

PEM

第1回 光応用電磁界計測研究会

—光応用電磁界計測における
シミュレーションの活用と応用展開 ・ 一般—

PEM2018-1~4

2018年 5月24日(木)

於：首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス

主催：電子情報通信学会
光応用電磁界計測特別研究専門委員会

第1回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「光応用電磁界計測におけるシミュレーションの活用と応用展開・一般」

2018年 5月 24日（木） 14:00 ~ 16:25

14:00 - 14:10 開会の言葉

水野麻弥(情報通信研究機構)

14:10 - 15:00 PEM2018-1

〔招待講演〕表面プラズモンポラリトンを利用したテラヘルツデバイスのFDTD解析

柴山 純・山内潤治・中野久松 (法政大)

休憩(10分)

15:10 - 15:35 PEM2018-2

〔一般講演〕ミリ波・THz波ばく露環境下におけるマルチフィジックス解析のための
メニーコアアーキテクチャーを用いた大規模有限差分法の並列実装

鈴木敬久(首都大)・小島正美(金沢医科大)・多氣昌生(首都大)
チャカロタイ ジェドヴィスノブ・佐々木謙介(NICT)

15:35 - 16:00 PEM2018-3

〔一般講演〕非同期電気光学検出技術による準ミリ波・ミリ波の放射パターン計測

鎌田淳平・堀尾和輝(岐阜大)・内田裕久(アークレイ)
東條 誠・及川陽一・宮地邦男(シンクランド)・久武信太郎(岐阜大)

16:00 - 16:25 PEM2018-4

〔一般講演〕環境測定を目的とした磁気光学センサの基礎特性

加藤佳仁(鉄道総研)・鈴木敬久(首都大)

場 所： 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス
主 催： 電子情報通信学会 光応用電界計測特別研究専門委員会
(<http://www.ieice.org/~pem/>)

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日： 2018 年 5 月 24 日

発 行 所： (一社)電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会

PEM 研究会 招待講演

表面プラズモンポラリトンを利用したテラヘルツデバイスのFDTD解析

柴山 純 山内 潤治 中野 久松

法政大学理工学部 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

E-mail: shiba@hosei.ac.jp

あらまし 近年筆者らは、表面プラズモンポラリトン(SPP)の特性を活用したテラヘルツ帯における2種類のデバイスを提案した。一つは、テラヘルツ帯でSPPを支持できるアンチモン化インジウム(InSb)を用いた表面プラズモン共鳴導波路型センサであり、もう一つは、疑似SPPを導波する放射状グレーティングを金属円盤上に配置した周波数分割器である。本稿ではSPPの伝搬特性に注意しながらこれらのデバイスを解説する。解析に利用するために新たに開発したFDTD法についても述べる。

キーワード テラヘルツ波, アンチモン化インジウム(InSb), 周波数分割器, 表面プラズモンポラリトン, FDTD法

FDTD analysis of terahertz devices using surface plasmon polariton propagation properties

Jun SHIBAYAMA Junji YAMAUCHI and Hisamatsu NAKANO[‡]

Faculty of Science and Engineering, Hosei University

3-7-2 Kajino-cho, Koganei, Tokyo 184-8584 Japan

E-mail: shiba@hosei.ac.jp

Abstract We have recently proposed two terahertz devices utilizing the property of surface plasmon polaritons (SPPs). One is a surface plasmon resonance waveguide sensor operating at THz frequencies, in which indium antimonide (InSb) supporting the SPP is adopted in the sensing region. The other is a metal disc-shaped THz frequency splitter, in which radially-placed gratings guiding spoof SPPs are applied to the surface of the disc. In this article, we discuss the two THz devices, paying attention to the propagation property of the SPPs. Also presented is a newly developed finite-difference time-domain (FDTD) method for the analysis of the THz devices.

Keyword Terahertz wave, Indium antimonide (InSb), Wavelength splitter, Surface plasmon polariton, Finite-difference time-domain (FDTD) method



表面プラズモンポラリトンを利用した テラヘルツデバイスのFDTD解析

柴山 純 山内潤治 中野久松
法政大学 理工学部 電気電子工学科

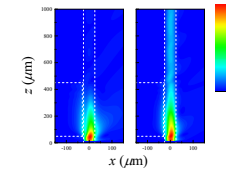
PEM研究会@首都大学東京（秋葉原サテライトキャンパス）
2018年5月24日

1 / 42



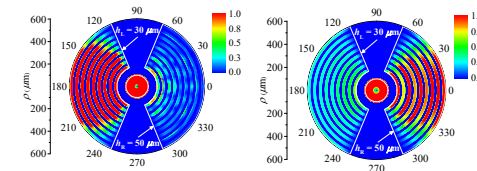
THz表面プラズモンポラリトン

✓ THz表面プラズモン共鳴導波路型センサ



J. Shibayama et al., *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 2518-2525, May 2016.

✓ 金属円盤型THz表面波分割器

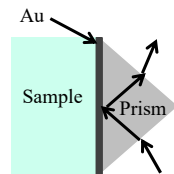


J. Shibayama et al., *Electron. Lett.*, vol. 51, pp. 352-353, 2015.

2 / 42

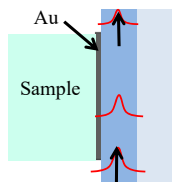


表面プラズモン共鳴(SPR) 導波路型センサ



クレッチマン構造を利用したSPRセンサ*

- 金属/誘電体境界に表面プラズモンポラリトン(SPP)が励起
- リアルタイム・高解像度のセンシング
- 光回路への集積化が困難



光回路への集積化が可能なSPR導波路型センサ**

* J. Homola et al., *Sensors and Actuators B*, vol. 54, no. 1, pp. 3-15, Jan 1999.
** J. Shibayama, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 643-645, May 2010.

3 / 42



THz帯でのSPP

✓ THz帯において金属/誘電体境界にSPPは非励起

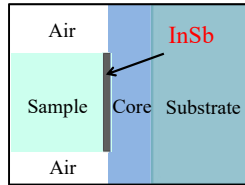
- InSb (アンチモン化インジウム) はTHz帯で負の誘電率
- InSb/誘電体境界にSPPが励起
- 誘電率が温度によって大きく変化

➢ InSbをセンシング領域に適用したSPR導波路型センサを提案*

*J. Shibayama et al., *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 2518-2525, May 2016.

4 / 42

THz帯でのSPR導波路型センサ

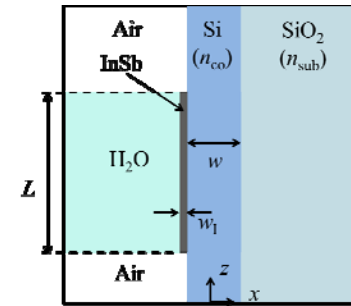


- ✓ TRC-FDTD法を用いてSPR導波路型センサの性能を評価
- ✓ 温度変化に対するSPR応答を調査
- ✓ 応用例として、水溶液の濃度検知

*J. Shibayama et al., *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 2518-2525, May 2016.

5/42

構造



$n_{co} = 3.4$ (Si)
 $n_{sub} = 1.94$ (SiO₂)
 Sample: H₂O
 $w = 50 \mu\text{m}$
 $w_1 = 5 \mu\text{m}$
 $L = 400 \mu\text{m}$
 $\Delta x = 0.2 \mu\text{m}$
 $\Delta z = 1.0 \mu\text{m}$

6/42

InSbと水の扱い



Drude model (InSb)*

$$\epsilon_{Dr}(\omega, T) = \epsilon_{\infty Dr} + \frac{\omega_p^2(T)}{\omega\{j\Gamma(T) - \omega\}}$$

$\epsilon_{\infty Dr}$: High-frequency permittivity ω : Angular frequency
 $\omega_p(T)$: Plasma frequency T : Temperature
 $\Gamma(T)$: Collision rate of the charge carriers

N-pole Debye model (H₂O)**

$$\epsilon_{De}(\omega, T) = \epsilon_{\infty De}(T) + \sum_{p=1}^N \frac{\epsilon_{s,p}(T) - \epsilon_{\infty De}(T)}{1 + j\omega\tau_{0,p}(T)}$$

$\epsilon_{\infty De}(T)$: High-frequency permittivity $\epsilon_s(T)$: Static dielectric constant
 N : Number of relaxation processes $\tau_0(T)$: Relaxation time
 $(N=2)$

7/42

台形則帰納的畳み込み(TRC)法



- Polarization $\mathbf{P}(n\Delta t) = \int_0^{n\Delta t} \chi(\tau) \mathbf{E}(n\Delta t - \tau) d\tau$

- ✓ RC technique

$$\mathbf{P}(n\Delta t) = \sum_{m=0}^{n-1} \mathbf{E}^{n-m} \chi^m$$

- ✓ PLRC technique

$$\mathbf{P}(n\Delta t) = \sum_{m=0}^{n-1} \{\mathbf{E}^{n-m} \chi^m + (\mathbf{E}^{n-m-1} - \mathbf{E}^{n-m}) \xi^m\}$$

- ✓ TRC technique*

$$\mathbf{P}(n\Delta t) = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{\mathbf{E}^{n-m} + \mathbf{E}^{n-m-1}}{2} \chi^m$$

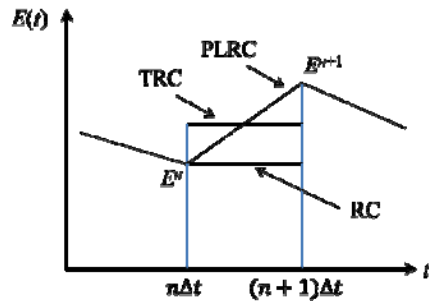
$$\chi^m = \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} \chi(\tau) d\tau$$

$$\xi^m = \frac{1}{\Delta t} \int_{m\Delta t}^{(m+1)\Delta t} (\tau - m\Delta t) \chi(\tau) d\tau$$

*J. Shibayama et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 46, no. 1, pp. 40-49, 2010.

8/42

台形則帰納的畳み込み(TRC)法



- ✓ RC法：畳み込み計算1度で1次精度
- ✓ PLRC法：畳み込み積分2度で2次精度
- ✓ TRC法：畳み込み計算1度で2次精度

9/42

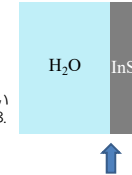
InSbと水の境界(2種類の分散媒質境界)



Method 1

- 境界の値を各々の媒質と見なし電界を計算 (H₂O: Debye model, InSb: Drude model)
- 境界上で電界の平均を取る

有馬、宇野、"FDTD法を用いた分散性媒質解析における境界の扱い方について," 信学論, vol. J91-B, no. 9, pp.1066-1068, 2008. (分散性媒質/通常誘電体媒質境界)



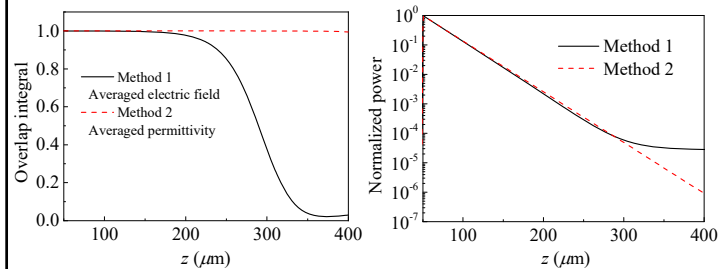
Method 2

- H₂OとInSbの誘電率の平均値を持つDrudeモデルを仮定
- 平均誘電率を持つプラズマ周波数、衝突周波数を導出

J. Shibayama et al., *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 2518-2525, May 2016.

10/42

InSbと水の境界(2種類の分散媒質境界)



- ✓ Method 1: 境界条件は界振幅に依存するため、界振幅が小さくなると精度の維持が困難
- ✓ Method 2: 境界条件は誘電率で決まるため、界の振幅には影響無し

11/42

SPR応答

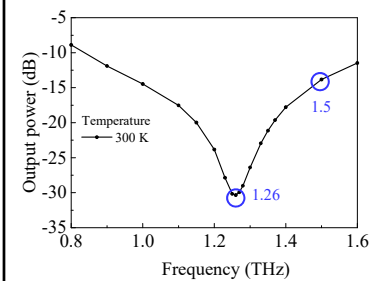


Fig. Output power as a function of frequency

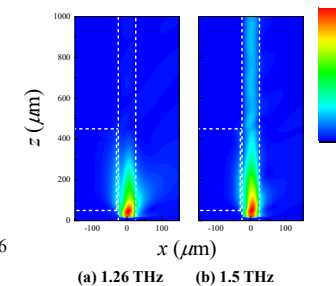
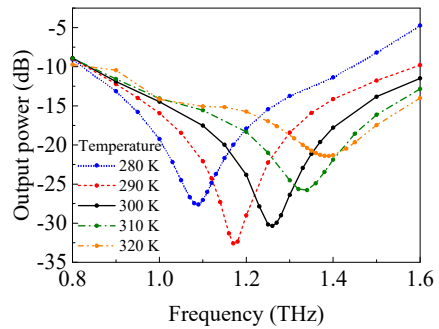


Fig. Field distributions

吸収ピークが1.26 THzで発現

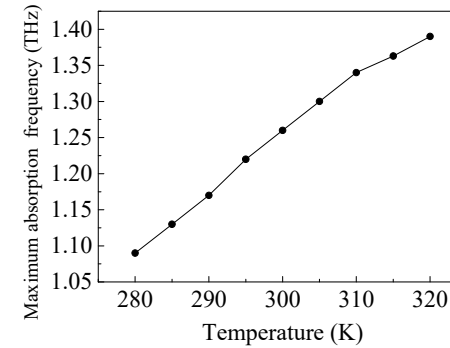
12/42

温度変化に対するSPR応答



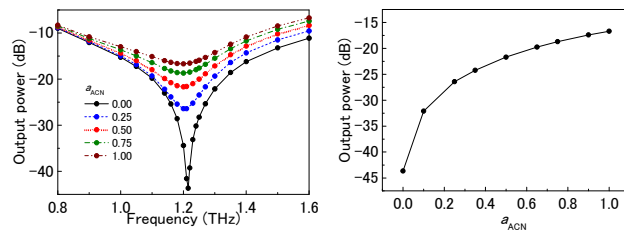
温度が上昇するにつれ、吸収は高い周波数に推移

温度に対する吸収周波数



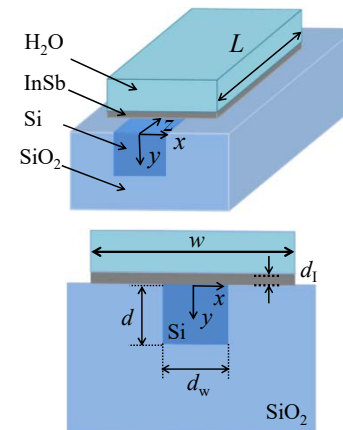
感度は 8.0×10^{-3} THz/K

有機溶剤水溶液の体積濃度



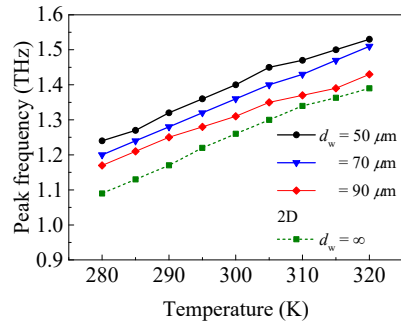
アセトニトリル水溶液の体積濃度はSPR周波数での最小出力パワーを調査することで検知できる可能性

3次元SPR導波路型センサ



- $n_{co} = 3.4$ (Si)
- $n_{sub} = 1.94$ (SiO₂)
- InSb: Drude model
- H₂O: 2-pole Debye model
- $d = 50 \mu\text{m}$
- d_w : varied
- $d_1 = 5 \mu\text{m}$
- $L = 400 \mu\text{m}$
- $w = 300 \mu\text{m}$
- $\Delta x = 5 \mu\text{m}$
- $\Delta y = 1 \mu\text{m}$
- $\Delta z = 5 \mu\text{m}$

3次元SPR導波路型センサ



センシング感度は2次元解析から得られた結果とほぼ一致

THz帯SPR導波路型センサまとめ



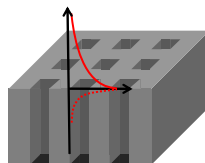
- ✓ THz帯においてInSb/誘電体境界にSPPが励起
- ✓ InSbをセンサ部に導入してSPR導波路型センサを提案
- ✓ 分散媒質であるInSb/水をTRC法でFDTD法に組み込み
- ✓ InSb/水の境界をそれらの平均誘電率をもつDrudeモデルで評価
- ✓ 温度感知、有機溶液濃度測定の可能性
- ✓ 3次元構造でも2次元と同様の感度

THz表面波

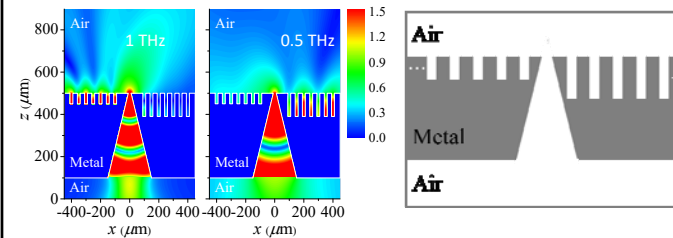


- ✓ THz帯ではSPPは金属/誘電体境界に非励起
- ✓ 金属のプラズマ周波数よりTHz帯での周波数は低く、電磁界は金属に染み込まない
- ✓ グレーティング構造を作ると、電磁界はわずかに金属に染み込む状態になり、表面波が導波する
- ✓ 疑似(spoof)SPPと呼ばれている

J. Pendry et al., Science, vol. 305, no. 5685, pp. 847-848, 2004.



THz表面波分割器

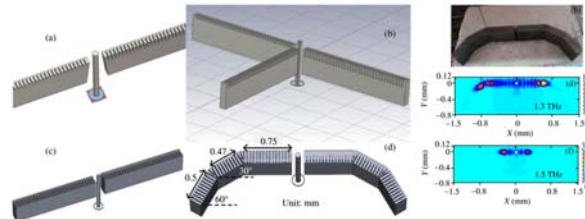


- ✓ 疑似SPPの伝搬特性を利用した双方向分割器が理論的に検討

Q. Gan, Z. Fu, Y. J. Ding, and F. J. Bartoli, Opt. Express, vol. 15, no. 26, pp. 18050-18055, 2007

THz表面波分割器

- ✓ 有限幅を持つ金属グレーティングからなる周波数分割器



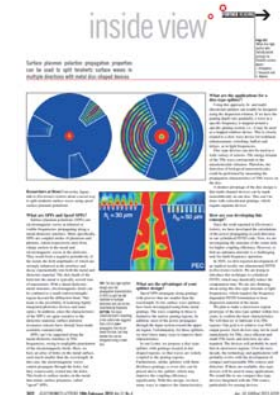
Z. YongJin et al., *Sci China Inf Sci*, vol. 55, no. 1, pp. 79-89, 2012.

- ✓ 電磁波の結合領域が狭いグレーティング幅のみに制限

21/42

金属円盤型表面波分割器

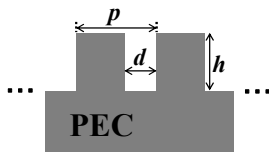
- ✓ 中央に入力部を持ち放射状にグレーティングを配置した金属円盤型THz周波数分割器を提案
- ✓ 広いグレーティング領域にTHz波が結合
- ✓ 設計は1次元グレーティングの分散関係式を利用
- ✓ 波長分割特性を評価
- ✓ 計算の効率化



J. Shibayama et al., *Electron. Lett.*, vol. 51, pp. 352-353, 2015.

22/42

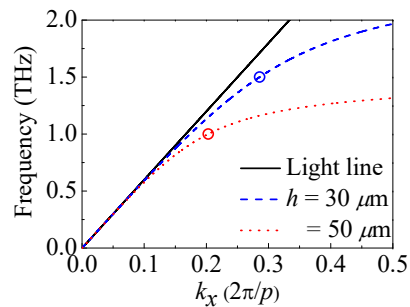
分散関係



$p = 50 \mu\text{m}$, $d = 20 \mu\text{m}$
 $h = 30 \mu\text{m}$ or $50 \mu\text{m}$

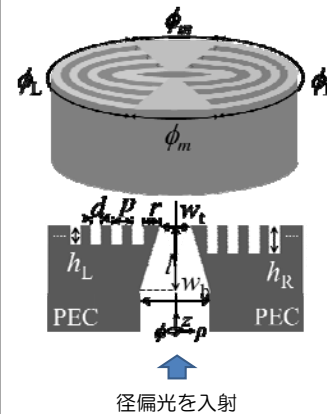
$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{d^2}{p^2} \tan^2\left(\frac{\omega}{c} h\right) + 1}$$

c : speed of light in a vacuum
 ω : angular frequency
 d : groove width
 h : groove depth
 p : grating period



23/42

円盤型分割器の構造



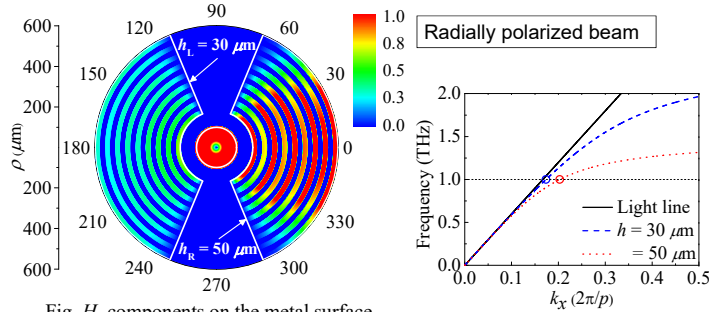
$h_L = 30 \mu\text{m}$
 $h_R = 50 \mu\text{m}$
 $\phi_L = 135^\circ$
 $\phi_R = 135^\circ$
 $\phi_m = 45^\circ$
 $r = 80 \mu\text{m}$
 $p = 50 \mu\text{m}$
 $d = 20 \mu\text{m}$
 $w_b = 480 \mu\text{m}$
 $w_t = 200 \mu\text{m}$
 $l = 400 \mu\text{m}$
Number of gratings: 9

円筒座標系FDTD法を用いて特性評価

径偏光を入射

24/42

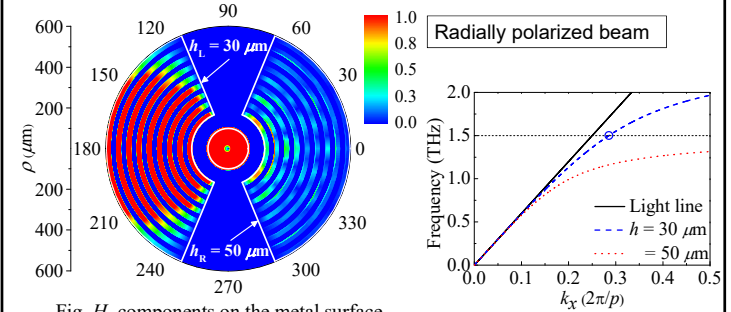
界分布 (1 THz)



1.0 THzの表面波の多くが右側のグレーティングに結合

25/42

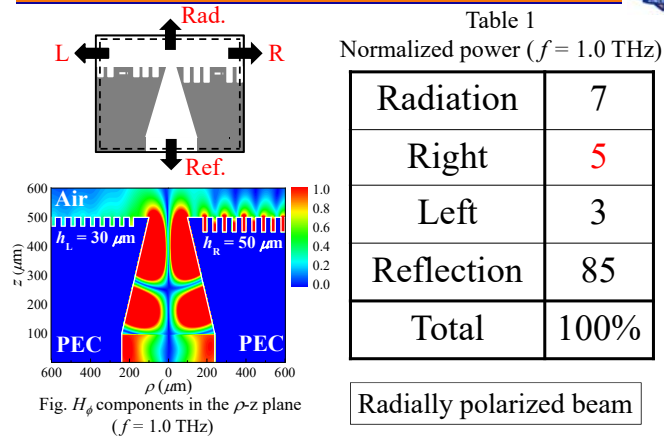
界分布 (1.5 THz)



1.5 THzの表面波の多くが左側のグレーティングに結合

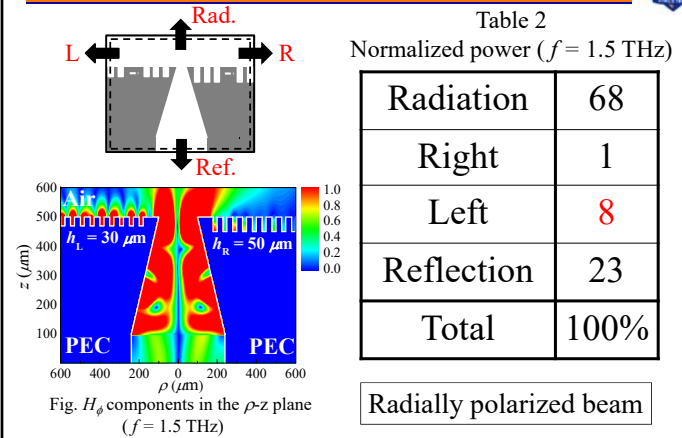
26/42

各方向への伝搬パワー(1.0 THz)



27/42

各方向への伝搬パワー(1.5 THz)

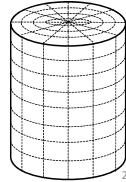


28/42

FDTD法の効率化



- ✓ FDTD法：電磁界の数値解析法として広範に利用
- ✓ 空間の刻み幅を小さく選ばざるを得ない場合、CFL条件により極端に小さな時間刻み幅→計算の長時間化
- ✓ CFL条件から解放された陰的FDTD法
 交互方向陰解法に基づく手法(ADI-FDTD法)
 局所的な一次元法に基づく手法(LOD-FDTD法)
 → 3重対角行列
- ✓ 円筒座標系では中心軸に近づくときと不可避に小さな刻み幅
 → 陰的FDTD法を用いた扱いは好適



29/42

陰的FDTD法



- 2次元TM波のマクスウェルの方程式（分散性なし）

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = ([A] + [B])\phi \quad (1)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} H_y \\ E_x \\ E_z \end{bmatrix}, \quad [A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\partial}{\partial z} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}$$

- (1) を陰的に解くためにクランク・ニコルソン法を適用

30/42

陰的FDTD法



$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = ([A] + [B])\phi \quad (1)$$

- 左辺

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} \quad (2)$$

- 右辺

$$\phi \approx \frac{\phi^{n+1} + \phi^n}{2} \quad (3)$$

- (2)、(3)を(1)へ代入

$$\phi^{n+1} = \frac{[I] + \frac{\Delta t}{2}([A] + [B])}{[I] - \frac{\Delta t}{2}([A] + [B])} \phi^n$$

31/42

陰的FDTD法



$$\phi^{n+1} = \frac{[I] + \frac{\Delta t}{2}([A] + [B])}{[I] - \frac{\Delta t}{2}([A] + [B])} \phi^n \rightarrow \phi^{n+1} = \frac{([I] + \frac{\Delta t}{2}[A])([I] + \frac{\Delta t}{2}[B])}{([I] - \frac{\Delta t}{2}[A])([I] - \frac{\Delta t}{2}[B])} \phi^n$$

ADI

LOD

Step 1:

$$\phi^{n+1/2} = \frac{([I] + \frac{\Delta t}{2}[A])}{([I] - \frac{\Delta t}{2}[B])} \phi^n$$

Step 1:

$$\phi^{n+1/2} = \frac{([I] + \frac{\Delta t}{2}[B])}{([I] - \frac{\Delta t}{2}[B])} \phi^n$$

Step 2:

$$\phi^{n+1} = \frac{([I] + \frac{\Delta t}{2}[B])}{([I] - \frac{\Delta t}{2}[A])} \phi^{n+1/2}$$

Step 2:

$$\phi^{n+1} = \frac{([I] + \frac{\Delta t}{2}[A])}{([I] - \frac{\Delta t}{2}[A])} \phi^{n+1/2}$$

T. Namiki, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 47, 10, 2003-2007, 1999.

J. Shibayama et al., *Electron. Lett.*, 41, 19, 1046-1047, 2005.

32/42

差分式右辺の計算数



Tab. Number of arithmetic operations

Method	Implicit		Explicit		Total	
	M,D	A,S	M,D	A,S	M,D	A,S
ADI	3+3	6+6	1+2+1+2	2+4+2+4	12	24
CNAD	3+3	8+12	2	8	8	28
CNCS	1+2	3+11	3+3	8+12	9	34
LOD	2+2	6+6	1+1	4+4	6	20

CNAD: Crank-Nicolson Approximated-Decoupling FDTD
CNCS: Crank-Nicolson Cycle-Sweep FDTD

G. Sun and C.W. Trueman, *IEEE Trans. Antennas Prop.*, 52, 2963-2972, 2004.

33/42

円筒座標系LOD-FDTD法



first step:

$$E_{\rho}^{n+\frac{1}{2}} = E_{\rho}^n + \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r \rho} \left(\frac{\partial H_z^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_z^n}{\partial \varphi} \right) \quad (1a)$$

$$E_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} = E_{\varphi}^n + \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r} \left(\frac{\partial H_{\rho}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial z} + \frac{\partial H_{\rho}^n}{\partial z} \right) \quad (1b)$$

$$E_z^{n+\frac{1}{2}} = E_z^n + \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r \rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \rho H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\partial}{\partial \rho} \rho H_{\varphi}^n \right) \quad (1c)$$

$$H_{\rho}^{n+\frac{1}{2}} = H_{\rho}^n + \frac{c\Delta t}{2\mu_r} \left(\frac{\partial E_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial z} + \frac{\partial E_{\varphi}^n}{\partial z} \right) \quad (1d)$$

$$H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} = H_{\varphi}^n + \frac{c\Delta t}{2\mu_r} \left(\frac{\partial E_z^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \rho} + \frac{\partial E_z^n}{\partial \rho} \right) \quad (1e)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}} = H_z^n + \frac{c\Delta t}{2\mu_r \rho} \left(\frac{\partial E_{\rho}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \varphi} + \frac{\partial E_{\rho}^n}{\partial \varphi} \right) \quad (1f)$$

second step:

$$E_{\rho}^{n+1} = E_{\rho}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r} \left(\frac{\partial H_{\varphi}^{n+1}}{\partial z} + \frac{\partial H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial z} \right) \quad (2a)$$

$$E_{\varphi}^{n+1} = E_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r} \left(\frac{\partial H_{\rho}^{n+1}}{\partial \rho} + \frac{\partial H_{\rho}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \rho} \right) \quad (2b)$$

$$E_z^{n+1} = E_z^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\epsilon_r \rho} \left(\frac{\partial H_{\rho}^{n+1}}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_{\rho}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \varphi} \right) \quad (2c)$$

$$H_{\rho}^{n+1} = H_{\rho}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\mu_r \rho} \left(\frac{\partial H_{\varphi}^{n+1}}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial \varphi} \right) \quad (2d)$$

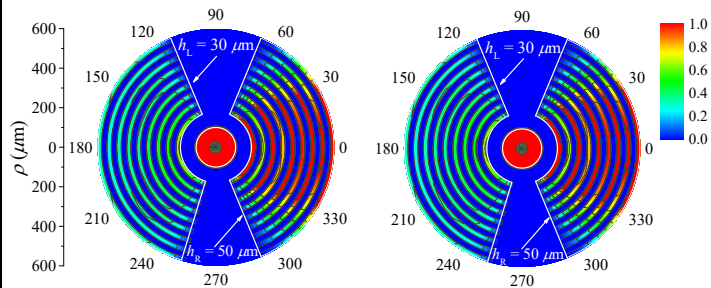
$$H_{\varphi}^{n+1} = H_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\mu_r} \left(\frac{\partial E_{\rho}^{n+1}}{\partial z} + \frac{\partial E_{\rho}^{n+\frac{1}{2}}}{\partial z} \right) \quad (2e)$$

$$H_z^{n+1} = H_z^{n+\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{2\mu_r \rho} \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \rho E_{\varphi}^{n+1} + \frac{\partial}{\partial \rho} \rho E_{\varphi}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2f)$$

J. Shibayama et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 11, pp. 865-868, 2017.

34/42

金属円盤形分割器の計算結果(1 THz)



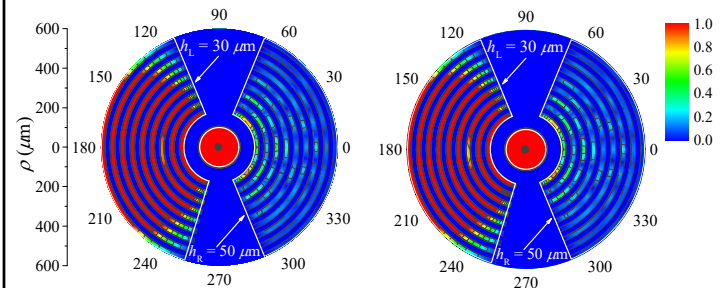
(a) Explicit FDTD (CFLN=1)

(b) LOD-FDTD (CFLN=10)

Fig. H_{φ} field distributions ($f=1.0$ THz).

35/42

金属円盤形分割器の計算結果(1.5 THz)



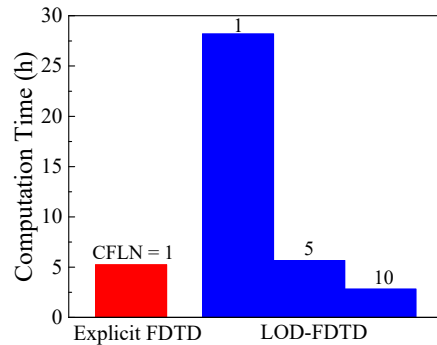
(a) Explicit FDTD (CFLN=1)

(b) LOD-FDTD (CFLN=10)

Fig. H_{φ} field distributions ($f=1.5$ THz).

36/42

計算時間

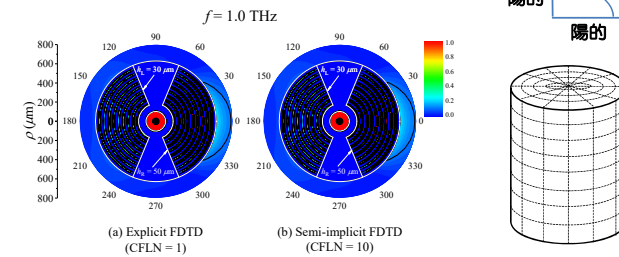


J. Shibayama et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 11, pp. 865-868, 2017.

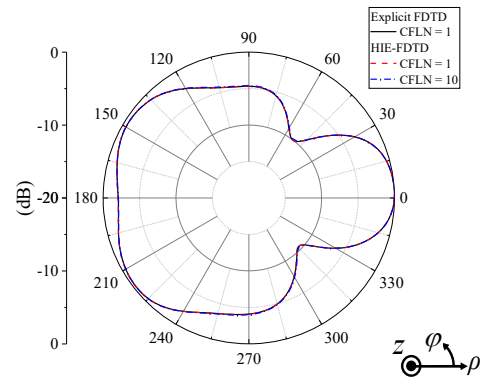
陰的・陽的ハイブリッド(HIE)FDTD法



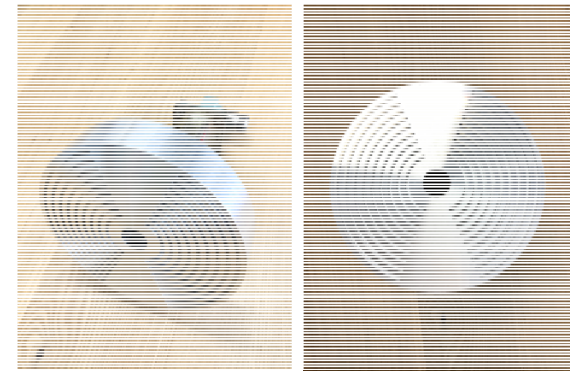
- ✓ 細かい刻みが必要な方向のみに陰解法を適用、他の方向には従来と同様の陽解法で解く
- ✓ 周回方向にのみ陰解法を導入
- ✓ 計算時間は陽的FDTD法の20%以下



放射パターン



金属円盤型表面波分割器の作成



金属円盤型表面波分割器まとめ



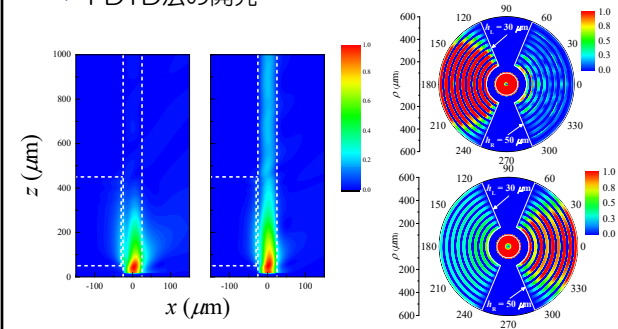
- ✓ THz帯において疑似SPPが励起
- ✓ 放射状に配置したグレーティングを持つ金属円盤型表面波分割器を提案
- ✓ 周波数分割を確認
- ✓ 多くのパワーが透過あるいは反射
- ✓ 円筒座標系LOD-FDTD法の開発
 - 計算時間は50%
- ✓ 陰的・陽的ハイブリッド円筒座標系LOD-FDTD法の開発
 - 計算時間は20%
- ✓ 作成しマイクロ波帯で実験

41/42

まとめ



- ✓ 表面プラズモンを活用したTHzデバイス
 - SPR導波路型センサ
 - 金属円盤型周波数分割器
- ✓ FDTD法の開発



42/42

ミリ波・THz 波ばく露環境下におけるマルチフィジックス解析のための メニーコアアーキテクチャーを用いた大規模有限差分法の並列実装

鈴木 敬久^{*†} 小島 正美[‡] 多氣 昌生[†] チャカロタイ ジェドヴィスノブ^{††} 佐々木 謙介^{††}

[†] 首都大学東京 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

[‡] 金沢医科大学 〒920-0293 石川県河北郡内灘町大学 1-1

^{††} 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: *y_suzuki@tmu.ac.jp

あらまし 最近のミリ波・THz 波の生体へのばく露評価を行うための計算機シミュレーションについて、その規模は非常に大きくなってきている。この傾向は計算結果の妥当性や精度を高めるために、生体をモデリングするとき形状・構造・生体組織の構成に関してより高い精細さが求められるからである。そのような高精細モデルを用いて数値シミュレーションを実施するとき、計算コードの並列化はパフォーマンスを高めるための1つの有効な手段である。ばく露評価のシミュレーションでしばしば使用されている有限差分法はステンシル計算であり、メモリ律速な特性である。このようなステンシル計算に対しては、例えば最近では200-900GB/sに達する広帯域なメモリバンド幅を持つ graphics processing unit (GPU) や many integrated core (MIC) のようなメニーコアアーキテクチャーのハードウェアアクセラレータを使用することが有効である。本研究ではメニーコアアーキテクチャーを利用したミリ波・THz 波に関するばく露評価のための数値ばく露評価システムの高速度の取り組みについて示す。

キーワード ミリ波, THz 波, ばく露評価, 電磁界計測, 大規模シミュレーション, 超並列計算

Massively parallelized implementation of large scale finite difference method for the multi physics analysis under the millimeter-THz wave exposure with many-core architecture

Yukihisa SUZUKI^{*†} Masami KOJIMA[‡] Masao Taki[†]

Jerdvisanop CHAKAROTHAI^{††} and Kensuke SASAKI^{††}

[†] Tokyo Metropolitan University 1-1 Minamiosawa, Hachioji, Tokyo 192-0397 Japan

[‡] Kanazawa Medical University 1-1 Daigaku, Uchinada, Kahoku, Ishikawa 920-0293 Japan

^{††} National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795 Japan

E-mail: *y_suzuki@tmu.ac.jp


Abstract Recently, computer simulation scale for biomedical EMC in millimeter-wave and THz wave exposure becomes extremely huge, because numerical models, which represent shape, structure and configuration of biological bodies, increase these preciseness. Parallelizing simulation codes are one of the effective solutions to deal with such a high definition and massive scale problem. Finite difference methods, frequently used for solving biomedical EMC problem, are classified as the stencil scheme which has the nature of memory-bound feature. Hence, it is desirable to employ many-core architecture with the high-speed memory bandwidth (approximately 200-900GB/s) such as the graphics processing unit (GPU) or the many integrated core (MIC) hardware accelerators. In this study, we describe the acceleration of the multiphysics simulation system for numerical dosimetries in millimeter-wave and THz wave exposure by the many-core architecture-based computing technique.

Keyword Millimeter wave, THz 波, Dosimetry, Electromagnetic field measurement, Large scale simulation, Massively parallel computing

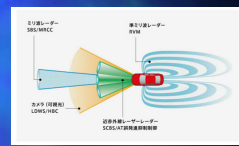
目次

- 背景・目的
- ミリ波・THz波ばく露下の眼部組織熱輸送の物理
- 電磁界・熱流体連成解析システム概要
- 電磁界シミュレーション
- 流体を含む生体熱輸送シミュレーション
- 連成シミュレーションの結果の例
- まとめ

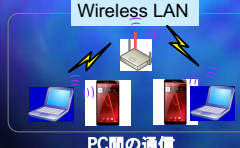
ミリ波(30-300GHz)帯電波利用状況



空港等での保安検査
(Active Millimeter-wave Imaging Sensors)



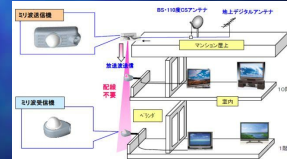
自動車衝突防止システム
<http://www.mazda.co.jp/cars/demo/feature/safety/i-activesense/>



Wireless LAN

PC間の通信

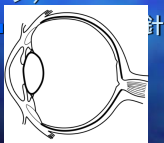
サムソンが携帯用60 GHz WiFi開発中
<http://global.samsungtomorrow.com/mes/>
アクセス：2015年2月6日



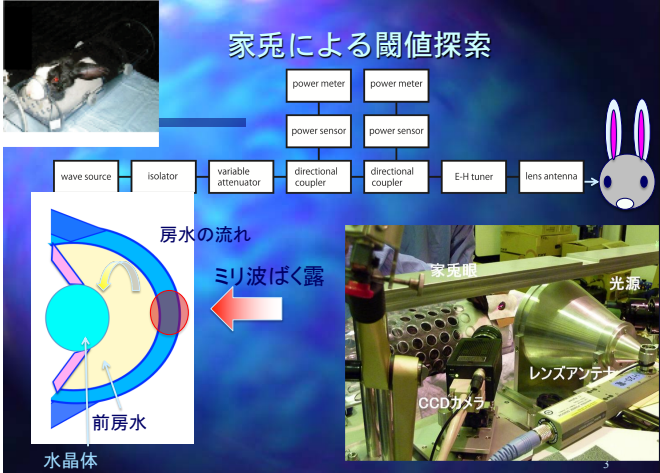
テレビ共同受信システム
<http://www.jushin-e.co.jp/60ghz.html>

ミリ波ばく露による角膜の障害閾値の探索

- 眼部表面は血流がなく、熱影響を受け易い組織である。
- 動物実験により閾値を検証→ガイドラインへの反映
- ICNIRP (国際非電離放射線防護委員会ガイドライン)



家兎による閾値探索



Experimental setup components: wave source, isolator, variable attenuator, directional coupler, E-H tuner, lens antenna, power meter, power sensor.

Eye diagram labels: 房水の流れ (aqueous humor flow), ミリ波ばく露 (mm-wave exposure), 前房水 (anterior chamber fluid), 水晶体 (lens).

Photo labels: 家兎眼 (rabbit eye), 光源 (light source), レンズアンテナ (lens antenna), CCDカメラ (CCD camera).

ミリ波ばく露動物実験



レンズアンテナ 家兎

角膜表面 ばく露前

ばく露直後

レンズアンテナを用いたミリ波ばく露実験

画像データ 75GHz@300mW/cm²



障害箇所：緑色に発光

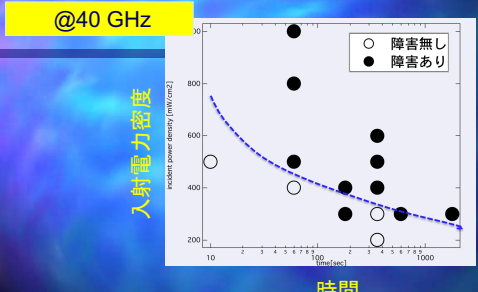
>フルオレセイン溶液を使用

>眼科医が観察

実験条件	
周波数 [GHz]	40, 60, 75, 95
入射電力密度 [mW/cm ²]	10 - 1000 (適切に変化)
ばく露時間 [秒]	360
家兎の数	5

動物実験による閾値の推定

@40 GHz



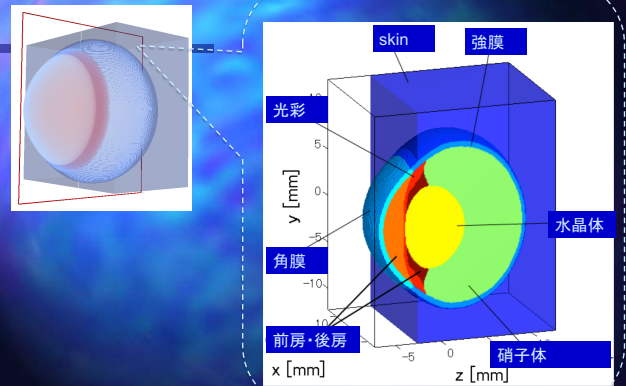
Graph labels: 入射電力密度 (incident power density [mW/cm²]), 時間 (time), 障害無し (no damage), 障害あり (damage).

- ・ばく露時間, 入射電力密度をパラメータとした閾値の推定が必要
- 動物実験での検証には限界がある。
- ・数値ドシメトリによる閾値の推定が有効

目的

- ミリ波帯ばく露において眼部の障害閾値を定量的に推定できるシステムの開発
 - 電磁界と熱輸送の連成シミュレーション
 - GPUなどを用いたコードの高速化

眼球の構造



Visualization of heat transport in ocular tissue exposed to MMW



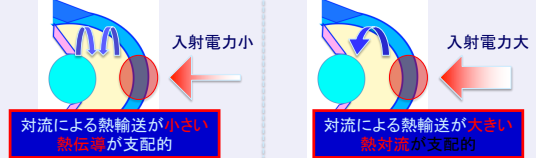
- HT in the anterior chamber is visualized with particle tracing method with color change
- Before exposure, physiological convection is observed from lens to cornea.
- When MMW exposure is started anti-clockwise flow from ocular to lens are observed.
- Temperature elevation is occurred in the vicinity of cornea.

-Complex heat transport is observed anterior part of ocular tissue because of aqueous humor.

眼部における複雑な熱輸送

ばく露による眼障害発生プロセス

入射電力密度や周波数、ばく露時間などの組み合わせによっては...



眼部における複雑な熱輸送

入射パワーに対して非線形な応答

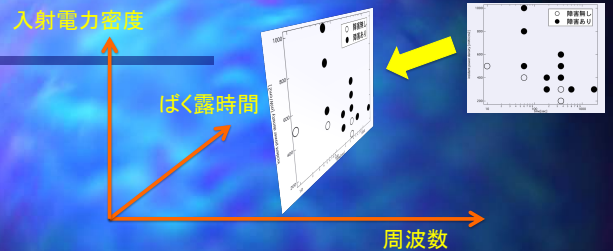
ばく露による眼障害発生プロセス

入射電力密度や周波数、ばく露時間などの組み合わせによっては...



熱輸送形態によって、眼障害発生箇所が変化し、複雑化する。

推定



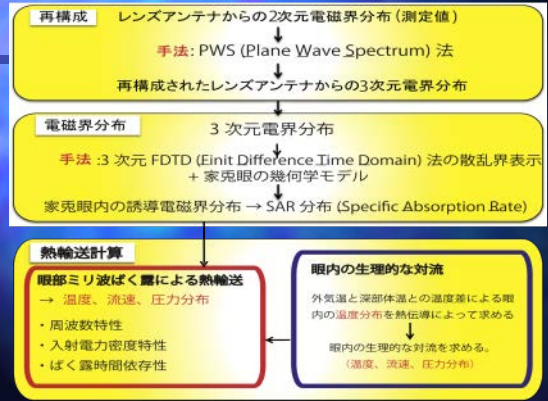
個々が大規模シミュレーションである連成解析のパラメータ掃引が必要: 10分の実時間追跡×150パターン程度(10(電力)×15(周波数))

➡ 高速なシミュレーションコードが必要

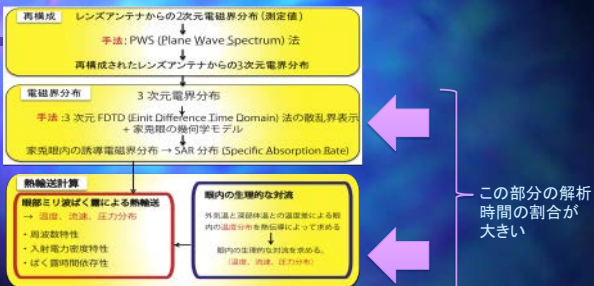
目次

- 背景・目的
- 眼部組織熱輸送の物理
- 電磁界・熱流体連成解析システム概要
- 電磁界シミュレーション
- 流体を含む生体熱輸送シミュレーション
- 連成シミュレーションの結果の例
- まとめ

【電磁界-熱輸送】連成解析システムの概要



【電磁界-熱輸送】連成解析システムの高速度化の検討



従来のCPUを使用した計算時間

- 電磁界解析: FDTD 法
 - 500X500x500 (約 1.2億ボクセル)
 - 1 パラメータで約12時間
- 熱輸送解析: SMAC 法
 - 172x172x172 (約 5 百万ボクセル)
 - 1 パラメータで約 1 週間

パラメータ掃引を行い実用的な結果を得るためには高速な計算手法が必要→GPU (メニーコア) 計算の積極的利用

メニーコアアクセラレーター



GPU
コア数 5000個程度



MIC
コア数 61個

- 並列計算に特化したメニーコアアクセラレーターによって数値計算の演算速度の向上が見込める

Top 500* (Nov. 2015)

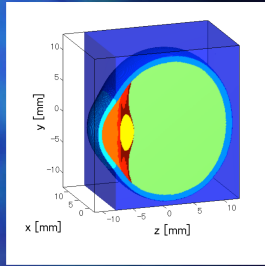
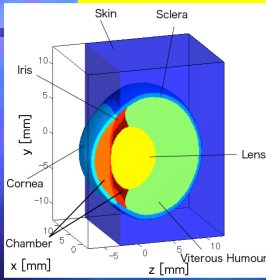
Ran	Name	Computer	Site	Country	Total Co/Process	Accelerator		Power [kW]	Mflops/Watt	Processor	Processor Technology	Accelerator/Processor
						Rmax (Tflops)	Rpeak (Tflops)					
1	Trinity	THALES FEP Cluster	Intel Xeon	National Super Computer Center	China	3E+06	3E+06	3.4E+07	54902400	17808	1901.5	Intel Xeon Phi 3151P
2	Titan	Cray XK7 Opentel 6274 16C 2.200GHz	BlueGene/Q	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory	United States	6E+05	261632	1.8E+07	27112050	8209	2142.8	AMD x86_64 K20x
3	Sequoia	Power BOC 15C 1.60 GHz	BlueGene/Q	DOE/NSA/ILL NL	United States	2E+06	0	1.7E+07	20132659	7890	2176.6	PowerPC 16C SPARC 64 V8iX
4	K computer	SPARC64 V8iX 2.0GHz, Tofu (BlueGene/Q)	BlueGene/Q	RIKEN Advanced Institute for Computational Science	Japan	7E+05	0	1.1E+07	11280384	12660	830.18	PowerPC 16C SPARC64 V8iX
5	Mira	Power BOC 16C 1.60GHz	Xeon	the National Laboratory	United States	8E+05	0	8586612	10066330	3945	2176.6	PowerPC 16C Xeon E5-2680v3
6	Trinity	Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz	Aries	DOE/NSA/ILL NL/SNL	United States	3E+05	0	8100900	11078961			Xeon E5-2680v3 Intel Haswell
7	Dainti	Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz	Aries	Swiss National Supercomputing Centre	Switzerland	1E+05	73808	6271000	7789853	2325	2697.2	2670 BC Xeon E5-2680v3 Intel SandyBridge
8	Hazel	Cray XC40, Xeon E5-2680v3 12C 2.5GHz	Aries	HLRS - High Performance Computing Center	Germany	2E+05	0	5640170	7403520			Xeon E5-2680v3 Intel Haswell
9	Shahae	Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz	Aries	King Abdulaziz University	Saudi Arabia	2E+05	0	5536990	7235174	2834	1953.8	2680v3 Xeon E5-2680v3 Intel Haswell
10	Stamp	PowerEdge C8220, Xeon E5-2680 8C	Aries	Advanced Computing	United States	5E+05	366386	5168110	8520112	4510	1145.9	2680 BC Intel SandyBridge SE 10P

*http://www.top500.org

Voxel models for rabbit and human

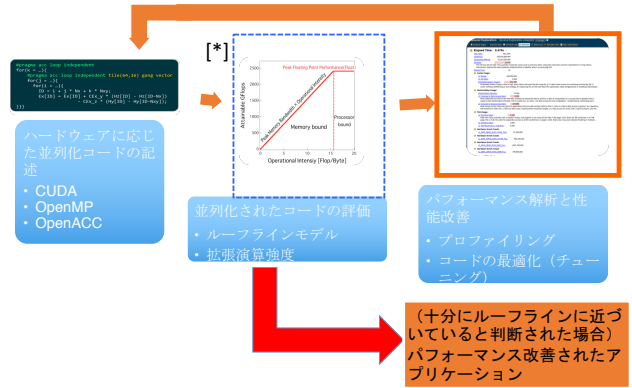
Rabbit eye model

Human eye model



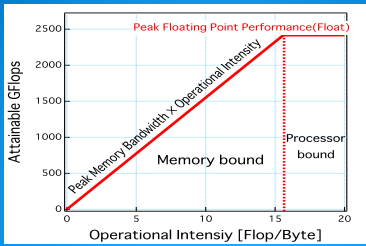
- Mesh size is 50μm.(100-200million cell)
- These models are consists of 7 tissues, cornea, aqueous humor, iris, lens, vitreous humor, sclera, and skin.

並列化コードのパフォーマンス改善プロセス



[*] 今井稜, 香取勇太, 河田直樹, 鈴木敬久, 大久保寛, 信学論(C), Vol. J99, No. 5, May, 2016

Roofline model[*]



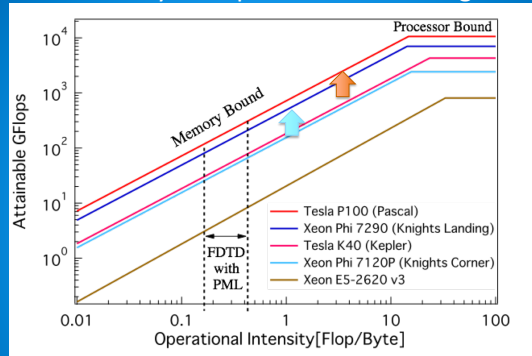
$$F = \min(P, B \times I)$$

F: Attainable GFlops, P: Peak Floating-point Performance
B: Peak Memory Bandwidth, I: Operational Intensity

- Performance evaluation model considering the memory bandwidth.
- "Roofline" indicates attainable performance by the function of "operational intensity"

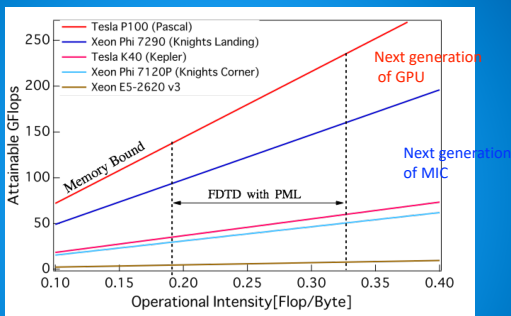
[*] S. Williams, et al., Commun. ACM, 52(4): pp65-76, 2009

Rooflines of many-core processors in next generation



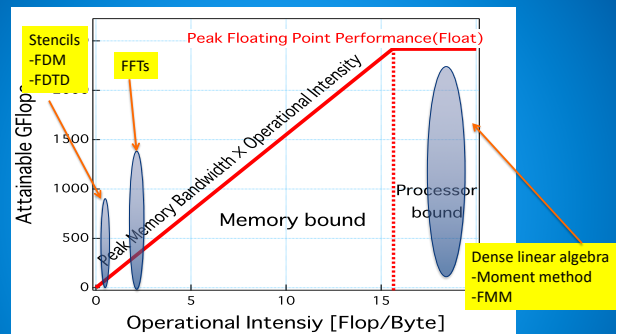
-Roof lines will lift up as shown in this figure, because of the implementation of high band memory.

Next generation of GPU and MIC



- We will expect dramatic speed up for stencil type application.
- The performance of FDTD method will achieve more than 100 Gflops.
- If we have opportunity, we will report about next generation many-core processors.

Attainable performance depending on the application



- Attainable performances depends on the type of application.
- Stencil type applications do not bring out the processor ability.

Operational intensity (OP)

- Operational Intensity: The ratio of the number of floating operation to the sum of traffics of memory.

$$I[\text{Flop/Byte}] = \frac{W}{Q}$$

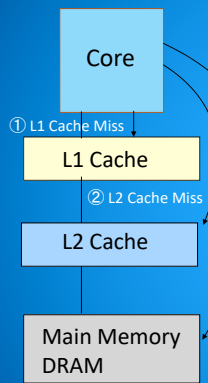
W [Flop] : Number of floating point operation
 Q [Byte] : Byte number of memory access for application

Example: update scheme of electric field in FDTD

$$Ex[i][j][k] = Ex[i][j][k] + CEx_y * (Hz[i][j][k] - Hz[i][j-1][k]) - CEx_z * (Hy[i][j][k] - Hy[i][j][k-1]);$$

In this scheme, W = 6, Q = 8byte * 6 = 48, therefore $I = 0.125$,
 Here, coefficient of CEx_y and Cex_z is assumed on the cache memory.

Memory hierarchy



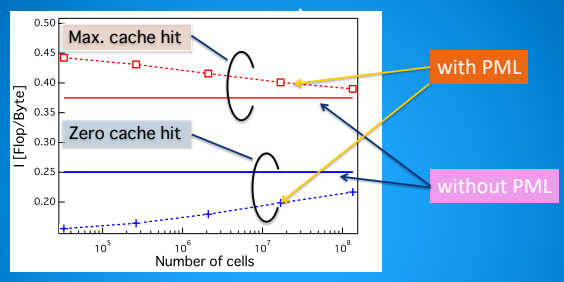
- In the conventional OI estimation, high speed cache memories does not considered.
- In recent many-core architecture, cache memories with high bandwidth are implemented
 - Cache hit ratio plays important role to discuss the traffics between cache memory and DRAM.
 - However, it is difficult to estimate quantity of traffic between cache and DRAM by the conventional OI.

Extended operational intensity (EOI)

$$I(c) = \frac{W}{Q(c)}$$

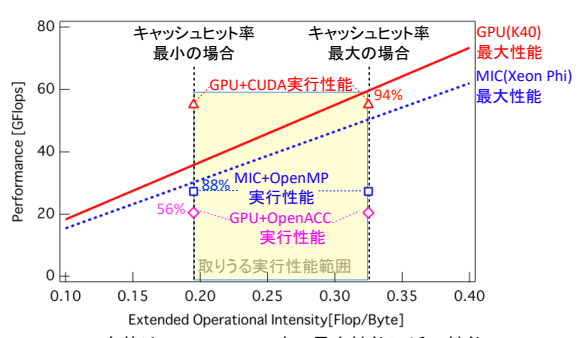
- We extend the operational intensity to include cache hit effect.
 - c: cache hit number
 - Q(c) is the access number to the main memory.
 - I(c) is assumed as a function of c

Dependence of EOI on the calculation scale



- In this investigation, the number of PML is 16.
- With PML case, according to the increase of the computational scale,
 - EOIs decrease for "mac cache hit" condition.
 - EOIs increase for "0 cache hit" condition.

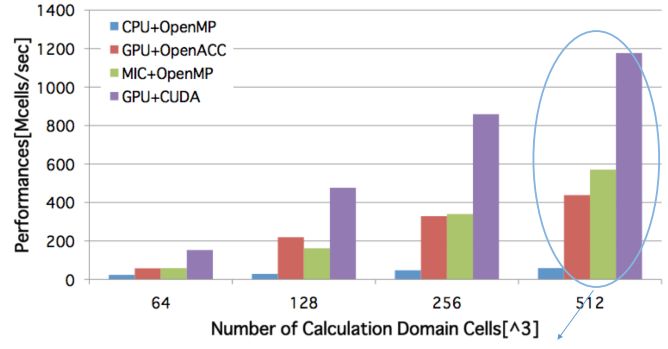
拡張演算強度を用いたパフォーマンス評価[*]



- GPU+CUDA実装はCache Hit Max時の最大性能に近い性能(94%)
- MIC+OpenMP実装やGPU+OpenACC実装では見込まれる最低限の性能 (キャッシュヒット率最小時の最大性能) を得ることができていない

[*] 今井稜, et al., 信学論(C), Vol. J99, No. 5, May, 2016

cells/secによる実行性能比較



Mcells/sec	GPU+CUDA	GPU+OpenACC	MIC+OpenMP	CPU+OpenMP
512^3 cells	1176	438	570	58

比吸収率(SAR)

■ 熱作用の用量の指標

- Specific Absorption Rate(SAR)

■ 組織内の比吸収率

- 単位質量あたりの電力の吸収

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad [W/Kg]$$

(σ :導電率, E :電界, ρ :密度)

電磁界解析で得られた電界分布からSARを計算し熱源として使用

熱輸送シミュレーションの支配方程式系

- 非圧縮性の流れ: 多くの流れのように流体が縮まない場合を想定
- 流体計算にはSMAC (Simplified marker and cell) 法を用いた。

連続の式

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Navier-stokes方程式

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{V} + \vec{g}$$

流体を含む生体熱輸送方程式

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + A_0 - B(T - T_{blood}) + Q$$

流体効果の非線形項

圧力計算

$$\Delta p = -\frac{\rho}{dt} \nabla \vec{V}$$

Navier-stokes方程式から求めた仮速度

電磁界解析から得られた SAR分布を利用

$$Q = \rho SAR$$

物理定数

- 密度: ρ [kg/m³]
- 動粘性係数: ν
- 比熱: C_p [J/kg·K]
- 熱伝導率: K [W/m·K]
- 代謝による産熱: A_0 [W/m³]
- 血流定数: B [W/m³·K]
- 熱源: Q [W/m³]
- 重力: g [m/s²]

未知変数

- 速度ベクトル: V [m/s]
- 温度: T [°C]
- 圧力: p [kg/m²]

境界条件

温度

•緑線: 計算領域の境界にて等温境界

$$T = T_{body}$$

•外気と体の境界にて熱量の流入出を保存する境界条件を与えた

$$\vec{q} \cdot \hat{n} = h(T - T_{air})$$

熱伝達率 h : 赤線→角膜、水色→皮膚

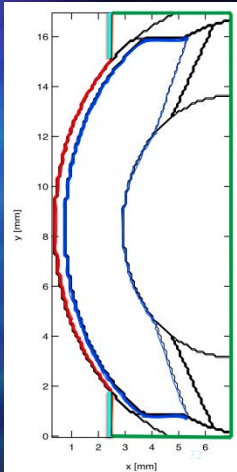
速度

•Non slipとし、境界にて速度0とした

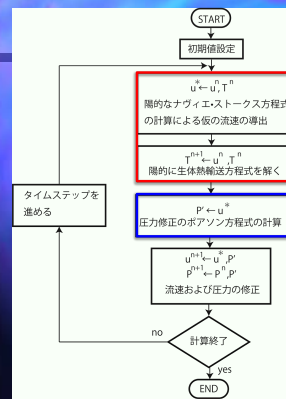
$$\vec{V} = 0$$

圧力

•ポテンシャルとして扱うので、基準点として房水領域内の1点を0とした。



SMAC法のフローチャート



通常のSMAC法の解法

陽解法

- 仮の流速と温度を解く。
- 差分スキームの安定性条件によるタイムステップの制限
- 計算時間がかかる

陰解法

- SOR法→収束に時間がかかる

5百万ボクセルの6分間の時間発展の解析に約1週間

SMAC法のパフォーマンス改善

■ 全陰解法化

- 仮速度・温度計算: クランクニコルソン法

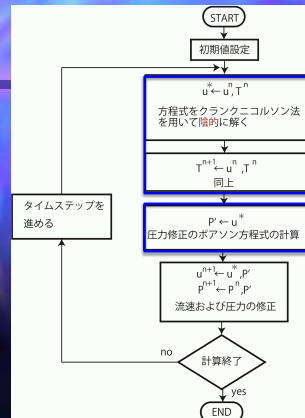
■ GPUによる超並列化

- 適用可能な場所に積極的に利用

■ ソルバーの改善によるパフォーマンス向上

- 圧力修正 (Poisson方程式): AMG法

修正版SMAC法



• 陰解法化, SOR法, GPU並列化

• AMG法, GPU並列化

• GPU並列化

パフォーマンス改善結果

■ 全陰解法化

- 時間離散間隔: 2 μ sから2ms程度まで緩和

■ ソルバーの改善+GPU

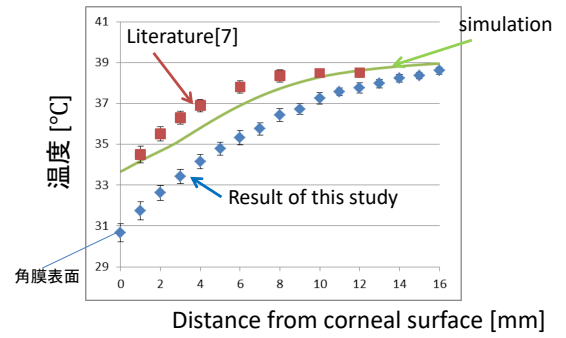
- 計算コード全体で約50倍程度の高速化を達成。

■ 6分間の時間追跡: 7日程度→3時間@5百万ボクセル

- 計算精度の向上: 収束判定→10⁻⁶→10⁻¹⁰

■ 効率的な収束が得られるため収束条件を厳しくできる。

Comparison of temperature



-Simulation result is consistent with the distribution of literature [7].
 -Our measurement indicates relatively low temperature values.
 -It needs to consider this inconsistency.

[7]F. Robert et al., "Temperature measurements in the eye," 1977.

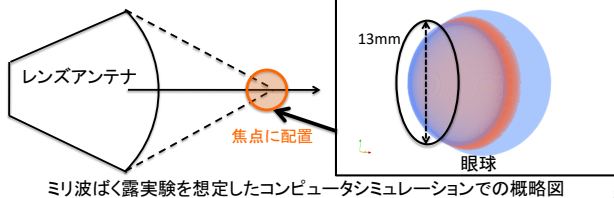
電磁界解析の計算条件



- ・レンズアンテナ使用
- ・焦点距離は135mm
- ・焦点付近に角膜表面中央を配置

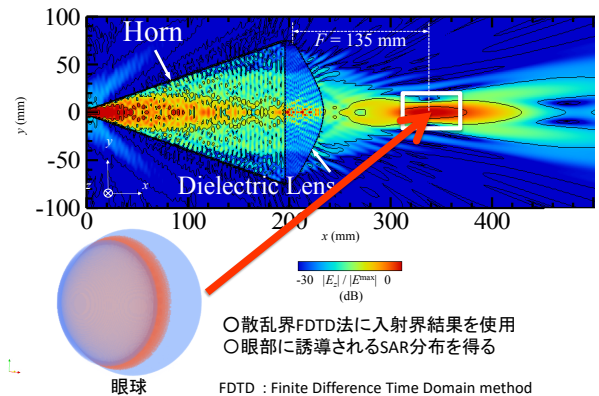
入射電力密度
 下図の直径13mmの円の面積上の電力の空間平均

レンズアンテナを用いたミリ波ばく露実験



ミリ波ばく露実験を想定したコンピュータシミュレーションでの概略図

レンズアンテナの放射界と眼部の配置

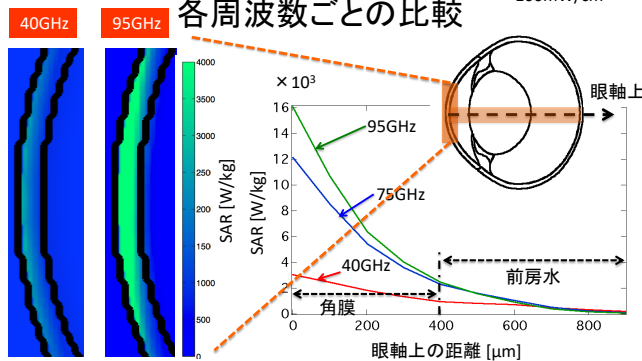


- 散乱界FDTD法に入射界結果を使用
- 眼部に誘導されるSAR分布を得る

FDTD : Finite Difference Time Domain method

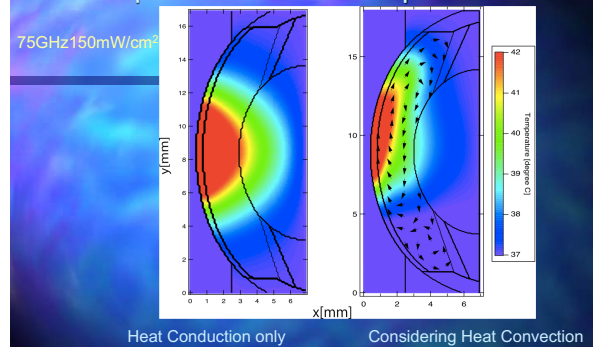
結果: SAR分布※ 各周波数ごとの比較

※入射電力密度
100mW/cm²



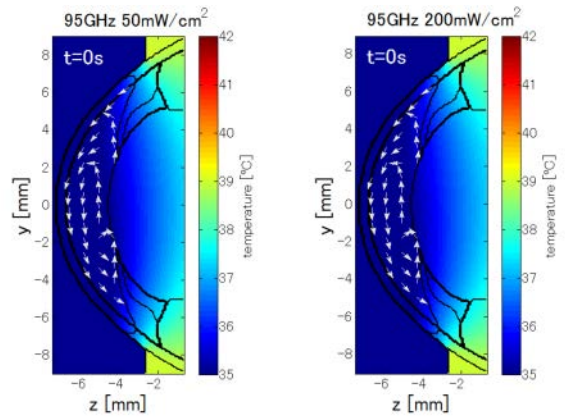
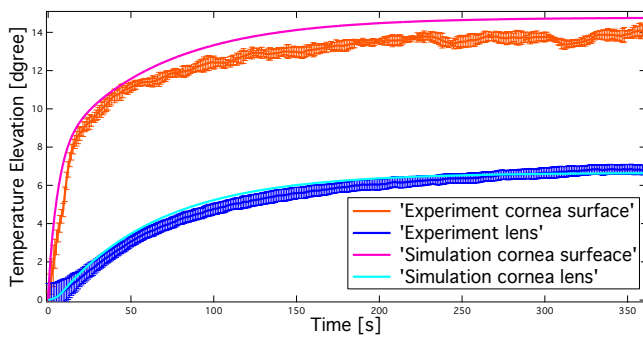
- 周波数: 40GHz→反射: 大、周波数: 95GHz→反射: 小
- 周波数が高くなるにつれて、SAR値はおおきくなる

Comparison of heat transport mechanism

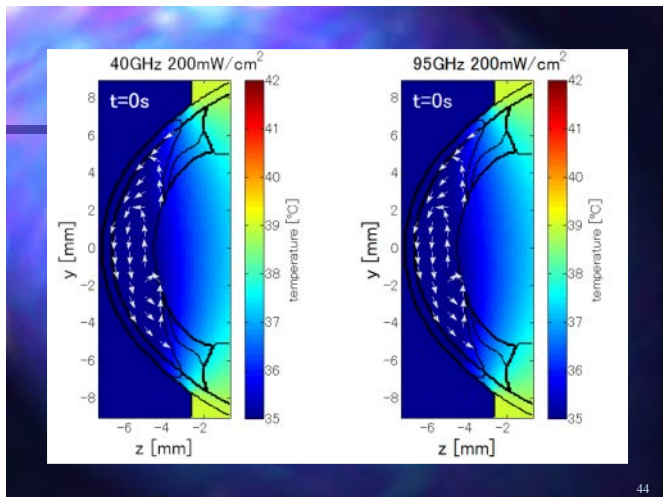


- Temperature distribution is highly influenced by aqueous humor flow.

75GHz, 300mW/cm²



43



44

まとめ

- ミリ波帯電磁界ばく露による眼障害の閾値推定のための【電磁界-熱輸送】連成解析システムの開発を行った。
- 連成解析システムのGPUによる超並列化実装の検討
 - 散乱界FDTDに関してGPUによる高速化の検討を行った。
 - 熱輸送解析に関してSMAC法の全陰解法化とGPUを用いたコード改善を行った。
- 実用的な時間で精密に眼障害閾値を推定できるシステムを構築した。
 - 現実の現象を比較的妥当に予測出来るシステムであることを検証できた。

45

ご清聴ありがとうございました

y_suzuki@tmu.ac.jp

46

非同期電気光学検出技術による準ミリ波・ミリ波の放射パターン計測

鎌田 淳平[†] 堀尾 和輝[†] 内田 裕久[‡] 東條 誠[#] 及川 陽一[#] 宮地 邦男[#] 久武信太郎[†]

[†] 岐阜大学工学部 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

[‡] アークレイ株式会社 〒602-0008 京都市上京区岩栖院町 59

[#] シンクランド株式会社 〒230-0046 神奈川県横浜市鶴見区小野町 75-1

E-mail: [†] hisatake@gifu-u.ac.jp

[‡] uchidah@arkray.co.jp

[#] {tojo, yoikawa, miyaji}@think-lands.com

あらまし 非同期電気光学検出技術を用いて、準ミリ波・ミリ波の放射パターンを計測し、シミュレータで解析した放射パターンと比較を行った。ホーンアンテナの前に誘電体オブジェクト置いた場合のミリ波(77 GHz)の放射パターンにおいて、主ローブにおける 3 dB ビーム幅は計測では 4.4 度、シミュレータでは 10.6 度であった。また、光周波数トラッキング技術を用いて、車載レーダに用いられる準ミリ波帯 FMCW 信号(24 GHz ± 80 MHz)を計測した。計測した FMCW 信号(24 GHz ± 80 MHz)の放射パターンは帯域内の CW 信号の時間平均であり、CW(24 GHz)信号の放射パターンとの乖離は、ホーンアンテナの前に誘電体で構成される自動車のエンブレムを置いたときに顕著となった。

キーワード 非同期電気光学検出技術, 電磁界シミュレータ, FMCW 信号

Radiation pattern inspection of quasi-millimeter wave and millimeter wave by asynchronous electro-optic detection technique

Junpei KAMADA[†] Kazuki HORIO[†] Hirohisa UCHIDA[‡] Makoto TOJYO[#]

Youichi YOIKAWA[#] Kunio MIYAJI[#] and Shintaro HISATAKE[†]

[†] Electronic and Computer Engineering, [Gifu University](#) 1-1 [Yanagido](#), [Gifu](#) 501-1193, Japan

[‡] [Arkray Inc.](#), Kyoto 602-0008, Japan

[#] Think-Lands Co., Ltd., Yokohama 230-0046, Japan

E-mail: [†] hisatake@gifu-u.ac.jp

[‡] uchidah@arkray.co.jp

[#] {tojo, yoikawa, miyaji}@think-lands.com

Abstract We measured the radiation patterns of quasi-millimeter waves and millimeter waves using asynchronous electro-optic detection technique. We compare it with the radiation pattern analyzed by the CST Microwave Studio (simulator). When the dielectric object was placed in front of the horn antenna, the 3 dB beam width of the main lobe in the millimeter wave (77 GHz) radiation pattern was 4.4 degrees in the measurement and 10.6 degrees in the simulation. In addition, the quasi millimeter wave FMCW signal (24 GHz ± 80 MHz) was measured using optical frequency tracking technique. The radiation pattern of the measured FMCW signal (24 GHz ± 80 MHz) is the time average of the CW signal within the frequency band. The deviation between the radiation pattern of the CW (24 GHz) signal and the radiation pattern of the FMCW signal (24 GHz ± 80 MHz) becomes remarkable when an automobile emblem composed of a dielectric was placed in front of the horn antenna.

Keyword Asynchronous electro-optic detection technique, Electromagnetic field simulator, FMCWsignal

非同期電気光学検出技術による 準ミリ波・ミリ波の放射パターン計測

アウトライン

- ▶はじめに
 - 自動運転システムの普及と問題
 - 自動運転システムに用いられる準ミリ波・ミリ波レーダ
- ▶実験結果
 - シミュレーションと計測の放射パターンの比較
 - FMCW信号とCW信号の放射パターンの比較
- ▶まとめ

自動運転システムの普及と問題

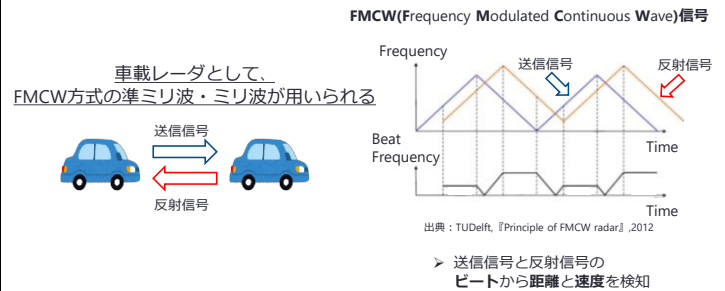
レベル	概要	安全運転に係る 監督・対応主体
レベル1 運転支援	システムが前後（アクセル やブレーキ）、左右（ハンドル 操作）のいずれかの運転制御 に係る監督・対応を行う	運転者
レベル2 部分運転 自動化	システムが前後（アクセル やブレーキ）、左右（ハンド ル操作）の両方の運転制御 に係る監督・対応を行う	運転者
レベル3 条件付き 運転自動化	限定領域内で、システム が全ての運転を掌握し、シス テムで運転困難な場合は、 運転者が対応する	システム (一部運転者)
レベル4 高度運転 自動化	限定領域内で、システム が全ての運転を掌握する	システム
レベル5 完全運転 自動化	領域は限定されず、シス テムが全ての運転を掌握する	システム

車載レーダの誤検知による
事故が起きている

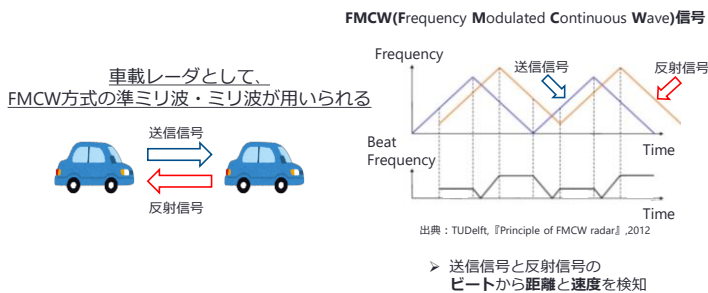


社会的問題となっている

自動運転システムで用いられる車載レーダ



自動運転システムで用いられる車載レーダ



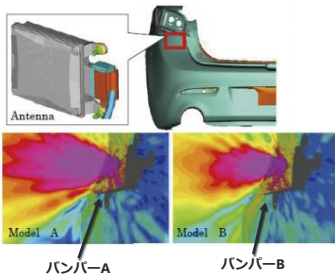
2つの検証

このようなバックグラウンドから

以下の検証を行った

- ▶ 車両部品を考慮した時、シミュレータと計測は一致するのか
- ▶ FMCW信号とCW信号の放射パターンはどれほど一致するのか

ミリ波・準ミリ波車載レーダの放射特性



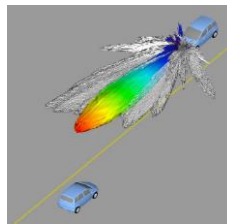
車両部品によって、
レーダの放射特性が依存

→ 車両部品の影響を
考慮した設計が必要

https://www.esi-group.com/jp/company/customer_successes/virtual-environment-mazda1

電磁界シミュレータ

電磁界シミュレータはレーダ設計には欠かせないツールである
しかし・・・



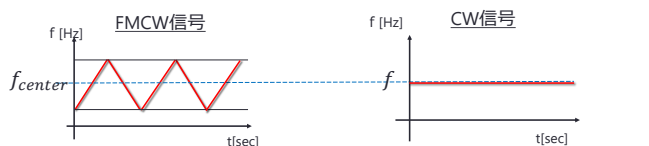
バンパーなどの誘電体車両部品に依存する
放射特性を正確に解析できているのか



▶ 誘電体オブジェクトを作製し、**実計測**と
シミュレーションの放射パターンを比較

アンシスジャパン、『ミリ波レーダ向け最新シミュレーション技術』
アンシスジャパン、2016

FMCW信号とCW信号の放射パターン比較



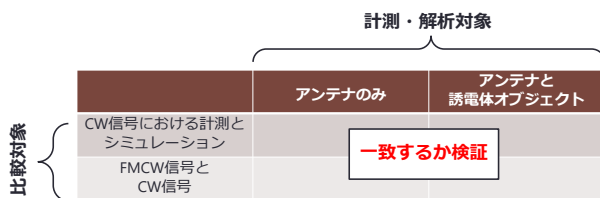
実際に車載レーダに用いられる

レーダ設計時にシミュレーションされる

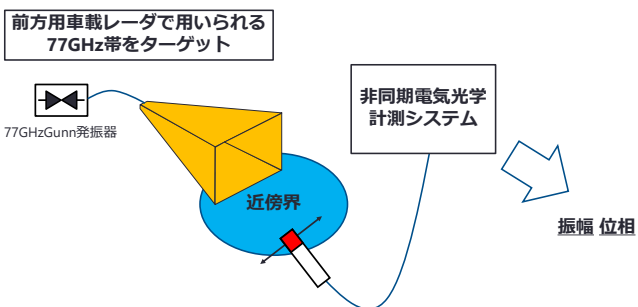
$$f_{center} = f$$

▶ FMCW信号の放射パターンとCW信号の放射パターンはどれほど一致するのか

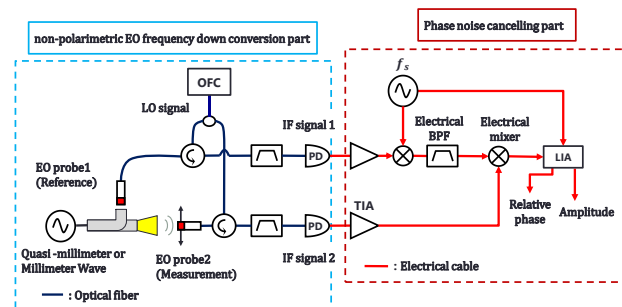
今回行った検証



77GHz帯放射パターン計測

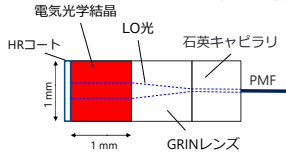


非同期電気光学計測システム



EOセンサの構成

電気光学結晶に印加される電界により
光LO信号が位相変調される



HR: High-reflection
LO: Local Oscillator
GRIN: Gradient index
PMF: Polarization maintaining fiber

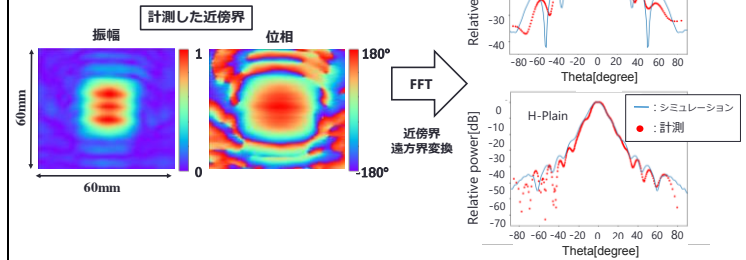
EOセンサの概念図

EOセンサは全て誘電体で構成されている
→アンテナ近傍においても低擾乱な測定が可能

電磁界シミュレータと実計測の一致

誘電体オブジェクトなしのホーンアンテナの放射パターン

→シミュレータと計測はよく一致する



シミュレーションモデルと実計測モデル

誘電体オブジェクトを置いた時、シミュレータと計測は一致するのか

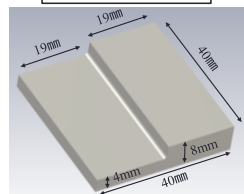
前方用車載レーダで用いられる77GHzをターゲット

波長 $\lambda(77\text{GHz}) = 3.89\text{mm}$

誘電体オブジェクトを製作し、
ホーンアンテナの前に設置して解析

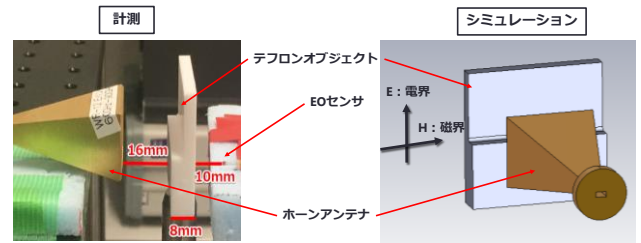
シミュレータで用いたオブジェクトのCADから
CNCフライスを用いてオブジェクトを製作

シミュレータと全く同じ環境で計測



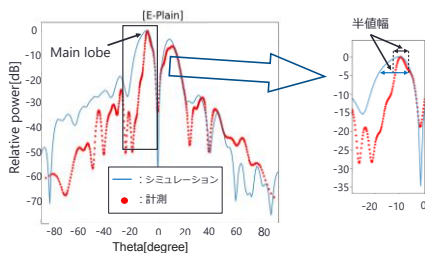
製作した誘電体(テフロン)オブジェクト
※表面粗さ: 3µm

誘電体オブジェクトをアンテナ前に置く



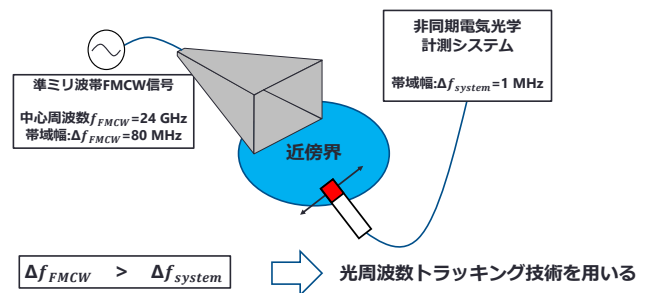
放射パターン(E-Plane)の比較

誘電体オブジェクトをアンテナ前に置く
→実測とシミュレーションが一致しない

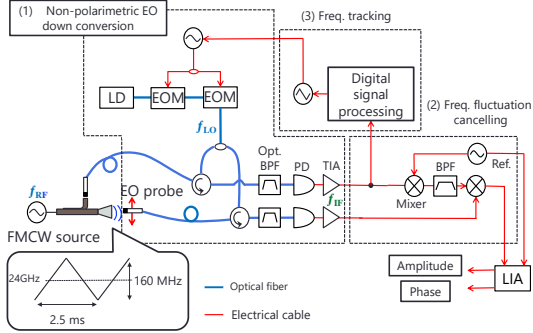


	半値幅 [degree]
シミュレーション	10.7
計測	4.4

検証② FMCW信号の放射パターン計測



光周波数トラッキング技術によるFMCW信号計測系

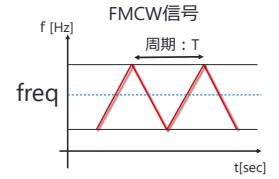


FMCW信号の測定

$$T_c[\text{sec}] > T[\text{sec}]$$

$$T_c = n \times T \quad (n \gg 1)$$

FMCW信号の変調周期: $T[\text{sec}]$
 ロックインアンプの待機数: $T_c[\text{sec}]$



本計測システムで検出される電界は
 FMCW信号の n 周期における時間平均値である

FMCW・CW信号の放射パターン計測

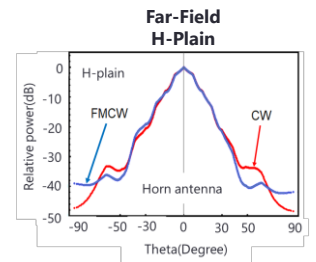
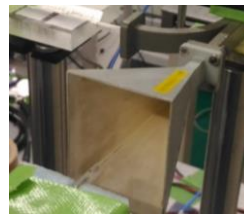
FMCW信号(24GHz±80MHz)と
 CW信号(24GHz)のアンテナ近傍界を計測

- ▶ ホーンアンテナの放射パターン
- ▶ ホーンアンテナ直後にエンブレムを挿入した時の放射パターン

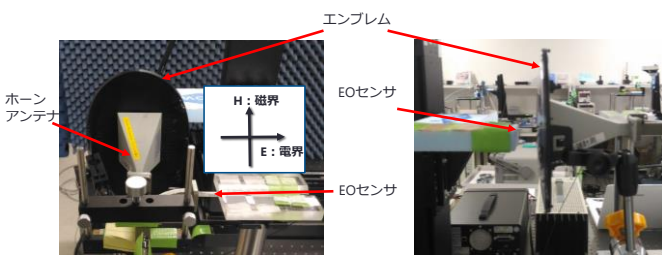
↓
 Far-Fieldを比較する

ホーンアンテナの放射パターン

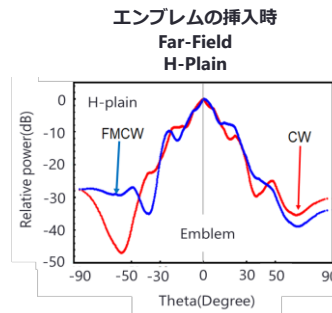
FMCW信号の放射パターン ≒ CW信号の放射パターン



エンブレムの挿入



エンブレムの挿入時の放射パターン

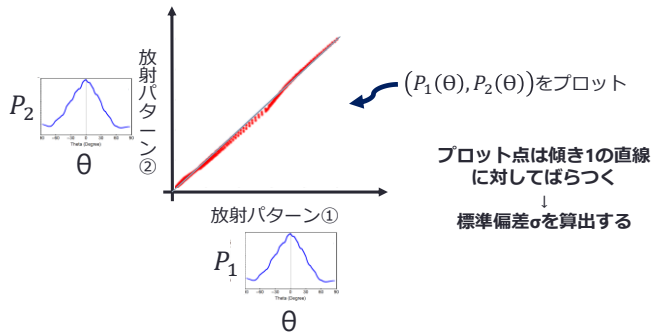


FMCW信号とCW信号の
 放射パターンに乖離がみられる



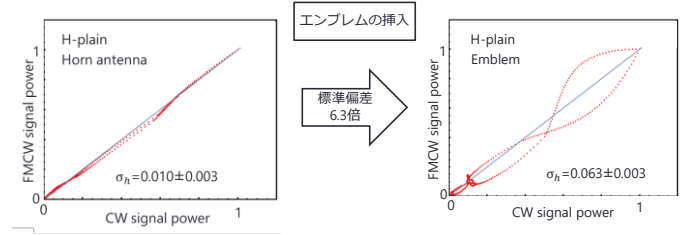
エンブレム挿入による放射パターンの
 乖離の定量的評価を行う

放射パターンの不一致度評価①



放射パターンの不一致度評価②

エンブレムの挿入より、放射パターンの標準偏差は増加する



まとめ

誘電体オブジェクトをホーンアンテナの前に置き、シミュレーションと計測の放射パターンの比較を行った

Main-lobeの半値幅に**倍以上**の差が生じた

計測したFMCW信号とCW信号の比較を行った

伝播空間に何も無い時にはよく一致していた。しかし、エンブレムを挿入する事で放射パターンの乖離が顕著になった

	アンテナのみ	アンテナと誘電体オブジェクト
CW信号における計測とシミュレーション	よく一致	差が顕著になる
FMCW信号とCW信号	よく一致	差が顕著になる

環境測定を目的とした 磁気光学センサの基礎特性

Basic Measurement Characteristics of Magneto-Optical Sensors
For Environmental Measurement

加藤 佳仁(鉄道総合技術研究所)
鈴木 敬久(首都大学東京)

1

発表の内容

1. 研究の背景・目的
2. 磁気光学センサの原理
3. 試験方法・結果
4. 考察・今後の予定



Railway Technical Research Institute 2

研究の背景

○低周波数帯(DC~100kHz)、中間周波数帯(300Hz~10MHz)の
磁界を利用した機器類の開発(非接触給電等)

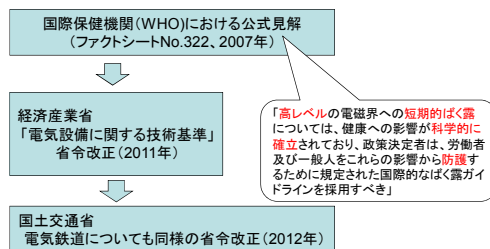
○これらの周波数帯の磁界に対する規制、規格の策定

→ 国際的な関心



Railway Technical Research Institute 3

国内の低周波磁界に対する規制、規格の近年の動き



→ 鉄道の地上電力設備も対象に

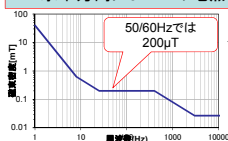


Railway Technical Research Institute 4

鉄道地上電力設備に対する規制

【地上設備・商用周波数に対する規制化】
2012年8月1日 国土交通省令 第69号
「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の一部を改正する省令」
第51条の2 (電磁誘導作用による人の健康に及ぼす影響の防止)

一般公衆が立ち入らないように施設した柵等から
水平方向に0.2 mの地点で、200 μ T(商用周波数)



Railway Technical Research Institute 5

低周波磁界の測定に関する主な国際規格等

名称	種別	内容	発行年
IEC 61786	「水平規格」	人体ばく露に関する低周波磁界及び電界の測定 — 測定器の特別要求事項及び測定の手引き	1998年
IEC 62233	「垂直規格」	家庭用電気機器及び類似機器からの 人体ばく露に関する電磁界の測定方法	2005年
IEC 62110		交流電力システムから発生する磁界及び電界の強さ — 公衆の人体ばく露を考慮した測定手順	2009年
IEC/TS 62597		鉄道施設の磁界の測定に関する技術仕様	2011年

鉄道に関しても2011年に技術仕様が発行



Railway Technical Research Institute 6

低周波磁界の影響

周辺への影響

生体への影響 急性影響 (短期的な影響)

- ・神経刺激作用
- ・磁気閃光 等

機器への影響

- ・磁気記録装置
- ・ペースメーカー 等

近年の規制、規格化は生体への急性影響を防止するためのものが主体

→ 環境磁界の測定評価の必要性



主な磁界センサの特性

センサ	特徴
ホール素子	<ul style="list-style-type: none"> ・大きな直流磁界の測定が可能 ・直流磁界と極低周波帯を除く交流磁界との同時測定が難しい(モードの切り替え等が必要) ・温度ドリフトの影響が大きい
サーチコイル	<ul style="list-style-type: none"> ・交流磁界の精密測定が可能 ・直流磁界の測定は不可
フラックスゲート	<ul style="list-style-type: none"> ・交流磁界とも測定可能 ・測定強度は最大でも数mT

・現状ではセンサの使い分けが必要

→ 直流~100kHzを10mTのオーダーまで測定できるセンサはない



本研究の目的

・環境磁界測定を用途とし、**広帯域**での測定が可能であると考えられる**ファラデー効果**を利用する**磁気光学センサ**について、数百kHz程度までの**変動磁界検出の特性**を把握する。



磁界センサの検討

○**環境磁界測定**を主な用途とする

○近年の電気機器類の開発の進展より、概ね**~数百kHz程度**を対象周波数とする

○このような機器類から発生する磁界は、機器の近傍で局所的に強磁界となる可能性が考えられるため、**空間分解能**が高いものが望ましい



磁界センサの例



サーチコイル型測定器
(Narda ELT-400)

交流磁界の環境測定等に広く使用されている
機器近傍での測定には不向きか



ファラデー効果を利用した磁気光学センサ

○原理的に**広帯域**(周波数・ダイナミックレンジともに)での活用の可能性

○センササイズの**微小化**が可能なので空間分解能を高くできる



ファラデー効果

直線偏光 → 偏光面 → ファラデー素子 → 偏光面

⇒ファラデー素子により磁場中では偏光面が回転する性質を利用
 $\theta_F = V B l$
 θ_F [rad]: ファラデー回転角
 V [rad/(T·m)]: 物質固有の定数(ヴェルデ定数)、 B [T]: 磁束密度、
 l [m]: ファラデー素子の厚さ

→ この性質を利用したセンサの活用

Railway Technical Research Institute 13

本測定に用いた磁気光学センサ

mmオーダーサイズの結晶を利用
→空間分解能が高い

情報の伝達に光ファイバーケーブルを使用
→測定磁界への擾乱が少ない

森田テック(株)製

⇒これまでほとんど実績のない低周波及び中間周波数帯磁界で測定試験を実施

Railway Technical Research Institute 14

本測定に用いた磁気光学センサ

Single Mode Fiber
Coupler
Faraday素子 (磁気光学結晶)
HR coat

↑磁束

反射材を利用することによりコンパクト+光ファイバー1本でセンシングを実現

⇒これまでほとんど実績のない500Hz以下の低周波磁界で測定試験を実施

Railway Technical Research Institute 15

測定システム

光学系: レーザー光源 → 偏光子 → 検光子 → 光アンプ

検出系: フォトディテクタ → データロガー

磁気発生源 → 磁気光学センサ

光学系で出力される光の強度を検出系で電圧に変換して測定

Railway Technical Research Institute 16

測定システムの主な装置

機器	製品名
レーザー光源	Alnair Labs TLG-200
フォトディテクタ	Thorlabs DET01CFC
光アンプ	FITEL
データロガー(メモリハイコーダ)	HIOKI 8847

装置類の主な仕様

項目	仕様等
レーザー出力	20~25mW
レーザー波長	1550nm
センサ結晶	磁気光学結晶(ビスマス置換型磁性ガーネット結晶)
結晶サイズ	0.3×0.3×0.3mm

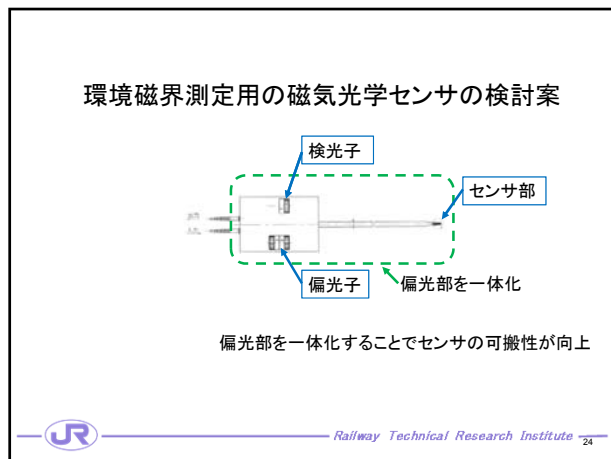
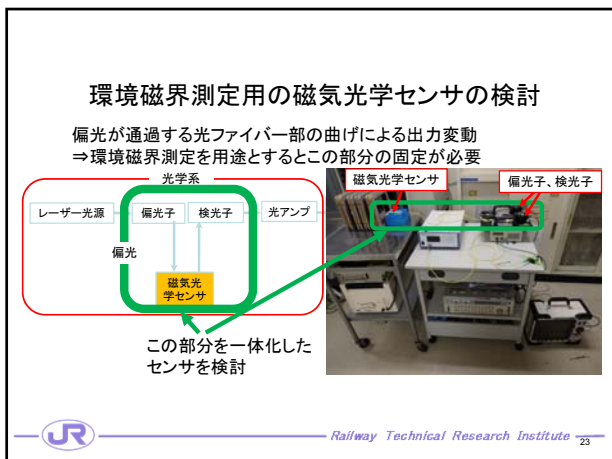
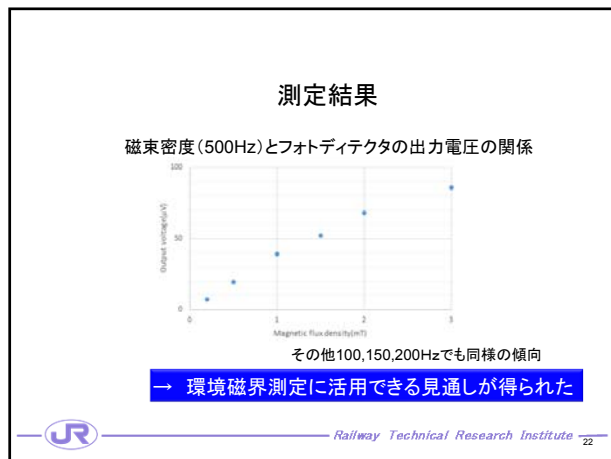
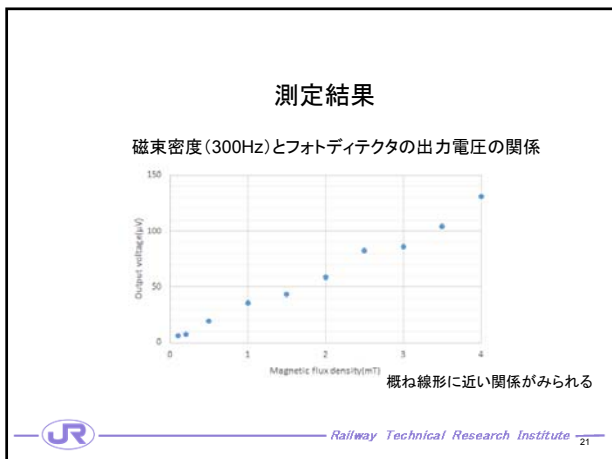
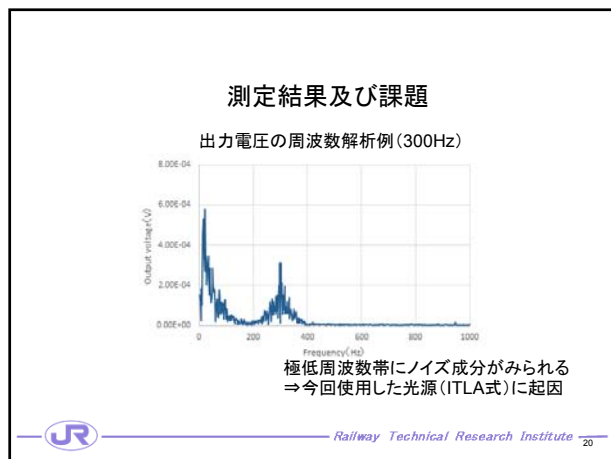
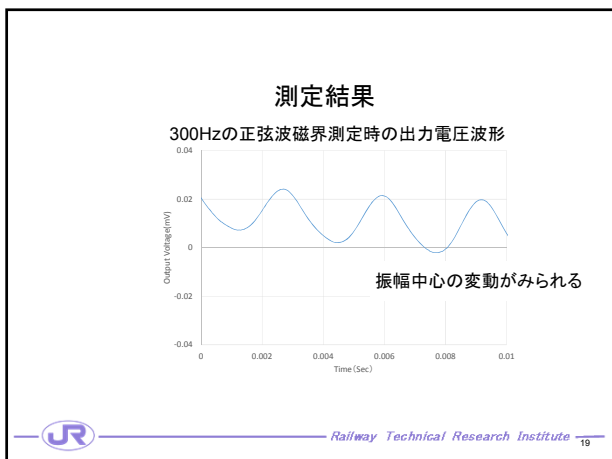
Railway Technical Research Institute 17

測定風景

磁気発生源, レーザー光源, 磁気光学センサ, 偏光子、検光子, 光アンプ, フォトディテクタ, データロガー(メモリハイコーダ)

→ 印加磁束密度と出力電圧との関係を測定

Railway Technical Research Institute 18



まとめ

- ・低周波、中間周波数帯の磁界測定を目的とした磁気光学センサの基礎測定試験を実施した。
- ・100～500Hzの磁界の印加磁束密度とセンサ出力に概ね線形に近い関係がみられ、今後の環境磁界測定への活用への見通しを得た。
- ・環境磁界測定で活用するための課題の抽出とその解決法の検討を引き続き実施する。

謝辞

今回の測定試験等を実施するにあたっては、森田テック株式会社殿に多大なるご支援をいただき、深く御礼申し上げます。
また、本研究の一部は総務省の提案公募型研究費を受けて実施しました。



光応用電磁界計測（PEM）特別研究専門委員会について

電子情報通信学会 光応用電磁界計測（PEM）特別研究専門委員会は、平成 24 年 4 月に発足した新しい研究専門委員会です。

PEM 研は、急速に進化・変貌を遂げつつある電磁界環境を正確に評価・計測するために、電磁界と光・物質との多彩な応答を利用した、新しい電磁界計測技術を追究することを目標としています。アンテナや電磁両立性等の電磁界計測分野と光センサ・光デバイス等の応用光学分野の専門家がコアメンバーです。対象とする電磁界は、アンテナや高周波回路だけでなく、プラズマ電磁界、宇宙到来電磁波など、人工および自然発生電磁界全般を含みます。また、それらと関連性の深い各種の現象についても議論したいと考えています。光・電磁界・マイクロ波・アンテナ等の様々な最先端研究分野を有機的かつ横断的に結びつけた新しい研究領域を開拓して、その成果を社会へ還元することを目指しています。

<委員名簿>

委員長	水野 麻弥	情報通信研究機構
副委員長	鈴木 敬久	首都大学東京
幹事（研究会運営）	久武 信太郎	岐阜大学
幹事（財務）	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
幹事	佐々木 愛一郎	近畿大学
幹事補佐	チャカロタイ ジェドヴィスノブ	情報通信研究機構
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	市川 潤一郎	住友大阪セメント株式会社
	今莊 義弘	スタック電子株式会社
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	佐藤 源之	東北大学
	余 元峰	産業技術総合研究所
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	バイテックグローバルエレクトロニクス株式会社
	田上 周路	高知工科大学
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	土屋 明久	神奈川県立産業技術総合研究所
	鳥羽 良和	株式会社精工技研
	羽賀 望	群馬大学
	日景 隆	北海道大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	村田 博司	三重大学
	陳 強	東北大学

PEM

☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページを作りました。
PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報
発信を進める予定です。
フォロー、「いいね！」をよろしくお願いします。



☆ PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しました。

このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための
様々な情報発信に活用する予定です。現在、チュート
リアル記事等を公開しています。

URL : <http://pem.main.jp/>

