

ばく露評価における電磁界測定

大西 輝夫

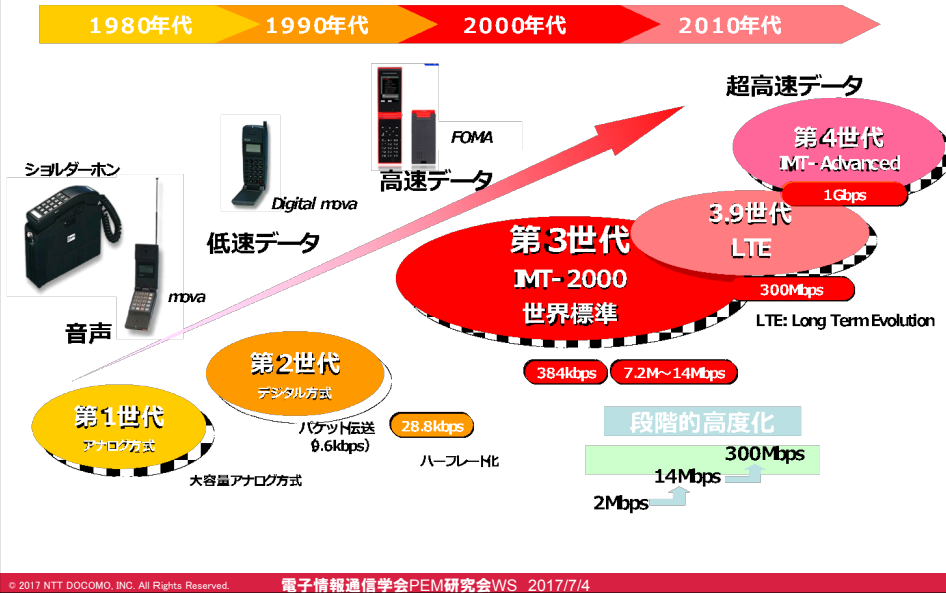
株式会社NTTドコモ 先進技術研究所

概要

- 背景
 - 無線技術の進化と最近のトレンド
 - 電波と人体影響・電波防護指針
 - ばく露測定例(SAR測定, 基地局周辺測定)
- 光を用いたばく露評価
- 適用例
 - SAR測定
 - 基地局電界測定
- まとめ

携帯電話方式の変遷

携帯電話システムは継続的に発展し、「高速・大容量化」へと着実に進化



将来のサービスイメージ

全ての「もの」が無線でつながる社会を実現し、無線サービスの高度化、拡大だけでなく、ビッグデータを活用した新たな産業創出などを期待

全ての「もの」が無線でつながる

Multiple Personal Devices 人が複数の各種端末を持ち、意図されなところでも身近に端末が存在	Transportation (Car/Bus/Train) 通信モジュールが、車、電車等にデフォルト搭載。トラフィック情報、車のコンディション等を収集し、ビッグデータサービスに利用
Consumer Electronics 全ての家電が手持ちの端末から遠隔制御	Watch/Jewelry/Cloths ヒューマンインターフェースを搭載し、通常身につけているものでサービス提供
House 家のセキュリティ強化、家具、設備のリモート制御	Sensors M2Mの更なる普及、農場、家畜や工場等でも状況管理・制御のために利用拡大

無線サービスの拡張・多様化

Video Streaming 4K/8Kの普及、ディスプレイ機能の進化とともに紙のような媒体でも動画視聴可	New Types of Terminals/HI 新たな表示機能を持つ新端末の普及、触覚通信
Healthcare 遠隔医療、少子高齢化を考慮すると、重要なサービスになり得る	Education 場所、時間を問わずに各種教育が受けられるサービス
Cloud Computing ドコモクラウド クラウドサービスの更なる進展と普及、あらゆるサービスがモバイルパーナルクラウド化	Safety and Lifeline System 移動通信サービスはライフラインとして、安全、救命に寄与

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

ワイヤレス充電国内動向



Qi規格

用途	モバイルなど	モバイルなど	EV
方式	磁界結合	電界結合	磁界結合
伝送電力	100 W以下	100 W以下	最大7.7 kW
周波数	6.765 MHz ~ 6.795MHz	425 ~ 524 kHz	79 ~ 90 kHz
送受電距離	0 ~ 30 cm	0 ~ 1 cm	0 ~ 30 cm
標準化動向	<ul style="list-style-type: none"> ・情通審答申（2015年1月） ・ARIB規格（2015年7月）但し、50Wまで 	<ul style="list-style-type: none"> ・情通審答申（2015年1月） ・ARIB規格（2015年7月）但し、50Wまで 	<ul style="list-style-type: none"> ・情通審答申（2015年7月）
関連団体	AirFuel Alliance (旧A4WP)		



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

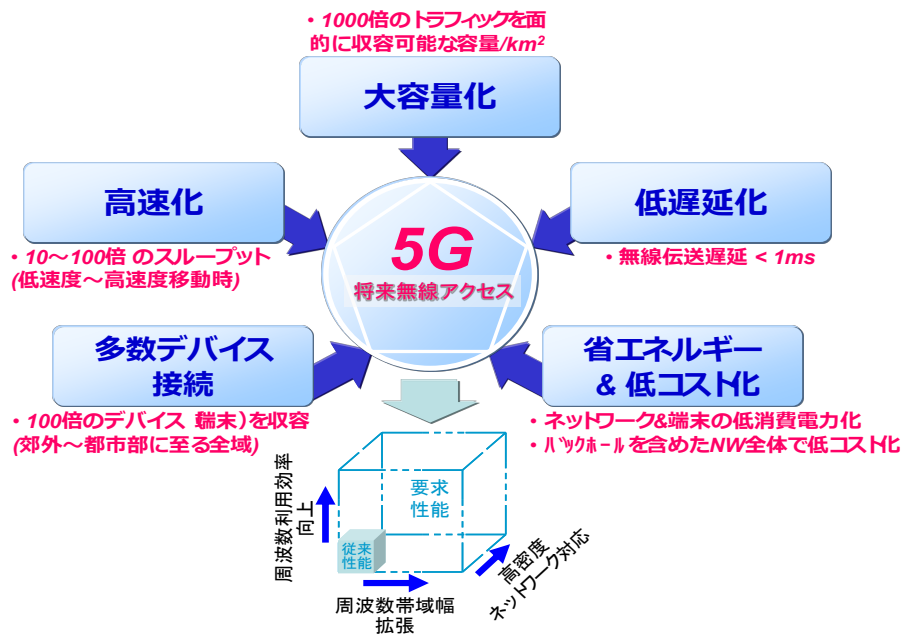
WPT業界団体(主に磁界結合)

団体名	WPC (磁界結合) (Wireless Power Consortium)	PMA (磁界結合) (Power Matters Alliance)	A4WP (磁界結合) (Alliance for Wireless Power) Rezence
設立年月	2008年12月	2012年3月	2012年5月
加盟団体数	200 (2014年2月)	109 (2014年2月)	135 (2015年5月)
周波数	100~200 kHz	約350 kHz	6.78 MHz
効率	70~90%	70~90%	50~70%
標準化動向	<ul style="list-style-type: none"> ・5W未満；標準化済み ・15W対応を発表（2015年6月） 		<ul style="list-style-type: none"> ・6.5W (Ver. 1.2) 送信は22W ・30W (Ver. 1.3) 途中
	2015年6月1日にA4WPと統合発表		
主要メンバ	Convenient Power, Fulton, LG, Panasonic, Philips, TI, Verizon	AT&T, Duracell Power Mat, Starbucks	Qualcomm, Samsung, Intel, Broadcom, Sony Mobile
商品化	<ul style="list-style-type: none"> ・ドコモおくとくだけ充電（3500か所設置） ・トヨタ ・イケア欧米にて家具に搭載 	<ul style="list-style-type: none"> ・Nokia / Samsung用ジャケット ・Starbucks, Delta Airport Loungeなどに設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・Gill Electronics社がFCC認証取得（2015年6月11日）

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

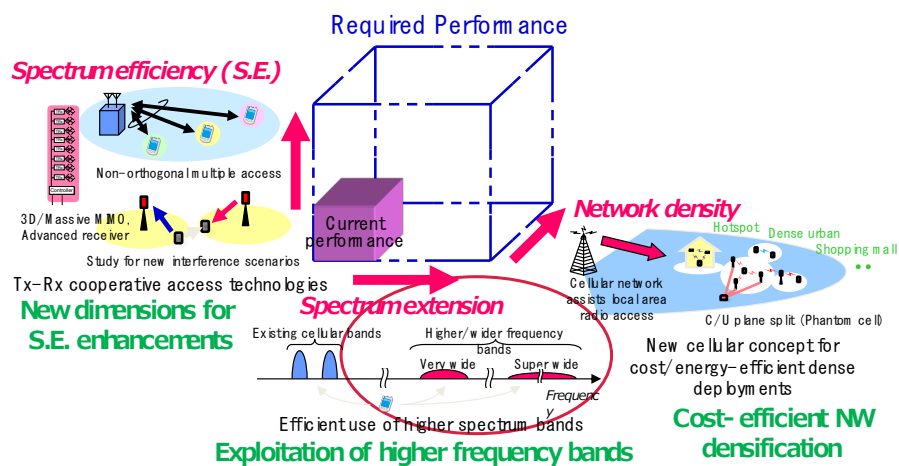
電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

将来無線アクセスに期待される性能



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved. 電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

要求される無線アクセス技術



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved. 電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

概要

■ 背景

- 無線技術の進化と最近のトレンド
- 電波と人体影響・電波防護指針
- ばく露測定例(SAR測定, 基地局周辺測定)

■ 光を用いたばく露評価

■ 適用例

- SAR測定
- 基地局電界測定

■ まとめ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

電波が生体に与える影響

電離放射線(Ionizing radiation)

エックス線やガンマ線などの電磁波で、細胞を構成する分子の原子結合を破壊することができるエネルギーを持つ

非電離放射線(Non-Ionizing radiation)

原子結合を破壊するには至らない程の電磁波で、この中には紫外線・可視光線・赤外線、携帯電話等の無線周波数界、超低周波数界等が含まれる

非電離放射線は、昇温させたり、組織内で電流を誘導するという生物学的な影響をもたらす可能性がある



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

電波防護指針の体系

管理指針 電磁界強度指針

補助指針

不均一/局所

接触電流

足首誘導電流

局所吸収指針

全身平均SAR

局所SAR

体内電界

接触電流

基礎指針を満たすための実測できる物理量(電界強度、磁界強度、電力密度、電流及び比吸収率)で示した、実際の評価に用いる指針

基礎指針

全身平均SAR

接触電流

局所SAR

局所(眼)入射電力

人体が電磁界にさらされるとき、人体に生じる各種の生体作用(体温上昇に伴う熱ストレス、高周波熱傷等)に基づいて、人体の安全性を評価するための指針

基本制限

体内電界

刺激作用に関する基本制限(10kHz-10MHz)

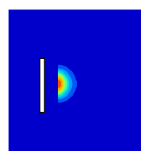
© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

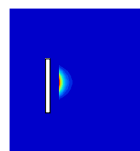
熱作用と比吸収率(SAR)

熱作用 → ばく露指標:
単位質量当りの組織の吸収電力
SAR: Specific Absorption Rate

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} = c \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad [W / kg]$$



熱



SAR

E: 組織内の電界 [V/m]
σ: 組織の導電率 [S/m]
ρ: 組織の密度 [kg/m³]
c: 比熱 [J/kg·°C]
T: 温度 [°C]
t: 時間 [sec]

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

局所吸収指針

日本の局所吸収指針(100 kHz - 6 GHz)

	管理環境	一般環境
全身平均SAR	0.4 W/kg	0.08 W/kg
局所SAR	任意の組織10 g当り 10 W/kg 20 W/kg(四肢)	任意の組織10 g当り 2 W/kg 4 W/kg(四肢)

10 g質量平均最大SARと最大温度上昇に比較的良い相関

10g平均 2 W/kg

ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)

IEEE C95.1(2006)

EU, 日本, オーストラリア等



10 g

1g平均 1.6 W/kg

IEEE C95.1(1999)

米国(FCC), カナダ, 韓国, ボリビア, インド(平成24年9月より)



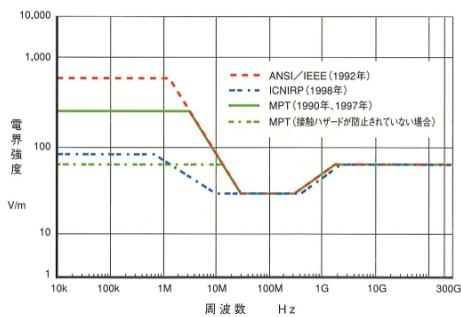
1 g

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

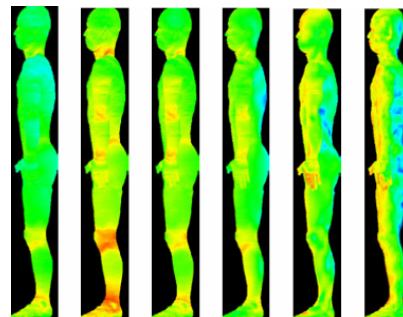
電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

電界強度指針

世界の電波防護指針の比較



ANSI/IEEE: 米国規格協会/米国電気電子技術者協会
ICNIRP: 国際非電離放射線防護委員会
MPT: 郵政省電気通信技術審議会



体表面のSAR分布計算例

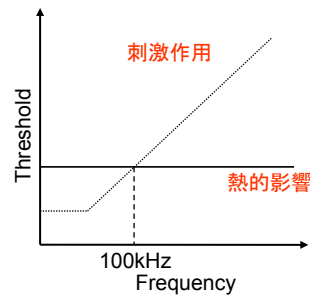
(提供((独)情報通信研究機構))

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

WPTに関する電波防護の考え方

- 人体近傍で使用
 - ~ 20 cm
- 送電電力が、50 Wなど携帯電話端末(0.2 W)などより大きい
- 周波数が低い
 - ~ 10 MHz
- 電波の生体影響
 - 刺激作用
 - 熱作用



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

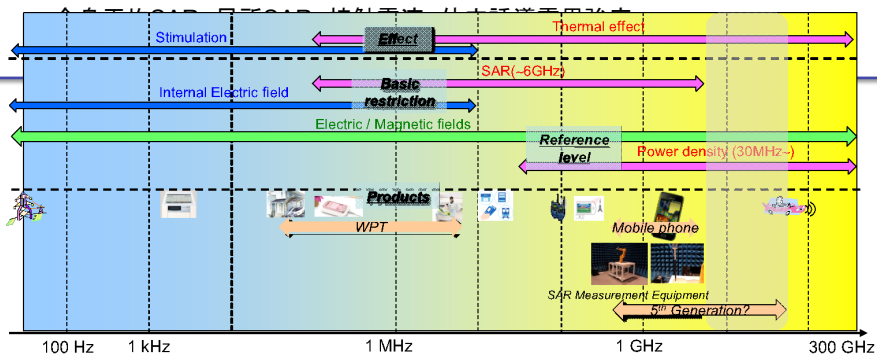
電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

管理指針

- 電磁界強度指針
 - 電磁界強度 (100 kHz~300 GHz)
 - 電力密度 (30 MHz~300 GHz)
- 補助指針

電磁界強度指針だけでは、防護指針を満たしていることを示すことができない場合に使用

 - 人体が電磁界に不均一又は局所的にさらされる場合の指針 (10kHz~300GHz)
 - 電磁放射源、金属物体から100 mm以上離れた人体の占める空間 (300MHz~)
- 局所吸収指針 (100kHz~6GHz)



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

概要

■ 背景

- 無線技術の進化と最近のトレンド
- 電波と人体影響・電波防護指針
- ばく露測定例(SAR測定, 基地局周辺測定)

■ 光を用いたばく露評価

■ 適用例

- SAR測定
- 基地局電界測定

■ まとめ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

ばく露評価

■ ばく露評価の必要性

- 市販／運用される無線機器／装置から発射される電波からの防護
 - 認証やリスクコミュニケーション
- 生体影響調査などでばく露量の把握
 - 細胞、動物、ボランティア実験や疫学調査など

■ ばく露評価法の特徴

- 安全性に直結
 - 機器認証
 - しきい値の決定
- 国際的に統一された測定法(特に認証)
 - Conservative(保守的)な結果を保証
 - 繰り返しの再現性、異なるサイトでの再現性
 - 測定手順が冗長気味
 - 不確かさの評価
- 波源近傍での測定

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

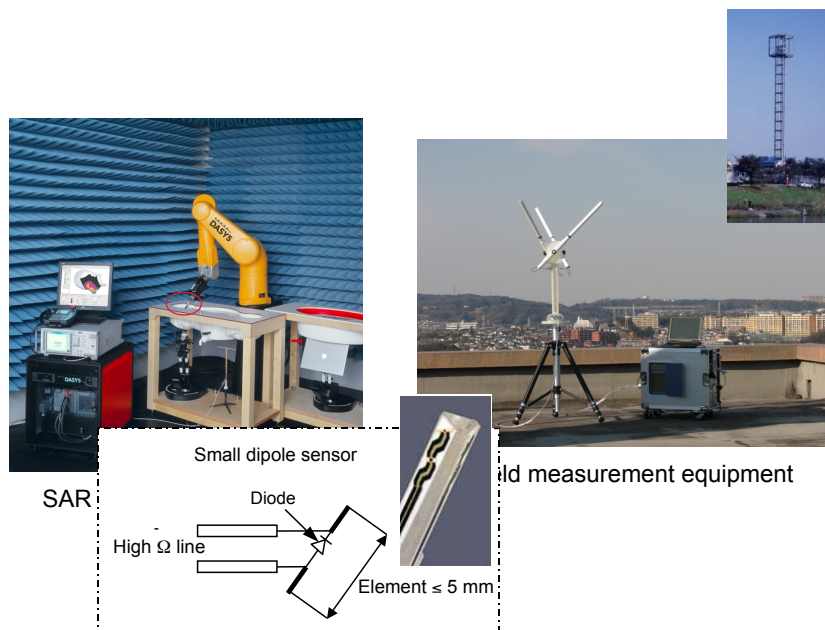
SAR測定法国際規格の例

	IEC 62209-1	IEC 62209-2
適用範囲	側頭部で使用される無線機器	人体に対し20 cm以内に近接して使用される無線機器
対象部位	側頭部	側頭部を除く、頭部・胴体・四肢
想定対象機器	主に携帯電話 	側頭部以外の携帯電話・無線通信機器 
周波数	300 MHz – 6 GHz	30 MHz – 6 GHz
ファントム形状	頭部を模擬 	平面形状 
設置方法	頬の位置、傾斜の位置	マニュアル記載の所定の使用状態（距離、向きなど）を模擬
その他		基本的な部分は62209-1と同じ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

SARおよび電界測定装置の例



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

概要

- 背景
 - 無線技術の進化と最近のトレンド
 - 電波と人体影響・電波防護指針
 - ばく露測定例(SAR測定, 基地局周辺測定)
- 光を用いたばく露評価
- 適用例
 - SAR測定
 - 基地局電界測定
- まとめ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

光技術に期待する理由

- 低侵襲性
 - 波源近傍の測定が可能
 - 電磁界との低結合性
- 広帯域性
 - 広帯域時間波形の取得
 - プローブなど交換不要
- 振幅・位相の測定
 - 3次元電磁界の再構築が可能
- 周波数識別性
 - 複数システム(周波数)同時送信に対応可能
- 2次元(3次元)分布の一括測定

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

光技術を用いたばく露測定法

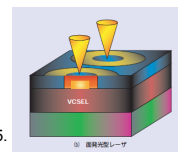
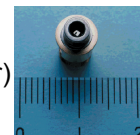
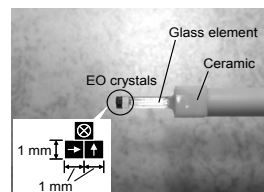
- 電界・磁界測定
 - 電気光学効果 / 磁気光学効果
 - レーザ駆動
- 温度測定
 - サーモグラフィ法
 - 光ファイバ温度計
 - 感温液晶マイクロカプセル

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

電界測定

- 電気光学効果 (EO結晶; CdTe, LiNbO₃など)
 - ポッケルス効果により結晶に入射される光の位相が変化
 - 微小 (mmオーダー)
 - 非金属 (検出部周辺)
 - 広帯域 (~THz)
- レーザ駆動
 - 電界 (電圧) による直接駆動
 - 検出部が必要だが、同軸ケーブル不要
 - 例えば、VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
 - mA以下のしきい値動作 (通常の約1/10)
 - 光出力の温度依存性小さい
 - モノリシックな共振器形成
 - 光ファイバに高効率で結合可能



出典: 天野, "850nm帯面発光型レーザー(VCSEL)の開発," NTT技術ジャーナル, 2003.5.

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

EO技術比較

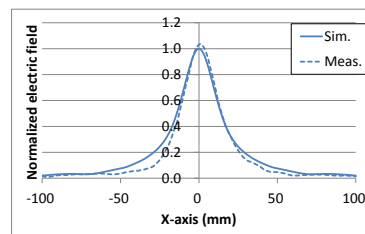
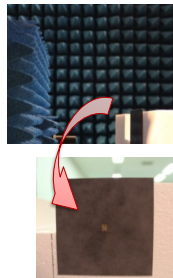
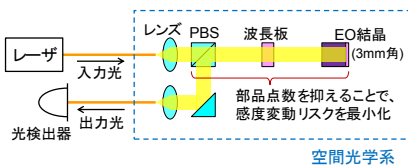
測定対象	電界	
方法	電気光学効果 (外部変調)	レーザ駆動 (直接変調)
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・低侵襲性※¹ ・振幅, 位相 ・広帯域※¹ ・周波数識別可 	<ul style="list-style-type: none"> ・検出部に金属 (同軸ケーブル不要) ・振幅, 位相 ・~6 GHz程度 ・周波数識別可 ・駆動用電力要 ・安定性 ・機器への組み込み
感度	<ul style="list-style-type: none"> ・0.1~1V/m ・1 mV/m※¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ・数+μV程度

※1: 検出部に微小アンテナを配置したものもあり、低侵襲性や広帯域特性は劣る

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

電界測定例(外部変調)

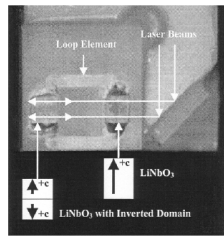


パッチアンテナ近傍電界測定例@15GHz

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

磁界測定



出典: Suzuki et al., IEEE MTT-53, no.2, 2005.

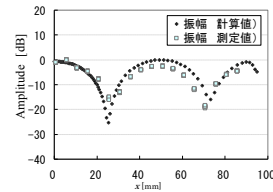
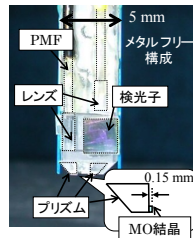
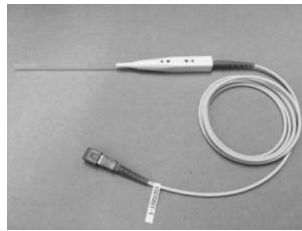
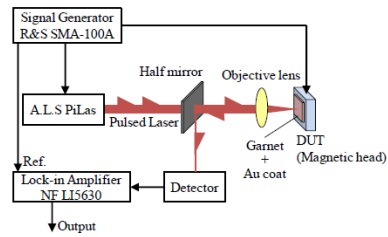


図6 MSL上電流振幅分布

出典: 中松他, 信学論J89-B, no.9, 2006.



出典: 上條他, IEICE PEM2015-08, 2016.



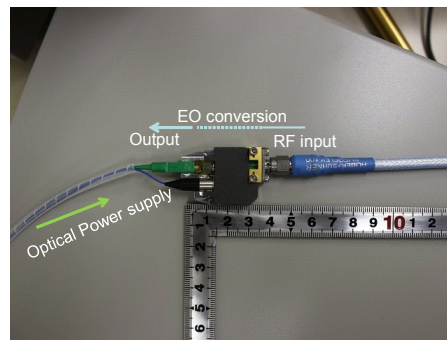
出典: 石山, IEICE PEM2015-07, 2016.

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

試作したEO変換器

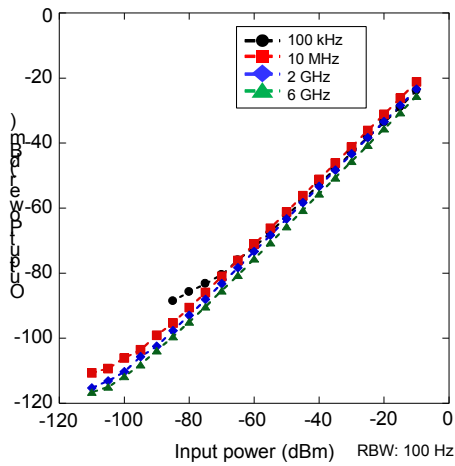
- EO変換部; 面発光レーザー
(VCSEL; Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
 - 波長 850 nm
- 光給電
 - 給電電流 20 mA
- 周波数範囲
 - 仕様 10 MHz ~ 6 GHz
- サイズ
 - 35 x 27 x 6 mm³



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

線形性と感度



入出力特性

検出感度

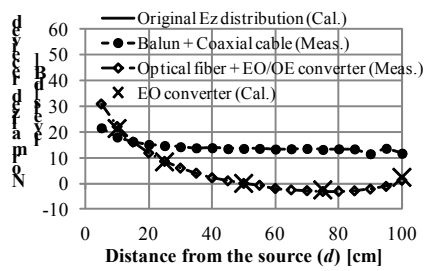
周波数	感度 (dBm)
100 kHz	-60
10 MHz	-75
2 GHz	-80
6 GHz	-75

±0.5 dB以内

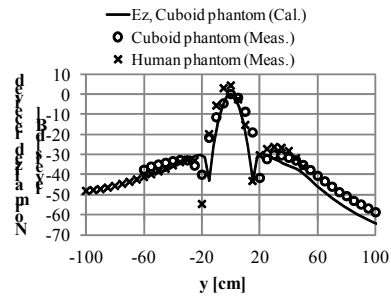
© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

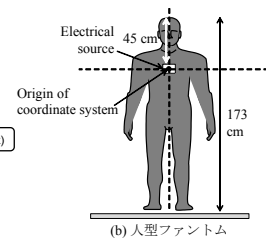
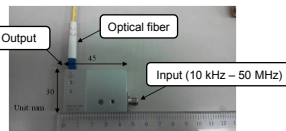
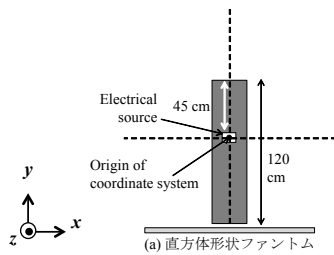
使用例(人体通信評価)



EO/OEと同軸ケーブルの比較



直方体/人型ファントムの結果

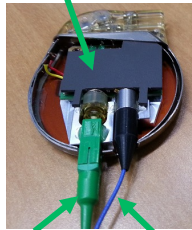


© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

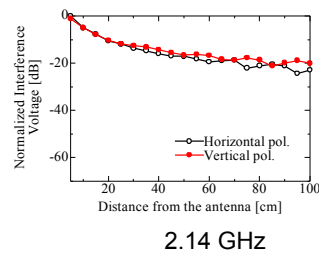
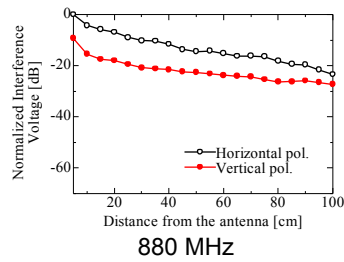
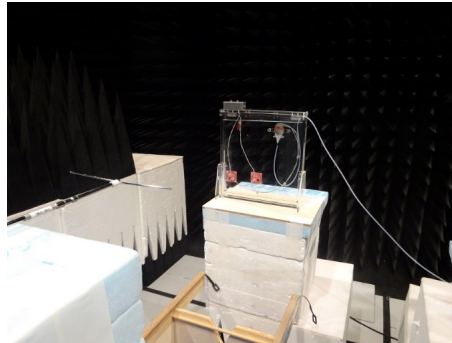
電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

使用例(ペースメーカー評価)

光給電型E/O変換器



光伝送用ケーブル 光給電用ケーブル



出典: 信学総大2016 B-4-7

温度測定

■ サーマグラフィ法

■ 赤外線カメラ

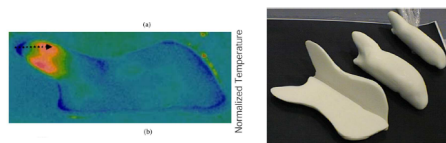
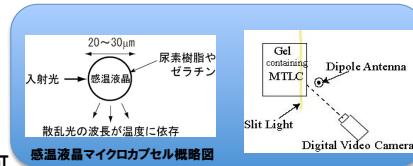
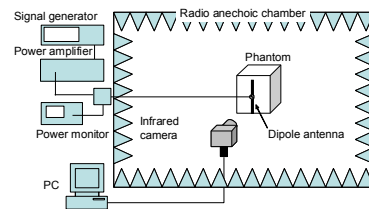
- 2次元分布
- 非干渉
- 比較的安価

■ 光ファイバ温度計

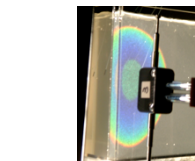
- 低侵襲
- 定点測定

■ 感温液晶マイクロカプセル

- 非接触・非侵襲での測定が可能
- データの再構成により3次元計測可



サーモグラフィ法による測定例: 文献[36]



感温液晶マイクロカプセルによる測定例 提供(首都大東京 鈴木准教授)

光ファイバ温度計による測定例

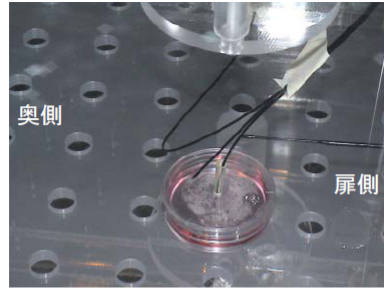
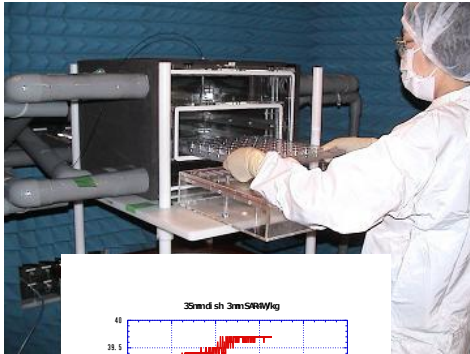
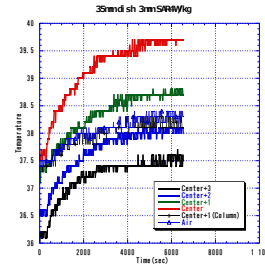
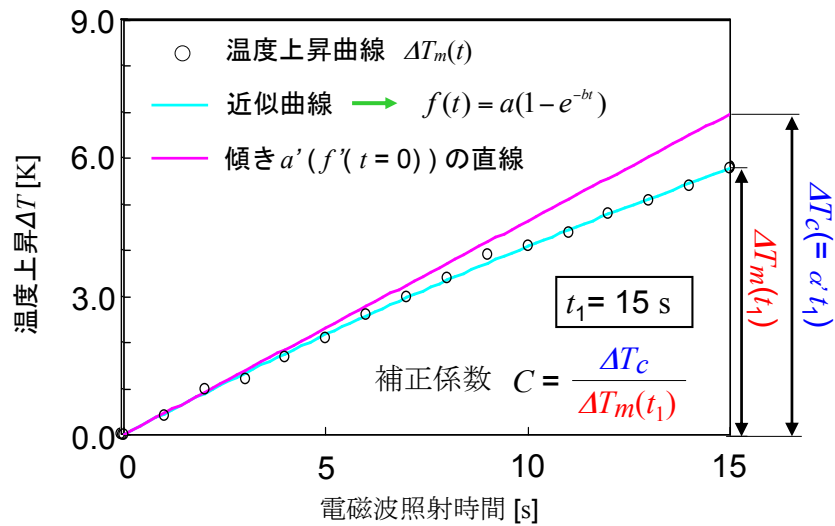


写真7.3.2-1 4号機内 35mm dishおよび光ファイバセンサー



熱移動の補正



文献[37]

電界・温度測定まとめ

測定対象	電界		温度	
	電気光学効果	レーザー駆動	サーモグラフィ法	感温液晶マイクロカプセル
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・低侵襲性※¹ ・広帯域※¹ ・振幅, 位相 ・周波数識別可 	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数識別可 ・検出部に金属(同軸ケーブル不要) ・安定性 	<ul style="list-style-type: none"> ・非侵襲性 ・2次元測定 ・周波数識別不可 ・熱の冷めによる影響 ・固体ファントム ・小型形状測定可 	<ul style="list-style-type: none"> ・非侵襲性 ・3次元測定可 ・周波数識別不可 ・熱による拡散を観測可 ・液体ファントム ・小型形状測定可
感度	<ul style="list-style-type: none"> ・0.1~1V/m ・1 mV/m※¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ・数+μV程度 	<ul style="list-style-type: none"> RF出力数十W必要(温度上昇が必要) 1秒間に1°C程度 	<ul style="list-style-type: none"> RF出力数十W必要(温度上昇が必要)
適用	SAR、電界(自由空間含む)実機	電界(自由空間含む)、アンテナ測定実機	SAR評価機	SAR評価機

※1: 検出部に微小アンテナを配置したものもあり、低侵襲性や広帯域特性は劣る

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

概要

■ 背景

- 無線技術の進化と最近のトレンド
- 電波と人体影響・電波防護指針
- ばく露測定例(SAR測定, 基地局周辺測定)

■ 光を用いたばく露評価

■ 適用例

- SAR測定
- 基地局電界測定

■ まとめ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

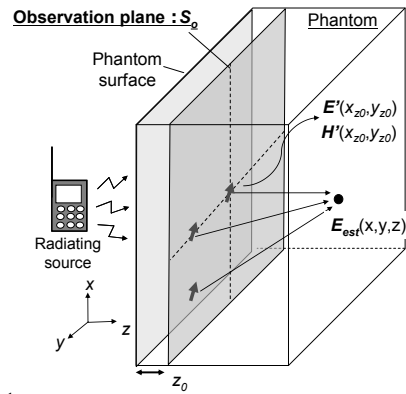
SAR 推定法

仮定

- 電磁波は観測面だけから入射
- ファントム内では反射なし



観測面での電磁界分布を基
にファントム内部を計算で推
定



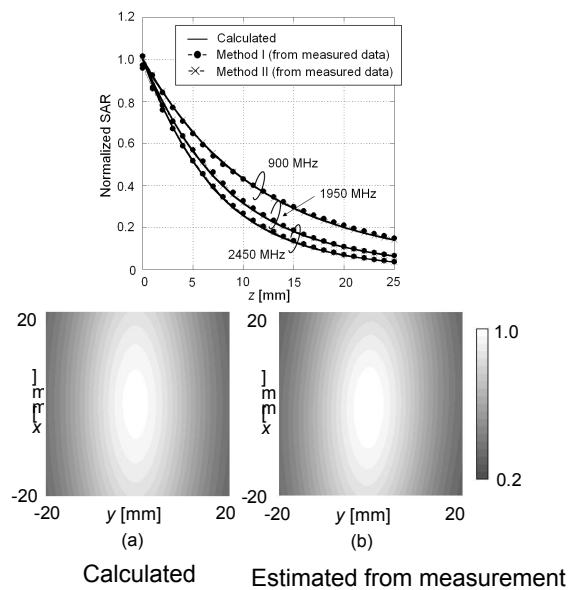
$$E_{est}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_S \{ (n \times E') \times \nabla' \phi \} dS$$

電界の位相成分必要

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

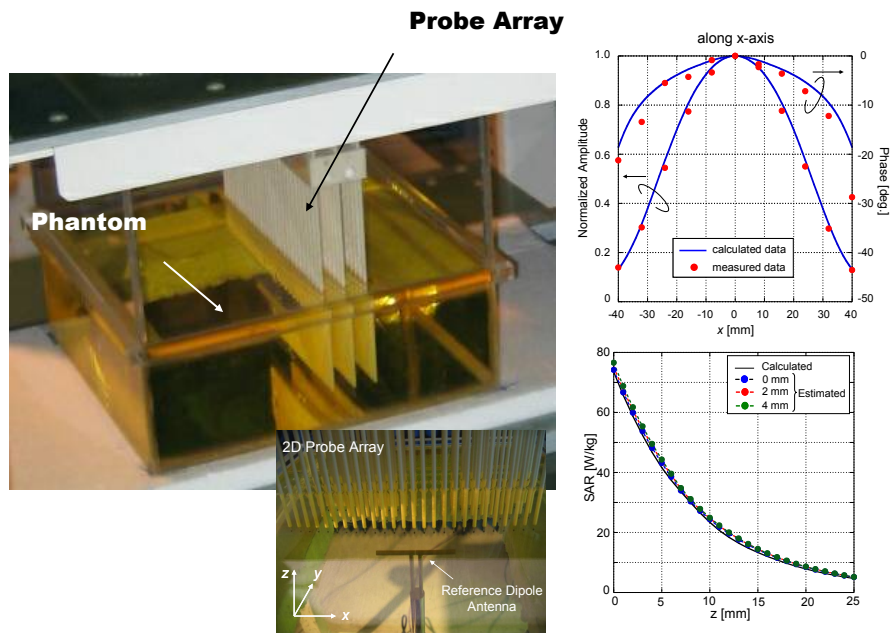
SAR 推定結果



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

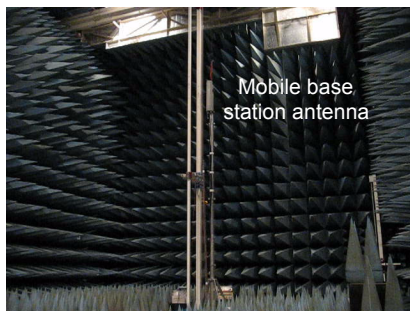
プローブをアレー化した例



© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved. 電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

基地局電界測定

- リスクコミュニケーション
 - 暗室での測定
 - 基地局周辺での測定



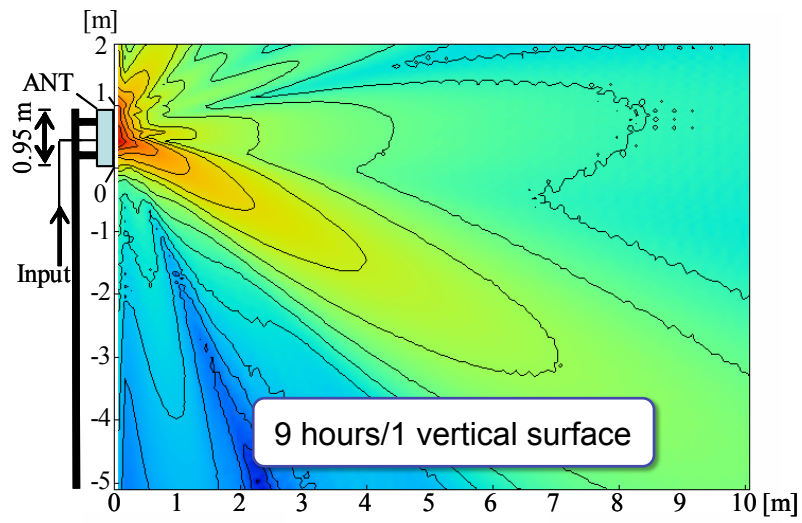
Lab. Measurement



On-site

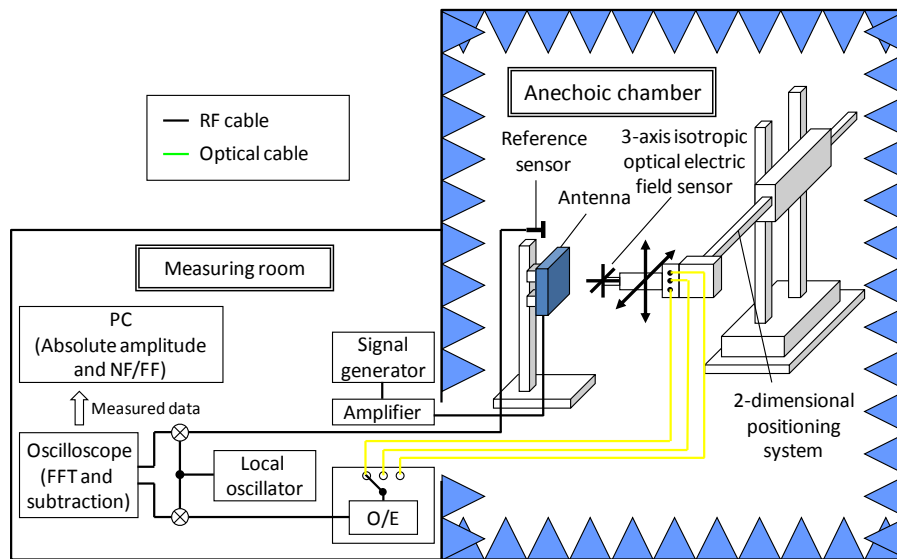
© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved. 電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

暗室での基地局アンテナ測定例

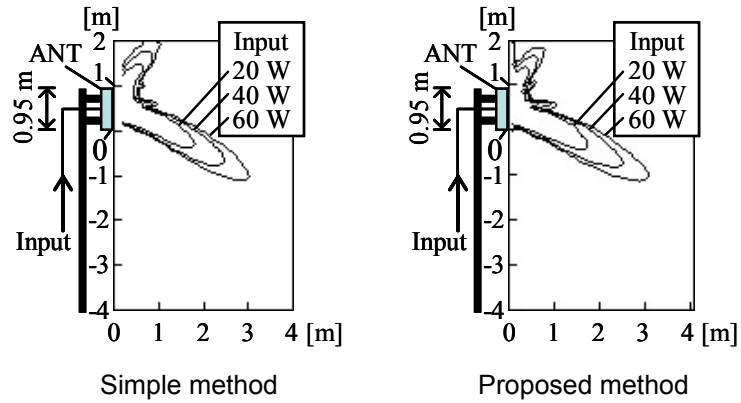


測定時間および測定空間が膨大

測定系概要



結果比較



測定時間 30分

※Boundary for 61.4 V/m

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

概要

■ 背景

- 無線技術の進化と最近のトレンド
- 電波と人体影響・電波防護指針
- ばく露測定例 (SAR測定, 基地局周辺測定)

■ 光を用いたばく露評価

■ 適用例

- SAR測定
- 基地局電界測定

■ まとめ

© 2017 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

電子情報通信学会PEM研究会WS 2017/7/4

まとめ

光技術を用いた人体防護のためのばく露評価について述べた。

- 光技術を用いることで、従来のプローブにない測定が可能と国内外で期待

課題

- 感度、安定性、操作性、コストなどに課題
- 人体防護は安全性に直結するため、信頼性も必要
 - 不確かさの評価、再現性など
- 光技術に特化した測定法の標準化が必要

The logo for NTT docomo, featuring the letters "NTT" in a smaller font above the word "docomo" in a larger, bold, lowercase font.