンテナチップはアンテナを 2 つ繋いだような構造となる。厚み  $640\mu\text{m}$  の Si 板の両面にそれぞれ  $200\mu\text{m}$  の樹脂層を設け、その上にアンテナパッチを成形する。2 本のピンを挿入し接着することで、2 つのアンテナを接続する。Si 表面は Cu で覆い、Si での損失を防ぐ。アンテナチップを台座にはめ込み、固定用のプレートで押し付け、プレートを座金にネジ止めしてアンテナチップを固定する。図中下部の導波管は V バンドの標準導波管となっていて、この導波管から下側のパッチに給電する。下側のアンテナで受信された信号はこのアンテナと平行 2 線により差動信号に変換される。そして上側のアンテナに差動信号が給電され、電磁波が放射される。



(a) 上面図



(b) 断面図

図 1 平行二線給電パッチアンテナ

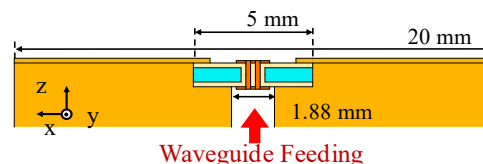


図 2 アンテナ治具

(2) 4x3mm 四方の 60GHz 帯直交発振器チップに直接、アンテナを設ける構造として、図 3 に示すセミリジット同軸ケーブルを用いてモノポールアンテナを検討した。

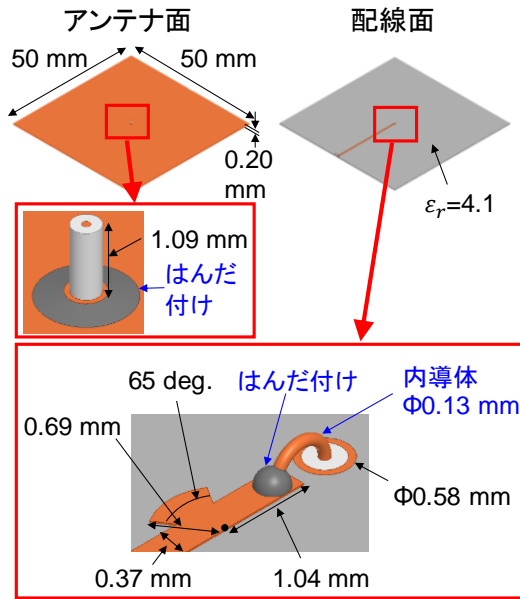


図 3 セミリジット同軸ケーブルを用いたモノポールアンテナ

(3) 図 4 に 4 相発振回路チップと同軸接続された 2x2 素子パッチアレーアンテナを示す。15mm 角のアンテナチップの背面に給電用の配線基板を張り付ける。配線面とアンテナを同軸接続し、その配線基板の上に発振器チップをフリップチップ実装して、回路からアンテナに給電する。発振器チップの電源供給用のコネクタのサイズが大きいために、全体のサイズが 15 mm 四方となっているが、アンテナ及び背面の配線と回路は 5mm 角に収まるように設計されている。現時点では発振回路チップ出力間で位相を変化できないので、配線長により位相調整し、同相給電・逆相給電のそれぞれのチップを試作した。

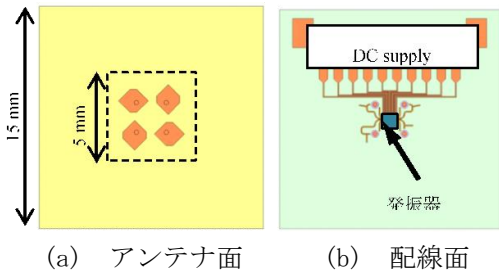


図 4 4 相発振回路チップと同軸接続された 2x2 素子パッチアレーアンテナ

(4) 図 5 に光ファイバーを用いた測定系を示す。光源から出た光を 30GHz の電波で振幅変調する。カップラーで 2 分割した後、上側波と下側波をフィルタで取り出して合波し、周波数差 60GHz の 2 つのスペクトルの光波を得

る。それを光検波器で受け 60GHz の電波を取り出しアンテナから放射する。別のアンテナで受信した 60GHz 電波は増幅器で増幅した後、スペクトラムアナライザで強度を測定する。

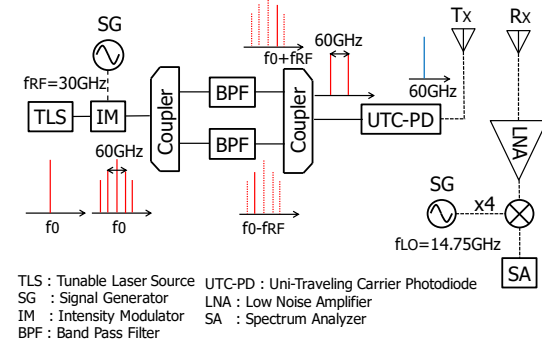


図 5 光ファイバーを用いた測定系

#### 4. 研究成果

(1) ① 図 6 に試作した平行二線給電パッチアンテナおよび、アンテナをセットした治具の写真を示す。写真のように、固定用プレートはネジにより、座金と固定される。以下、試作した 2 つのアンテナをそれぞれアンテナ 1、アンテナ 2 とよぶ。

② 図 7 に反射の周波数特性を示す。計算結果に比べて、アンテナ 1 は 0.4 GHz、アンテナ 2 は 0.9 GHz 程度それぞれ低周波側にシフトしている。これは試作誤差によるものと考えられる。設計値よりも実際のパッチが大きくなったと考えられる。

③ リバレーションチェンバーを用いて放射効率の測定を行った。基準となる導波管プローブアンテナと試作したアンテナでそれぞれにおいて受信電力を 10000 点測定し、この累積確率 63.2% の受信レベルを比較する。測定の結果 (図 8)、治具込みでの効率は、アンテナ 1 で 67%±3%、アンテナ 2 で 57%±3% となった。ただし、基準となるプローブアンテナの効率は 98% としている。また計算値は 64% であり、おおむね一致した。この結果より、アンテナ単体ではアンテナ 1 とアンテナ 2 それぞれ 82%±3%、76%±3% の放射効率と換算できる (アンテナ単体での放射効率の計算値は 79%)。

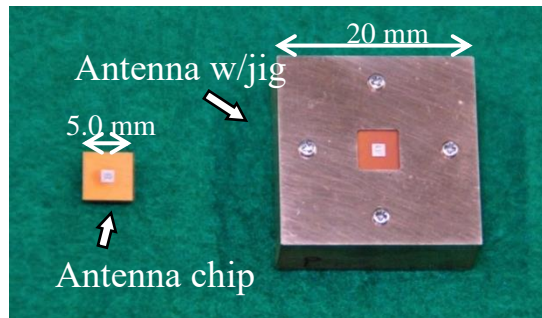


図 6 試作した平行二線給電パッチアンテナ

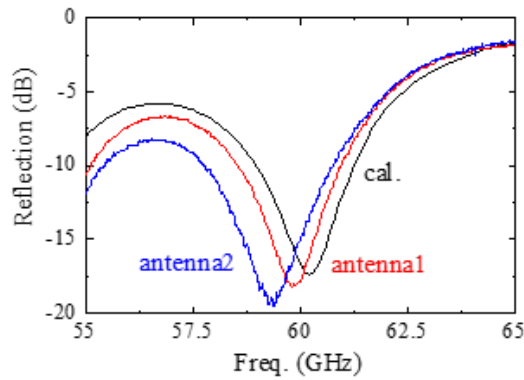


図7 反射特性

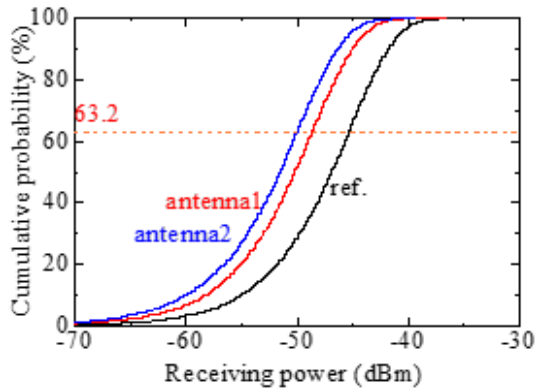
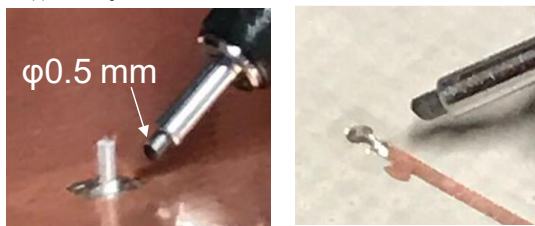


図8 放射効率測定

(2)① 図9に試作したモノポールアンテナを示す。また、図10に反射の周波数特性を示す。スタブの装荷により整合が取れている。反射-10dB以下の比帯域が23%得られた。

② 4x3mm 四方の60GHz帯直交発振器チップから300um離れたところに直径600umの穴をマイクロドリルで開けたが、発振器チップは動作した。



(a) アンテナ面 (b) 配線面

図9 試作したセミリジッド同軸ケーブルを用いたモノポールアンテナ

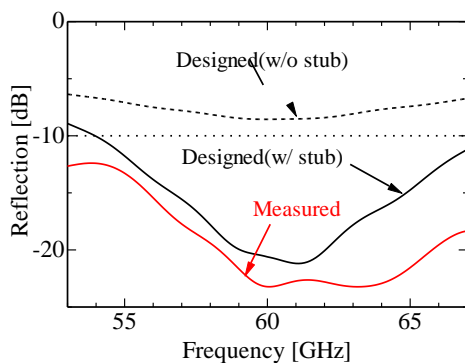


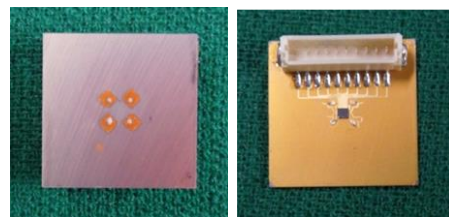
図10 反射

(3)① 図11に試作した4相発振回路チップと同軸接続された2x2素子パッチアレーアンテナを示す。アンテナ面にクラックは発生していないことが確認できる。

② 図12に同相給電チップでの指向性を示す。黒線はxz平面でのE $\phi$ 成分、緑線はxz平面でのE $\theta$ 成分、青線はyz平面でのE $\phi$ 成分、赤線はyz平面でのE $\theta$ 成分を表す。点線は計算値、実線は測定値を表す。赤線および緑線が±20度程度シフトしているが概ね測定値と実測値が一致している。この差異は発振器の各出力の負荷となる配線・銀ペーストの不均衡により、発振器の出力変動によるものと考えられる。また、今回使用した発振器は20GHzのシグナルにより同期できるのだが、配線の都合上同期注入していない。フリーランで動作させているために周波数が安定しないことも要因として考えられる。

図13に逆相給電チップでの指向性を示す。配線面の影響で赤線のレベルが±15度程度のところで非対称になっていることも測定で再現できている。赤線および青線は正面を除き計算値と測定値が良く一致している。しかし、赤線・青線の正面方向および黒線・緑線、つまりnull面上では測定値の値が計算値を上回っている箇所が多い。発振器の出力変動に加え、null面ではそもそも値が低いこと、谷となる範囲が狭いためチップが若干でも傾いてしまうとnull面がとらえられなくなるという測定上の問題が原因として考えられる。

③ 20GHz帯注入同期電波を加えることができる60GHz帯直交発振器チップと1点給電パッチアンテナを有するシリコンチップを接続した構造の製作に成功した。



(a) アンテナ面 (b) 配線面

図11 試作した4相発振回路チップと同軸接続された2x2素子パッチアレーアンテナ

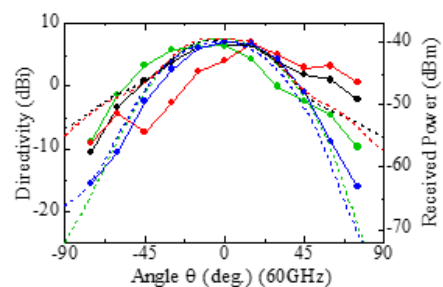


図12 同相給電指向性



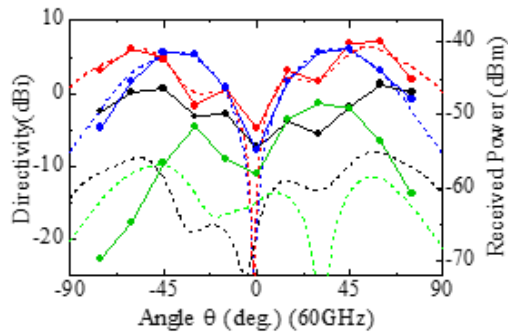
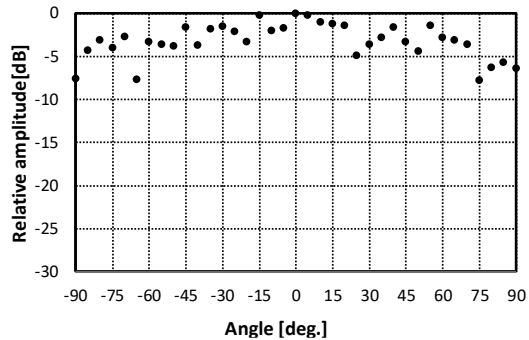


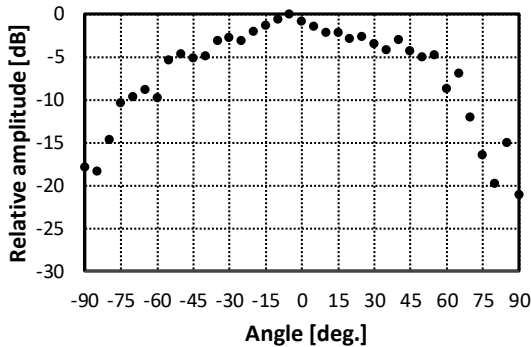
図 13 逆相給電指向性

(4)① 図 14 に光ファイバーを用いた測定系を用いた 60GHz におけるパッチアンテナの指向性の測定値を示す。増幅前の正面方向の受信電力強度は約-70dBmとなっている。受信強度が弱いためリップルが見られるが、おおむね計算値通りの指向性が得られた。

② 60GHz 帯光検出器一体パッチアンテナ 8 素子アレーを設計、製作した。光の波長を変えてアレー素子ごとに RF 信号の位相を変えることで、ビーム方向を変えることができた。位相変化量とビーム方向の関係に関して、理論値と測定値で良好な一致が得られた。また、8 素子アレーの配置と間隔を変えたときのビーム制御特性の測定を行い、実験値はアレーファクタの計算による理論値とよく一致した。



(a) E 面



(a) H 面

図 14 パッチアンテナの指向性

## 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 2 件)

① N. Oikawa, J. Hirokawa, H. Nakano, Y. Hirachi, H. Isono, A. Ishii, and M. Ando, A 60GHz-Band High-Efficiency Antenna with a Thick Resin Layer and Differentially Fed through a Hole in a Silicon Chip, IEICE Transactions on Communication, 査読有, vol. 99, pp. 27-32, 2016 年, 10.1587/transcom.2015ISP0027

② J. Asano, J. Hirokawa, H. Nakano, Y. Hirachi, H. Isono, A. Ishii, and M. Ando, Manufacture and Performance of a 60GHz-Band High-Efficiency Antenna with a Thick Resin Layer and the Feed through a Hole in a Silicon Chip, IEICE Transactions on Communication, 査読有, vol. 96, pp. 3108-3115, 2013 年, 10.1587/transcom.E96.B.3108

[学会発表] (計 10 件)

① K. Furuya, M. Oishi, S. Akiba, J. Hirokawa, and M. Ando, 60-GHz Compact Antenna Module Integrated with Photodiode for Various Two-Dimensional Arrays and RoF-Based Beam Forming, International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2016 年 11 月 2 日, ロングビーチ市(アメリカ)

② K. Furuya, S. Akiba, J. Hirokawa, and M. Ando, 60 GHz-band Compact Photonic Antenna Module with Integrated Photodiode, International Symposium on Antennas and Propagation, 2016 年 10 月 27 日, 沖縄コンベンションセンター(宜野湾市)

③ J. Hirokawa, N. Oikawa, Y. Hirachi, and M. Ando, Differential-feed Patch Antenna on the Thick Resin in a 60GHz Band Silicon Chip, European Conference on Antennas and Propagation, 2016 年 4 月 10 日, ダボス市(スイス)

④ T. Nemoto, J. Hirokawa, Y. Hirachi, and M. Ando, Stable operation of an oscillator chip mounted on a thick-resin patch antenna on a silicon chip in the 60GHz band, International Workshop on Electromagnetics, 2015 年 11 月 16 日, 新竹市(台湾)

⑤ 及川直也, 広川二郎, 平地康剛, 安藤真, 外導体付平行 2 線給電によるシリコンチップ背面厚膜誘電体層上板状差動アンテナの検討, 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 13 日, 立命館大学(草津市)

⑥ J. Hirokawa, N. Oikawa, Y. Hirachi, K. Okada, and M. Ando, Quadrature Oscillator Connection and Differential Feed of a Patch Antenna on the Thick Resin in a 60GHz Band Silicon Chip, International Workshop on Antennas Technology, 2015 年 3 月 5 日, ソウル市(韓国)

⑦ N. Oikawa, J. Hirokawa, H. Nakano, Y. Hirachi, and M. Ando, Patch Antenna on a Thick Resin Layer Fed by Coaxial-lines through a Hole in a Silicon Chip in the 60GHz Band, International Symposium on Antennas and Propagation, 2014 年 12 月 4 日, 高雄市(台湾)

⑧ N. Oikawa, J. Hirokawa, H. Nakano, Y. Hirachi, K. Okada, and M. Ando, Coaxial-line Connection of a Circularly-polarized Patch Array Antenna on the Thick Resin and a 60GHz-band Quadrature Oscillator Chip, International Workshop on Electromagnetics, 2014 年 8 月 5 日, 北海道大学(札幌市)

⑨ 及川直也, 広川二郎, 中野洋, 平地康剛, 岡田健一, 安藤真, 厚膜誘電体層上円偏波パッチアレーと 60GHz 帯 4 相発振回路チップとの同軸接続, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2014 年 5 月 23 日, 同志社大学(京都市)

⑩ 及川直也, 広川二郎, 平地康剛, 安藤真, 平行 2 線同軸線路給電によるシリコンチップ背面厚膜誘電体層上板状ループアンテナの検討, 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 20 日, 新潟大学(新潟市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣川 二郎 (HIROKAWA, Jiro)  
東京工業大学・工学院・教授  
研究者番号: 00228826

### (2) 連携研究者

安藤 真 (ANDO, Makoto)  
東京工業大学・工学院・教授  
研究者番号: 90159533

平野 拓一 (HIRANO, Takuichi)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・助教  
研究者番号: 60345361

張 ビョウ (ZHANG, Miao)  
東京工業大学・工学院・研究員  
研究者番号: 90535866