

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820139

研究課題名(和文) 集積回路設計のための高速・高精度な電磁界解析技術の研究

研究課題名(英文) Development of High-Speed and High-Accuracy Electromagnetic Simulation Technology for RF Integrated Circuits

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダミーメタルや配線層などの複雑な構造を実効媒質定数で近似するための電磁界シミュレーション技術を確立した。実効媒質定数は、単位セルの固有値解析から導波路の伝搬定数を抽出して求める。60 GHz帯オンチップダイポールアンテナの反射係数の周波数特性についても計算と実測を比較した。ダミーメタルの実効媒質定数を考慮していない場合の解析は実測とずれているが、考慮した場合はよく一致することが確認できた。本研究で確立した実効媒質定数による計算は簡易かつ高速に計算ができ、実用上十分な精度が得られることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Electromagnetic simulation technology to extract effective material properties of metal dummy fills and lines is developed. Effective material properties are analyzed from propagation constant by considering a unit cell of the structure via eigenmode analysis. Measured and calculated frequency characteristic of reflection coefficient are compared for a 60 GHz band on-chip dipole antenna. It was confirmed that the calculated value agrees very well with the measured one when the effective material property of the dummy metal fills were considered. The proposed technique using effective material property enables high speed and accurate analysis of dummy metal fills in a CMOS chip.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：電子デバイス・集積回路、マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波、微細プロセス技術、アンテナ、ダミーメタル、電磁界解析、実効媒質定数

### 1. 研究開始当初の背景

シリコン CMOS 技術の微細化による FET 動作周波数の向上に伴って、マイクロ波・ミリ波帯 RF 回路のデジタル回路との一体集積化が進められている。申請者はこれまでにミリ波オンチップアンテナの高効率化およびそのための電磁界シミュレーションの研究を行ってきた。

アンテナから放射された電波は近傍にあるチップ上の回路ブロックまで到達し、これがデジタル・アナログ一体型チップ実現の大きな障壁となる。また、現在アンテナ以外の回路ブロックは 1 チップで実現されているが、回路ブロック間のアイソレーション（影響を無くすこと）および影響の評価は大きな課題となっており、設計者の経験に依るところが大きい。

このような状況の中、定量的な評価と効率的な設計のために、1 チップ内での回路ブロック間の影響の高速・高精度電磁界シミュレーション技術の確立が望まれている。

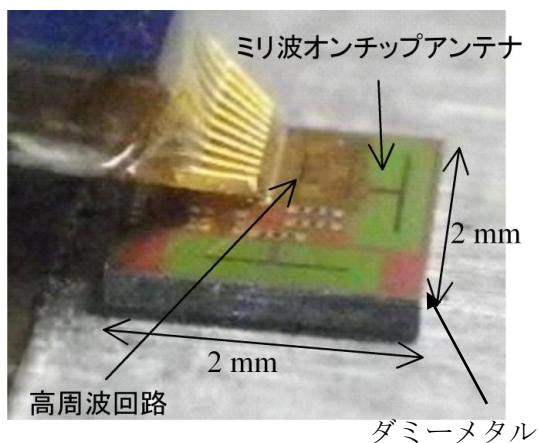


図 1 チップ内の回路ブロックの干渉

### 2. 研究の目的

本研究課題では、1 チップ内での回路ブロック間の影響を高速・高精度に評価するための電磁界シミュレーション技術の確立を目指す。

CMOS 集積回路製作上の問題から、アンテナの周囲等、チップのあらゆる部分にダミーメタルと呼ばれる、数 $\mu\text{m}$  角の金属片を配置

しなければならない。これはマイクロ波・ミリ波の波長(数 mm)に比しても微細であるが、多数配置されているため現代のスーパーコンピュータを用いても実構造の解析は不可能である。そこで、ダミーメタル領域を等価的な一様媒質定数に換算して電磁界解析する手法を提案する。また、デジタル回路には配線層も多数存在するが、これも同様の手法で一様媒質定数に換算する手法を用いることで、解析モデルの大幅な簡略化が可能となり、計算コストは大幅に削減できる。提案する電磁界解析技術の有効性を、誘電体基板を用いたモデルの実測との比較により確認する。

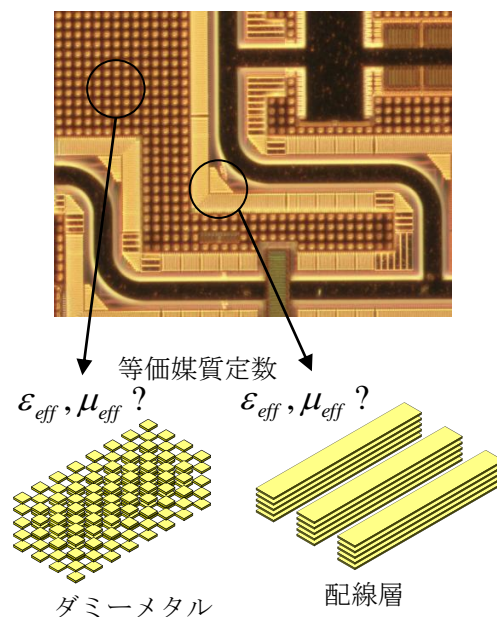


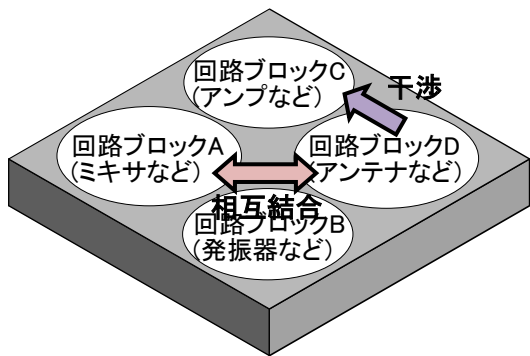
図 2 ダミーメタルと配線層

### 3. 研究の方法

ダミーメタルや配線層などの複雑な構造を一様等価媒質定数で近似するための電磁界シミュレーション技術を確認する。この手法には申請者らが開発した伝送線路の 1 周期の固有モード解析の理論（引用文献①）を用いることができる。

次に、電磁界シミュレーションでの検証を行う。内部にダミーメタルを数十個並べて配置した導波管の散乱行列を、提案手法による一様等価媒質定数で充填したモデルと比較して検証を行う。その際、ダミーメタル境界付近の不連続部の影響は申請者らが提案したディエンベディング手法（引用文献②）を用いることができる。

誘電体基板を用いたマイクロ波帯 (1 GHz ~ 10 GHz 程度) での実測との比較により一様等価媒質による解析手法の有効性の検証を行う。最後に、ミリ波帯 (60 GHz 帯) での実測との比較により、確立した一様等価媒質による解析手法の有効性の検証を行う。



<引用文献>

- ① Y. ONO, T. HIRANO, K. OKADA, J. HIROKAWA, and M. ANDO, "Eigenmode Analysis of Propagation Constant for a Microstrip Line with Dummy Fills on a Si CMOS Substrate," IEICE Trans. Electron., Vol.E94-C, No.6, pp.1008-1015, June 2011.
- ② T. Hirano, K. Okada, J. Hirokawa, and M. Ando, "Accuracy Investigation of De-embedding Techniques Based on Electromagnetic Simulation for On-wafer RF Measurements," InTech Open Access Book, Numerical Simulation - From Theory to Industry, Chapter 11, pp.233-258, September 19, 2012.  
ISBN 978-953-51-0749-1  
DOI: 10.5772/48431

4. 研究成果

図2に示すようにダミーメタルおよび配線層の等価媒質定数を計算した。図3のようにy軸方向に無限に長く、x,z方向には無限に並んでいる金属細線の透過媒質定数を計算し、実モデルとのSパラメータの周波数特性を行った。図4(a)に実モデルのSパラメータ計算モデルを、図4(b)に実効媒質定数のSパラメータ計算モデルを示す。実効媒質定数は、図5に示す流れで単位セルの固有値解析から導波路の伝搬定数を抽出して求める。図6に2つのモデルの反射係数  $S_{11}$  の周波数特性、図7に透過係数  $S_{21}$  の周波数特性を示す。実用的なレベルでの良好な一致が確認できた。

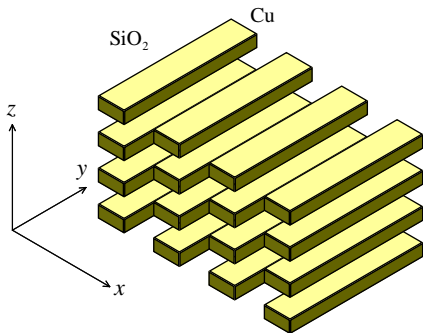


図3 金属細線の周期構造

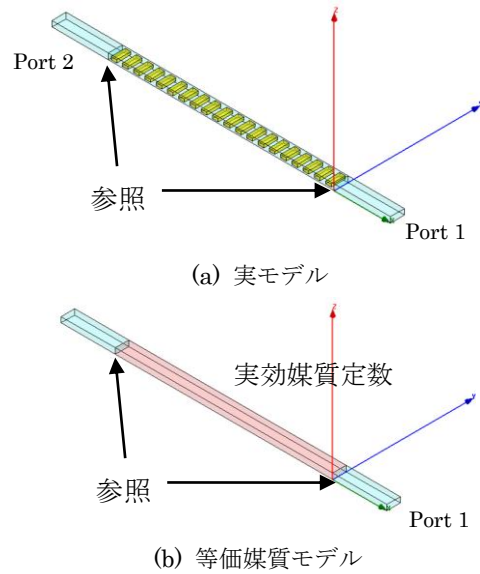


図4 金属細線の実モデルと透過媒質モデル

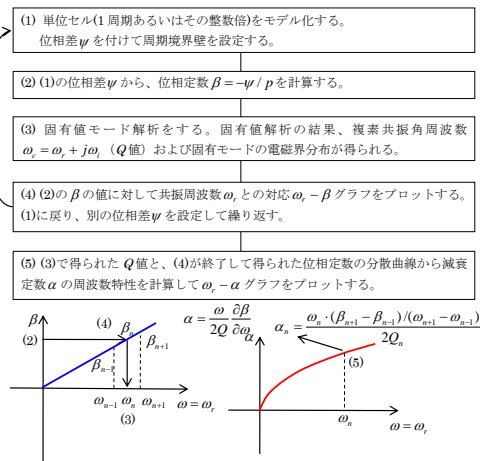
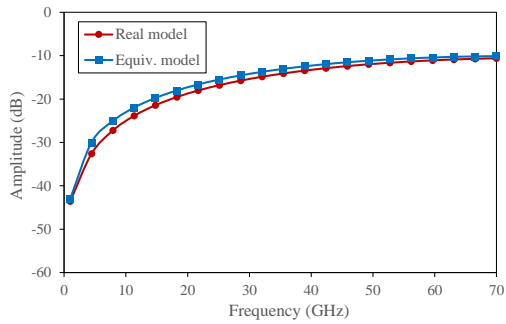
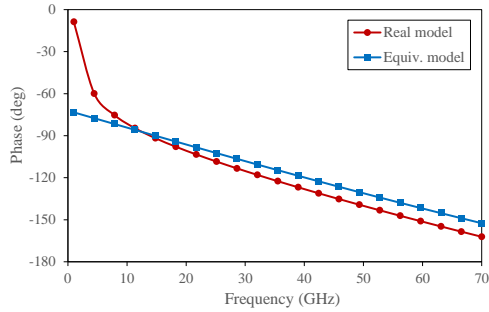


図5 固有値解析による伝搬定数計算の手順

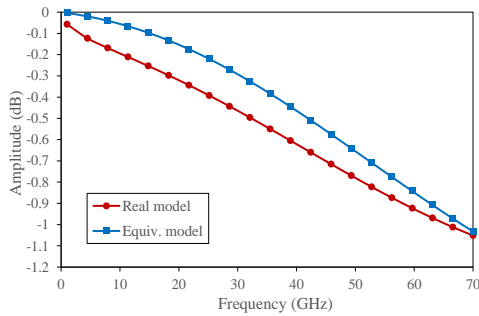


(a) 振幅

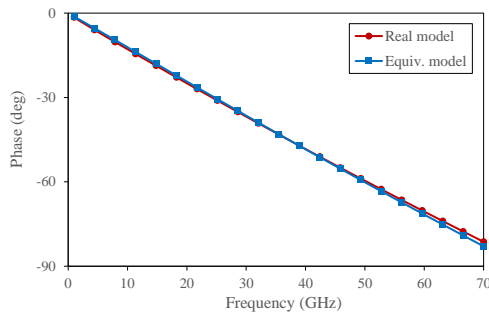


(b) 位相

図6 図4のモデルの反射係数  $S_{11}$  (偏波:  $E_z$ ,  $H_y$ )



(a) 振幅



(b) 位相

図7 図4のモデルの透過係数  $S_{21}$  (偏波:  $E_z$ ,  $H_y$ )

次に、実効媒質計算の有効性を確認するために、図8に示すように4 GHz帯標準方形導波管中に図9の金属パターン装荷誘電体基板を装荷したモデルの計算と実測の比較を行った。反射係数の周波数特性を図10に示す。実測は測定の問題でリップルが大きいですが、計算と実験がよく一致することが確認できた。

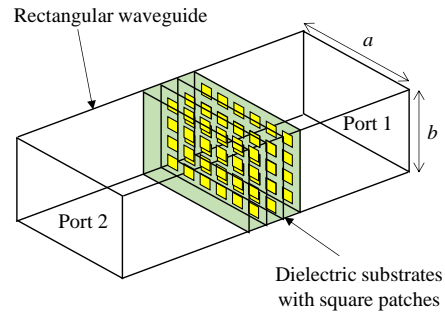
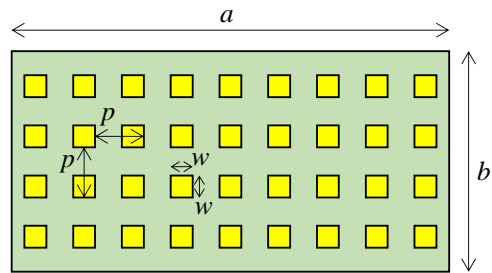
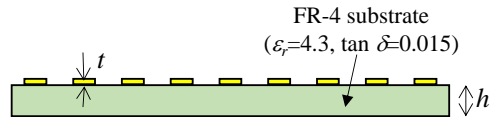


図8 誘電体基板装荷方形導波管( $a=58.1$  mm,  $b=29.1$  mm)



(a) Top view



(b) Side view

図9 周期金属パターン装荷誘電体基板

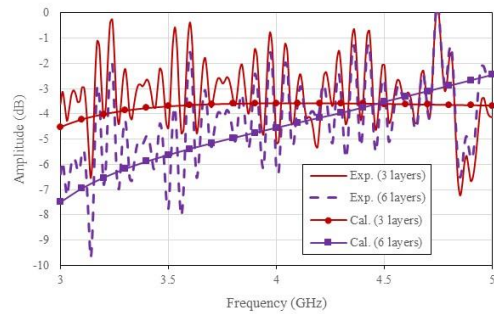
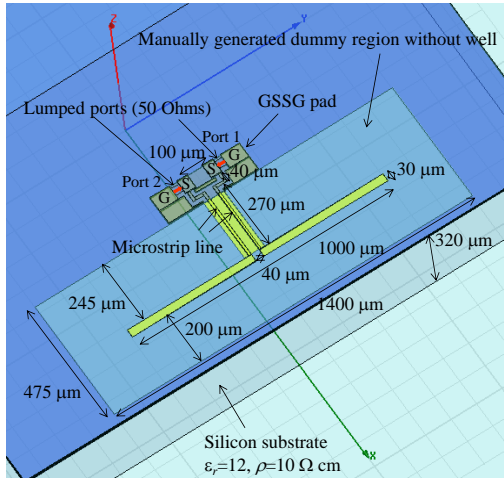


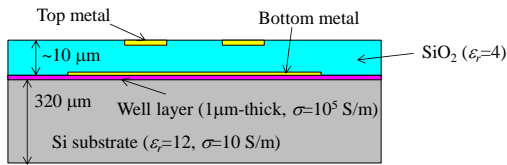
図10 図8のモデルの反射係数の周波数特性

最後に、実際にミリ波帯(60 GHz帯)において、ダミーメタルの実効媒質定数を計算し、計算と実測で実効媒質定数による扱いの有効性を確認した。図11に図1に示すオンチップダイポールアンテナの構造を示す。ダイポールアンテナ周囲には図12に示すようなダミーメタルの実効媒質定数は表1のように抽出された。ダミーメタルが人工誘電体として働くので、基本媒質の  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon_r=4$ ) よりも等価媒質定数の  $\text{Re}[\epsilon_{\text{eff}}]$  の値は大きくなっていることが確認できる。図13に60 GHz帯オンチップダイポールアンテナの反射係数の周波数特性を示す。ダミーメタルの実効媒質定数を考慮していない場合の解析は実測とずれている

が、考慮した場合はよく一致することが確認できた。ダミーメタルをそのままモデル化した場合には解析に莫大な時間がかかるが、本研究で確立した実効媒質定数による計算は簡易かつ高速に計算ができ、実用上十分な精度が得られることが確認できた。



(a) Perspective view



(b) Cross-sectional view

図 11 60 GHz 帯オンチップダイポールアンテナ

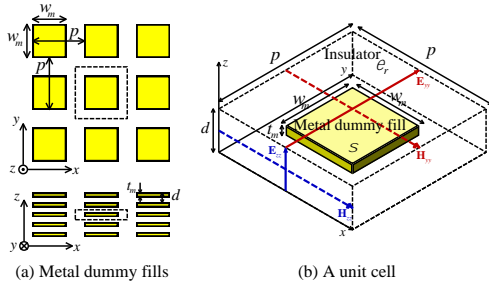
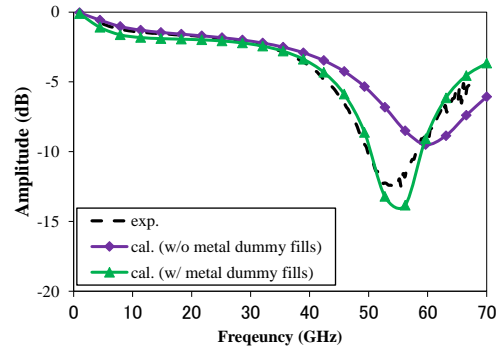


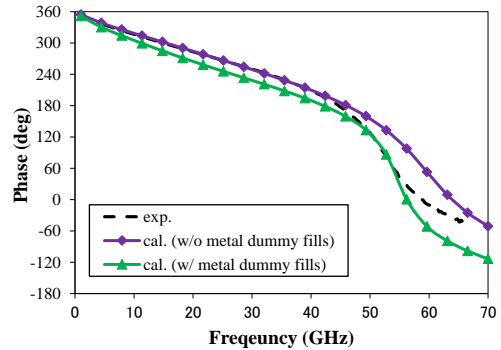
図 12 ダミーメタルと単位セル

表 1 図 12 のダミーメタルの実効媒質定数 ( $w_m = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $t_m = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $p = 0.7 \mu\text{m}$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_r = 4$ )

成分	$\text{Re}[\epsilon_{\text{reff}}]$	$-\frac{\text{Im}[\epsilon_{\text{reff}}]}{\text{Re}[\epsilon_{\text{reff}}]}$	$\text{Re}[\mu_{\text{reff}}]$	$-\frac{\text{Im}[\mu_{\text{reff}}]}{\text{Re}[\mu_{\text{reff}}]}$
xx	5.98	-0.033	0.96	0.084
yy	5.98	-0.033	0.96	0.084
zz	5.97	-0.031	0.96	0.093



(a) Amplitude



(b) Phase

図 13 60 GHz 帯オンチップダイポールアンテナの反射係数の周波数特性

## 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 6 件)

- ① T. Hirano, “Relationship between Q factor and complex resonant frequency: investigations using RLC series circuit,” IEICE Electronics Express, 査読有, Vol.14, No.21 pp.20170941, Nov. 2017.  
DOI: 10.1587/elex.14.20170941
- ② T. Hirano, N. Li, K. Okada, “Analysis of Effective Material Properties of Metal Dummy Fills in a CMOS Chip,” IEICE Trans. Commun., 査読有, Vol.E100-B, No.5, pp.793-798, May 2017.
- ③ 平野 拓一, 吉川 公麿, 広川 二郎, 安藤 真, “人体検査用広帯域五角形パッチアンテナ,” 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, Vol.J99-C, No.8, pp.365-372, Aug. 2016. (招待論文)
- ④ T. Hirano, J. Takada, “Dual-Band Printed Inverted-F Antenna with a Nested Structure,” Progress In Electromagnetics Research Letters, 査読有, Vol. 61, pp.1-6, 2016.
- ⑤ T. Hirano, J. Hirokawa and M. Ando, “Influence of the SMA Connector and Its Modeling on Electromagnetic Simulation,” Microwave and Optical Technology Letters (MOP), 査読有,

Vol. 57, No. 9, pp. 2168-2171, September 2015.

DOI: 10.1002/mop.29304

- ⑥ 矢尾 裕樹, 平野 拓一, 広川 二郎, 安藤 真, “材料への微細空孔生成による低損失化の電磁界シミュレーション,” 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, Vol. J97-C, No. 12, pp. 535-541, Dec. 2014.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 平野拓一, “[ポスター講演] ネットワークアナライザによる Sパラメータ測定における校正不整合について,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 117, no. 462, MW2017-185, pp. 55-55, 滋賀県立大学, 彦根, 2018 年 3 月 1 日.
- ② T. Hirano, N. Li, T. Inoue, H. Yagi, K. Okada, A. Matsuzawa, “Gain Measurement of 60 GHz CMOS On-Chip Dipole Antenna By Proton Irradiation,” Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Session 3E2.3, Phuket, Thailand, Oct. 30-Nov. 2, 2017.
- ③ 平野拓一, “共振の定義の違いと複素共振周波数による Q 値の計算,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-2-49, 東京都市大 (東京), 2017 年 9 月 13 日.
- ④ 平野拓一, “電磁界シミュレーションの導波管ポートにおける高次モードの影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 117, no. 140, MW2017-67, pp. 207-210, 帯広商工会議所, 北海道, 2017 年 7 月 21 日.
- ⑤ 平野拓一, “方形導波管中に置いた誘電体基板上の周期構造方形金属片の Sパラメータ測定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-2-44, 北大 (北海道), 2016 年 9 月 21 日.
- ⑥ 平野拓一・李 寧・岡田健一・広川二郎・安藤 真, “ミリ波帯オンチップアンテナの解析におけるダミーメタルの実効媒質定数近似,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, BCS-1-2, 九州大伊都キャンパス (福岡県), 2016 年 3 月 17 日.
- ⑦ 平野拓一・広川二郎・安藤 真, “2次元周期配列導体細線の実効媒質定数の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 433, EST2014-130, pp. 321-325, 2015 年 1 月.
- ⑧ 平野拓一・李 寧・岡田健一・松澤 昭・広川二郎・安藤 真・井上 剛・坂根 仁, “5GHz 帯 CMOS オンチップスパイラルインダクタの電磁界解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-15-9, 徳島大 (徳島県), 2014 年 9 月 23 日.

[図書] (計 1 件)

- ① 平野 拓一 (分担), 4.3 節: 有限要素法を用いた電磁界解析技術日、磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術、技術情報協会, 2018 年 3 月.  
ISBN-10: 4861047056

[その他]

ホームページ等

<http://www.takuichi.net/>

<http://www.takuichi.net/research/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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