

走査型プローブ顕微鏡および共焦点顕微システムを複合的に用いて多元系化合物の物性評価を行っている。以下に主な課題について記述する。

### 1. CuInS<sub>2</sub>エピタキシャル成長薄膜の評価

高効率薄膜太陽電池の吸収層を目的としてPLD (pulse laser deposition)法による高品質CuInS<sub>2</sub>薄膜のGaAs (001) 基板上へのエピタキシャル成長を行っている。SEMによる断面観察から、作製した薄膜の膜厚は約0.5–1 μm得られたことを確認した。作製した薄膜のX線回折パターンは、CuInS<sub>2</sub>のカルコパイライト型結晶構造と一致した。RHEEDパターンから、結晶は正方晶のc軸成長をしていることがわかった。また、ラマンスペクトルからも、作製した薄膜がカルコパイライト構造であると確認した。これらの結果からパルスエネルギー密度0.8 J/cm<sup>2</sup>、エッチング処理なしの条件で作製した薄膜が、最も結晶性が良かった。パルスエネルギー密度0.8 J/cm<sup>2</sup>で作製した薄膜において、共焦点顕微システムを用いたフォトルミネセンス (PL) 測定により、CuInS<sub>2</sub>薄膜でポイント領域であるが初めて自由励起子および束縛励起子発光を観測した。さらに、励起子発光が観測されたポイントをEPMAにより組成分析を行った。さらに、CuInS<sub>2</sub>薄膜がS-poorであることから、Sアニールを行った。その結果、表面が緻密な薄膜となり、広領域での励起子発光を観測した。

### 2. アニール処理したCdS:O薄膜のナノ構造評価

CdS太陽電池窓層の太陽光の透過率を上げるために、CdSに酸素添加したCdS:O薄膜の作製を行い、CdSナノ結晶による量子サイズ効果について検討した。成膜方法にはカソードスパッタリング法を用い、CdSへの酸素添加を行った。さらに、作製した薄膜を真空中にてアニール処理を施し、ナノ結晶を形成した。

X線回折およびラマン散乱の解析結果から、アニール温度300 °C以上にて結晶化が起こっていることがわかった。また、結晶化によるナノ結晶の確認のために、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観測により500 °Cでアニール処理した薄膜において、薄膜全体に非晶質状態が認められたが、粒径5–10 nm程度のCdSナノ結晶もわずかに存在していることがわかった。

さらに、原子間力顕微鏡 (AFM) およびケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) による薄膜表面の測定によりAFM像から、200 °C、500 °Cでアニール処理した薄膜それぞれに、表面粗さの均一性と不均一性を観察した。また、KPFM像は、500 °Cでアニール処理した薄膜において、200 °Cでアニール処理した薄膜よりも表面電位差が87 mV大きい 174 mVを得た。これは500 °C膜においてのみナノ結晶を含むためであると考えられる。またいずれも、TEM像に対応した結果となった。このため、AFMおよびKPFMを用いてCdS:O薄膜のナノ結晶の観察に成功したと考えられる。これらの結果より、真空アニール処理により形成されたCdSのナノ結晶を観察し、ナノ結晶による量子サイズ効果が期待できる薄膜の作製に成功したと考えている。

### 3. タリウム化合物のナノドメイン計測

タリウム系化合物は構造相転移によりナノ空間変調構造をとる。本研究ではAFMおよびKPFMにより低温でのコメンシュレート相における自発分極によるナノドメインの観測を試みる。現在、低温でのAFMおよびKPFM測定の環境整備を行っている。さらにチップ増強分光法による計測も試みている。

## SPM / 共焦点顕微システム と物性評価

平成27年8月6日

千葉工業大学  
電気電子情報工学科  
脇田 和樹

### 多元化合物の物性評価

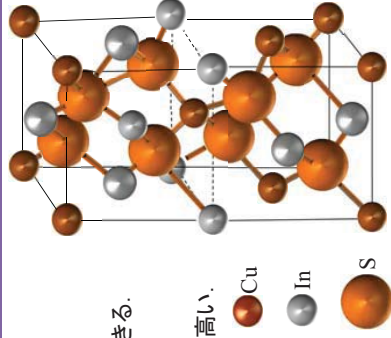
1.  $\text{CuInS}_2$  エピタキシャル成長薄膜の評価
2. アニール処理した  $\text{CdS}:\text{O}$  薄膜のナノ構造評価
3. タリウム化合物のナノドメイン観測

### 1. $\text{CuInS}_2$ エピタキシャル成長薄膜の評価

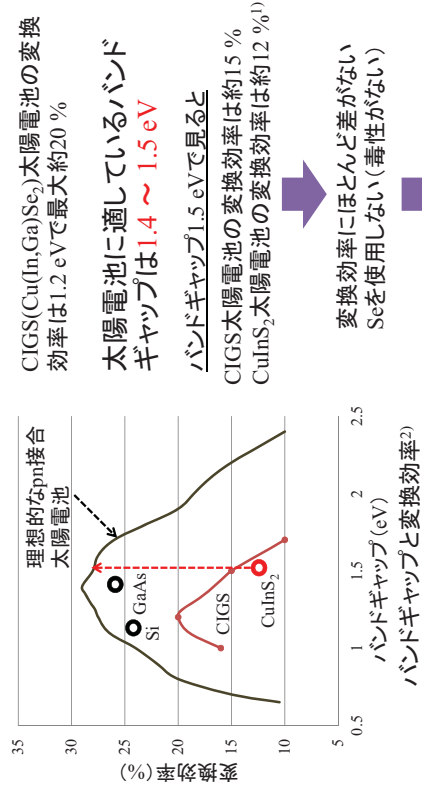
#### イントロダクション

<  $\text{CuInS}_2$  太陽電池の特徴 >

- カルコパイライト化合物の優位性  
組成比の制御によりバンドギャップが変更できる。  
 ↑ **太陽光を効率よく吸収!**  
 直接遷移型半導体であるため光吸収係数が高い。  
 ↑ **薄膜化, 軽量化!**
- $\text{CuInS}_2$  特有の特徴  
太陽電池として最も適したバンドギャップ  
(1.5 eV付近)をもつ。  
 ↑ **高効率!**  
 毒性がない (Seを使わない)。  
 ↑ **環境に優しい!**



#### CIGS太陽電池との比較



**$\text{CuInS}_2$ は太陽電池材料として優れている。**

1) R. Kojawa, A. Neisser, R. Klenk, M. Ch. Lux-Steiner: Thin. Solid Films 415 (2002) 266.  
2) 中田尚夫: CIGS太陽電池の基礎技術 (2010).

## 本研究の目的

CuInS<sub>2</sub>太陽電池の変換効率は12%程度であり、さらに高効率化を目指すには高品質CuInS<sub>2</sub>薄膜の成長が求められている。

薄膜形成法の一つとして、パルスレーザー堆積(PLD)法がある。

PLD法とは……

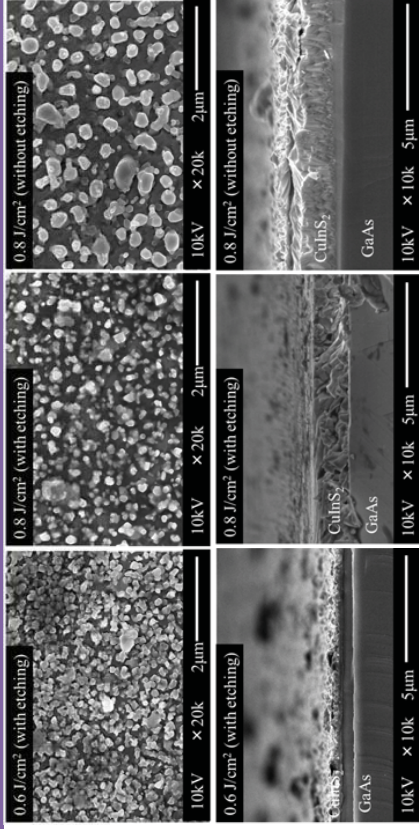
- ターゲットを蒸発させる手段として高パワー密度のパルスレーザーを用いる薄膜形成法
- レーザー光をターゲット表面に集光することで放出されるプルーム(柱状粒子群)が基板に堆積して薄膜が形成

### PLD法の利点

- 高融点の物質でも容易に薄膜化が可能
- ターゲットと堆積膜との組成ずれが少ない(化学量論比を維持)
- 成膜速度の制御が可能

- **PLD法を用いることでCuInS<sub>2</sub>の高品質薄膜成長を目指す。**
- **作製した薄膜をSEM, XRD, ラマン散乱分光法, フォトリミネセンス(PL)により評価する。**

## CuInS<sub>2</sub>薄膜のSEM像



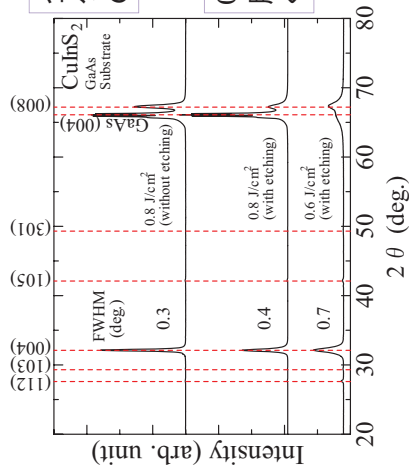
- 表面SEM像から0.8 J/cm<sup>2</sup>(エッチングなし)の薄膜で結晶粒径が最も大きい。
- 断面SEM像から膜厚は0.5-1 μm程度。

表面状態が粗く、島状に成長

↑ 硫黄が不十分

ターゲット作製時に硫黄を増やす。

## X線回折パターン



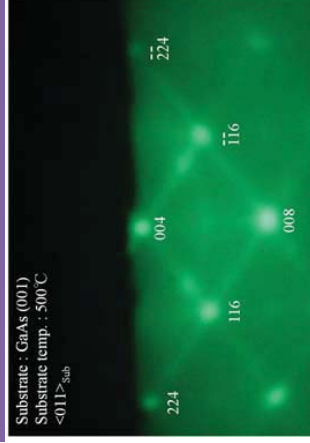
全ての薄膜において、各ピークはカルコパライト型CuInS<sub>2</sub>の回折パターン<sup>3)</sup>と一致

3) JCPDS CARD No. 27-0159.

0.8 J/cm<sup>2</sup>(エッチングなし)の薄膜において特に、半値幅が狭くなりX線強度も高くなった。

↑ 結晶性の向上

## RHEED



正方晶のc軸配向結晶に対するパターン (<011>方向入射)

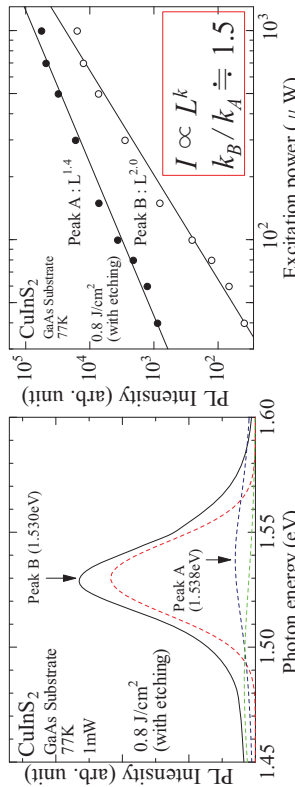
0.8 J/cm<sup>2</sup>(エッチングなし)におけるCuInS<sub>2</sub>薄膜のRHEEDパターン (<011>方向入射)

- RHEEDパターンから、単結晶成長している。
- 比較から**正方晶のc軸成長を示している<sup>4)</sup>**。

(004)が見えていることから、XRDの結果とも一致

4) K. Oishi, S. Kobayashi, S. Ohta, N. Tsuboi, and F. Kaneko: Journal of Crystal Growth 177 88-94 (1997).

# フォトルミネセンス

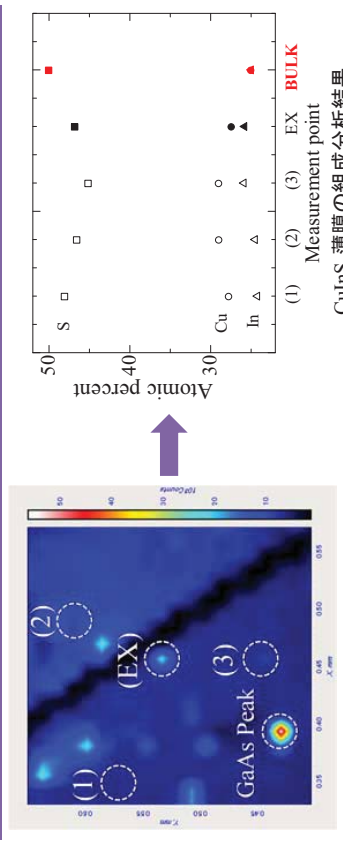


0.8 J/cm<sup>2</sup> (エッチングあり)におけるCuInS<sub>2</sub> 薄膜のPLスペクトル

- 1.538eV (ピークA)のローレンツ関数と1.530eV (ピークB)のガウス関数に波形分離
- ピークAおよびBは、Binsmaらの報告<sup>5)</sup>によるとA自由励起子, 束縛励起子EXIに 対応
- ピークAおよびBのk値は、それぞれ1.4, 2.0 ( $k_B/k_A = 1.5$ )<sup>6)</sup>

5) J. J. M. Binsma, L. J. Giling and J. Bloem: J. Lumin. 27 55-72 (1982).  
 6) J. J. Pankove, "Optical properties in semiconductors", Dover Publication, p. 123, (1971).

# PL強度マッピングおよび組成分析



PL強度マッピング (1.47 - 1.58 eV)

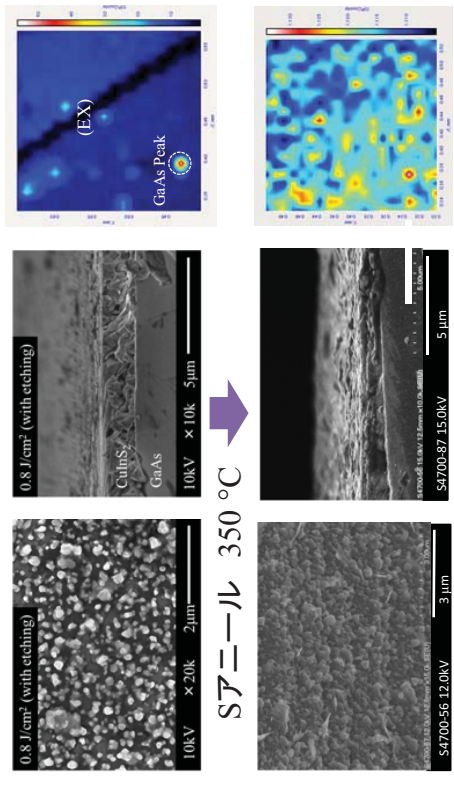
組成分析

薄膜上の励起子発光は、特定の場所でのみ観測

CuおよびInの組成が、他の場所のそれよりも近い

励起子発光するような高品質薄膜になるには、CuとInの組成が近いことが条件として考えられる。

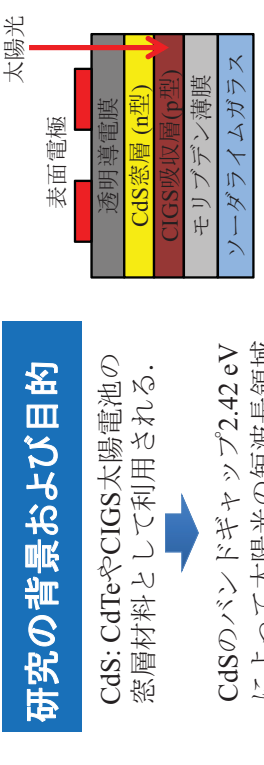
# Sアニール処理



S7100-56 12.0kV 3 μm  
 S4700-87 15.0kV 5 μm

- 緻密な薄膜
- 広領域での励起子発光

# 2. アニール処理したCdS:O薄膜のナノ構造評価



CdS/CIGS太陽電池の模式図

## 研究の背景および目的

CdS: CdTeやCIGS太陽電池の窓層材料として利用される。

CdSのバンドギャップ2.42 eV によって太陽光の短波長領域で吸収が起こる。

一方、ZnO(3.1 eV)やZnS(3.7 eV)はCdS以上のバンドギャップをもつが、格子定数の不整合が問題となる。

太陽電池全体の変換効率を向上させるには、CdSのバンドギャップ拡大が不可欠である。



## CdS薄膜のワイドギャップ化に関する報告①

rfマグネトロンスパッタリング法で作製し、成膜中に酸素添加したCdS(CdS:O)薄膜

形成されたCdSナノ結晶による、量子サイズ効果でバンドギャップ拡大

CdTe太陽電池全体の変換効率の上昇

我々の研究グループでも、rfマグネトロンスパッタリング法を用いて作製したCdS:O薄膜においてナノ結晶による量子サイズ効果を確認している。

### 本研究の目的

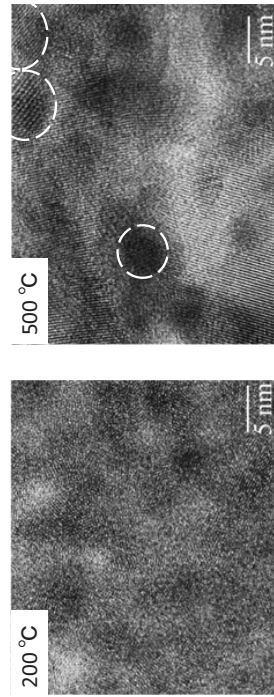
カゾードスパッタリングで作製し、アニール処理したCdS:O薄膜において、ラマン散乱、X線回折(XRD)、透過型電子顕微鏡(TEM)による結晶構造の解析、さらには原子間力顕微鏡(AFM)およびケルビンプローブフォース顕微鏡(KPFM)を用いてナノ構造を詳細に解析することを目的とする。

7) X. Wu *et al.*, Phys. Stat. Sol. C, 1, 1062-1066 (2004).

## 透過型電子顕微鏡(TEM)

ナノスケール領域における薄膜の結晶構造。

- 200 °Cでアニール  
一部に結晶性、しかし全体的に非晶質
- 500 °Cでアニール  
200 °Cと比べ多くの格子縞、  
粒径5-10 nmのナノ結晶が混在

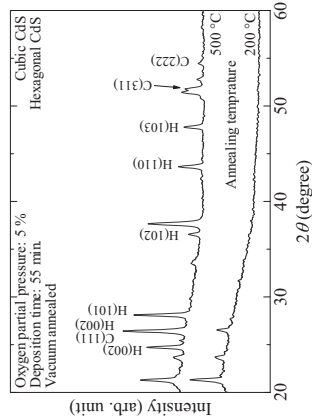


アニール処理したCdS:O薄膜のTEM像

より明確なナノスケール領域における観察が必要

## X線回折(XRD)

結晶構造および結晶粒径



アニール処理したCdS:O薄膜のXRDパターン

- ラマン散乱と同様に、回折ピークの半値幅(FWHM)が減少
- 結果、結晶粒径が増加

- 200 °Cでアニール  
六方晶CdSに対応する、一つの回折ピークのみ観測した。

一部に結晶性があるが、全体的に非晶質

- 500 °Cでアニール  
六方晶だけでなく立方晶CdSに対応する回折ピークを観測した。

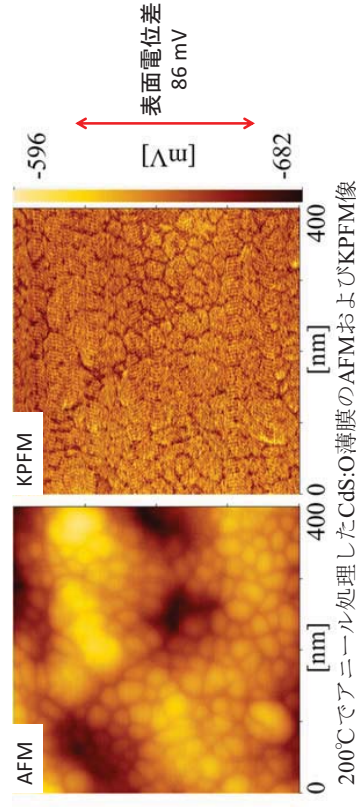
アニールによって再結晶化

シェラー式から求めた結晶粒径

Annealing temp. (°C)	Crystal radius (nm)
300	19.9
400	20.4
500	29.2

## 原子間力顕微鏡(AFM)およびケルビンプローブフォース顕微鏡(KPFM)

ナノスケール領域における薄膜表面解析



表面の粗さがほとんど均一  
→ 全体的な非晶質に起因すると考えられる。

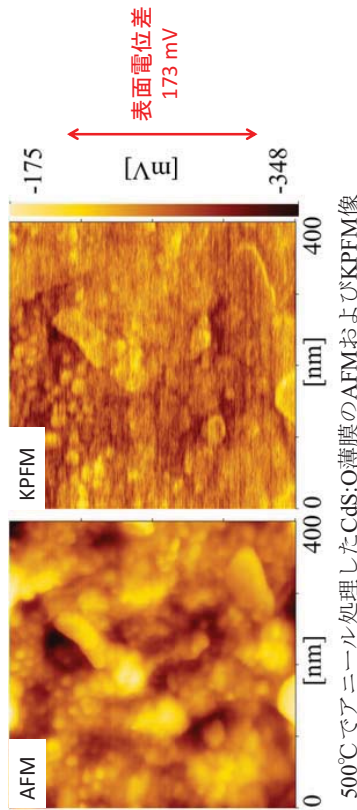
200°Cでアニール処理したCdS:O薄膜のAFMおよびKPFM像

アニール処理したCdS:O薄膜のTEM像

より明確なナノスケール領域における観察が必要

## 原子間力顕微鏡(AFM)およびケルビンプローブフォース顕微鏡(KPFM)

ナノスケール領域における薄膜表面解析。

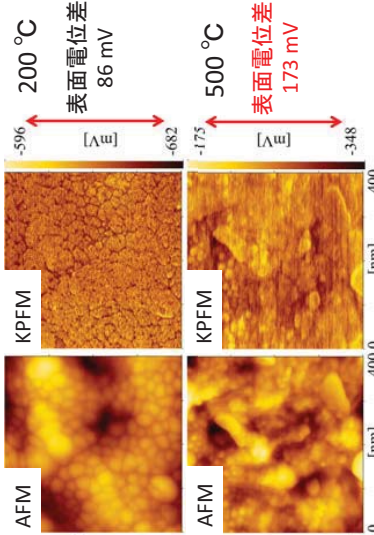


500°Cでアニール処理したCdS:O薄膜のAFMおよびKPFM像  
 表面の粗さが比較的不均一であり、粒径の小さな凹凸が混在  
 → TEMの観察結果と一致している。

## 原子間力顕微鏡(AFM)およびケルビンプローブフォース顕微鏡(KPFM)

### 500 °C膜の特徴

1. AFMで確認できる凹凸の大きさがナノ結晶の粒径に近い。
2. KPFMでもAFMと同じように観測できている。
3. KPFMにてナノ結晶混在による、表面電位差の拡がりを確認した。



200, 500°Cでアニール処理したCdS:O薄膜のAFMおよびKPFM像

## 500 °C膜における表面電位差の拡がり

200°Cおよび500°CでアニールしたCdS:O薄膜にて、表面電位差として86 mVと173 mVのそれぞれを観測した。

ラマン散乱, XRD, TEMの結果より500 °C膜の再結晶化を確認した。

TEMの結果より500 °C膜中にCdSナノ結晶の混在を観察した。

酸素添加によって両薄膜ともにCdOが混在しているはずである。

両薄膜の表面電位差87 mV(=173 mV - 86 mV)はナノ結晶が混在していることにより生じたものであると考えられる。

### 各化合物の仕事関数

化合物	仕事関数 (eV)	拡がり
CdS (nanocrystals)	5.2 <sup>8)</sup>	}
CdS (thin films)	5.3-5.7 <sup>9)</sup>	
CdO (thin films)	3.447 <sup>10)</sup>	

KPFMを用いてナノ結晶を観察したと考えられる。

8) P. Kulisser et al., *Material Science and Engineering*, **38**, 012008 (2012).  
 9) H. Wu et al., *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **95**, 51 (2011).  
 10) R. Ferno, J. A. Rodriguez-Solar, *Energy Materials & Solar Cells*, **64**, 383 (2000).

## AFMおよびKPFMからの結論

1. 500 °Cでアニール処理されたCdS:O薄膜において、AFMおよびKPFMによって同様な画像が観察された。さらにKPFMによって表面電位差の拡がりから、ナノ結晶を観測した。
2. AFMにおいて観察された凹凸の中にナノ結晶に近い粒径をもつものが含まれていた。

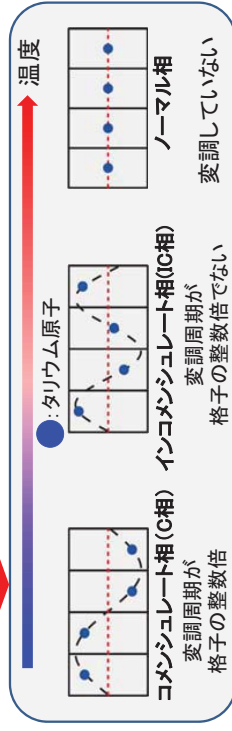
AFMおよびKPFMで観測した一部はナノ結晶であると考えられる。

### 3. タリウム化合物のナノドメイン観測 はじめに

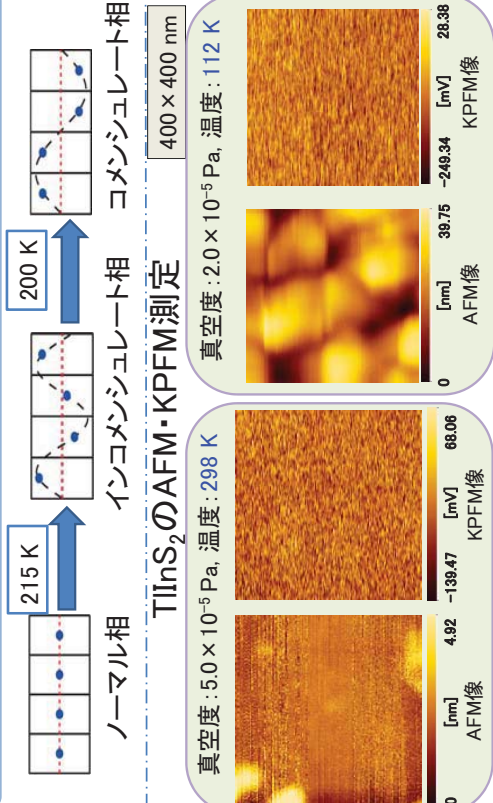
三元タリウム系化合物の特徴 (TlMeX<sub>2</sub>; Me=In, Ga, X=S, Se, Te)

- ・巨体積膨張[11]
- ・マルチフェロイックの可能性[12]
- ・構造相転移物質[12]

Ref.  
1) N. Mermesov et al., Thin Solid Films, 517, 434 (2009).  
12) マズダフ 他, 第95回応用物理学会秋季大会 15P-EP-5.



### 環境制御型AFMでのTlInS<sub>2</sub>のナノドメイン観測



低温でのAFM像: 表面吸着 (約40 nm)

### 研究の背景・目的

背景  
三元タリウム系化合物は構造相転移をもつ  
新しいデバイス材料として応用の可能性あり  
しかし基礎的物性が明らかでない

昨年度までは第二高調波による構造相転移のマクロ的観測

### 目的 ナノドメインを観測

走査型  
プローブ顕微鏡  
(SPM)  
原子間力顕微鏡法 (AFM): 形状  
表面電位顕微鏡法 (KPFM): 電位差  
チップ増強型近接場分光法: 散乱や発光

### 今後の方針

- ・共焦点顕微鏡システムとSPM法との併用による物性の複合解析  
CuInS<sub>2</sub>結晶の発光ポイントの解析など
- ・共焦点顕微鏡分光システムを用いた新たな評価
- ・SPM法による強誘電体ドメインの観測  
タリウム化合物コモメンシュレート相の観測
- ・チップ増強型近接場分光法による計測

# 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

山本 秀和

## 1. パワーデバイス用結晶の特異性

パワーデバイス用半導体チップには、数1000 Vの耐圧と100 A/cm<sup>2</sup>以上の通電能力が要求される。そのため、Si集積回路用として広く用いられているCZ (Czochralski) 法による結晶が使用できない。そのため、FZ (floating zone) ウエハや厚いエピタキシャルウエハ (エピウエハ) が用いられている。

次世代パワーデバイス用としてSiCやGaN等のワイドギャップ半導体が期待されている。しかしながら、ワイドギャップ半導体は結晶製造が難しく、Si比べると格段に結晶欠陥が多い。

従って、結晶欠陥との共存が大前提であり、結晶欠陥評価技術の確立が重要である。

## 2. パワーデバイス用結晶の評価事例

### 2-1. Siミスフィット転位の発生メカニズム

パワーデバイス用Siエピウエハにおけるミスフィット転位の発生メカニズムを確立した。試料の薄膜化後の暗視野TEM (transmission electron microscope) 観察により、バーガースベクトル、バーガースベクトルと転位線との角度を決定した。その結果、基板/エピ層界面を伸展する転位は60°転位であり、エピ層に抜ける転位はらせん転位であることが判明した。

### 2-2. SiC積層欠陥の構造解析

SiC結晶中の積層欠陥には、フォトルミネッセンス (PL : photoluminescence) では検出できるが、X線トポグラフィでは検出されていないものが存在する。TEM評価の結果、SiC結晶の周期性を乱さない積層欠陥は、フォトルミネッセンスでは検出できるが、X線トポグラフィで検出されないことが判明した。

### 2-3. GaN on Si結晶のラマン散乱分光評価

GaN on Si結晶における転位低減層の評価にラマン散乱分光法が有用である。共焦点ラマン散乱分光評価により、ウエハの深さ方向の評価が可能である。また、ピーク値のシフトから内部応力が評価できる。

## 3. SPMによるパワーデバイス用結晶評価

### 3-1. SP-DLTSによる再結合中心の局所評価

再結合中心のエネルギー準位の局所評価法として、SP (scanning probe) -DLTS (deep level transient spectroscopy) を検討する。エネルギー準位の決定は、温度掃引または光励起DLTSにより実施する。

### 3-2. AFMによるレーザーアニールSiC表面の評価

SiC中にドーパントをイオン注入した場合の不純物の活性化には1700°C以上の高温アニールが必要である。この高温アニールにレーザーアニールを適用することを検討している。レーザーアニールSiCの評価にAFM (atomic force microscope) を適用していく。

### 3-3. KFMによるGaN表面空乏化の評価

GaN on GaN結晶の共焦点ラマン散乱分光評価で、キャリアの空乏化と考えられる現象が観測されている。ウエハ最表面でのバンドベンディングが関連している可能性があり、この評価にKFM (Kelvin force microscope) を適用していく。





戦略的研究基盤形成支援事業  
「マイクロ領域／マイクロ領域における複合的プロセス技術の開発に関する研究」

## 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響 と結晶評価技術

1. パワーデバイス用結晶の特異性
2. パワーデバイス用結晶の評価事例
3. SPMによるパワーデバイス用結晶評価

千葉工業大学 工学部 山本 秀和  
yamamoto.hidekazu@it-chiba.ac.jp

1



## パワーデバイス用結晶の特異性

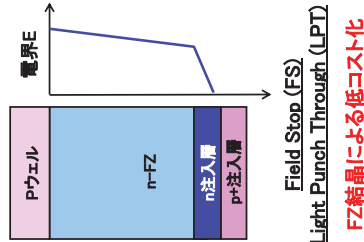
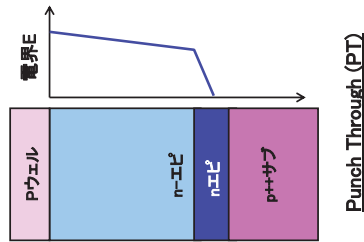
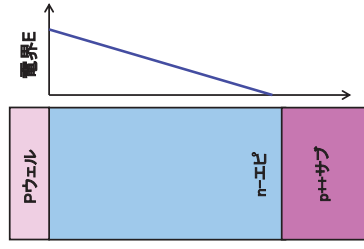
### 1. パワーデバイス用結晶の特異性

結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

2



## Siパワーデバイス用結晶



高耐圧、低オン抵抗を実現するため、Siパワーデバイス用として、厚いエピタキシャルウエハまたはFZウエハが用いられる。

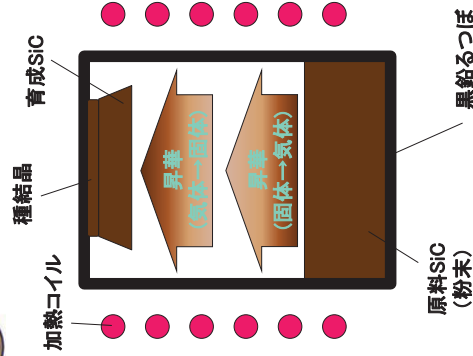
FZ結晶による低コスト化

結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

3



## SiC結晶の製造～昇華法



SiCでは融液成長が困難  
現状の結晶製造は昇華法のみ  
種結晶にウエハを使用  
・大口径化が難しい  
・高品位化が困難

結晶欠陥との共存が前提

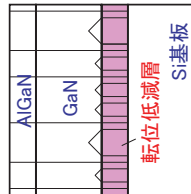
結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

4



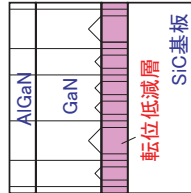
### GaN 結晶と適用デバイス

$10^8 \sim 10^9 \text{cm}^{-2}$



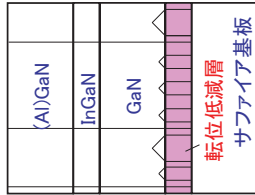
パワーデバイス  
高周波デバイス

$10^8 \sim 10^9 \text{cm}^{-2}$



高周波デバイス  
LED(発光ダイオード)  
(パワーデバイス)

$\sim 10^8 \text{cm}^{-2}$



LED(発光ダイオード)  
(パワーデバイス)

$10^5 \sim 10^6 \text{cm}^{-2}$



LD(レーザーダイオード)

SiC以上の多量の結晶欠陥が存在

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

5



### パワーデバイス用結晶の評価事例

## 2. パワーデバイス用結晶の評価事例

- 2-1. Siミスフィット転位発生メカニズムの解明
- 2-2. SiC積層欠陥の構造解析
- 2-3. GaN on Si結晶のラマン散乱分光評価

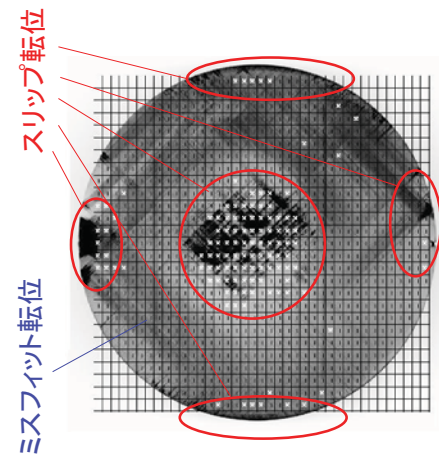
### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

6



### IGBTにおける転位の影響

- ・ミスフィット転位はデバイス特性を劣化させない
- ・スリップ転位は、リーク不良を発生



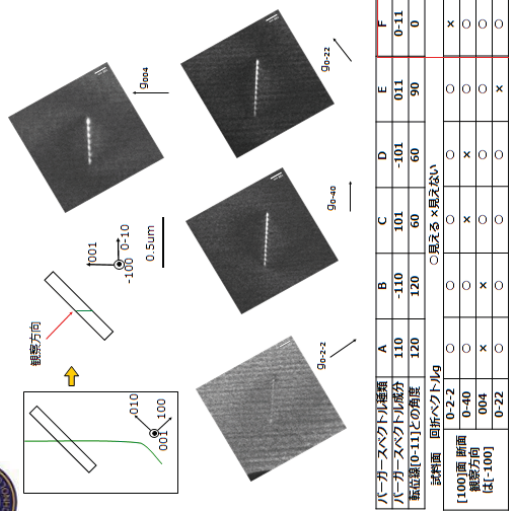
リーク不良マップ (白い×)

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

7



### バーガーズベクトルの決定



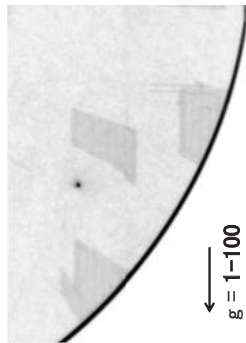
- ・基板/エピ層界面を伸展する転位は60°転位。
- ・エピ層に抜ける転位はらせん転位。

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

8



### X線トポグラフィ、PLIによる積層欠陥の評価



透過X線トポグラフィによる評価

フォトルミネッセンス(PL)による評価

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

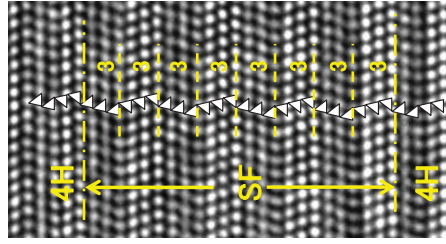
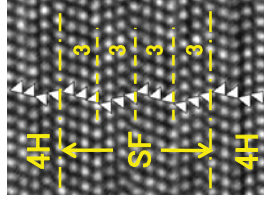
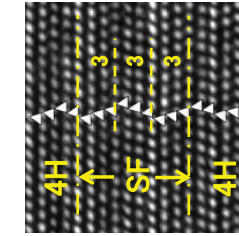
9



### TEMによる積層欠陥の構造解析



・上下の4H構造の周期性が崩れる場合、X線トポグラフィで検出される。  
(333) ⇒ 検出可  
(3333)、(3333333) ⇒ 検出不可



X線トポグラフィで検出可能

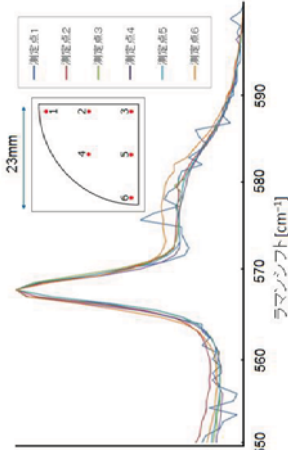
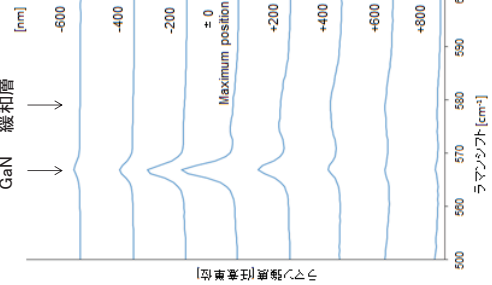
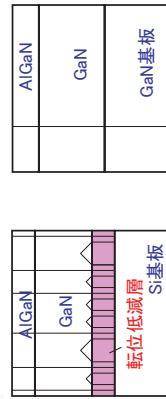
X線トポグラフィで検出不可

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

10



### GaN on Si 結晶のラマン散乱分光評価1

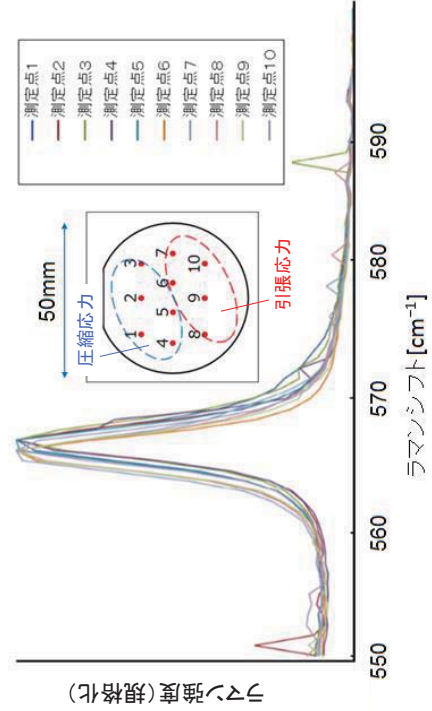


### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

11



### GaN on Si 結晶のラマン散乱分光評価2



### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

12



### SPMIによるパワーデバイス用結晶評価



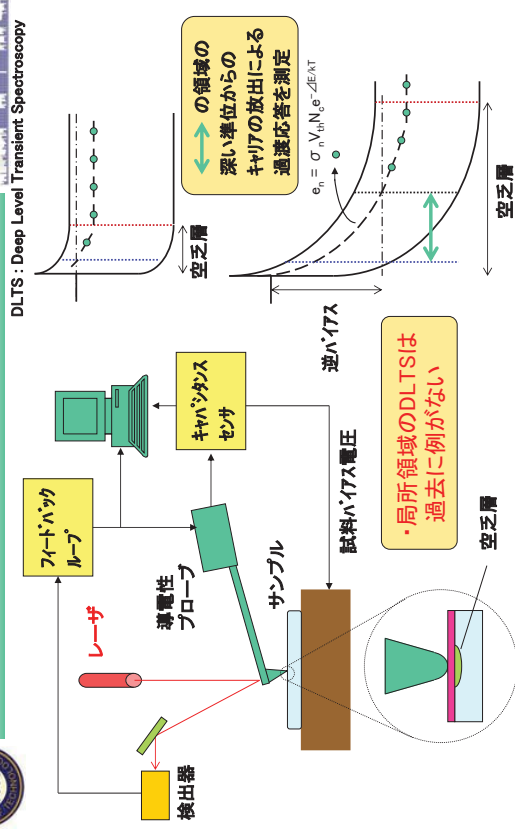
## 3. SPMIによるパワーデバイス用結晶評価

- 3-1. SP-DLTSIによる再結合中心の局所評価
- 3-2. AFMによるレーザーアニールSiC表面の評価
- 3-3. KFMによるGaN表面空乏化の評価

結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術 13



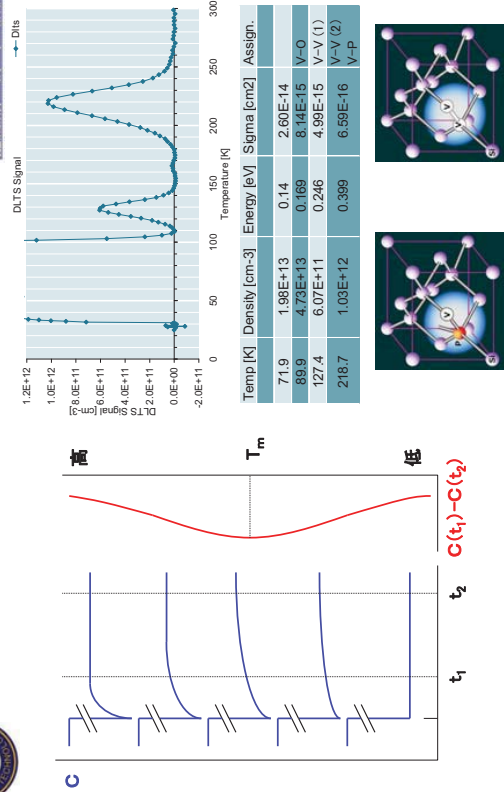
### SP-DLTS



14



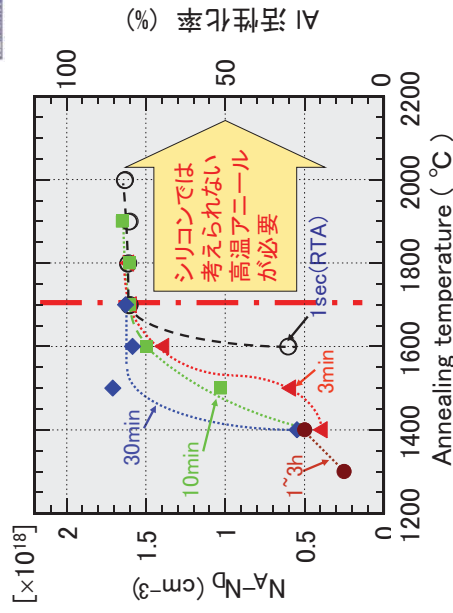
### SP-DLTS



結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術 15



### SiCの活性化アニール



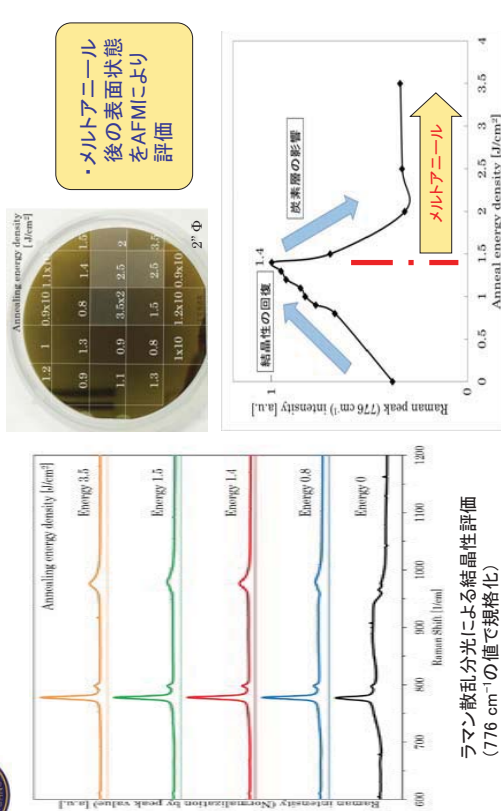
アニール条件によらず1700°C以上でアクセプタとしての活性化率~80%

16





### レーザーアニールSiCのAFMによる評価



### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

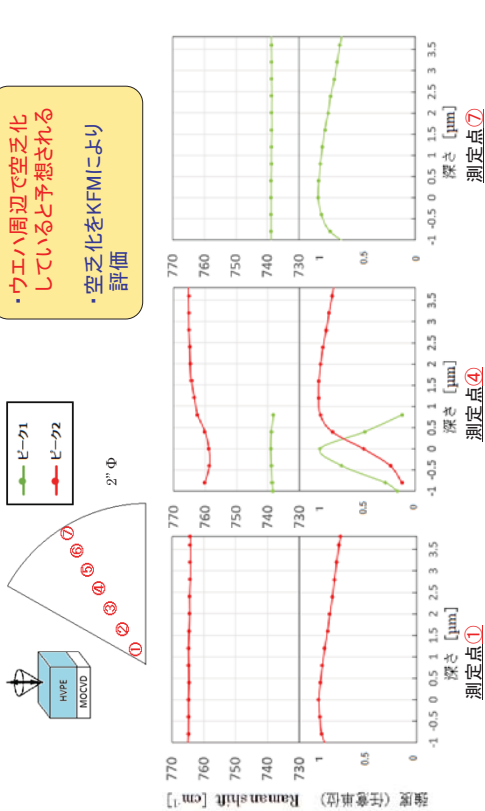
17

ラマン散乱分光による結晶性評価  
(776 cm<sup>-1</sup>の値で規格化)

・メルトアニール後の表面状態をAFMにより評価



### GaN on GaN結晶のラマン散乱分光評価



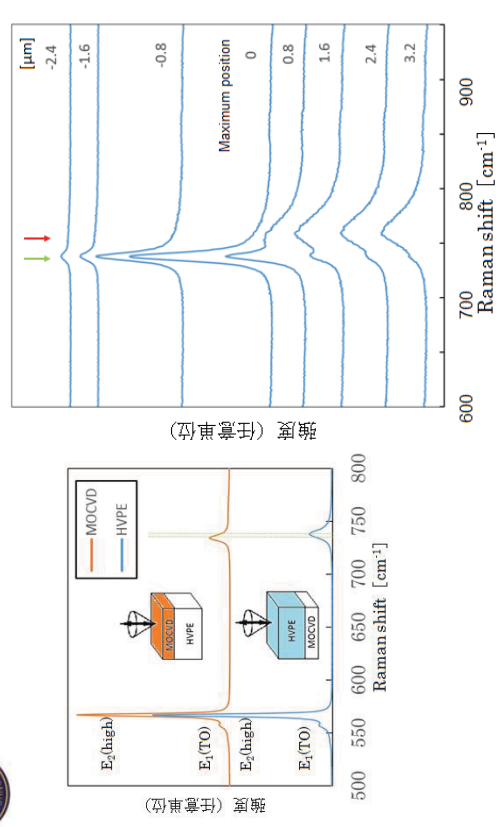
### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

19

・ウエハ周辺で空乏化していると予想される  
・空乏化をKFMにより評価



### GaN on GaN結晶のラマン散乱分光評価



### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

18



### まとめ

- ▶ Si/パワーデバイス用として、厚いエピタキシャルウエハあるいはFZウエハが用いられている。
- ▶ パワーデバイス用SiCおよびGaN結晶においては、**結晶欠陥との共存**が大前提となる。⇒結晶評価技術の確立が重要。
- ▶ パワーデバイス用Siエピタキシャルウエハにおけるミスフィット転位の発生メカニズムを確立。
- ▶ SiC結晶の**周期性を乱さない積層欠陥**は、フォトルミネッセンスでは検出できるが、X線トポグラフィで検出されない。
- ▶ GaN on Si結晶における転位低減層の評価にラマン散乱分光法が有用。再結合中心のエネルギー準位の局所評価法として、SP-DLTSを検討する(含光励起DLTS)。
- ▶ レーザーアニールSiCの評価にAFMを適用していく。
- ▶ GaN on GaN**結晶の空乏化**の評価にKFMを適用していく。

### 結晶欠陥のパワーデバイスへの影響と結晶評価技術

20

# レーダポーラリメトリと偏波合成開口レーダ画像処理

山田 寛喜 (新潟大学)

## 1. まえがき

近年、日本においても人工衛星 ALOS2(大地 2号)や航空機 PiSAR2による偏波合成開口レーダが運用され、火山噴火や土砂崩れ、津波被害の影響などの迅速な観測が可能となった。偏波、すなわちポーラリメトリ(Polarimetry)の理論を用いることで、ターゲット形状の明瞭な映像化が不可能な分解能であっても、ターゲット偏波特性を利用することで、ターゲットの分離、識別が可能となる。この講演では、レーダポーラリメトリの原理と POLSAR 画像処理への応用に関して概説する。解析結果に関してはスライドを参考されたい。本稿では、今回の資料を理解するうえで役立つと思われる文献引用を中心にまとめる。

ポーラリメトリの基礎に関しては、文献[1-3]が詳しい。特に文献[3]はポーラリメトリの基礎から POLSAR 画像処理までを網羅した唯一の和書である。また合成開口レーダに関しては[4]が役に立つであろう。

## 2. POLSAR 画像処理

この 20 年ほどの間で、様々な POLSAR (Polarimetric SAR)画像処理の理論が提案され、特に 2000 年以降、数多くのプラットフォームが打ち上げられ、様々なデータが入手可能になるに従い、それらの理論が著しく発展した。POLSAR 画像処理では、主に散乱行列から生成される散乱ベクトルより計算される Coherency 行列、あるいは Covariance 行列に基づく解析を行う。残念ながら、これらすべてを紹介することは困難である。近年、複数の良書が出版されているのでそちらを参照されたい[5,6]。

ここでは、特に固有値解析を用いた解析手法 (Entropy-Alpha)[7,8]と散乱電力の成分分解能 (3 成分分解法[9], 4 成分分解法[10,11]) を取り上げる。前者は固有値解析により得られる固有値、固有ベクトルから偏波に依存した特徴量であるエントロピー、 $\alpha$  アングルを取り出すことで、各領域の偏波散乱特性の違いを特徴づけるものであり、後者は、事前に導出された基本散乱成分のモデル式を用いて、各散乱成分の電力寄与を推定するものである。基本散乱成分としては、一般に表面散乱成分、2 回反射成分、および体積散乱成分が用いられ、それぞれ裸地 (あるいは低植生)、市街地 (住宅地)、森林領域に対応する。講演では、その基本概念と、これらの手法を用いた解析結果から周波数特性による違い[12]、入射角の方位依存性の補償[11]、津波被害の検出結果[13]などを紹介する。

さらにインターフェロメトリへの応用として、1 組の和すかに異なる軌道から観測された L-band POLSAR k 彡画像を利用し、森林領域の木々の高さ推定 (バイオマス量の推定) を実現した Polarimetric SAR interferometry[14]を紹介する。

## 3. まとめ

この講演では、レーダポーラリメトリとそのような POLSAR 画像処理を概説した。ポーラリメトリの応用は、SAR トモグラフィーなどへ更に発展し続けている。今後、多くの研究者がこの分野の研究に挑むことを期待している。

## 参考文献

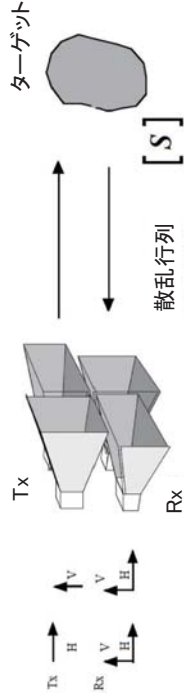
- [1] W. L. Stutzman, Polarization in Electromagnetic Systems, Artech House, 1993.
- [2] H. Mott, Polarization in Antennas and Radar, John Wiley & Sons, 1986.
- [3] 山口芳雄著, レーダポーラリメトリの基礎と応用 ー偏波を用いたレーダリモートセンシングー, 電子情報通信学会, 2007 年.
- [4] 大内和夫著, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電機大学出版局, 2004 年
- [5] J. S. Lee and E. Pottier, Polarimetric Radar Imaging, CRC Press, 2009.
- [6] J. van Zyl and Y. Kim, Synthetic Aperture Radar Polarimetry, Wiley, 2011.
- [7] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.34, no.2, pp.498-518, Mar. 1996.
- [8] S. R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.35, no.1, pp.68-78, Jan. 1997.
- [9] A. Freeman and S. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol.36, no.3, pp.963-973, May 1998.
- [10] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, "Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol.43, no.8, pp.1699-1706, Aug. 2005.
- [11] Y. Yamaguchi, A. Sato, W. M. Boerner, R. Sato, and H. Yamada, "Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.49, no.6, pp.2251-2258, Jun. 2011.
- [12] Y. Yajima, Y. Yamaguchi, R. Sato, H. Yamada, and W. M. Boerner, "POLSAR image analysis of wetlands using modified four-component scattering power decomposition," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.46, no.6, pp.1667-1673, Jun. 2008.
- [13] G. Singh, Y. Yamaguchi, W. M. Boerner, and S.E. Park, "Monitoring of the March 11, 2011, Off-Tohoku 9.0 earthquake with super-tsunami disaster by implementing fully polarimetric high-resolution POLSAR techniques," Proc. IEEE, vol.101, no.3, pp.831-846, Mar. 2013.
- [14] K. P. Papathanassiou and S. R. Cloude, "Single-baseline polarimetric SAR interferometry," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol.39, no.11, pp.2352-2363, Nov. 2001.



# レーダーポラリメトリと 偏波合成開口レーダー画像処理

新潟大学工学部 情報工学科  
山田 寛喜  
2015年8月6日 @ 千葉工業大学

## 偏波レーダーによるターゲット観測










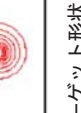

$$E^s = \begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix} = [S]E^t$$

送受信偏波と散乱行列

## 本講演の構成

- 偏波レーダーによる散乱観測の基礎
  - 偏波レーダーによるターゲット観測
  - 基本ターゲットの散乱行列
  - 偏波合成開口レーダー
- POLSAR画像解析
  - 様々なアプローチ
  - 散乱行列の変換
  - 固有値解析を用いた画像解析 (Entropy, Alpha Angle)
  - 散乱電力成分分解を用いた画像解析 (3成分分解法(FDD), 4成分分解法(Y40, Y4R), etc)
    - ✓ 周波数による違い
    - ✓ 入射方向依存性の補正
    - ✓ 解析例 (PISAR2-X最新画像, ALOSデータを用いた津波被害検出)
  - インターフェロメトリへの応用
    - ✓ Polarimetric SAR Interferometry
- まとめ

## 基本ターゲットの散乱行列

			Scattering matrix $[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ j & -1 \end{bmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ j & -1 \end{bmatrix}$

ターゲット形状に応じた特徴的な散乱行列  
実際の複雑なターゲットも基本ターゲットの組み合わせ

# 偏波合成開口レーダー(POLSAR)

周波数呼称と割り当て帯域

名称	周波数(GHz)	衛星用帯域(GHz)	最高分解能
P	0.3-1.0	0.432-0.438	25 m
L	1-2	1.125-1.13	88 cm
S	2-4	3.1-3.3	75 cm
C	4-8	5.25-5.46	71 cm
X	8-12.5	9.5-9.8	50 cm
Ku	12.5-18	13.25-13.75	30 cm
K	18-26.5	24.05-24.25	75 cm
Ka	26.5-40	34.5-36	10 cm
V	40-75		
W	75-110	94-94.1	150 cm



TerraSAR-X (X)/DLR



ALOS-2 (L)/JAXA



Cosmo-SkyMed X



RADARSAT-2 (C)



E-SAE (PLC/X)/DLR

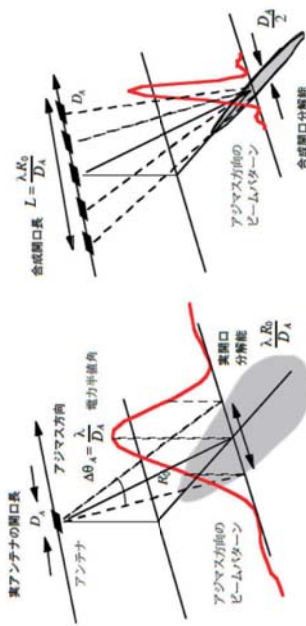
PISAR2 (L&X)/NICT/JAXA

様々なPOLARSプラットフォーム



Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.

# 実開口レーダーと合成開口レーダー



実開口レーダーの分解能

合成開口レーダーの分解能

実開口と合成開口レーダーの分解能の概念図

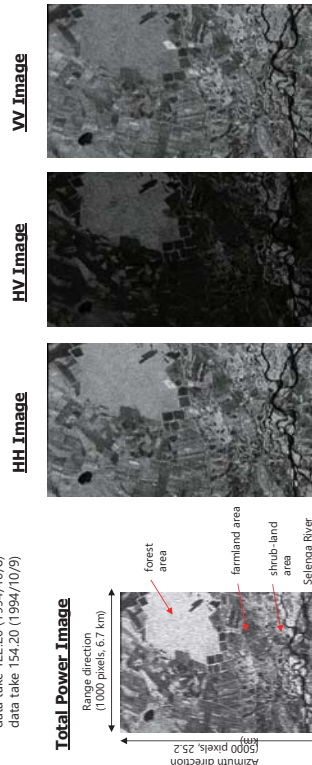


Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.

# 合成開口レーダー画像例

Used data sets:

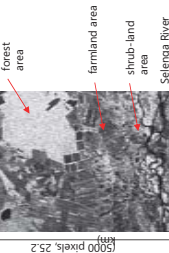
SIR-C/X-SAR data (L-Band)  
data take: 122.20 (1994/10/8)  
data take: 154.20 (1994/10/9)



Total Power Image

Range direction  
(1000 pixels, 6.7 km)

Azimuth direction  
(300 pixels, 25.2 km)

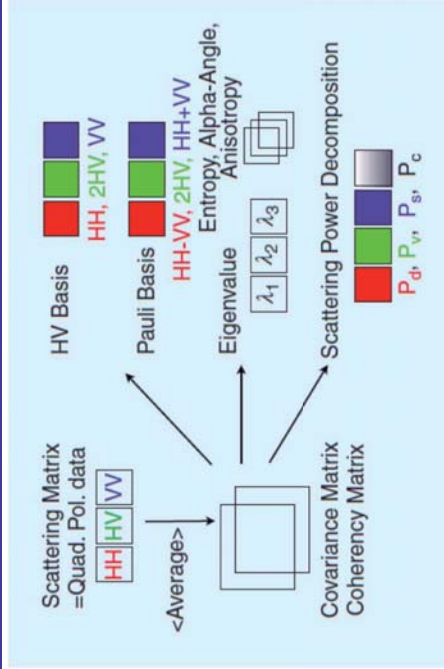


Span Image of Tiem-Shan Flight Pass  
(southeastern edge of Lake Balkal, Russia)



Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.

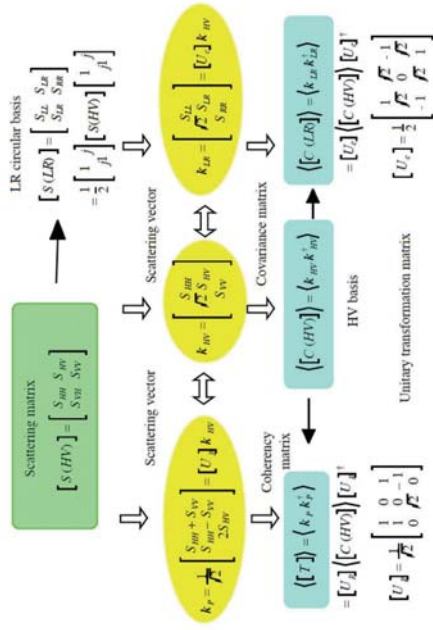
# POLSAR画像処理 ~様々なアプローチ~



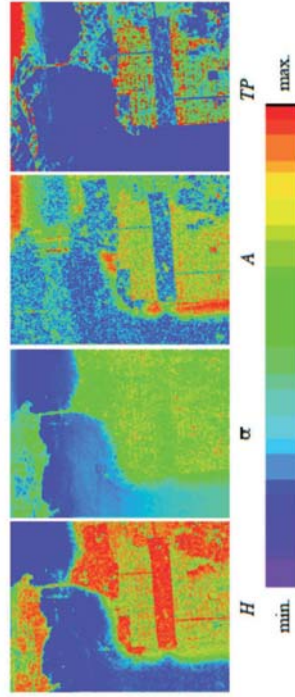
Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.



# POLSAR画像処理 ~ 散乱行列の変換 ~



# 固有値解析を用いた画像解析(2)



# 固有値解析を用いた画像解析(1)

Coherency行列 (あるいはCovariance行列) の固有値解析結果を用いた特徴量

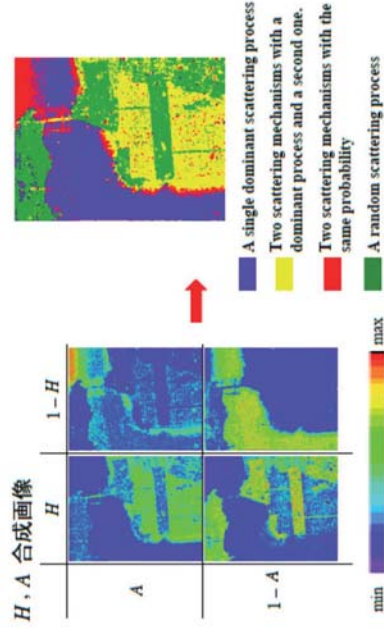
$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i k_i^H = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^H = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^H$$

$$[U_3] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 e^{j\phi_1} & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 e^{j\phi_2} & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 e^{j\phi_3} \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 e^{j\theta_1} & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 e^{j\theta_2} & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 e^{j\theta_3} \end{bmatrix}$$

( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ )

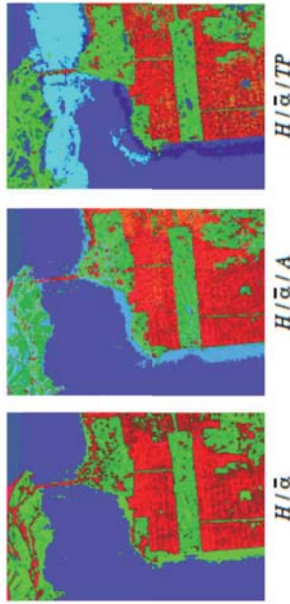
- Entropy 複雑さ  $H = -\sum_{i=1}^3 P_i (-\log_2 P_i)$   $(P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3})$
  - Alpha angle 偏波依存性  $\bar{\alpha} = P_1 \alpha_1 + P_2 \alpha_2 + P_3 \alpha_3$
  - Total Power 散乱強度  $TP = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$
  - Anisotropy 複雑さ  $A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$
- Angle alpha
- $\bar{\alpha} = 90^\circ$ : Isotropic dihedral CR & helix
  - $\bar{\alpha} = 45^\circ$ : Anisotropic Isotropic dipole
  - $\bar{\alpha} = 0^\circ$ : Anisotropic Isotropic surface

# 固有値解析を用いた画像解析(3)



H, AによるPOLARSAR画像と散乱メカニズム (サンランシンスコスベイエリア)

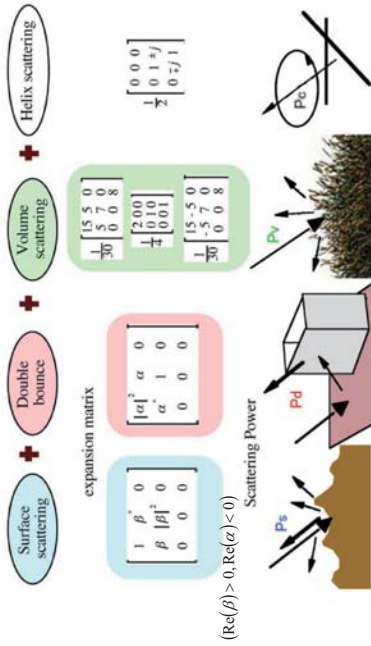
## 固有値解析を用いた画像解析 (4)



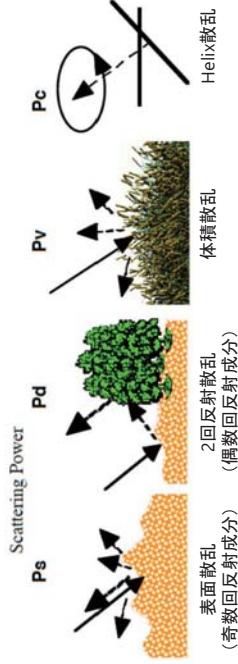
$H, \alpha, A$ によるPOLSAR画像分類結果 (サンフランシスコベイエリア)

## 散乱電力成分分解を用いた画像解析 (2)

Coherency行列に基づく成分分解



## 散乱電力成分分解を用いた画像解析 (1)



- 表面散乱：地面、海面などの表面が引き起こす1回（奇数次回）反射の散乱過程
- 2回反射散乱：地面と幹、道路と建物壁面などの直角構造が引き起こす2回（偶数次回）反射の散乱過程
- 体積散乱：密集した枝などのランダムな向きで分布した線状物体が引き起こす散乱過程
- Helix散乱：直線偏波を円偏波に変える散乱過程。主に人工建造物から発生する

## 散乱電力成分分解を用いた画像解析 (3)

観測可能量と未知数

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}$$

3 real independent observables  
3-2=1 complex independent observables

$$= \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ f_s & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \alpha^* & 0 \\ f_d & |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{v,11} & T_{v,12} & 0 \\ T_{v,12} & T_{v,22} & 0 \\ 0 & 0 & T_{v,33} \end{bmatrix}$$

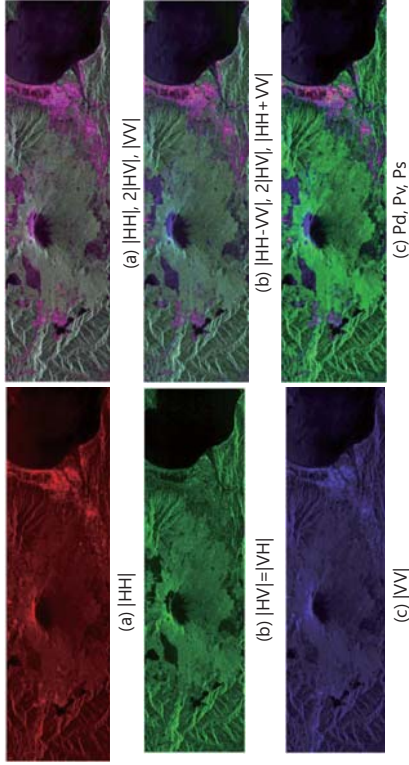
6-1=5 real independent unknowns  
5-2=3 complex independent unknowns

1つの対角要素は normalize可能  
回転普遍性よりゼロ

様々な手法で用いられている仮定

- ex. Empirical volume scattering model : FDD, Y4R, Lee-Bragg
- Adaptive volume scattering model : AMBD
- $\alpha = -1$  or  $\beta = 1$  (select minor component) : FDD, Y4R, Lee-Bragg

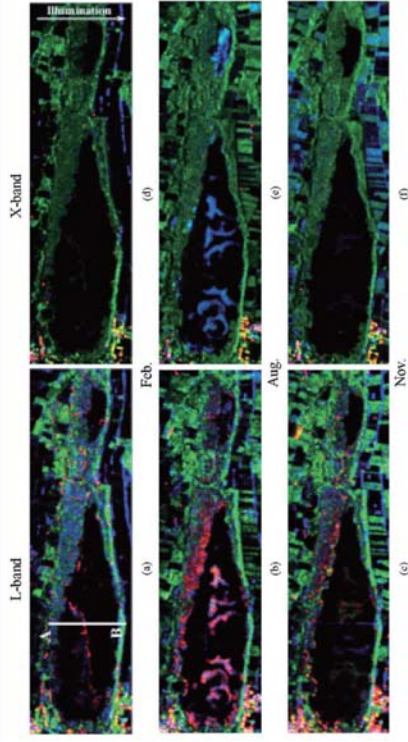
# POLSARの各成分とカラー合成画像



色付けされたPOLSAR画像

POLSAR画像成分合成画像

# 散乱電力成分分解を用いた画像解析 ~ 周波数による違い(2) ~



PISAR-L/Xによる新潟市佐潟付近の散乱電力成分分解結果

# 散乱電力成分分解を用いた画像解析 ~ 周波数による違い(1) ~

Date	Incidence angle (deg.)
2004/7/4	31.71 ~ 40.13
2004/8/4	30.19 ~ 44.18
2004/11/3	31.19 ~ 43.19

Frequency	L-band	X-band
Polarization (pol)	25 by 2.5	125 by 1.25
Averaging size (pixels)	3 by 3	10 by 10



解析領域：新潟市佐潟付近

湖岸にはマコモやヨシが群生（8月）

湖面にはヒシやハスが群生（8月）

# 散乱電力成分分解を用いた画像解析 ~ 入射方向依存性の補正(1) ~



入射角度がsquintした際の  
建物と道路の2回反射成分 = Pv成分

面の傾きの補正 (T33成分の最小化)

$$[T(\theta)] = [R_P(\theta)][T][R_{P_s}(\theta)]^\dagger$$

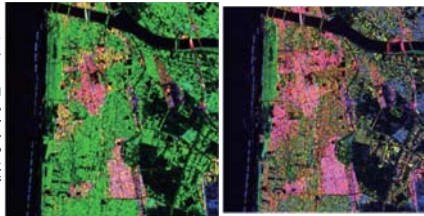
$$[R_{P_s}(\theta)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} ; \text{rotation matrix}$$

$$2\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\text{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} \right)$$



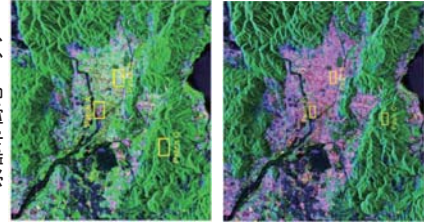
## 散乱電力成分分解を用いた画像解析 ～入射方向依存性の補正(2)～

新潟市街地エリア



回転処理なし

京都市街地エリア



回転処理あり

21

Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.



## PiSAR2-Xによる解析結果



新潟市鳥屋野潟付近の散乱電力分解結果 (PiSAR2-X, X-band)

新潟市鳥屋野潟付近のGoogle earth画像



22

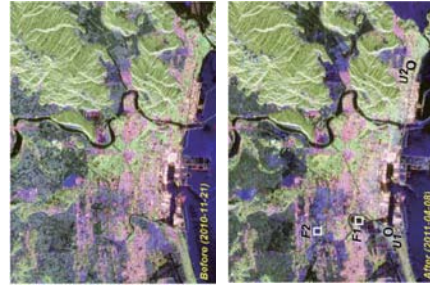
Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.



## 津波被害の検出への応用(1)

Polarization Mode	Date	Incidence angle (center)	Status
Quad-pol Ascending	2009/04/02	23.772°	Before earthquake
Quad-pol Ascending	2010/11/21	23.794°	Before earthquake
Quad-pol Ascending	2011/04/08	23.828°	After earthquake

解析領域：石巻エリア

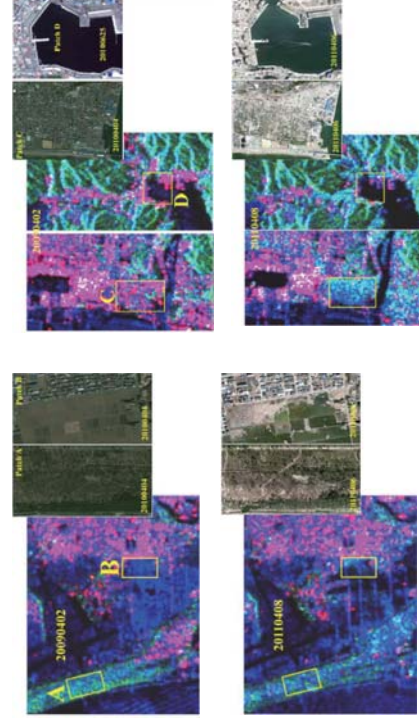


23

Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.



## 津波被害の検出への応用(2)



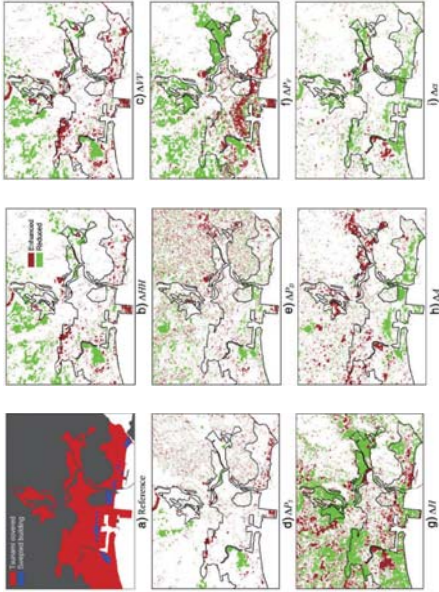
24

Wave Information Engineering Laboratory / Yamada Lab.





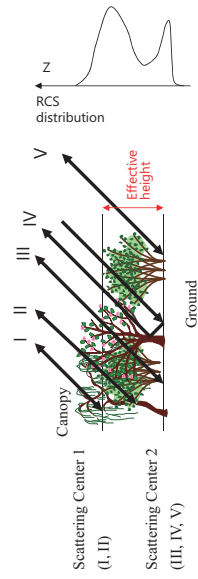
### 津波被害の検出への応用(3)



25

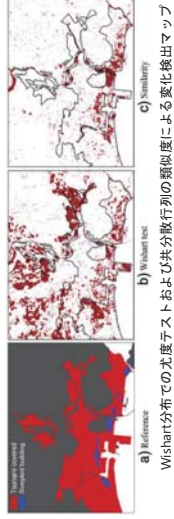
### インターフェロメトリへの応用(1)

- Polarimetric SAR Interferometry
- 主にL-bandでの森林の高さ推定 (=バイオマス推定)  
一部の入射波は地表面まで到達、一部は樹冠で散乱  
個々の散乱成分の偏波状態の違いを利用して分離



27

### 津波被害の検出への応用(4)



出典: S.E.Park, Y. Yamaguchi, D.J.Kim,  
"Polarimetric SAR remote sensing of the 2011 Tohoku  
earthquake using ALOS/PALSAR,"  
Remote Sensing of Environment, 132, pp.212-220, 2013.

MRF contextual情報フェュージョン手法を用いた変化検出マップ

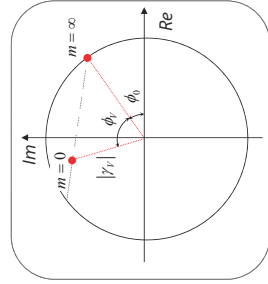
26

### インターフェロメトリへの応用(2)

#### Volume Scattering Model

$$\gamma(\omega) = \exp(j\phi_0) \frac{\gamma_r + m(\omega)}{1 + m(\omega)} \left[ \gamma_r + \frac{m(\omega)}{1 + m(\omega)} (1 - \gamma_r) \right]$$

$\gamma_r$ : Volume decorrelation coeff.  
 $m$ : Ratio of Ground to Vol. scat.  
 $\phi_0$ : Topographical phase



6 unknowns

Geometrical representation of the volume scattering model  $\rightarrow$  3 independent observation is necessary (fully polarimetric observation)

28

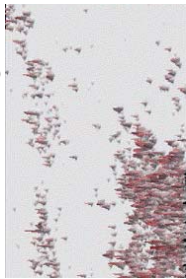
## インターフェロメトリへの応用(3)



SIR-C/X-SAR image



E-SAR image



森林の実効高度推定結果

## まとめ

- 偏波レーダの利用 = ターゲットの偏波散乱特性
  - ✓ 画像として形状が分離されていないターゲットの形状／特徴の抽出が可能
- POLSAR画像解析
  - ✓ 画像の固有値解析からの特徴量 (Entropy, Alpha Angle, Anisotropy, etc.) を用いることで、教師なしでも土地被覆分類が可能
  - ✓ 事前導出された基本ターゲットのCoherency (or Covariance)行列モデルを用いることで、各基本ターゲットの散乱電力の寄与の分解が可能
  - ✓ POLSAR画像の周波数依存性(ターゲットと使用波長数帯)
  - ✓ POLSAR画像における入射波とターゲットの方位依存性(Pd成分)
  - ✓ 応用例 (土地被覆分類, 津波被害の検出)
- インターフェロメトリへの応用
  - ✓ Polarimetric SAR Interferometry = 高さ方向の推定 = 3次元観測

# 電波および超音波解析技術による テラヘルツ波イメージングの高分解能化

水津 光司, 久保田 貴之, 村瀬 岳志

電波と光波の中間領域に位置する電磁波であるテラヘルツ波は、適度な物質透過特性を有することから、コンクリート等の建築構造物内の亀裂診断などへの応用が期待されている。テラヘルツ波を用いたイメージングを実施する際、イメージング分解能と、深さ方向も含めた測定領域の大きさにはトレードオフの関係が存在する。テラヘルツ波を集光した場合、原理的には回折限界程度の高分解能が得られるが、レンズの焦点深度の問題からサンプルの深さ方向の情報を得ることが難しくなる。一方、コリメートビームを用いた場合、深さ方向の情報は比較的得やすいが、イメージング分解能はビーム径で限定される。

我々は、電波領域や超音波領域で活用されている解析技術を導入し、コリメートビームを用いながらも、回折限界程度の高分解能化を得る試みを行っている。具体的には、合成開口アレイ技術、もしくは振幅相関合成映像化法によりイメージングの高分解能化を試み、かつ、レーダポーラリメトリにより物質の判別を行っている。これら解析技術を適用するためには、信号発生源（エミッタ）もしくは検出器（レシーバ）の位置情報を任意に設定し、かつ、信号の位相情報を取得する事が必要である。この目的のために、ファイバー結合型の光伝導アンテナによるテラヘルツ波パルス発生装置を構築した。

構築した実験装置の送信器および受信器周りの測定部周辺を図1に示す。送信器は-30度の位置に固定されている。受信器はサンプル点をピボットとした回転ステージ上に設置されており、0~90度の範囲で移動できるようにしている。受信器の位置設定精度は約10  $\mu\text{m}$ である。サンプル台は回転ステージ上に設置されており、-90~90度の範囲で回転可能である。これらの措置により、任意の入射角度が設定可能であり、合成開口アレイ技術や振幅相関合成映像化法での解析に要求される測定が可能となっている。金属に対する正反射により取得したテラヘルツ波時間波形に対し、高速フーリエ変換により求めたパワースペクトルを図2に示す。約1.7 THzまでの帯域でテラヘルツ波の検出が可能であり、ピークは約0.5 GHzである。現在、偏波計測に備えてテラヘルツ波帯の偏光子である金属ワイヤグリッドを導入し、サンプルや送信器および受信器を再設置することなく、垂直偏波および水平偏波を送信・検出できるように系の改良を行っている。

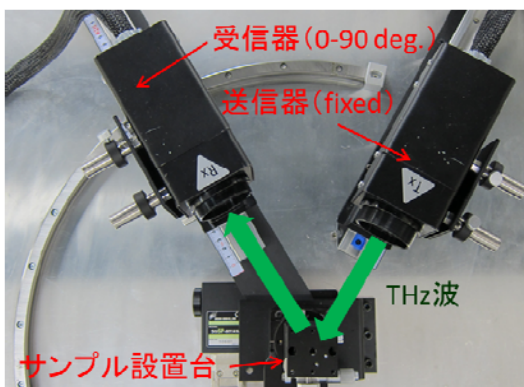


図1 テラヘルツ波測定部外観.

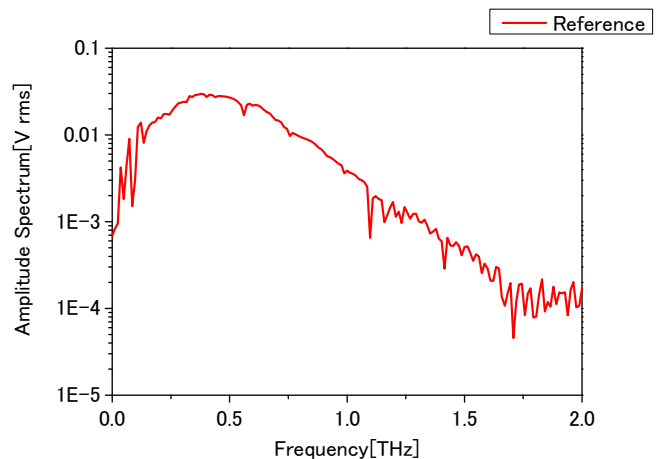


図2 金属正反射時のテラヘルツ波パワースペクトル.

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
マイクロ領域/マクロ領域における複合的アプローチ技術の開発に関する研究

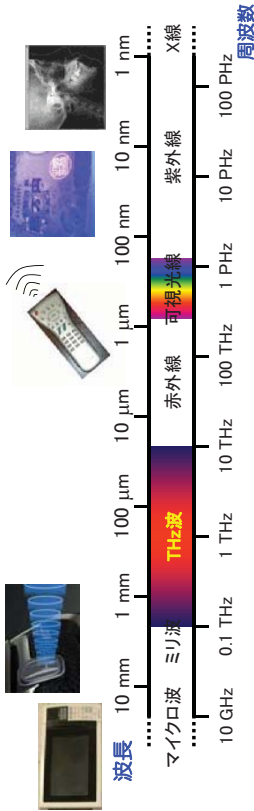
2015年8月6日(木)

超音波およびテラヘルツ波による  
複合的非破壊検査の高精度化に関する研究  
(マクロチーム)

## 電波および超音波解析技術による テラヘルツ波イメージングの高分解能化

水津 光司, 久保田 貴之, 村瀬 岳志

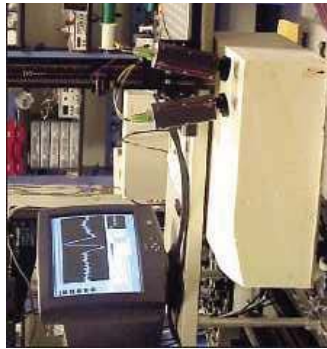
### テラヘルツ波とは



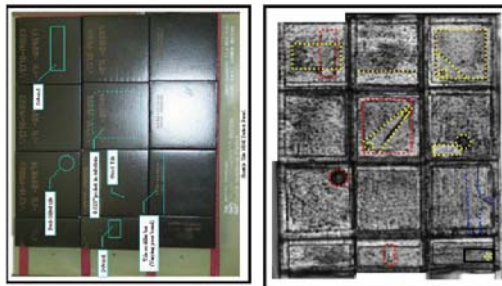
- 格子振動 (結晶)
- 分子振動 (有機物)
- 分子間振動 (水素結合)
- 骨格振動 (たんぱく質)
- テバイ緩和 (極性分子液体)
- 分子回転 (気体)

分光やイメージングなどの応用

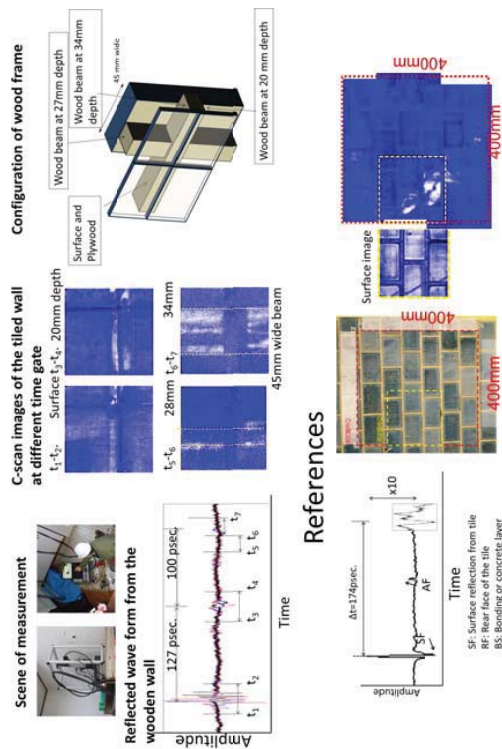
### スペースシャトル外壁の検査



亀裂や欠陥を  
事前にみつける

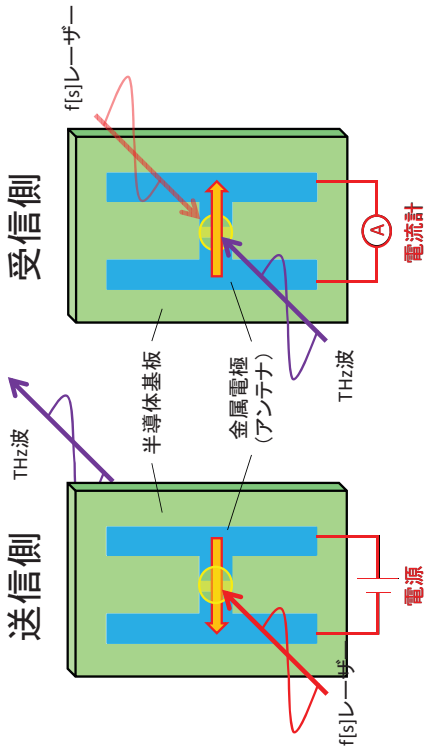


### テラヘルツ波による断層像計測例





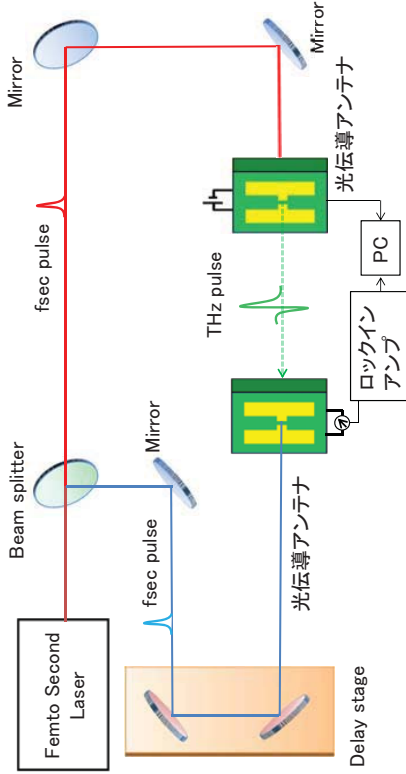
### 光伝導アンテナによるTHz波発生/計測



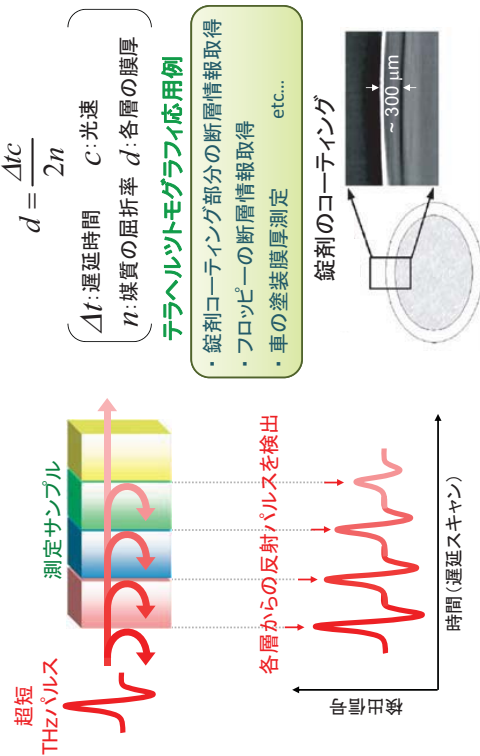
$$E(t) \propto \frac{\partial^2 p(t)}{\partial t^2} \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} I_e$$

### テラヘルツ波時間領域分光法

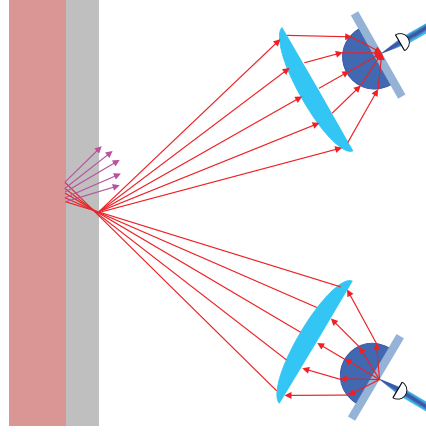
THz-TDS: THz-wave Time Domain Spectroscopy



### テラヘルツ波による断層像取得

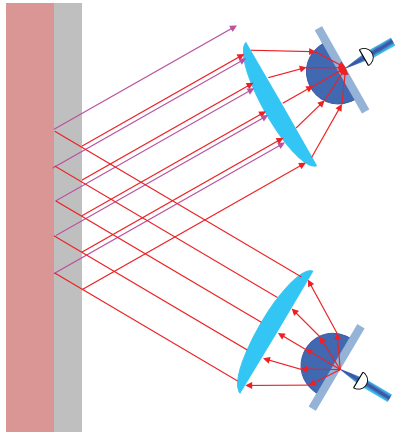


### テラヘルツ波による断層像取得



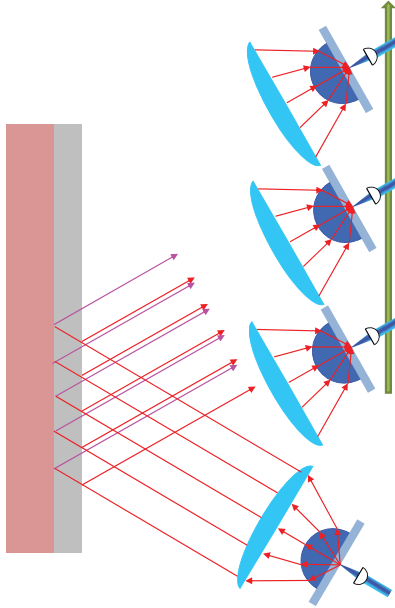
テラヘルツ波を集光した場合  
計測可能なサンプル位置/深さ情報が限定される

## テラヘルツ波による断層像取得



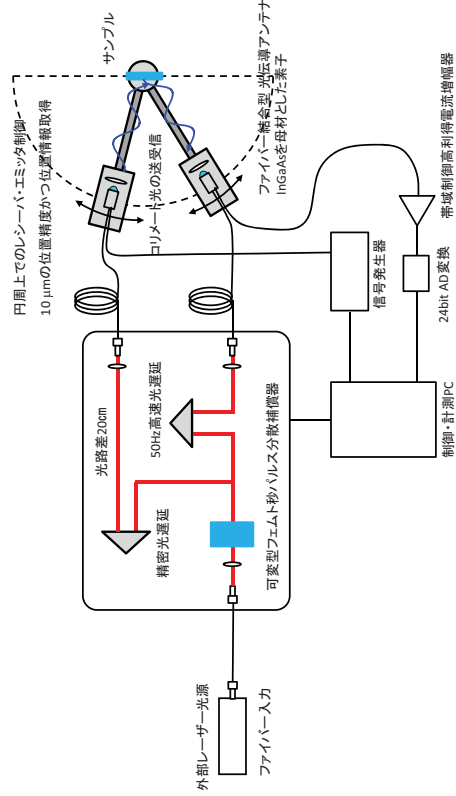
テラヘルツ波をコリメートした場合  
画像の縦/横分解能がコリメートビーム径で限定される

## 電波領域の技術導入

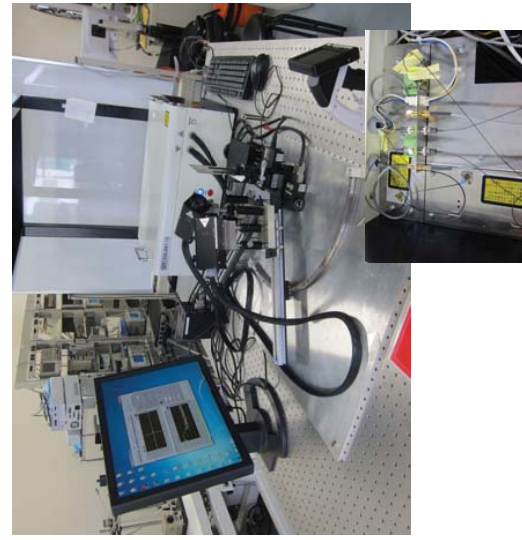


例) 合成開口アレインテナ技術  
検出器を波長以下の精度で移動/情報取得  
波長と同程度の縦/横分解能

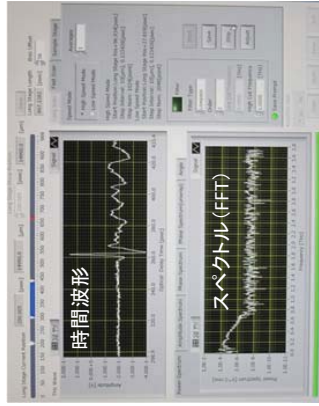
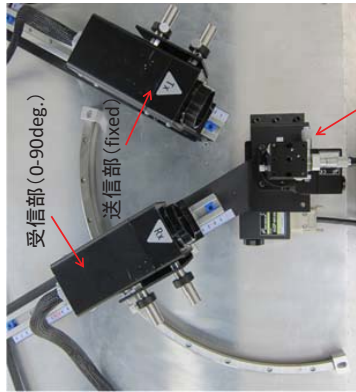
## スペクトルデザイン社 装置構成図



## ファイバー型テラヘルツ波時間領域分光装置



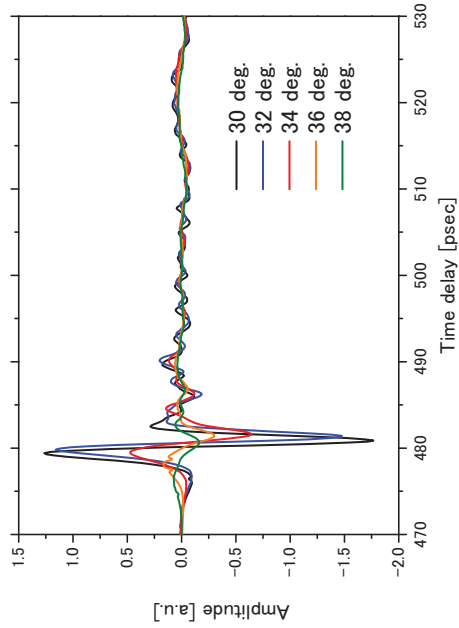
### ファイバー型テラヘルツ波時間領域分光装置



サンプル設置台 (0-180deg.)

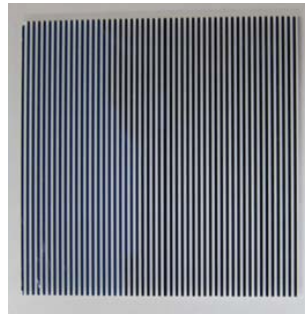
- ・受信部を円弧上に回転(0-90deg.)
- ・サンプル設置台をその場で回転(0-180deg.)
- ・時間波形を取得してFFTによりスペクトルを計算

### 金属板からの反射THz波



到来波推定@長研究室

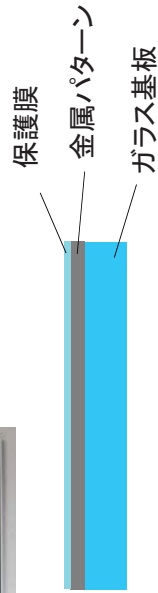
### ロンキールーリング



エドモンド製ロンキールーリング

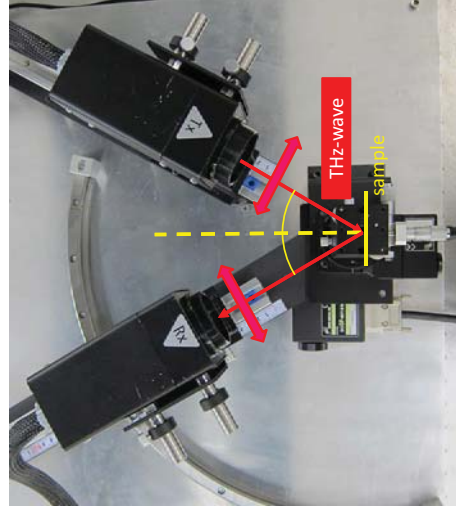
- 25/inch, 50/inch, 100/inch (1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm)
- (0.3 THz, 0.6 THz, 1.2 THz)

ガラス基板上に金属周期パターン  
→ 偏波のテストターゲット



→ 金属パターンの自作

### ロンキールーリング



送信機・受信器の偏波

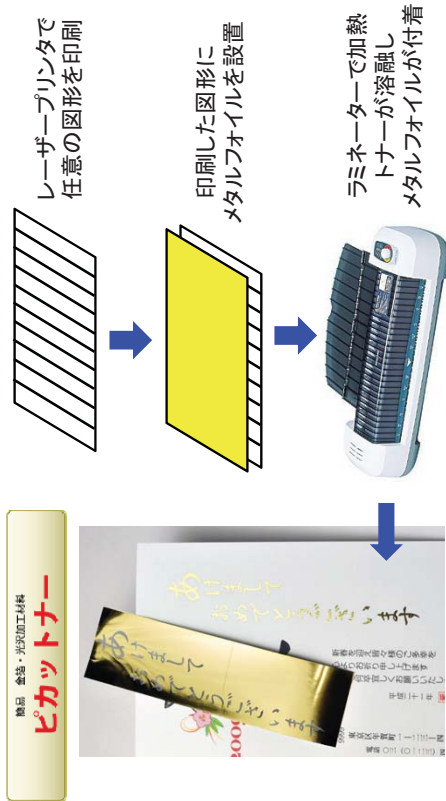
- 水平:H
- 垂直:V

90度回転させて設置

- H-H
  - H-V
  - V-H
  - V-V
- の4パターン

レーダーポラリメトリ@中林研

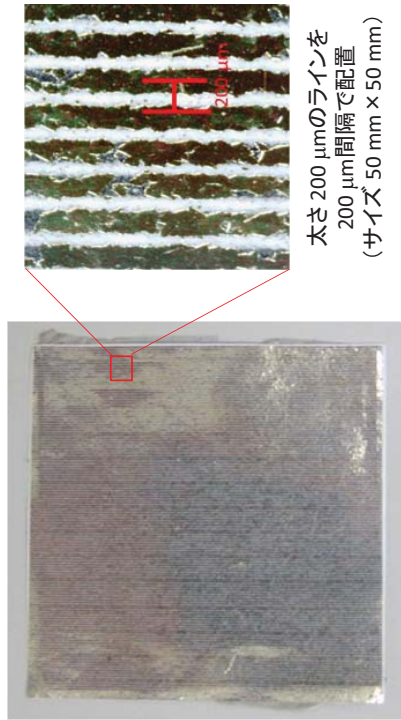
### メタルフォイルプリンティング



株式会社 アメイジング  
<http://www.amazing.co.jp/picatoner/>

レーザープリンタ  
 印刷解像度 1200 x 1200 dpi (約21 μm)

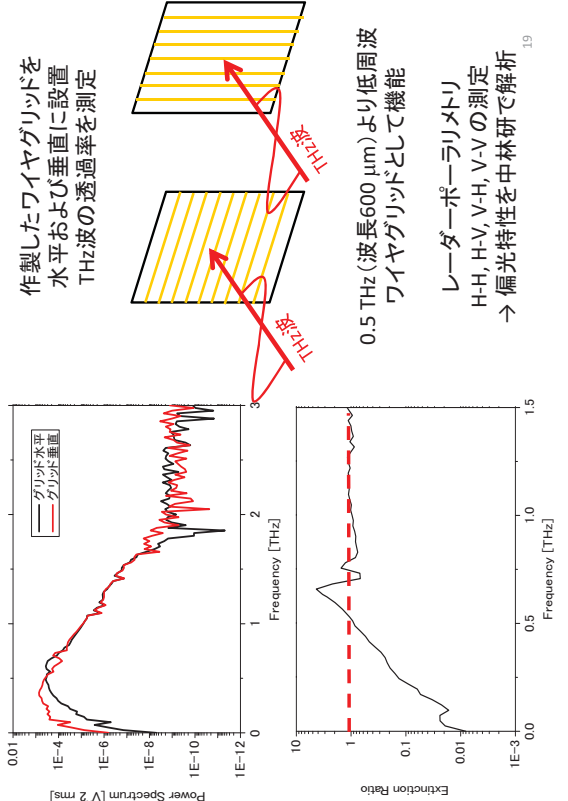
### メタルフォイルプリンティング



200 μmより細かいパターンの場合  
 レーザープリンタでの印刷時でパターンが潰れる

五 工業大学 18

### メタルフォイルプリンティング



### インクジェットプリンタ + 銀ナノインク

Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd, "Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices," The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013), pp. 363-372, Zurich, CH, Sept. 2013 (Best Paper Award).

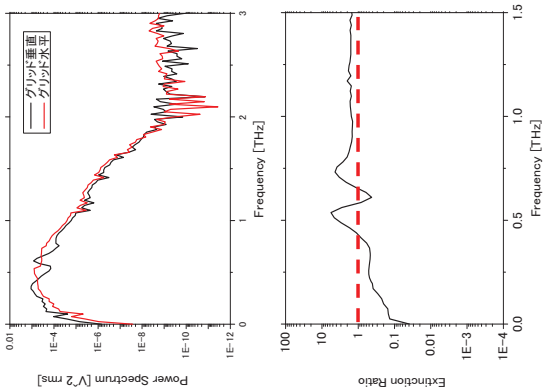
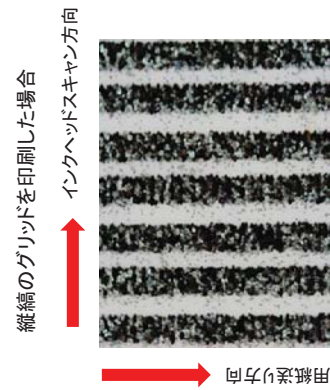


熱焼結が不要な銀ナノインクと  
 家庭用インクジェットプリンタで  
 フレキシブルな電子回路基板を実装

川原圭博 准教授 東京大学大学院情報理工学  
[http://kawahara.akg.t.u-tokyo.ac.jp/home/profile\\_ja](http://kawahara.akg.t.u-tokyo.ac.jp/home/profile_ja)

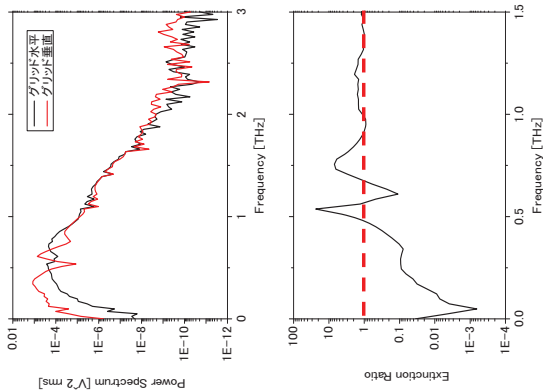
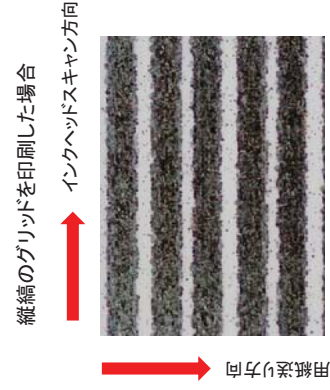


### インクジェットプリンタ＋銀ナノインク



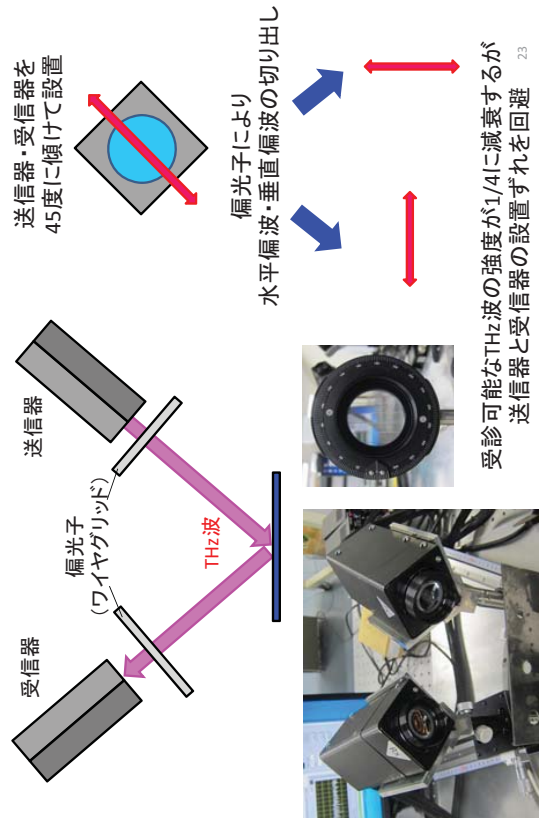
グリッドのラインに空隙  
(電気伝導性が悪い)  
ワイヤグリッドとしての機能  
消光比が悪い

### インクジェットプリンタ＋銀ナノインク



グリッドのラインが繋がっている  
(電気伝導性が良い)  
ワイヤグリッドとしての機能  
低周波では2桁の消光比

### 偏波測定系



受診可能なTHz波の強度が1/4に減衰するが  
送信器と受信器の設置ずれを回避

### 今後の予定

- 実験系の構築**
- ・ワイヤグリッド偏波コントロール
    - ・ THz伝搬状態
    - ・ サンプル設置精度
- 計測対象の準備**
- ・ サンプル作製法
  - ・ 2次元面内分布の評価  
(金属/誘電体サンプル)  
(誘電体/誘電体サンプル)
    - ・ 深さ方向の評価
    - ・ 表面形状の評価

# テラヘルツ波を用いたレーダポーラリメトリによる 非破壊検査の基礎検討

中林 寛暁, 須藤 博樹

偏波(ポーラリメトリ)技術は, レーダ分野においてターゲットの識別や分類等に利用でき, その重要性が認識されている. また, テラヘルツ波は電波と光の境界を含む電磁波で, 光のような直進性と電波のような透過性を併せ持つ. 本報告では, テラヘルツ波を用いて, 一般にレーダで用いられているポーラリメトリ技術により高精度な非破壊検査を行うための基礎検討について示す.

図1に測定装置の外観を示す. ターゲットを中心に送受信アンテナはそれぞれ左右30度に固定し, 広帯域パルスを用いて受信スペクトルを得る. 送信(Tx)アンテナからターゲットまでの距離が約15cm, 受信(Rx)アンテナからターゲットまでの距離が約16cm, 送受信アンテナの偏波は偏光子を用いて変更する. 本測定のターゲットは, 市販の導電性インクと配線基板用プリンタを用いて作製した金属グリッドとする(図2). また, 送信した振幅及び位相スペクトルを推定するために, ターゲットを金属板として予備測定を行っている. ターゲットの散乱行列が与えられたときのレーダポーラリメトリの基本式を式(1)に示す.

$$P = \left| \mathbf{E}_i^T [S] \mathbf{E}_i \right|^2 \quad (1)$$

但し,  $P$ : 受信電力,  $\mathbf{E}_i$ : 送信の偏波状態,  $[S]$ : ターゲットの散乱行列,  $T$ : 転置を表す. ターゲットが金属板と金属グリッドの両方において, 送信及び受信の偏波を垂直, 水平とした4種類の組み合わせにおいて, 振幅及び位相スペクトルを測定した. まず, 金属板の0.02, 0.12, 0.34, 0.75THzでの測定された受信スペクトル値を, 各周波数での送信スペクトルと等しいものと仮定する. 次に金属板による測定から求めた送信スペクトラムと, 金属グリッドが垂直方向となるように設置したターゲットの各周波数の受信スペクトラムを用いて散乱行列を求め, 式(1)により偏波シグネチャを求めた.

ターゲットを図2のような規則的なパターンから成る金属グリッドとした場合, 偏波シグネチャは周波数に対して規則的に変化することが確認された. このことから, ターゲットの偏波シグネチャの周波数特性を事前に把握しておくことにより, ターゲットの状態を把握することが可能となり, 本手法が非破壊検査に有効であることを示した.

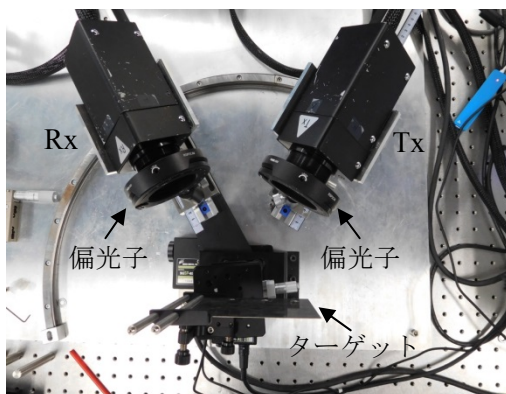


図1 測定装置の外観

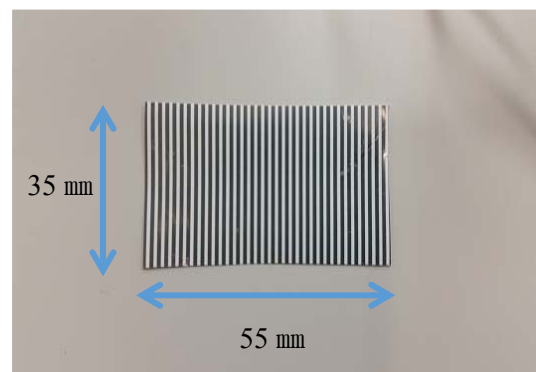


図2 測定に用いたターゲット

# テラヘルツ波を用いたレーダポラリメトリによる 非破壊検査の基礎検討

Basic Study of Non Destructive Inspection Using Radar Polarimetry for Terahertz Radiation

千葉工業大学 電気電子情報工学科

Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering,  
Chiba Institute of Technology

中林 寛暁

須藤 博樹

Hiroaki NAKABAYASHI

Hiroki SUDO

千葉工業大学 中林研究室  
CHIIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
MIZUHARA LABORATORY

1

シンポジウム「複合的プローブ技術」  
2015.8.6 千葉工業大学

## テラヘルツ波の特徴

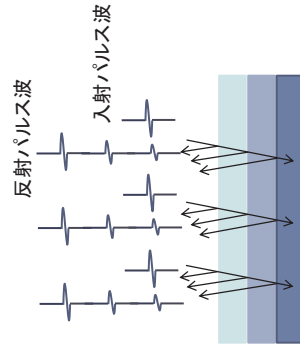
テラヘルツ波は波長が短いため、多くの  
情報を得られる



イメージング技術に応用することで、  
分解能が高くマイクロ波よりも高精度  
な検査ができる



電磁波の透過性や指紋スペクトラム  
が得られ、その特徴より非破壊検査  
や化学分析に応用されつつある



テラヘルツパルス波の深さ方向の計測  
注)電子情報通信学会誌 Vol.97, No. 11, 2014  
引用

千葉工業大学 中林研究室  
CHIIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
MIZUHARA LABORATORY

3

シンポジウム「複合的プローブ技術」  
2015.8.6 千葉工業大学

## 背景

レーダポラリメトリは、マイクロ波を放射させターゲットの反  
射波を測定し、偏波を用いて垂直成分・水平成分の両成分  
から情報を得る技術

テラヘルツ波は電波と光の境界を含む電磁波で、光のような  
**直進性**と電波の**透過性**を併せ持ち波長が短く、分解能が高  
いなどの特徴がある



テラヘルツ波を用いてレーダポラリメトリを利用すること  
で高精度なイメージング技術に有効

千葉工業大学 中林研究室  
CHIIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
MIZUHARA LABORATORY

2

シンポジウム「複合的プローブ技術」  
2015.8.6 千葉工業大学

## テラヘルツ波を用いた分析法

時間領域で得られたパルス波をフーリエ  
変換する方法は、テラヘルツ波の分析装  
置に最も用いられている



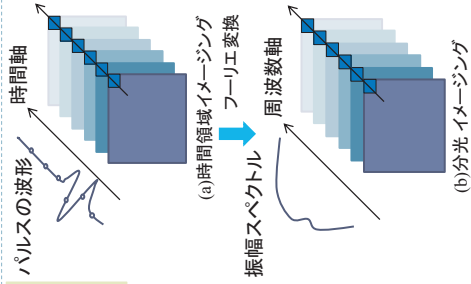
各周波数の 電界の振幅強度、位相情報  
が得られる



テラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)

特徴

各周波数での物質の透過特性を把握す  
ることができる



時間領域イメージングと分光イメージングの関係  
注)電子情報通信学会誌 Vol.97, No. 11, 2014 引用

千葉工業大学 中林研究室  
CHIIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
MIZUHARA LABORATORY

4

シンポジウム「複合的プローブ技術」  
2015.8.6 千葉工業大学

## 目的

テラヘルツ波を用いて、一般にリモートセンシングで利用されているレーダポラリメトリ技術により、高精度な非破壊検査を実現するための基礎検討

### < 検討内容 >

- 1) 送信波の推定(予備測定)
- 2) テラヘルツ波による散乱行列の推定
- 3) 偏波シグネチャの周波数特性

## レーダポラリメトリ

レーダポラリメトリは散乱行列をもとにした偏波状態を用いてターゲットの識別や分類を行う技術である

レーダポラリメトリの基本式

$$E'_i = [S]E'_i \quad (1)$$

$i$  番目の受信波 散乱行列  $i$  番目の送信波

$$E'_i = \begin{bmatrix} E'_{HH} \\ E'_{VH} \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$E'_i = \begin{bmatrix} E'_{Hh} \\ E'_{Vh} \end{bmatrix}$$

受信の偏波状態 送信の偏波状態

$$S_{HV}$$

## 送信波の推定方法

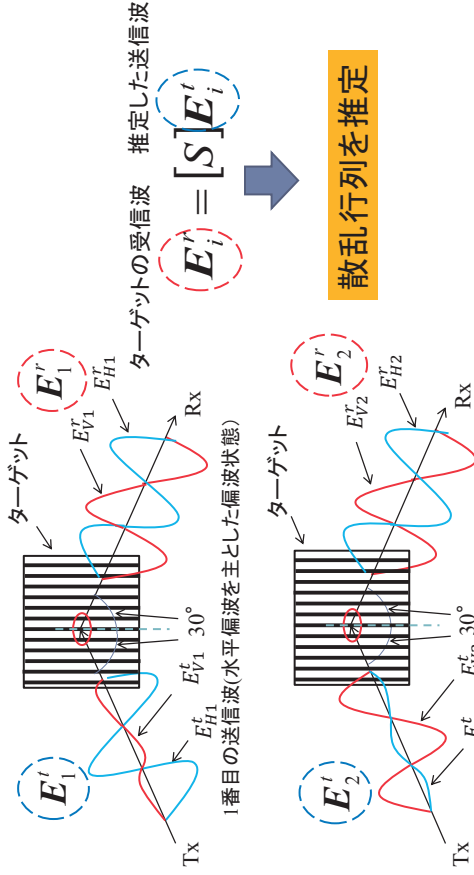
送信波  $E'_i$  は、金属板の散乱行列  $[S]$  を以下と仮定し、推定する

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式(2)で送信波  $E'_i$  を推定

$$E'_i = [S]^{-1} E'_i = E'_i \quad (2)$$

## 散乱行列の推定方法





## 散乱行列による偏波シグネチャ

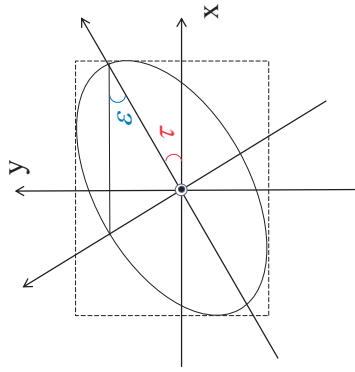
ターゲットの散乱行列が与えられたときに、偏波状態によってターゲットによる受信電力がどのように変化したのかを表す

偏波シグネチャの受信電力  $P$  (Co-Pol)

$$P = |E_r^T [S] E_t|^2 \quad (3)$$

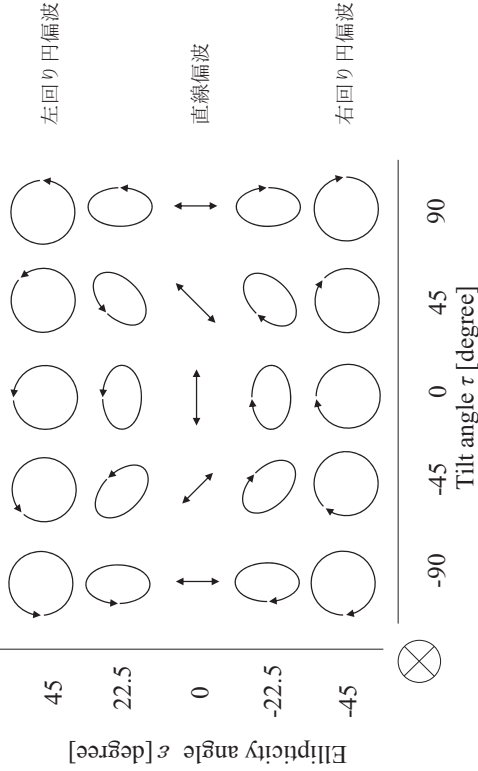
$$E_t = \begin{bmatrix} \cos \tau & -\sin \tau \\ \sin \tau & \cos \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon \\ j \sin \varepsilon \end{bmatrix}$$

T: 転置,  $E_r$ : 送信の偏波状態,  $\varepsilon$ : 楕円角,  $\tau$ : 傾き角



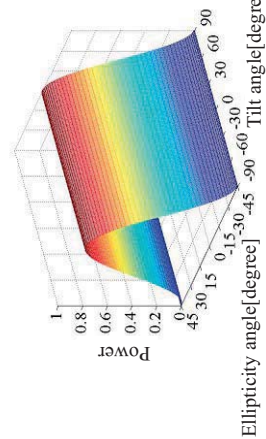
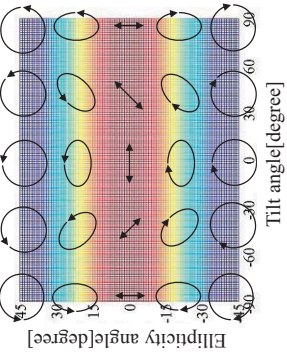
楕円偏波を表すパラメータ

## 幾何学的パラメータによる偏波の表現

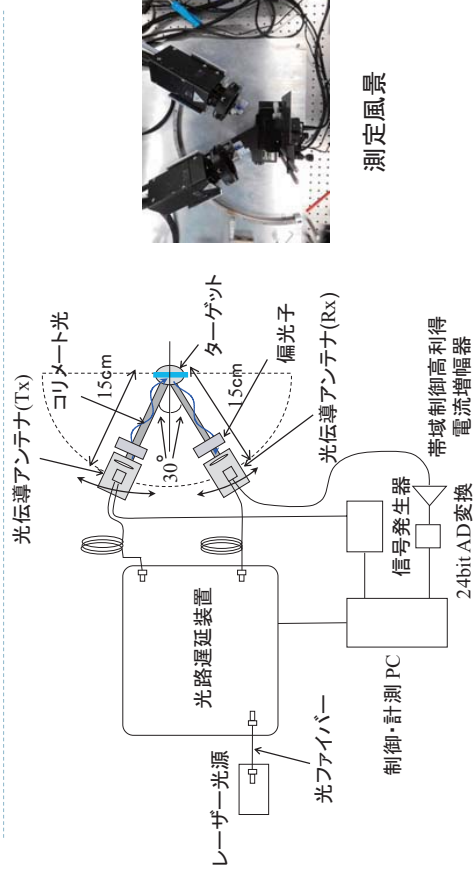


## 金属板の偏波シグネチャ例(Co-Pol)

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



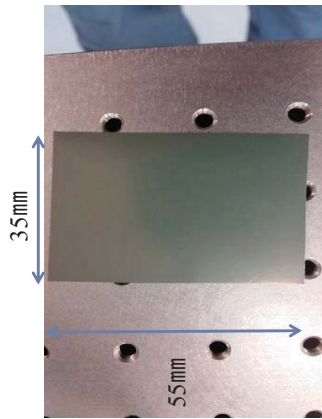
## 測定装置



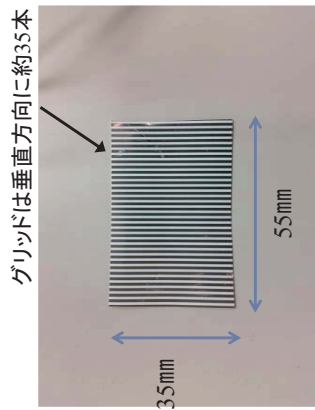
測定風景

測定装置の構成

## 本測定で用いたターゲット



a) リファレンス (金属板)



b) ターゲット (金属グリッド)

※配線基板プリンタにより導電性インクを用いて作製

## 解析方法

リファレンスの測定結果による送信波の推定



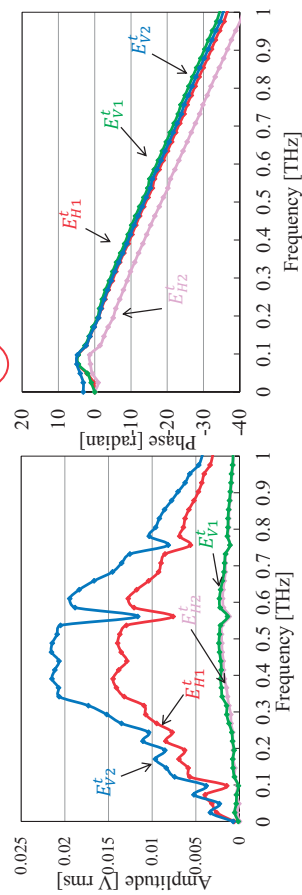
ターゲットの散乱行列の推定



偏波シグネチャ化

## 送信波の推定

$$E_i^t = [S]E_i^r$$

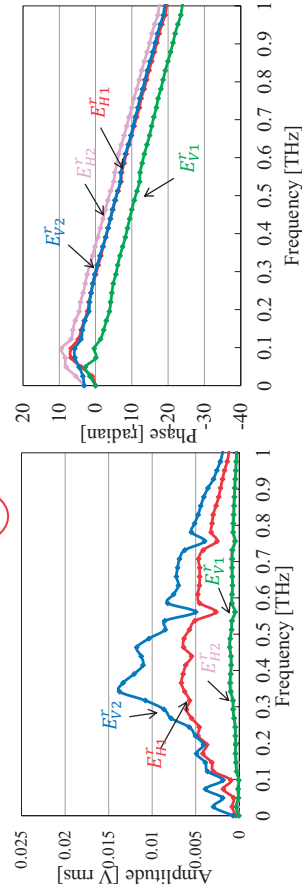


a) 振幅スペクトル

b) 位相スペクトル

## ターゲット (金属グリッド) の受信波

$$E_i^r = [S]E_i^t$$



a) 振幅スペクトル

b) 位相スペクトル

## 散乱行列の推定

$$E_i' = [S] E_i$$

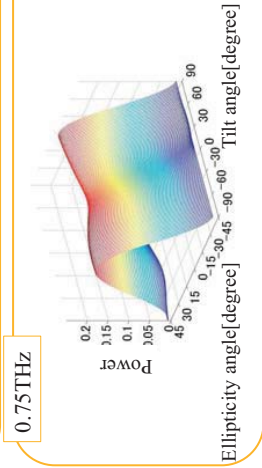
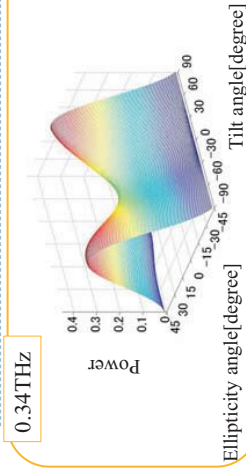
$$0.02\text{THz: } [S] = \begin{bmatrix} 0.3191e^{j0.6260} & 0.0483e^{j1.9853} \\ 0.0594e^{-j2.7143} & 0.8831e^{j0.3395} \end{bmatrix}$$

$$0.12\text{THz: } [S] = \begin{bmatrix} 0.5239e^{j2.3858} & 0.0183e^{-j3.0705} \\ 0.0302e^{-j2.5854} & 0.4937e^{j1.6345} \end{bmatrix}$$

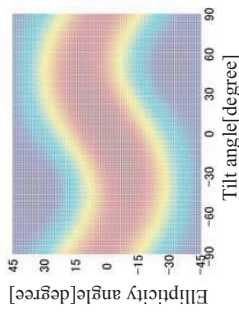
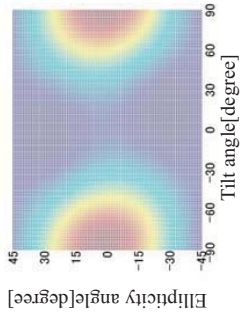
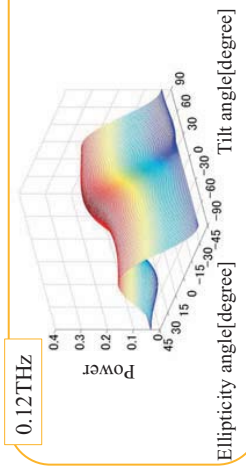
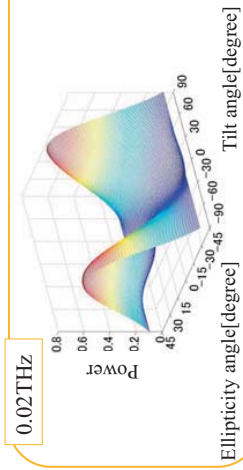
$$0.34\text{THz: } [S] = \begin{bmatrix} 0.4769e^{-j0.8473} & 0.0128e^{j1.4898} \\ 0.0253e^{j2.9425} & 0.6652e^{-j0.8423} \end{bmatrix}$$

$$0.75\text{THz: } [S] = \begin{bmatrix} 0.4582e^{j0.3138} & 0.0117e^{j2.2980} \\ 0.0303e^{-j2.6401} & 0.4866e^{-j0.1008} \end{bmatrix}$$

## ターゲットの偏波シグネチャ(Co-Pol)



## ターゲットの偏波シグネチャ(Co-Pol)



## まとめ

《ターゲットの散乱行列を広帯域で推定し、偏波シグネチャを計算》

- ・偏波シグネチャは金属グリッドの幅、間隔に依存する
- ・0.02, 0.12, 0.34, 0.75 THzの全ての周波数において、垂直偏波成分が受信される
- ・0.12, 0.75 THzでは、垂直偏波に加え水平偏波成分も受信される



偏波シグネチャの周波数特性解析は、ターゲットの分析に有効な手法

# テラヘルツ波における振幅相関合成映像化方法のシミュレーション検討

陶 良, 水津 光司

超音波映像化非破壊探査技術は、医療分野における人体診断、工業分野における金属内部欠陥探査、海洋開発分野における水中探査、土建分野におけるコンクリートや地中探査など、幅広く研究・応用されている。一方、テラヘルツ波は光波の直進性・短波長特性と電波の波動性を兼ね備え、非破壊検査への応用が高く期待されるが、その発生と検出が困難であり、近年まで未開拓の領域であった。そこで、本研究グループでは、テラヘルツ波パルスを送受信装置を構築し、電波領域や超音波領域で活用されている解析技術を導入し、テラヘルツ波による高分解能のイメージング検査技術の開発を目指して研究を進めている。

本講は、この研究の一環として、テラヘルツ波パルスエコーの実験装置より得られたパルス応答を用いて、今まで研究し続けている超音波振幅相関映像化技術を適用することの可能性について、シミュレーションにより検討する。

受波器アレーによる超音波パルスエコーを用いた映像化方法では、合成開口法[1]が代表的であり、理論上では探査位置に対応する各受信出力の線形合成により探査位置での反射率に比例する映像値が得られる。しかし帯域制限によるインパルス応答の歪みと受信ノイズの影響も線形的に反映され、狭帯域または高周波減衰の激しい場合、受信信号のSN比が低い場合では、映像結果の分解能とSN比が顕著に低下する。そこで、映像値の線形性を犠牲にし、分解能よく被探査体の位置と形状の判断を優先させるように、非線形処理により反射パルス信号のピークを強調する振幅相関合成処理法が考案されていた。これは、受信出力の組合せを変えて振幅の乗算を行い、それらの乗算結果を合成する方法であり、金属内部の欠陥探査[2-3]や地中埋設物映像化探査[4-6]において、映像分解能とSN比向上の効果が検証されている。

本講では、ノイズおよび指向性や反射率の変化を無視した簡略化の点反射モデルの基に、シミュレーション反射信号を作成し、これらのシミュレーション信号を用いて映像化した。その結果、振幅相関合成映像化方法の有効性が見込まれ、実験サンプル作製や受信器走査間隔と範囲などの設定に関する参考情報が得られている。今後はテラヘルツ波を用いた実験データを中心に、主に指向性、SN比、実験装置の位置誤差などの影響について、映像化方法の検討を進める予定である。

- [1] S. R. Doctor, T. E. Hall, L. D. Reid. SAFT – The evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. *NDT International* 19, 163-172 (1986).
- [2] Z. Guo, L. Tao, S. Gao, Y. Li, S. Yu. Flaw cross-section reconstruction using the correlation synthesizing delayed amplitude technique. *NDT&E International* 24, 203-206 (1991).
- [3] L. Tao, X. R. Ma, H. Tian, Z. X. Guo. Phase superposition processing for ultrasonic imaging. *Journal of Sound and Vibration* 193, 1015-1121 (1996).
- [4] L. Tao, T. Tanaka, T. Watanabe, S. Motooka. Ultrasonic underground imaging using amplitude correlation synthesizing method. *Japanese Journal of Applied Physics* 38, 3148-3153 (1999).
- [5] 陶良, 渡辺勉, 本岡誠一. クロス型送・受波器アレーを用いた地中埋設物の3次元映像化. 日本音響学会誌, 60, 727-734 (2004).
- [6] 陶良, 本岡誠一. 地中埋設物の3次元映像化探査における受波器アレーの配置方法. 電子情報通信学会論文誌, J94-A, 870-877 (2011).

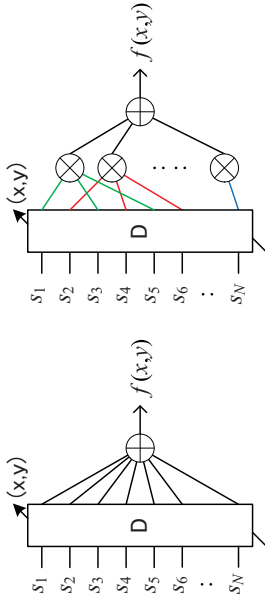


## テラヘルツ波における 振幅相関合成映像化方法 のシミュレーション検討

2015. 8. 6

陶良 水津 光司

## 振幅相関合成法概要



### Synthetic Aperture

- 線形処理
- ✓ 分解能・SNRIに制限

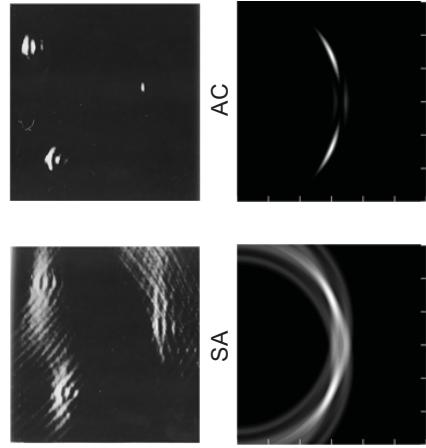
### Amplitude Correlation

- 分解能・SNRの向上
- ✓ 相関次数・サブアレイ開口幅などパラメータの最適化

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

2

## 映像比較例 (超音波)



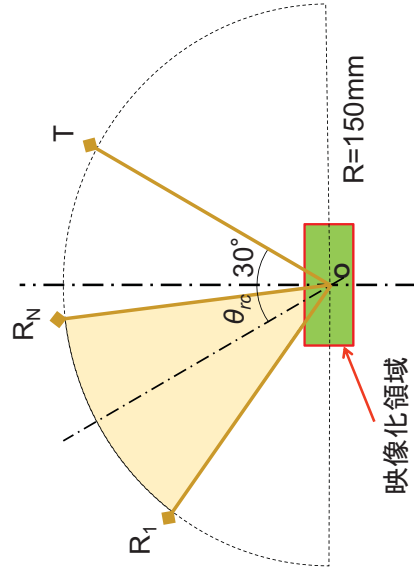
- 金属欠陥  
・応答歪み  
・ノイズ

- 地中埋設物  
・低周波

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

3

## テラヘルツ計測システムモデル



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

4

## シミュレーション方法

- 信号作成

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^M R_j \cdot p \left( t - \frac{r_{ij} + r_{ij}}{c} \right)$$

$p(t)$ : パルス応答(基準波形・実験取得)  
 $r_{ij}$ : 送信器・ $j$ -th反射体(点)間距離  
 $r_{ji}$ :  $i$ -th受信器・ $j$ -th反射体(点)間距離  
 $R_j$ :  $j$ -th反射体(点)の反射係数  
 $c$ : 光速 (0.299792458 mm/ps)

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

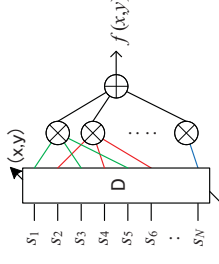
5

## シミュレーション方法

- 映像化

$$f^\pm(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{N-(o-1)p} \prod_{j=0}^{o-1} s_{t+jp}^\pm \left( \frac{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}| + |\mathbf{r}_{t+jp} - \mathbf{r}|}{c} + \tau_s \right)$$

$N$ : 受信器数  
 $o$ : 相関次数  
 $p$ : 相関アレイ内受信器間隔  
 $\mathbf{r}_j$ : 送信器位置  
 $\mathbf{r}_m$ :  $m$ -th受信器位置  
 $\tau_s$ : ピークシフト時間(基準波形より)

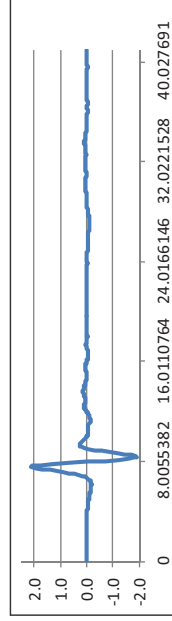


2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

6

## シミュレーション条件

- パルス応答(基準波形)



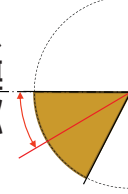
取得方式: 送・受信対置  
 サンプリング間隔: 0.080055382 psec  
 データ長: 512  
 ピークオフセット: 94  
 (ピーク周波数成分: 約0.4THz →  $\lambda$  約750 $\mu$ m)

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

7

## シミュレーション条件

- 受信アレー
  - 30° ±30° : (31個-1) × 2°  
or (61個-1) × 1°
  - 45° ±45° : (31個-1) × 3°
- 相関パラメータ



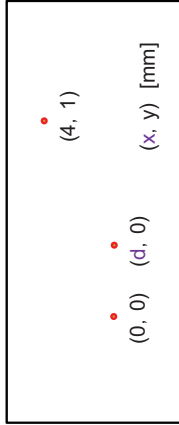
相関次数: 4, 3, 1 (通常SA),  
 相関アレイ内受信器間隔(数): 6, 12,  
 例) 4 × 6: 1 · 7 · 13 · 19 + 2 · 8 · 14 · 20 + ...

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

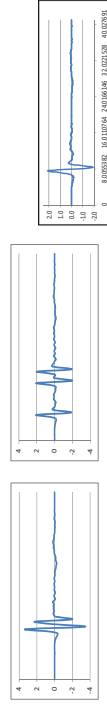
8

## シミュレーション条件

- 反射体モデル



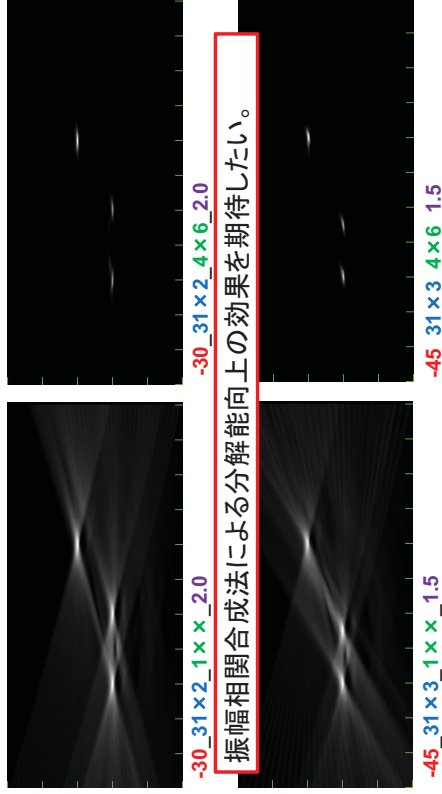
- 受信例



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

9

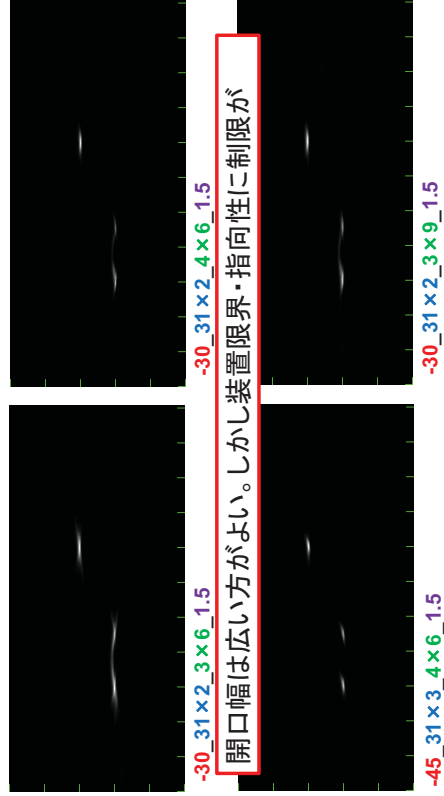
## 映像結果例 (SA vs AC)



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

10

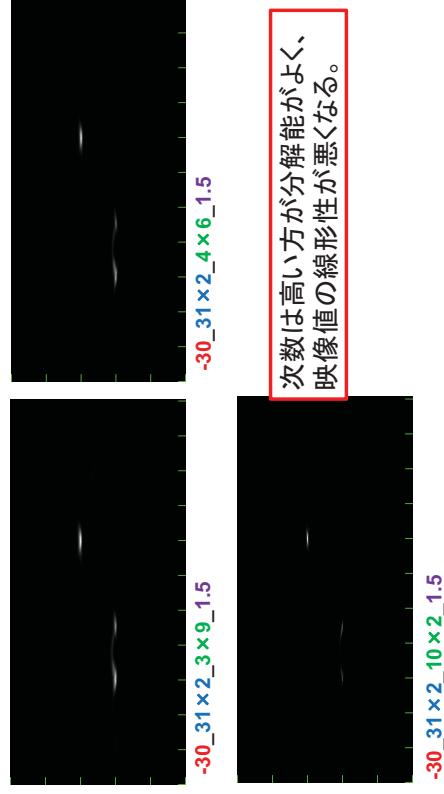
## 映像結果例 (開口幅・相関間隔)



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

11

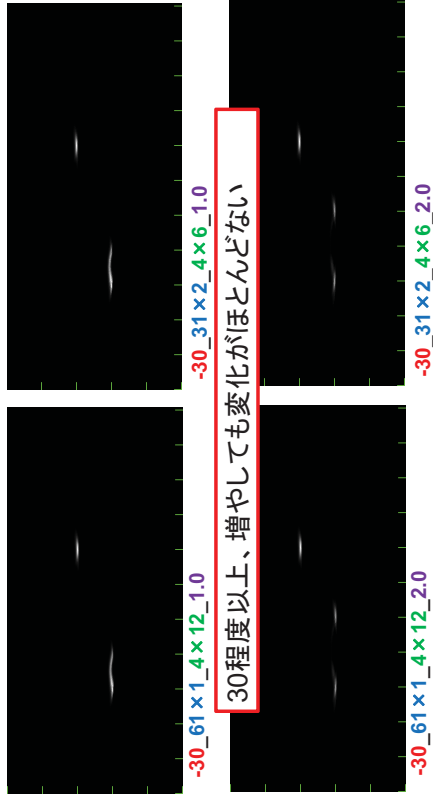
## 映像結果例 (相関次数)



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

12

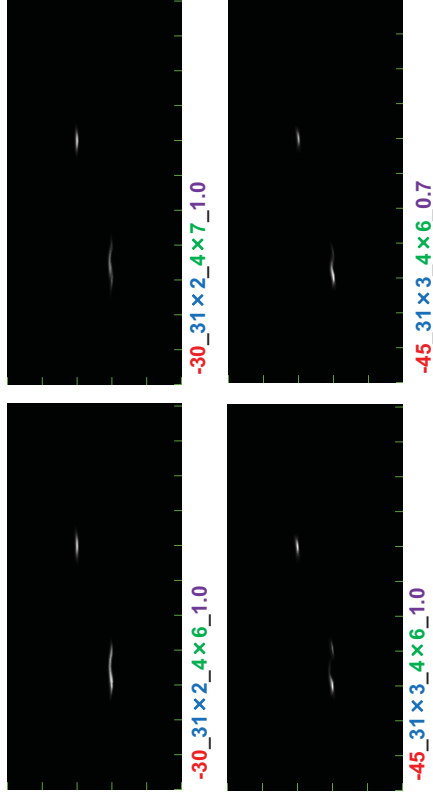
### 映像結果例 (受信総数)



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

13

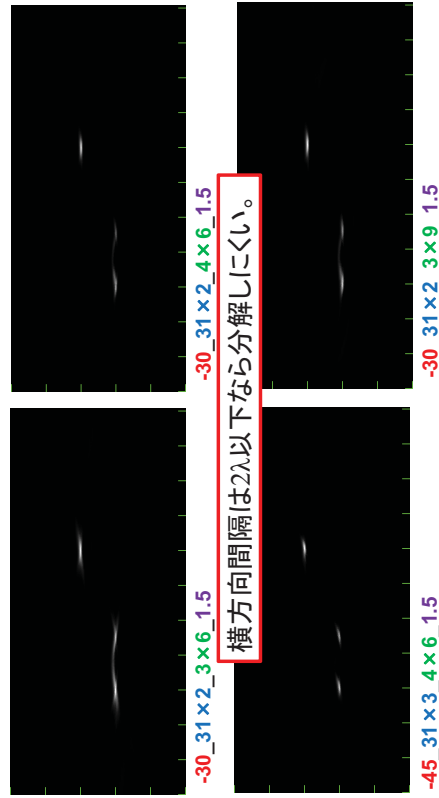
### 映像結果例 ( $\Delta x$ )



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

14

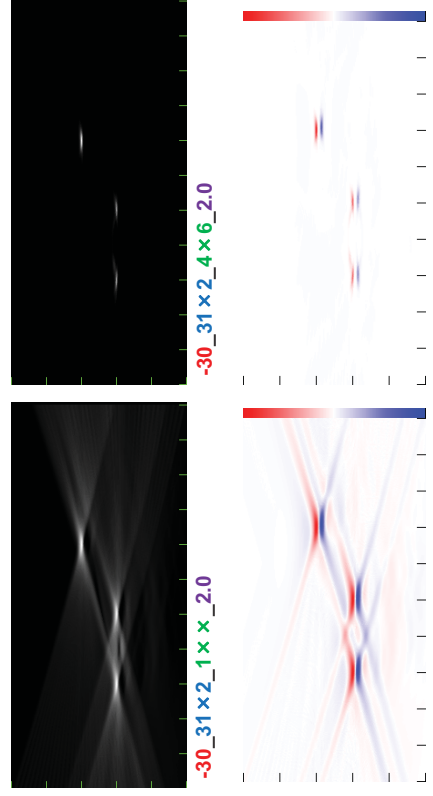
### 映像結果例 ( $\Delta x$ )



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

15

### 映像結果例 (Bipolar)



2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

16



## まとめ

- ◆ 相関合成は、分解能・SN比向上に有効
- ◆ 開口幅・相関幅は、分解能に重要(指向性配慮要)
- ◆ 相関次数は、高いほど分解能アップが線形性悪化
- ◆ 受信総数は、現条件下30程度以上なら影響なし
- ◆ 横方向分解能は、約 $2\lambda$ (実験サンプル作製参考)

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

17

## これから(実験検討中心)

- ワイヤ単体反射強度によるSN比低下の影響
- 送受信機指向性の影響
  - ―― 受信SN比との兼合い
- 光速・送受信機設置誤差の影響
  - ―― 適応走査の可能性
- パルス圧縮の適用

2015 Symposium on Complex Probing Technology 2015. 08. 06

18

# ポスター・セッション

- [P-01] Auメッキ層及び台形型ビームを用いたMEMS熱式マイクロ・アクチュエータ  
落合邦行, 長田貴裕, 室英夫
- [P-02] リチウムイオン電池に対する電気二重層キャパシタおよび電解コンデンサの併用時における検討  
牛崎拓, 佐藤宣夫
- [P-03] 昇圧回路におけるパワーMOSFETの高速スイッチング特性の評価  
大里辰希, 佐藤宣夫
- [P-04] サファイア基板上窒化ガリウム層の表面形状及び表面電位観測  
潤間威史, 佐藤宣夫, 石川博康 (芝浦工業大学)
- [P-05] 数値解析に向けた power-MOSFET のモデル構築の検討  
小村裕作, 佐藤宣夫
- [P-06] 電流可視化装置の検出可能電流値の検討  
池田新平, 佐藤宣夫, 木村建次郎(神戸大学)
- [P-07] AFM/KFM を用いたミスト法及び真空蒸着法による  $\alpha$ -NPD 薄膜の電子物性評価  
小高晃裕, 佐藤宣夫, 香取重尊 (津山工業高等専門学校)
- [P-08] パワーデバイス用GaN on GaN結晶の評価  
安喰和也
- [P-09] パワーデバイス用GaN on Si結晶の評価  
池田直樹
- [P-10] パワーデバイス用SiC結晶の評価  
内盛瑞記
- [P-11] パワーMOSFET のモデリング –ゲート・ソース間電圧特性–  
齋藤勇氣, 小森郷平, 小田昭紀, 佐藤宣夫, 山本秀和
- [P-12] 非平衡大気圧ヘリウムプラズマの軸対称3次元流体モデリング  
–プラズマの径方向均一性へ及ぼす誘電体特性の影響–  
小森郷平, 大木一真, 小田昭紀
- [P-13] ダイヤモンドライクカーボン成膜用炭化水素プラズマの質量分析およびプローブ診断  
深井駿, 小田昭紀
- [P-14] PLD 法による  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  薄膜の組成制御  
三浦宏記, 小谷昌大, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹

- [P-15] 固相反応法による  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  多結晶の作製  
小谷昌大, 三浦宏記, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹
- [P-16] PLD 法による  $\text{CuInS}_2$  薄膜の組成制御  
喜屋武一成, 吉田亮, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹
- [P-17] PLD 法で作製した  $\text{CuInS}_2$  薄膜の S アニール  
曾柏翰, 喜屋武一成, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹
- [P-18] 化合物半導体光吸収層を有する高効率太陽電池デバイスの製作  
朱旭昕, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹
- [P-19] 原子間力顕微鏡・表面電位顕微鏡によるタリウム系化合物のナノ構造評価  
坂本優也, 沈用球 (大阪府立大学), 脇田和樹
- [P-20] Temperature Dependence of Phonon Spectra of  $\text{TlInS}_2$  Crystal  
R. Paucar, Y. Shim (Osaka Prefecture University), K. Wakita,  
O. Alekperov (Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences),  
N. Mamedov (Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences)
- [P-21] Self-Organized Au Nanoparticles over  $10^{12}/\text{inch}^2$  with Equidistant Intervals Formed by  
Magnetron Sputtering Method  
Yukiko Yasukawa, Xiaoxi Liu (Shinshu University), Akimitsu Morisako (Shinshu University)
- [P-22] 直交偏波励起によるTHz波表面発生の検討  
橋野風, 秋葉拓也, 関裕次郎, 水津光司, Yuri H. Avetisyan (Yerevan State University)
- [P-23] 全反射減衰分光およびアンテナ解析による汗腺のテラヘルツ帯電磁波応答の解明  
長嶋一樹, 水津光司
- [P-24] タンデム配置による狭線幅 $1.5\mu\text{m}$ 帯二波長ピコ秒レーザーの開発  
木村優基, 多田純, 金子直也, 水津光司, 宮本克彦 (千葉大学), 尾松孝茂 (千葉大学)
- [P-25] 周波数アップコンバージョンを用いた室温高感度テラヘルツ波検出  
多門寛晃, 小倉悠, 水津光司
- [P-26] テラヘルツ波時間領域全反射減衰分光法による結晶育成過程の直接観察の検討  
古橋遼平, 水津光司, 内田裕久 (アークレイ株式会社)
- [P-27] 導波路化によるテラヘルツ・エバネッセント波分光法の高感度化に関する検討  
水野光貴, 木村優基, 水津光司

- [P-28] セルフ・ヘテロダイン方式による連続テラヘルツ波検出  
南部広樹, 細身将大, 水津光司
- [P-29] テラヘルツエリプソメトリによる非破壊計測の検討  
村瀬岳志, 近藤啓司, 水津光司, 山本直人 (名古屋大学)
- [P-30] Type II バックワード位相整合によるTHz波発生の高効率化  
関裕次郎, 秋葉拓也, 小田切政樹, 橋野風, 水津光司,  
Yuri H. Avetisyan (Yerevan State University),  
宮本克彦 (千葉大学), 尾松孝茂 (千葉大学)
- [P-31] テラヘルツ波を用いた合成開口アレー測定  
東島侑矢, 村松琢己, 須藤博樹, 久保田貴之, 長敬三, 中林寛暁, 水津光司
- [P-32] ループ素子状無給電素子を用いた基地局アンテナの広帯域化  
佐々木隆吉, 長敬三
- [P-33] 薄型単一指向性アンテナの広帯域化  
五十畑棟規, 長敬三
- [P-34] 左手系漏れ波オムニアンテナの等価回路解析  
坂本旭, 長敬三, 道下尚文 (防衛大学校)
- [P-35] 右手・左手系複合伝送線路を用いた移動通信基地局用移相器  
柳澤康人, 長敬三, 道下尚文 (防衛大学校)
- [P-36] 無線電力伝送における位置ずれ時の伝送効率改善  
高橋直矢, 長敬三
- [P-37] Propagation Characteristics Using Ray-Tracing Method for Spatial MIMO Adaptive  
Transmission in Street Microcell Environments  
Quang Ha Nguyen, Hiroaki Nakabayashi
- [P-38] 超音波を用いた地中埋設物三次元映像化におけるRayleigh波の影響について  
陶良, 本岡誠一
- [P-39] パルス圧縮法を用いた超音波計測法に関する検討  
一感度補正型信号と線形予測法を併用した信号帯域拡大一  
千村大, 陶良



私立大学戦略的研究基盤形成支援事業シンポジウム

## 複合的プローブ技術

2015年8月6日

---

編集・発行：千葉工業大学 複合的プローブ技術研究グループ

連絡先：〒275-0016 習志野市津田沼2-17-1

千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 脇田和樹

Tel: 047-478-0374 E-mail: kazuki.wakita@it-chiba.ac.jp

---

無断転載・複製を禁ずる