

高電圧下(1000V)における
放電・マイグレーション挙動と
改善案の紹介

研究開発部

背景と目的

ハイブリッドカーを始めとする高出力・高効率かつコンパクトな
パワー制御システムの実現のために高電圧におけるプリント基板の
耐放電・イオンマイグレーション性の向上が重要課題であるが、
その挙動については不明な点も多い。



高電圧下における放電・イオンマイグレーション観察・評価技術および
その改善方法について検討を実施。

報告内容

01

高電圧における 放電・マイグレーション観察および評価技術の検討

光学顕微鏡下直接観察
観察例

02

耐放電・イオンマイグレーション改善法に関する検討

電極・基材表面形状と耐放電・マイグレーション効果
放電の観察
電極形状と電界強度 計算
電極間基材表面状態とマイグレーション発生・成長形態

表面処理と耐放電・マイグレーション効果

03

まとめと今後の課題

1. 高電圧における放電・マイグレーション
観察および評価技術の検討

イオンマイグレーション試験方法

簡易試験法(脱イオン水滴下法)

- ・長所)
試験中の観察可能
- ・短所)
実際の発生条件と異なる場合多い

環境試験法(恒温槽)

- ・長所)
多チャンネルの電気特性評価可能
(電気抵抗、電気化学インピーダンス等)
- ・短所)
試験中の観察困難

目的

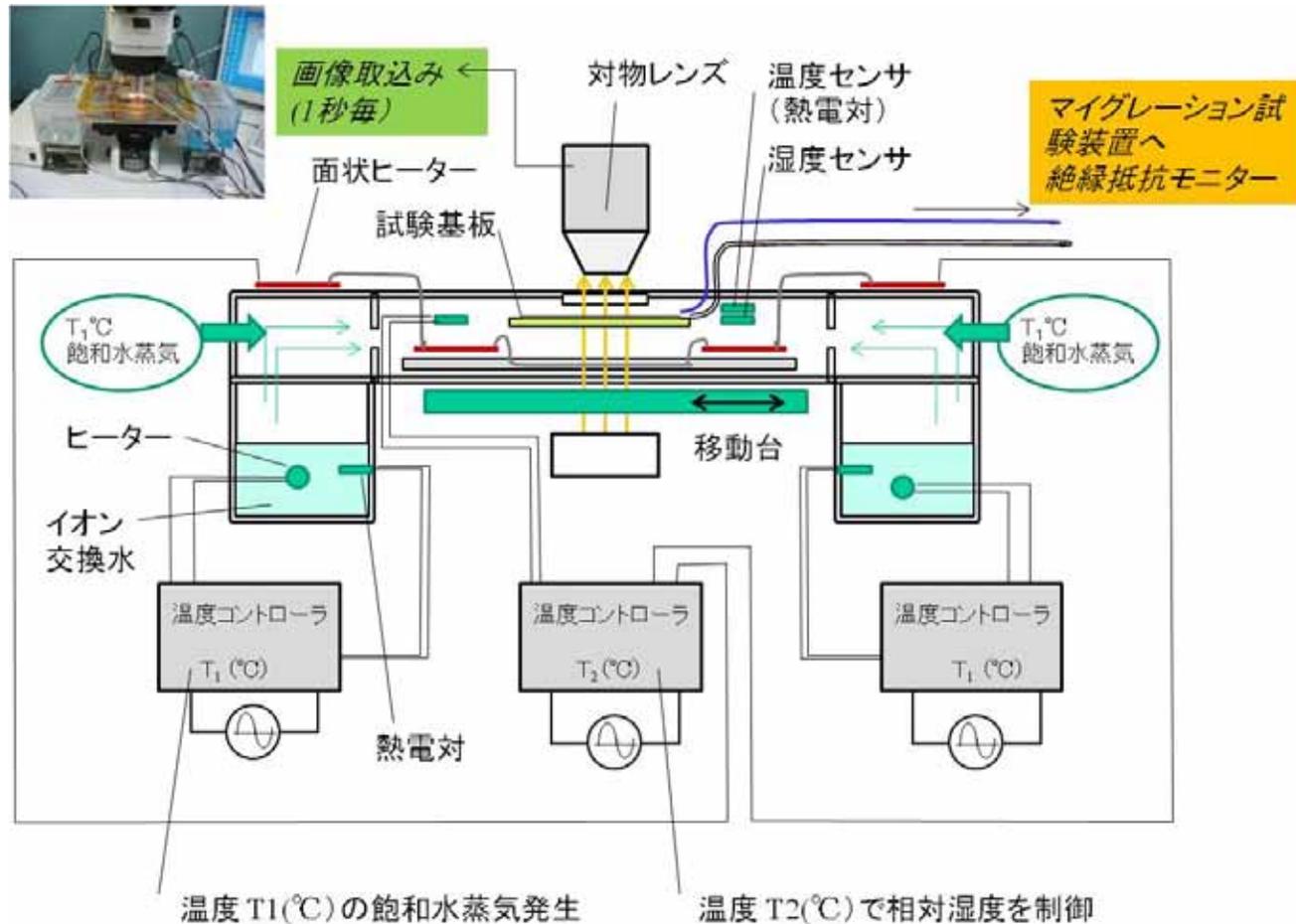
01

実基板でのマイグレーション発生経緯を顕微鏡観察しながら環境試験が出来る機器を開発する。

02

電圧1000V印加時のイオンマイグレーションの観察を行い、高電圧イオンマイグレーションの特徴を明らかにする。

イオンマイグレーション観察システム構成

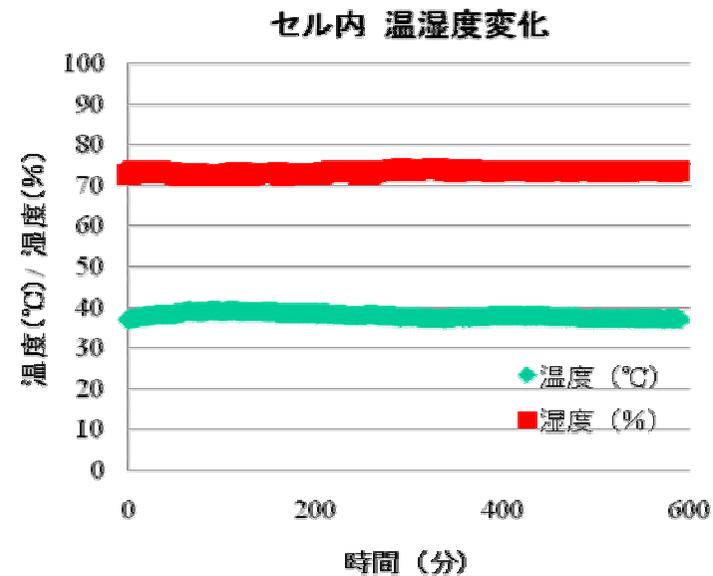


観察装置および小型セル仕様

01 小型セル試験環境

50 (max)湿度:85%(max) の条件下で 最大1000 V印加可能であること
(標準条件: 温度:40 , 湿度:75%)

02 基板電極対向部(電極間距離 最大0.25mm)が視野(200倍)内に収まること



試験基板

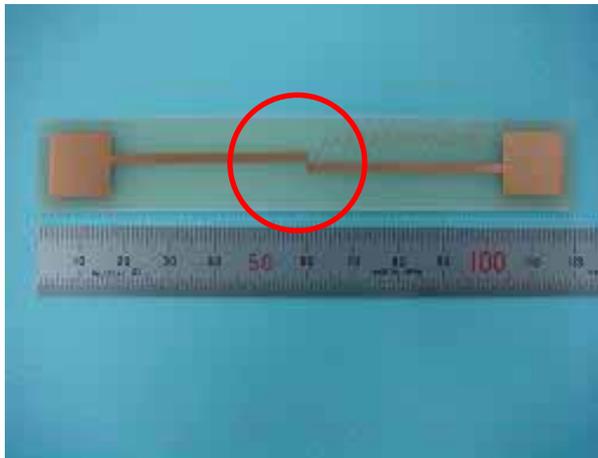
FR-4基板

12cm x 2cm

銅箔厚み: 35 μm

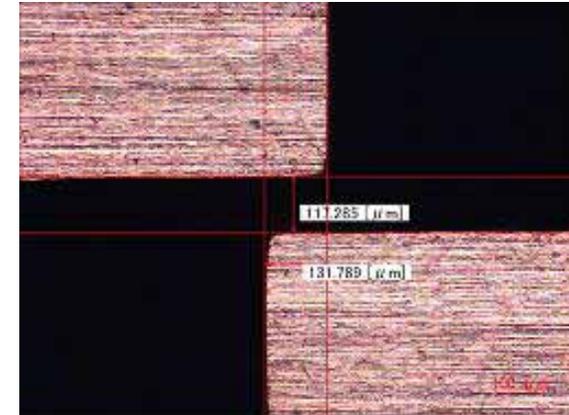
電極間距離: 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mm

電極重なり: 0.15 mm

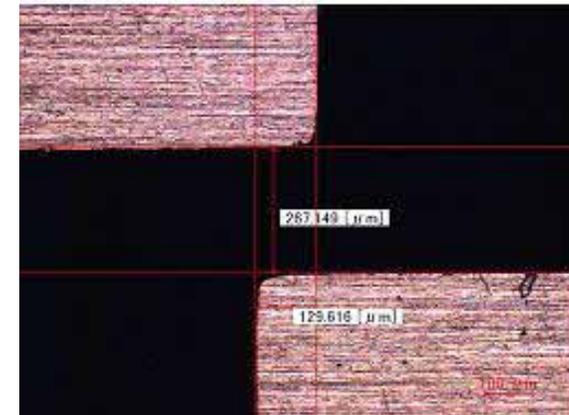


顕微鏡視野内で確実に放電・マイグレーションが発生する電極形状

a) 0.10 mm



b) 0.25 mm



高電圧放電・マイグレーション監視装置

最大電圧:1kV、絶縁抵抗 1×10^6 以下で電源回路から切り離し



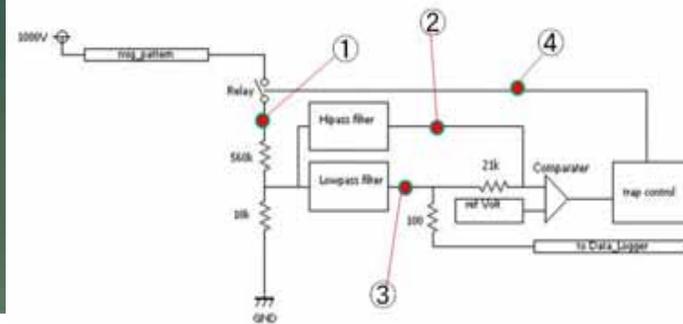
監視システム

48ch xユニット数 同時監視



監視装置

(48ch / ユニット)



監視回路 模式図

放電およびマイグレーションによる絶縁低下を検出可

光学顕微鏡下の直接観察では1チャンネルのみ使用

標準試験条件の検討

比較的短時間で放電による絶縁低下を起こさずにマイグレーション発生が観察出来る加速条件を求める。

加速因子) a) 加速電圧: 0 ~ 1000 V

b) 電極間距離: 0.1, 0.15, 0.20, 0.25 mm

c) 汚染物質: NaCl水溶液塗布(ディップ法)・乾燥
必要に応じてHClにてpH調整
NaCl: 0, 0.01, 0.1, 1, 10 wt%

NaCl 10wt%

電極間距離 0.15mm

電圧 10V

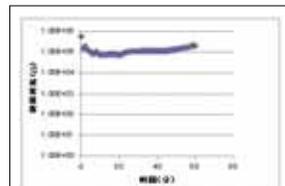
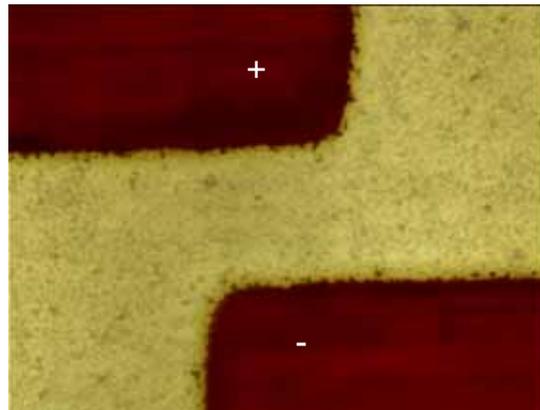


図 NaCl10% 10V における絶縁抵抗の時間変化

100V

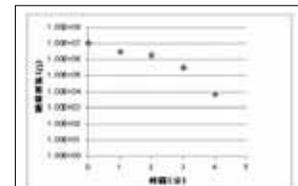


図 NaCl10% 10V における絶縁抵抗の時間変化

NaCl 1wt%

電極間距離 0.10mm

電圧
100V

200V

1000V

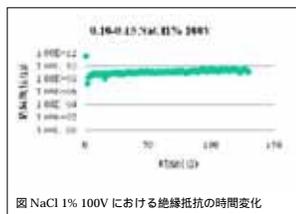
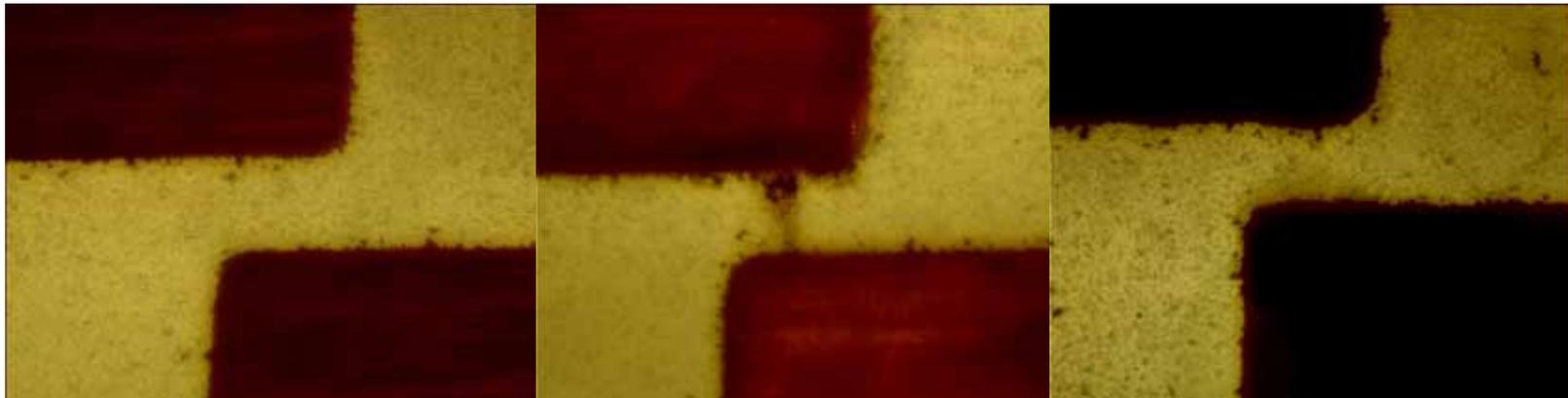
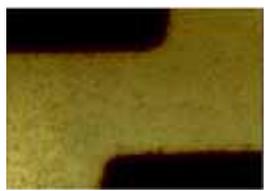
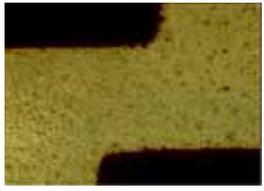
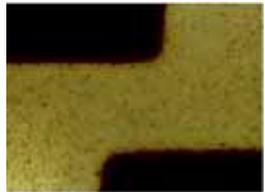
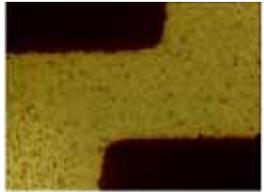
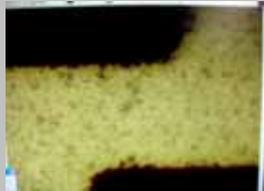
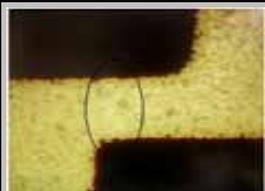


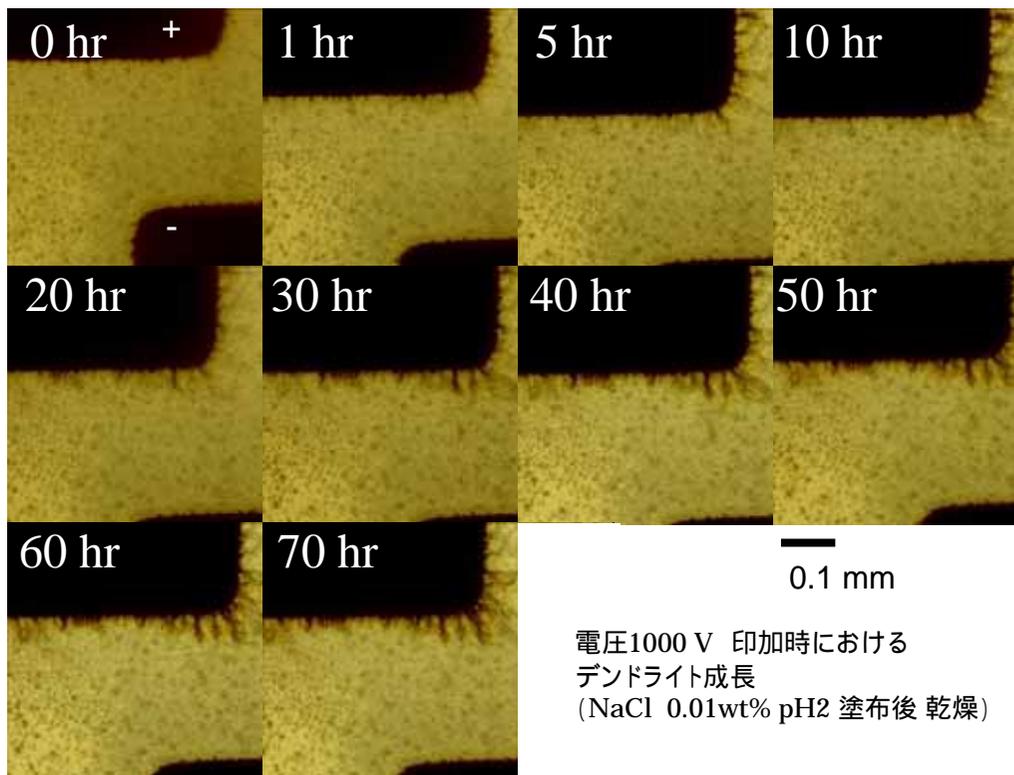
図 NaCl 1% 100V における絶縁抵抗の時間変化

1000V印加時の放電範囲

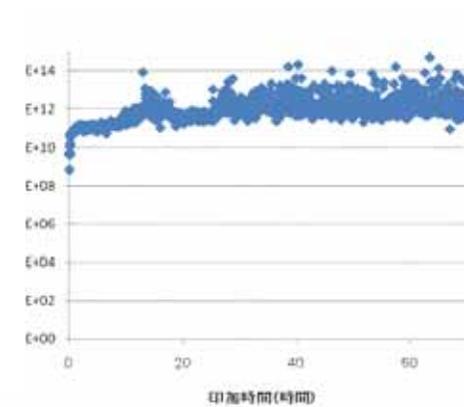
電極間 距離(mm)	NaCl水溶液濃度 (wt.%)		
	0(汚染無し)	0.01	0.1
0.25			
0.2			
0.15			
0.1			

3分以内に
絶縁落ちした条件範囲

1000 V印加時のイオンマイグレーション (NaCl 0.01wt%, pH2)

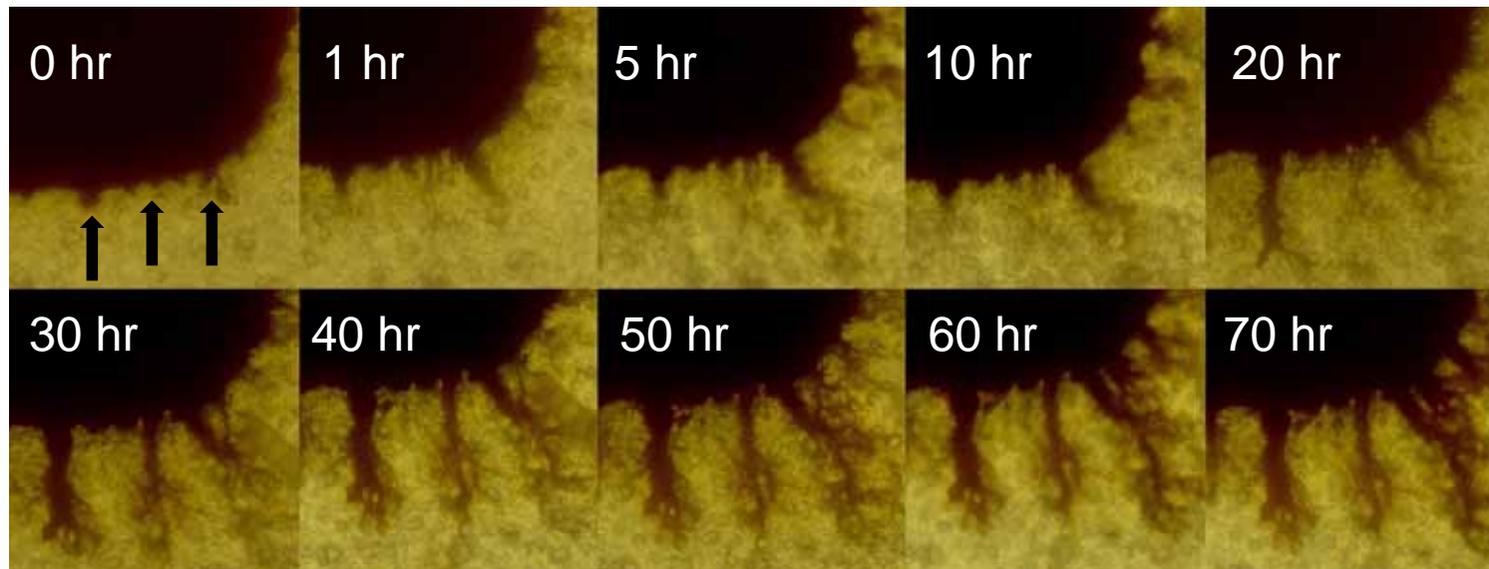


40 75%RH
電極間距離: 0.25mm



1000 V印加時のイオンマイグレーション (NaCl 0.01wt%, pH2)

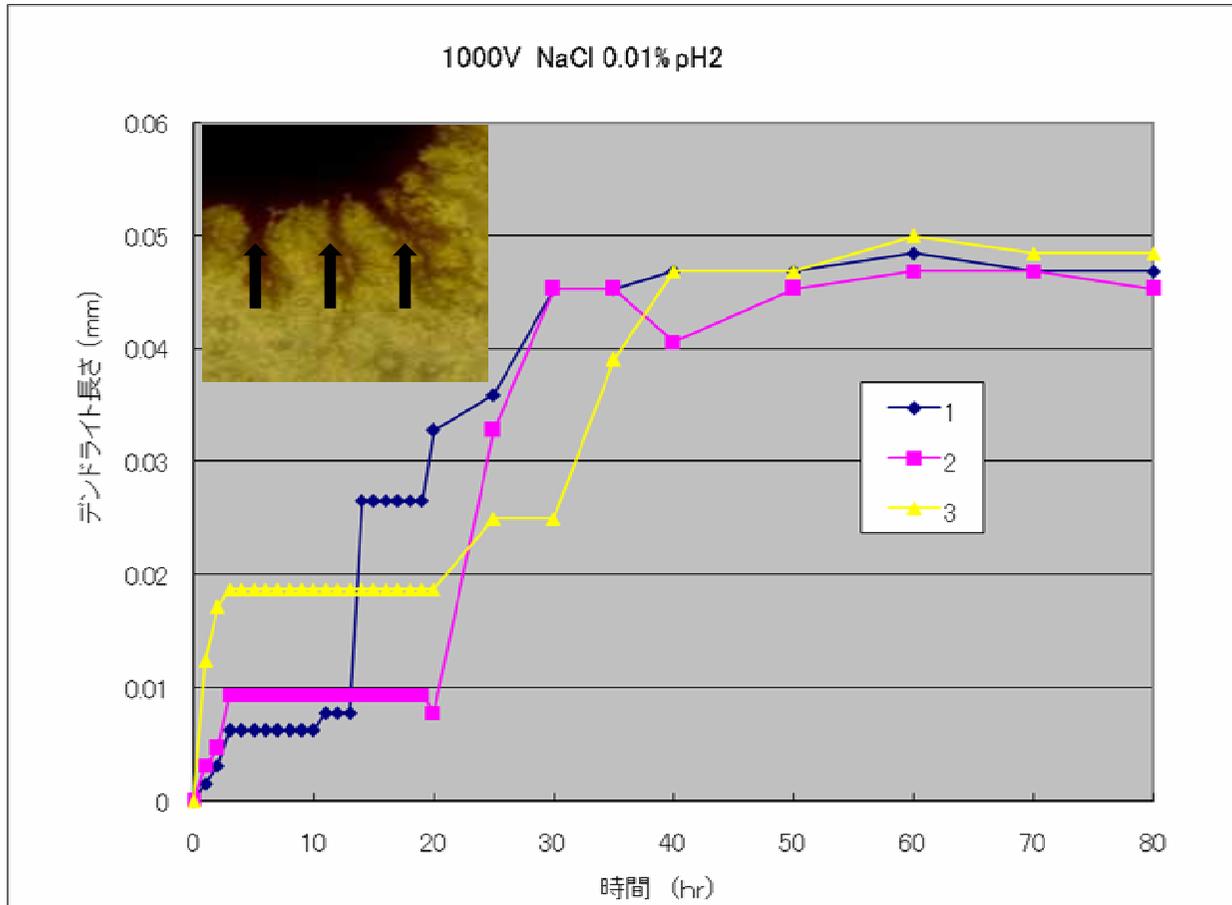
40 75%RH 電極間距離: 0.25mm



電極(正極)下部アンカー先端よりデンドライト発生・成長

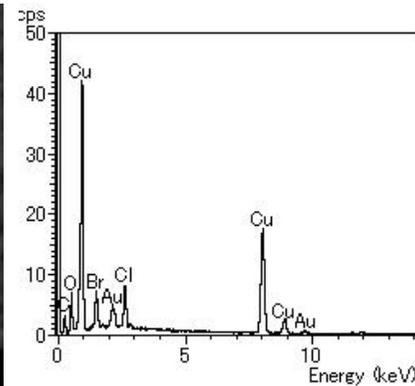
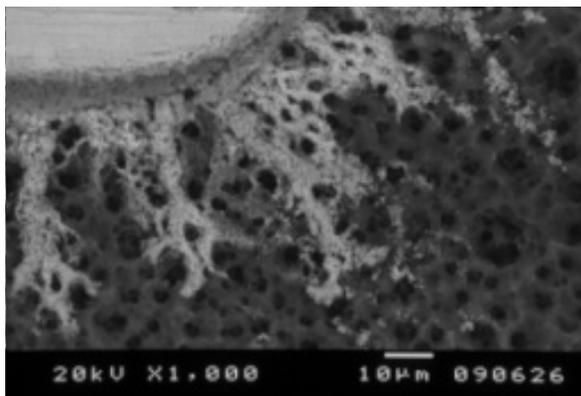
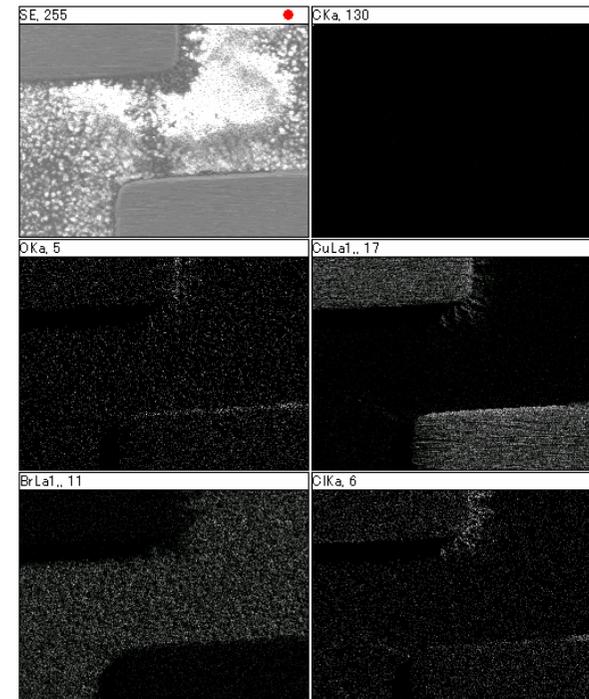
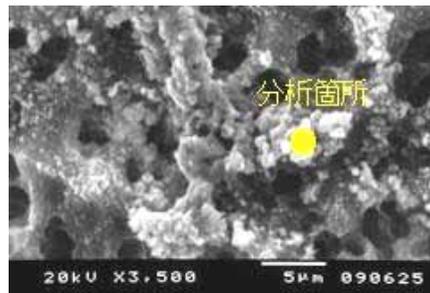
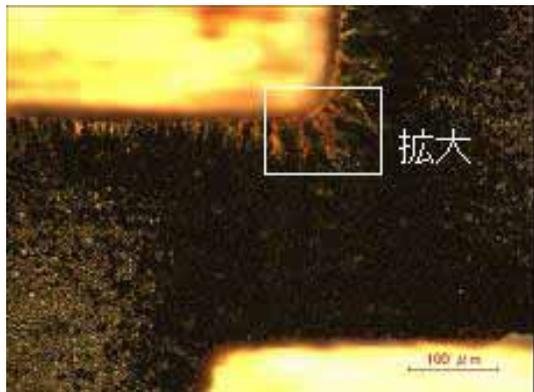
10 μ m

正極デンドライト長さの時間変化



汚染物質の消耗により、成長速度は飽和

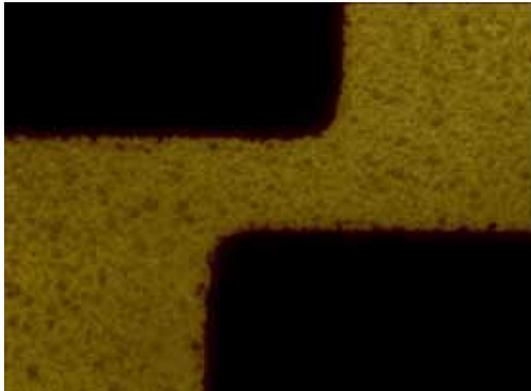
デンドライトの分析



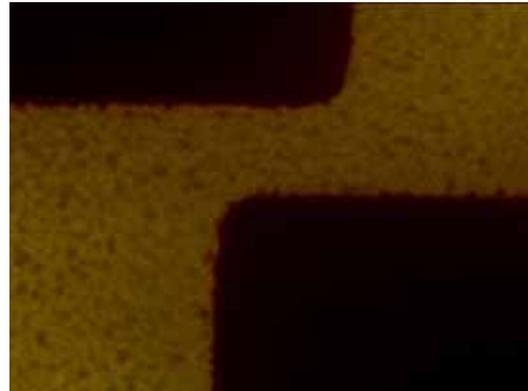
SEM反射電子像 (×1000)

正極近傍より、主として
Cu、Clを検出

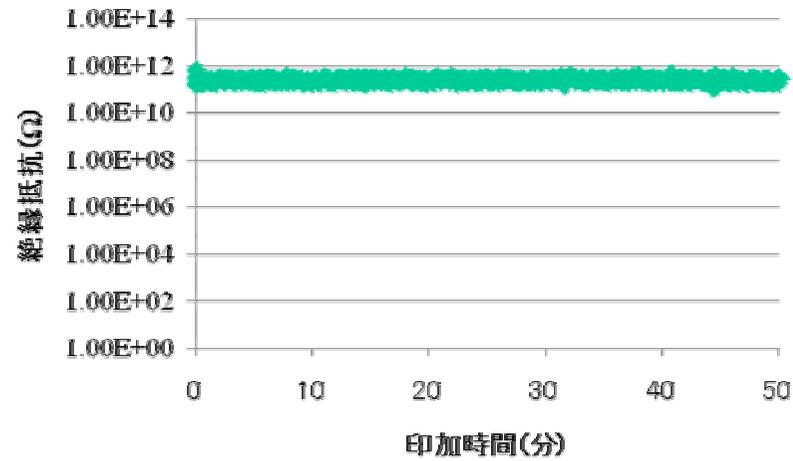
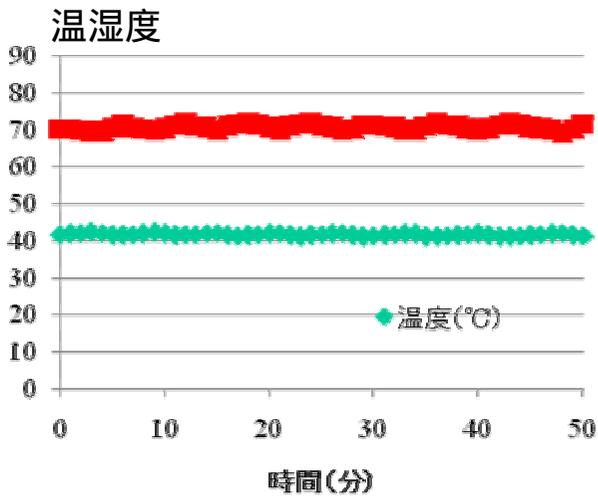
印加直後



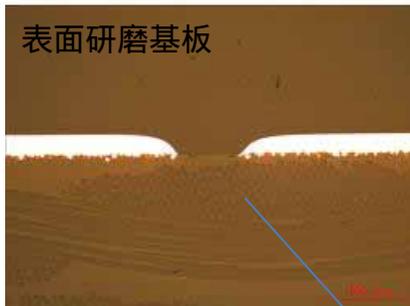
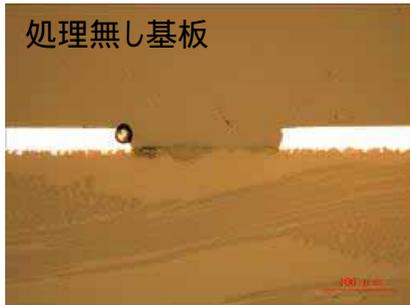
印加50分後



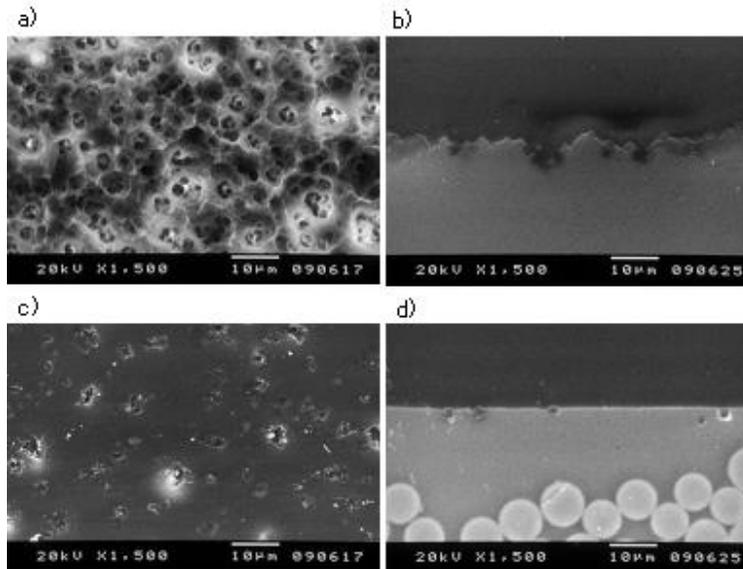
超音波洗浄により、
電極間距離0.1mm
においても絶縁低下
抑制効果有り。



研磨基板のマイグレーション試験



光学顕微鏡写真



SEM写真 a) b): 処理無し基板 (平面および断面)
c) d): 表面研磨基板 (平面および断面)

アルミナ1 μ mを使用して綿棒で研磨

処理無し基板



表面研磨基板

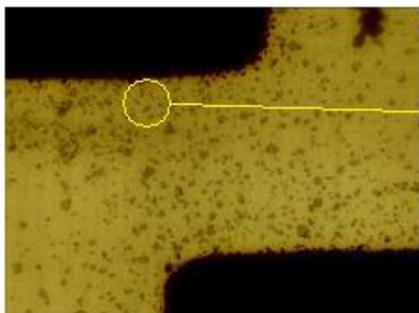


NaCl水溶液塗布時の
顕微鏡写真

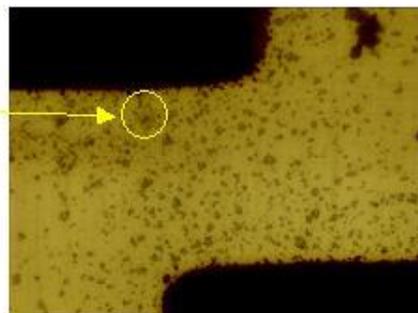
表面研磨基板のイオンマイグレーション試験

(電極間距離 0.25 mm)

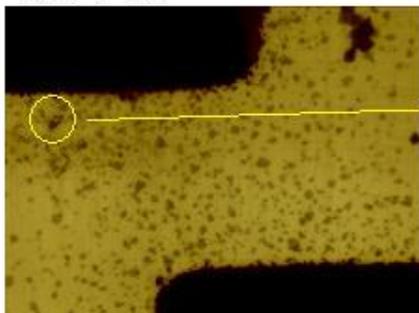
印加直後



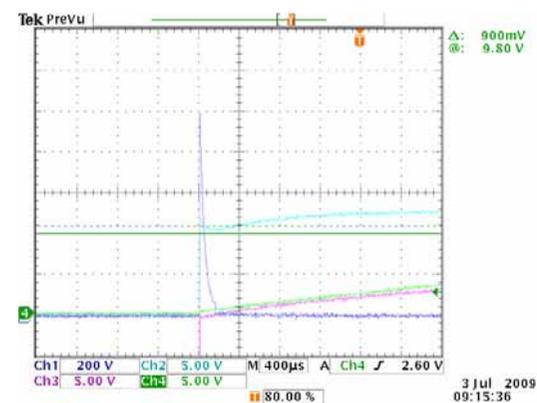
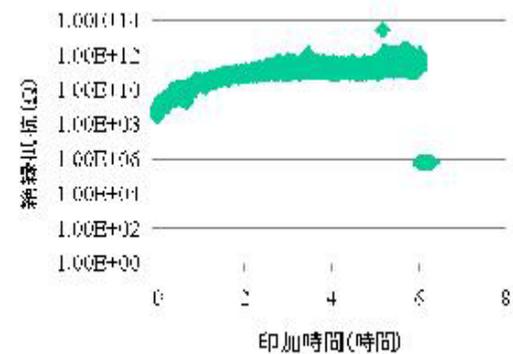
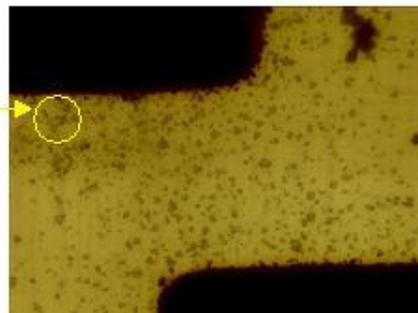
印加01時間30分後



印加06時間後



印加06時間1分後(絶縁落ち)



電極対向部の表面研磨により絶縁低下抑制効果有り

中間まとめ

01

実基板のイオンマイグレーション発生および成長を顕微鏡下で観察しながら環境試験が可能な機器を開発した。

1000Vイオンマイグレーションでは、ただちに放電によって絶縁低下する条件が存在した。電極間距離が短く、表面汚染濃度が高い程、放電による絶縁低下が生じやすいことを確認した。

電極下部のアンカー先端よりデンドライト発生・成長を確認した。

電極対向部研磨により、耐放電・マイグレーションの抑制効果が認められた。

2 . 耐放電・イオンマイグレーション 改善方法の検討

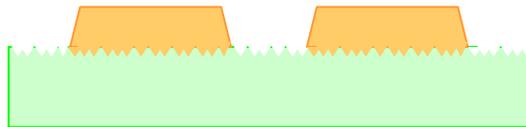
電極・基材表面形状とイオンマイグレーション

目的

電極形状および基材表面状態と耐放電・マイグレーション効果の
関係について調査する。

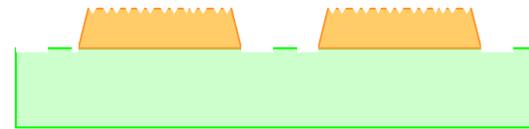
基板断面形状

【通常基板】



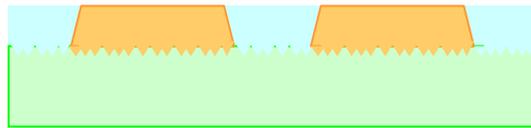
- ・標準品：パターン形成後、表面研磨なし
- ・基材：FR-4基板

【プロファイルフリー基板】



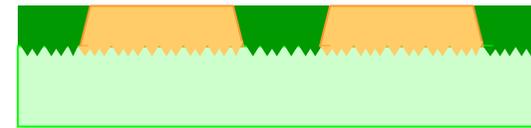
- ・電解銅箔を裏返して積層 研磨後、パターン形成
- ・コア材 銅箔エッチング後、片面積層

【電極埋め込み基板】



- ・パターン形成後、FR-4基材と同等の樹脂（プリプレグ）を積層し、表面研磨実施

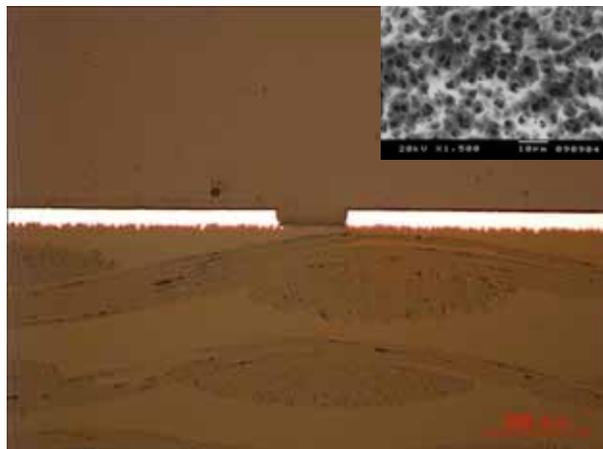
【電極埋め込み基板】



- ・パターン形成後、パターン表面までレジスト塗布
- ・レジストインキをスクリーン印刷し、硬化後表面研磨

基板表面SEM像と断面の光学顕微鏡像

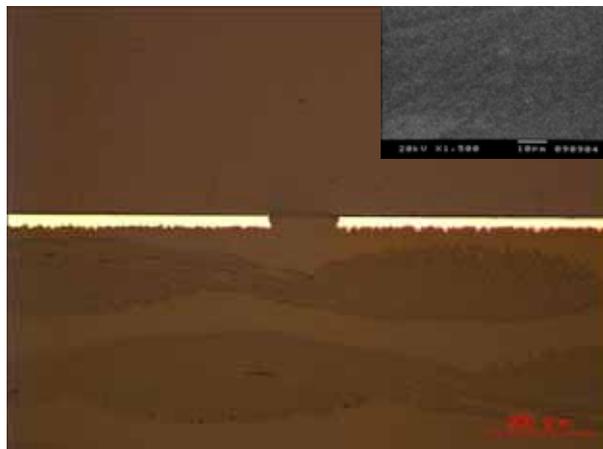
通常基板



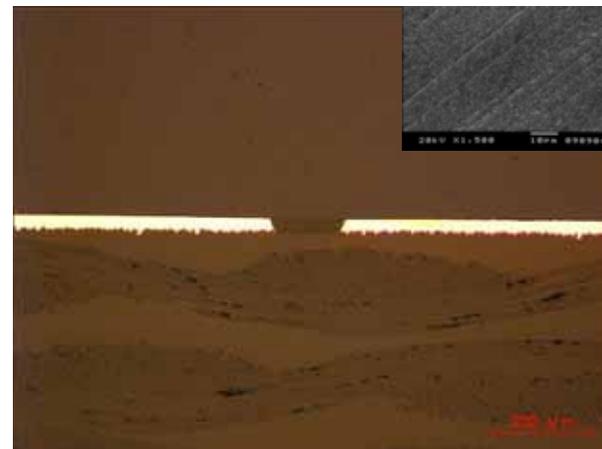
プロファイルフリー基板



電極埋め込み基板(プリプレグ)



電極埋め込み基板(ソルダレジスト)



恒温恒湿試験結果

85 85%RH

1000V

	電極間距離 (mm)	通常基板	プロファイル フリー基板	埋め込み基板 (プリプレグ)	埋め込み基板 (ソルダレジスト)
汚染無	0.25				
	0.2	X	22h		
	0.15	X	14h18m		
	0.1	114h13m	X	2h25m	1h58m
汚染有	0.25				
	0.2	15min			
	0.15	X	X		113h7m
	0.1	X	X		

Xは1分以内に
絶縁落ち

No.3 , No.4では電圧印加後、ただちに絶縁落ちしているものは存在していない。

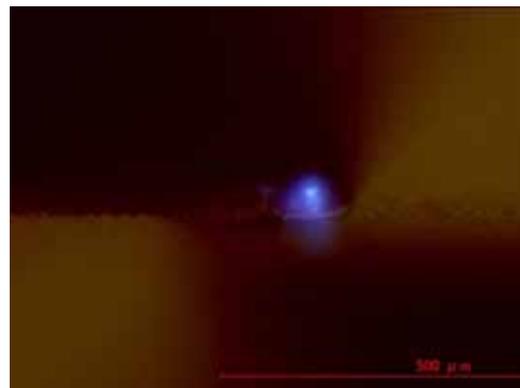
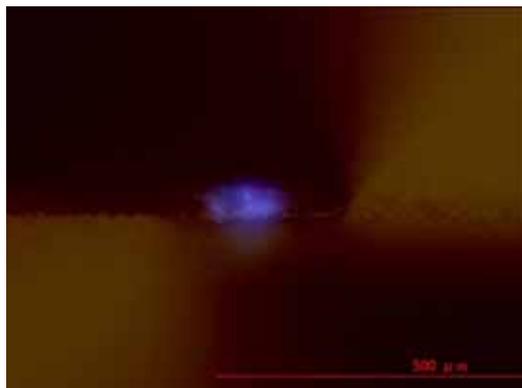
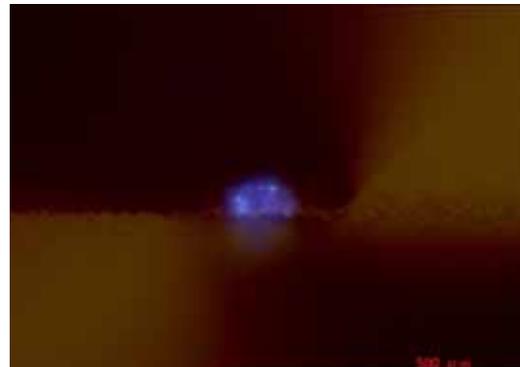
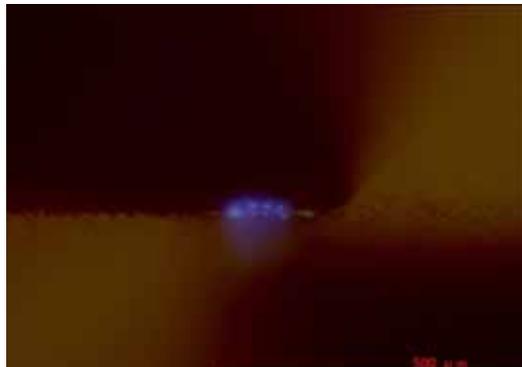
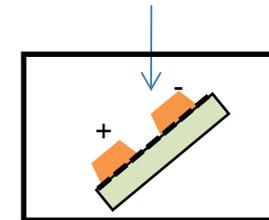
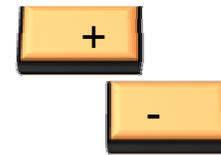
内部で絶縁落ち
(CAF状)

斜め観察による放電位置の観察(1)

1000 V印加 (正極側)

No.1 通常基板

電極下部より放電開始

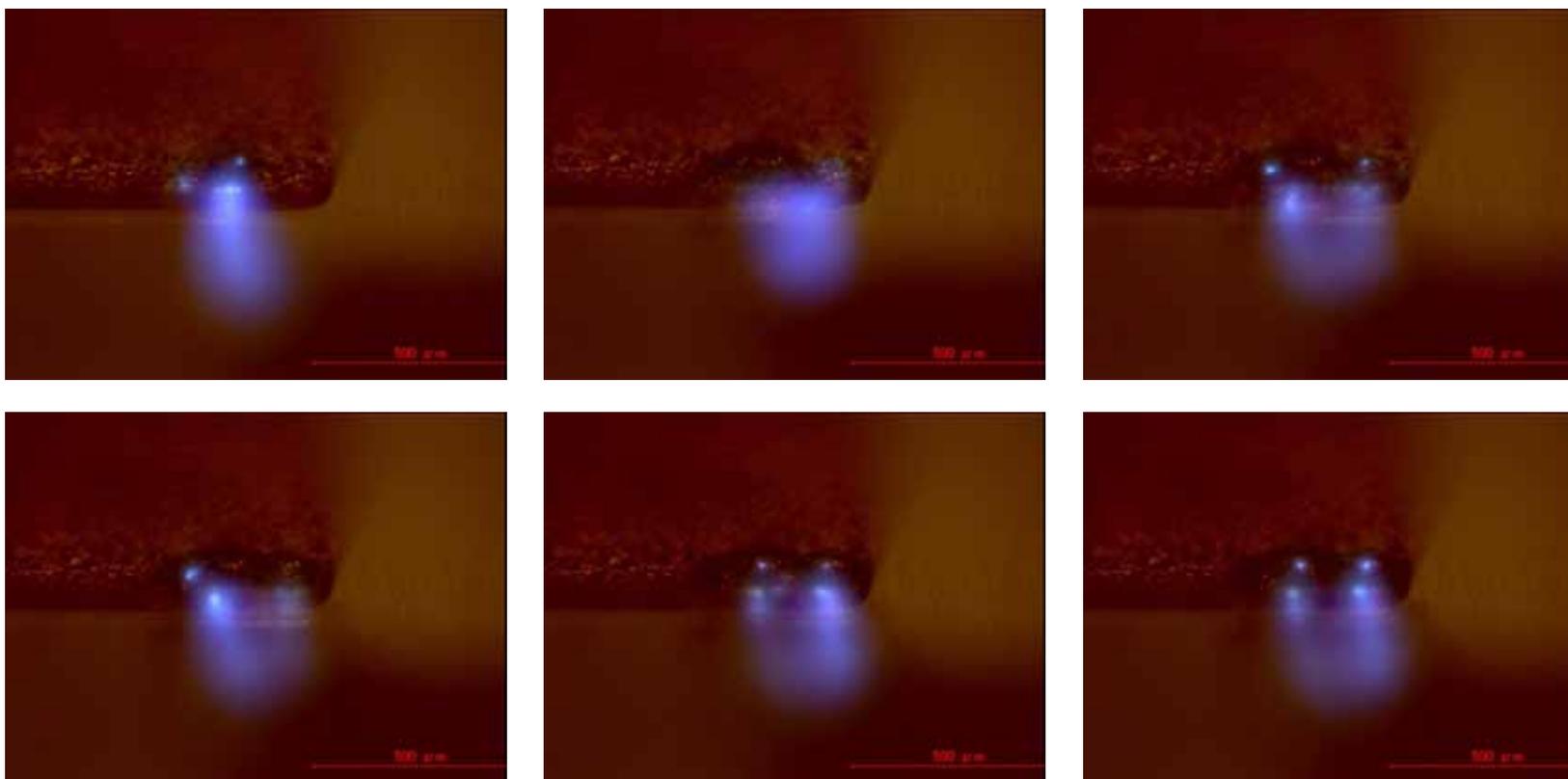


斜め観察による放電位置の観察(2)

1000 V印加 (正極側)

No.2 プロファイルフリー基板

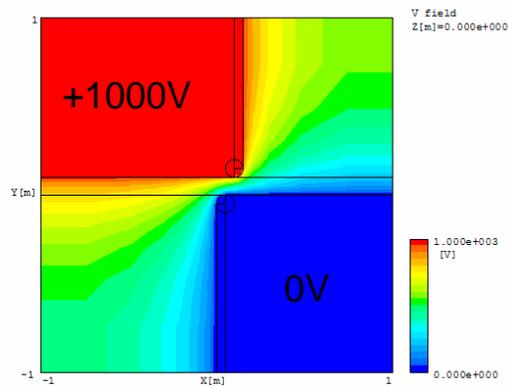
電極上端および上面より放電開始



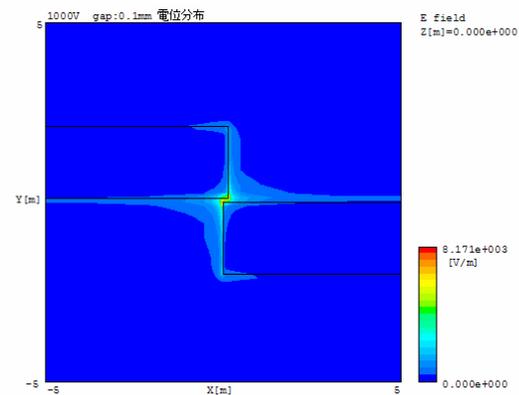
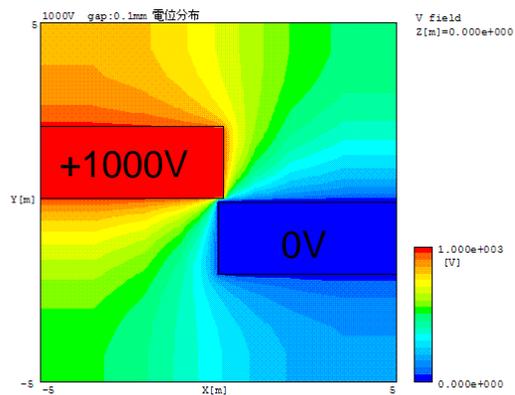
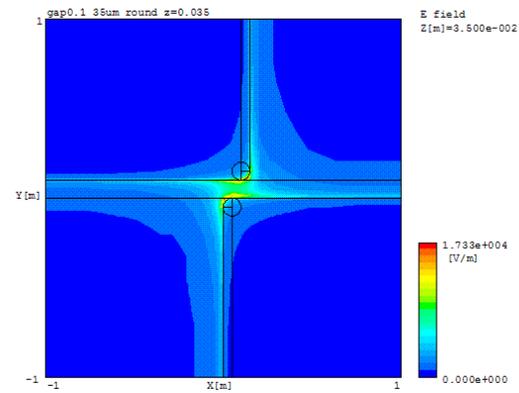
電位および電界分布 計算

例) 電極間距離 0.1mm

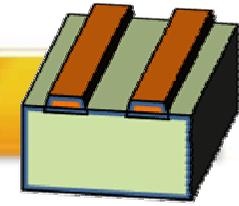
電位分布



電界分布



電極テーパ角と電界強度分布 (通常基板)



テーパ角

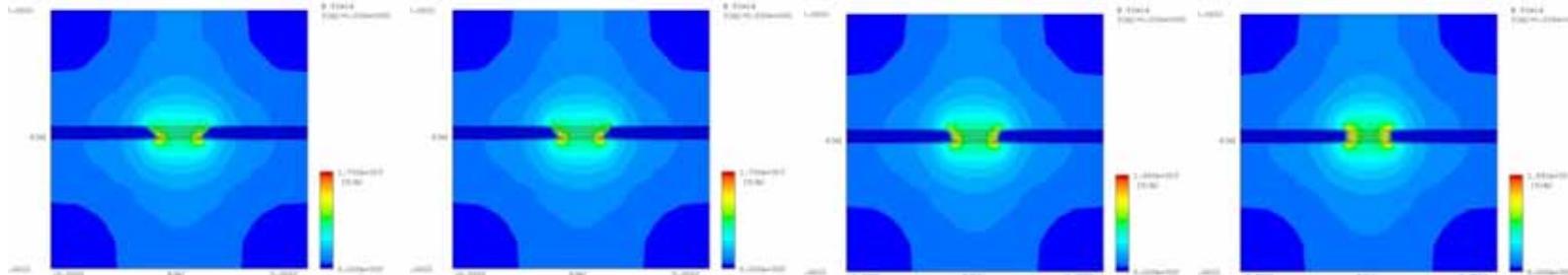
電極間距離 (底部) 0.1 mm

45°

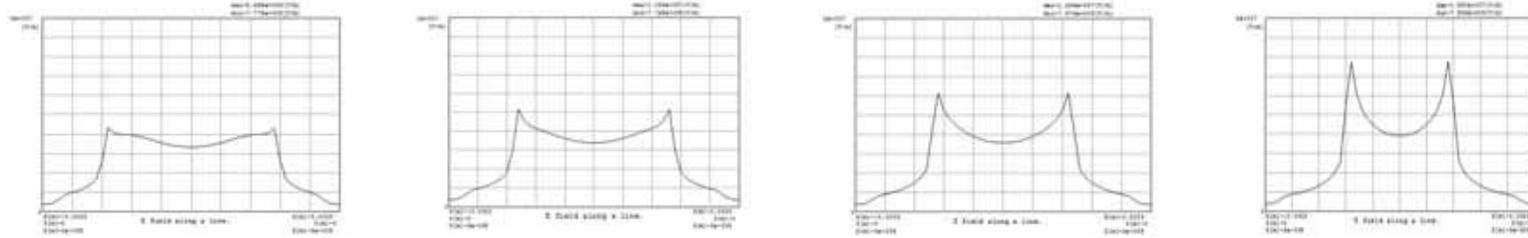
60°

75°

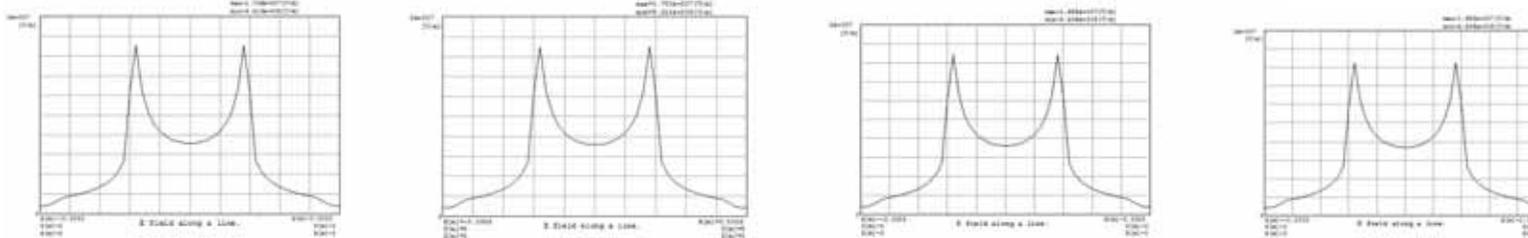
90°



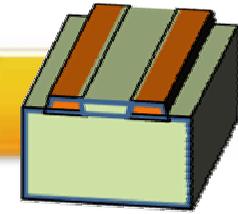
上部



下部



電極テーパ角と電界強度分布 (電極埋め込み基板)



テーパ角

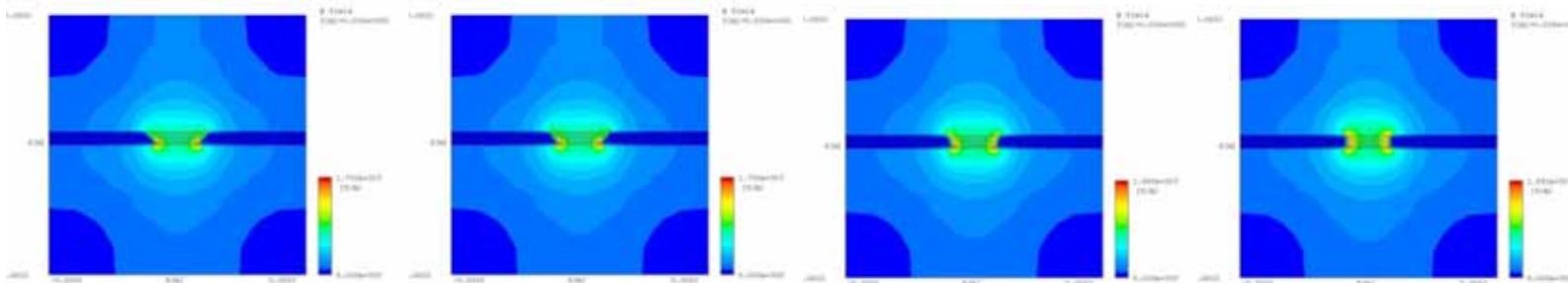
電極間距離 (底部) 0.1 mm

45°

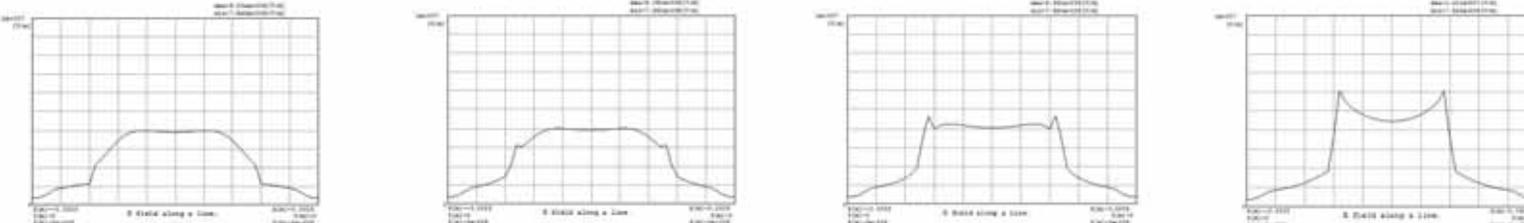
60°

75°

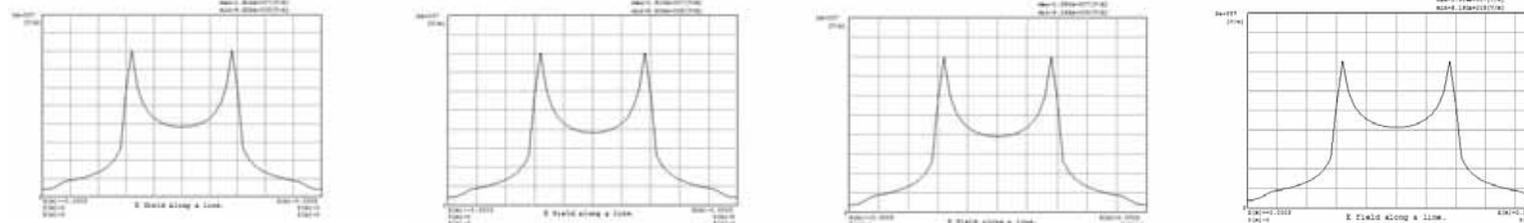
90°



上部



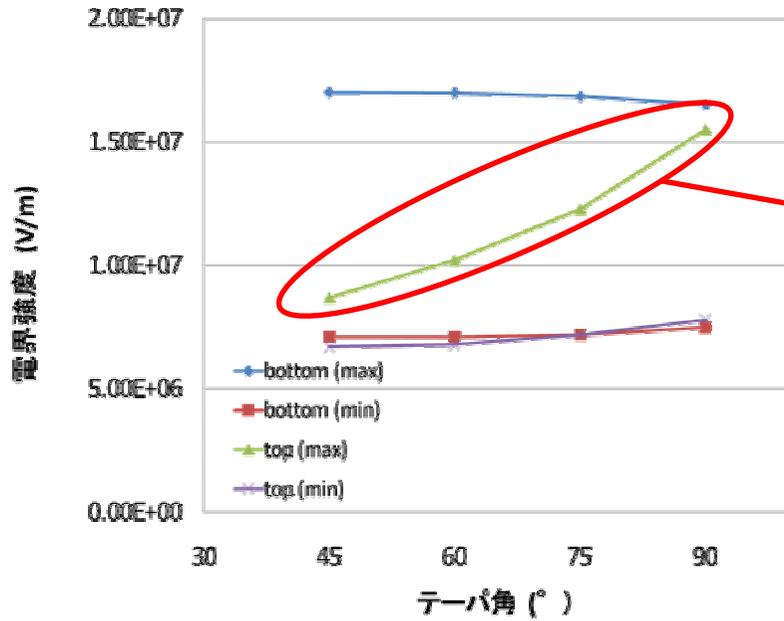
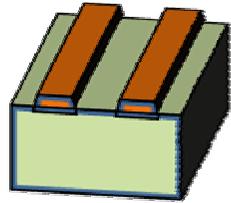
下部



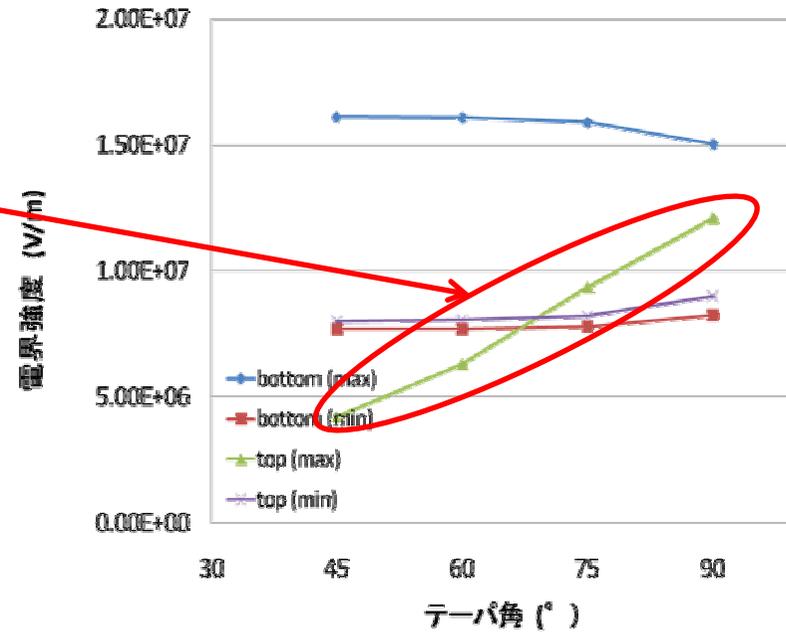
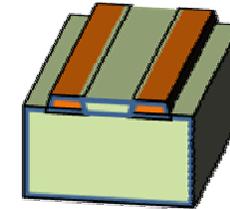
電界強度のテーパ角依存性(計算値)

電極間距離(底部)0.1 mm

通常基板

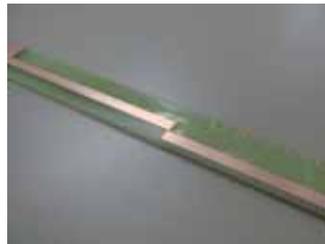


平滑基板



テーパ角が90°に近いと、上部と下部の最大電界強度の差は小さくなる。
電極上端の最大電界強度は埋め込み構造により低下する傾向にある。

NaCl 0.01%水溶液浸漬後の乾燥状態



基材表面にて水溶液保持

電極間および端部に水溶液保持しにくい構造

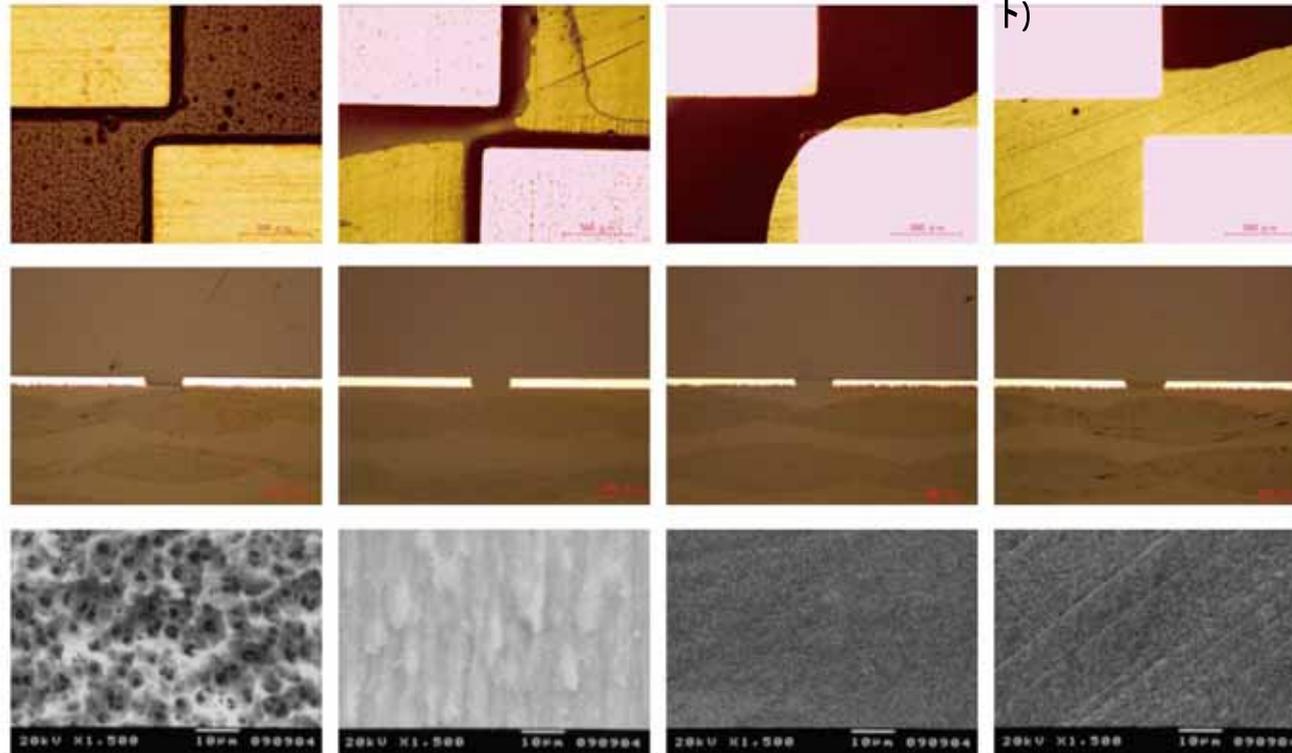
電極端部にて
水溶液保持

No.1
通常基板

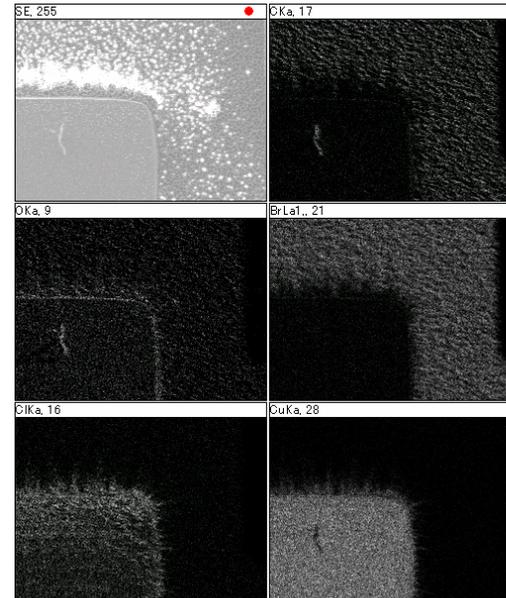
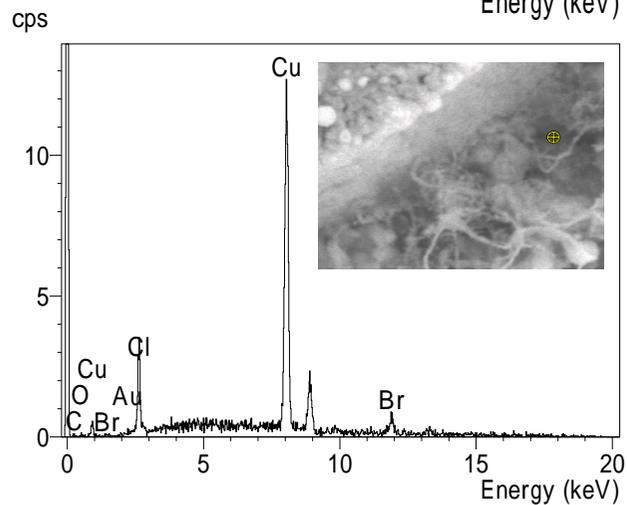
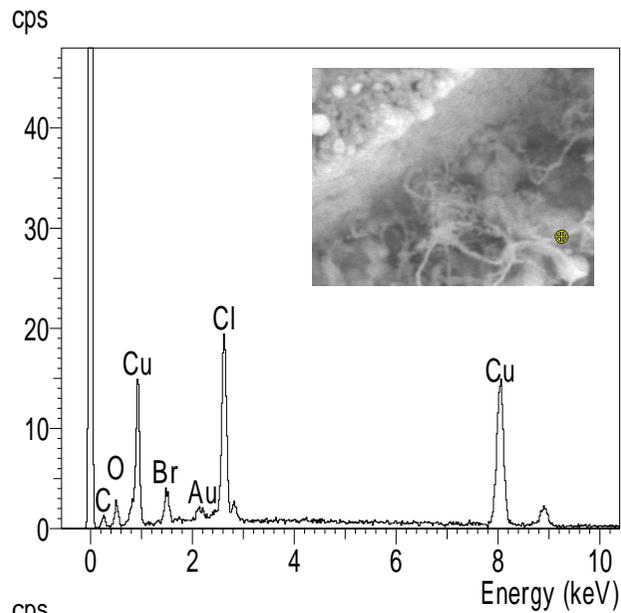
No.2
プロファイルフリー基板

No.3
電極埋込み基板
(プリプレグ)

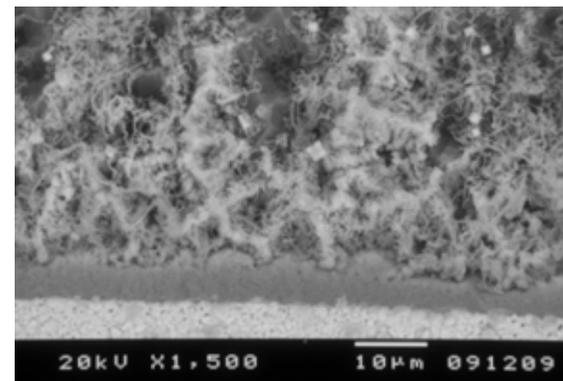
No.4
電極埋込み基板
(ソルダレジスト)



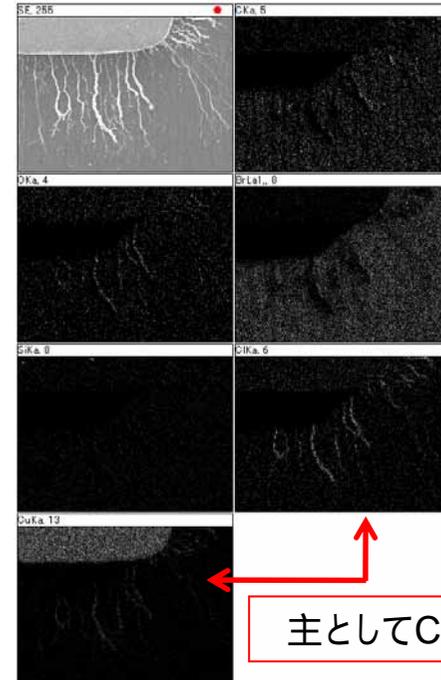
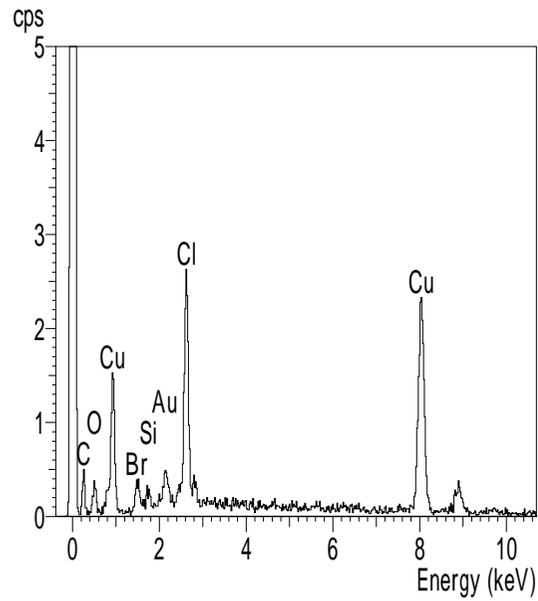
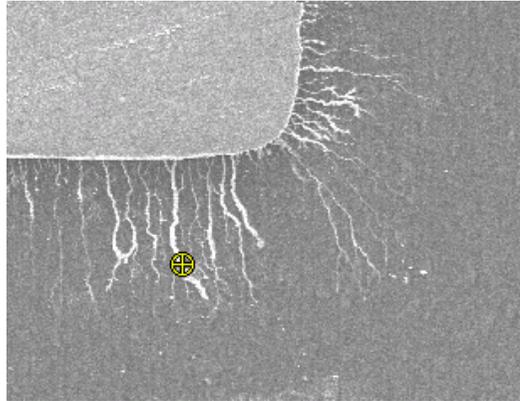
通常基板



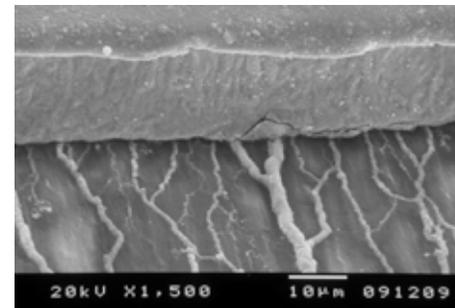
← 主としてCu, Clを検出 ↑



プロファイルフリー基板



45° 傾斜



No.1 通常基板

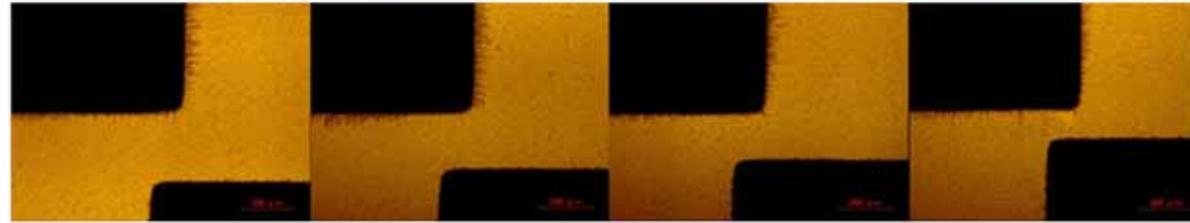
0.25 mm

0.20 mm (xx)

0.15 mm (xx)

0.10 mm (114h13m)

汚染無し



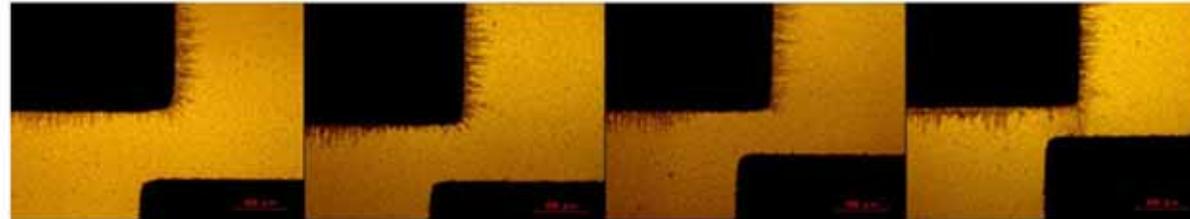
0.25 mm

0.20 mm (15m)

0.15 mm (xx)

0.10 mm (x)

汚染有り



No.2 プロファイルフリー基板

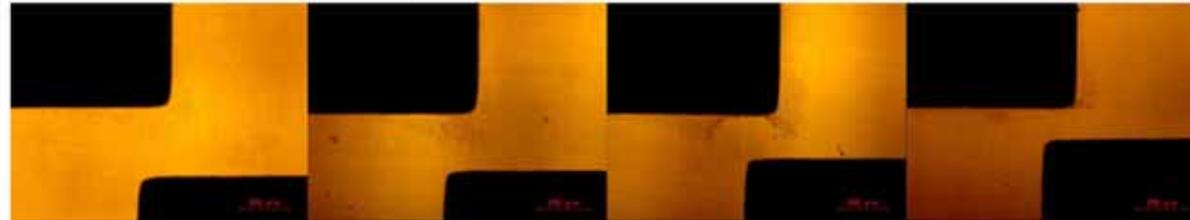
0.25 mm

0.20 mm (22h)

0.15 mm (14h18m)

0.10 mm (xx)

汚染無し



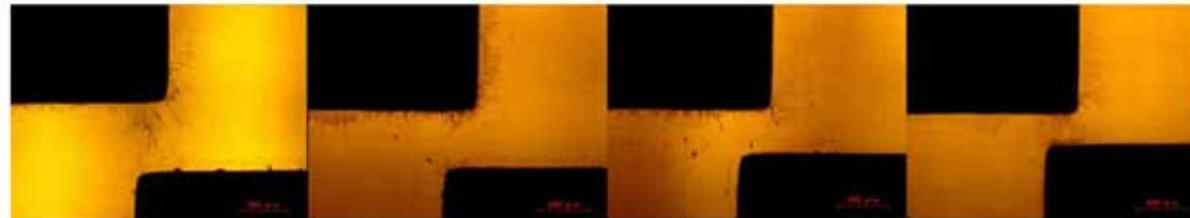
0.25 mm

0.20 mm

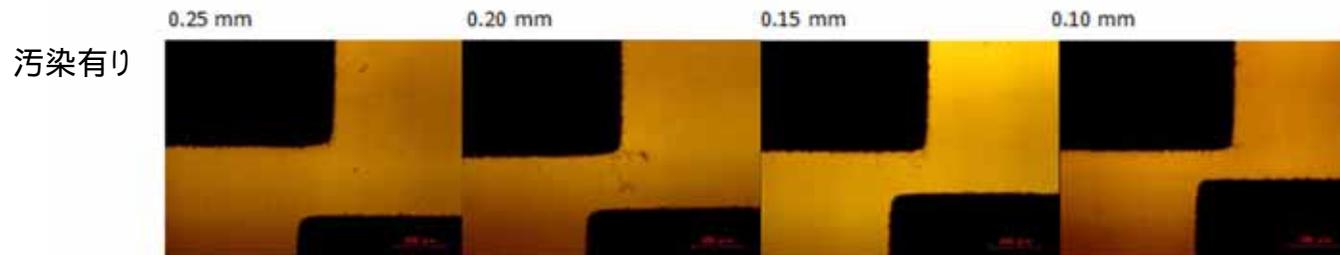
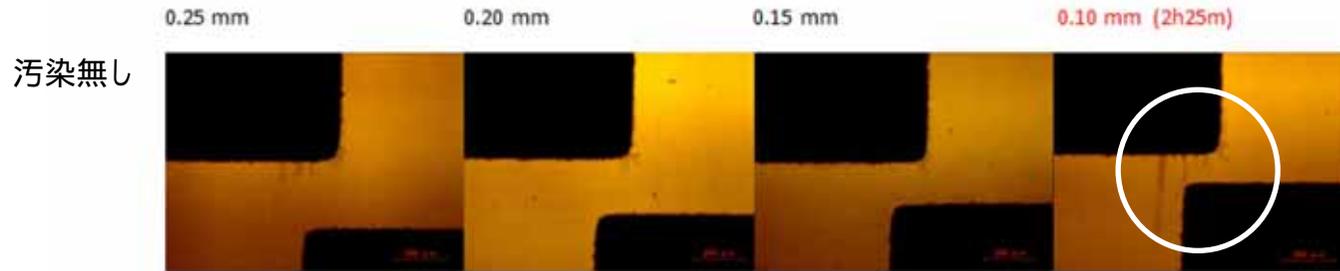
0.15 mm (x)

0.10 mm (x)

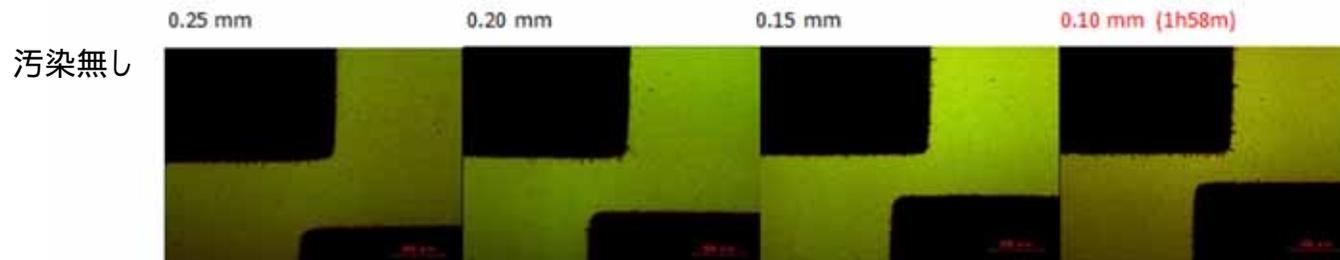
汚染有り



No.3 プリプレグ平坦化基板



No.4 ソルダレジスト平坦化基板



まとめ(中間)

01

アンカーレス基板において、マイグレーション抑制効果は見られなかった。電極対向部表面研磨による耐放電効果は、電極端部の電界緩和と汚染物質保持しにくい構造による可能性大と考える。(基板製造プロセスについては再検討必要)

02

埋め込み電極構造とすることにより、電極端部での電界緩和とイオン性物質が保持されにくくなり、表面での放電およびマイグレーションによる絶縁低下が起こりにくくなると考えられる。ただし、埋め込み方法・材料については最適化必要。

2 . 耐放電・イオンマイグレーション 改善方法の検討

表面処理と耐放電・イオンマイグレーション効果

目的

電極間の表面処理を施し、水溶性物質の濡れ性を制御による耐放電・イオンマイグレーション性能向上の可能性について検証する。

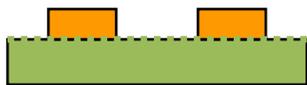
コーティング膜 評価

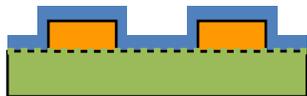
ぬれ性： 接触角(側面よりデジタルカメラ画像)

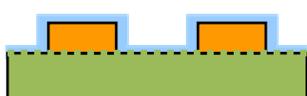
表面微細構造： SEM

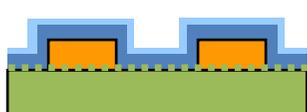
コーティング条件

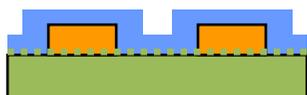
- 01 **未処理**
(通常プロファイル基板)

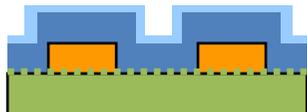

- 02 **BICOAT**
(ガスバリア性付与)


- 03 **クリアコート**
(撥水性付与)


- 04 **クリアコート/BICOAT**
(ガスバリア性 + 撥水性)


- 05 **シリコーン樹脂**
(電気絶縁性付与?)


- 06 **クリアコート/BICOAT(厚塗り)**

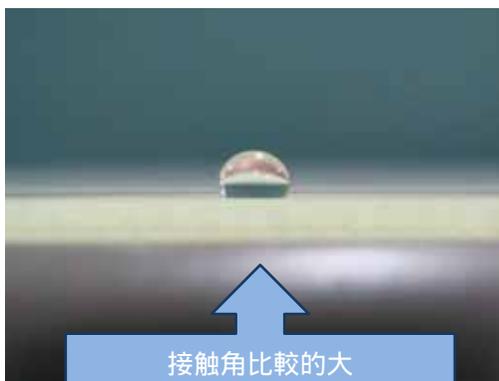


株式会社 吉田SKT様のご協力による

コーティング条件と接触角(イオン交換水)

()内は接触角 [横方向より観察]

未処理 (99°)



↑
接触角比較的大
ただし、水滴乾燥に伴う後退接
触角は0に近くなる。

BICOAT (49°)



↑
接触角小
(親水性)

クリアコート (~150°)

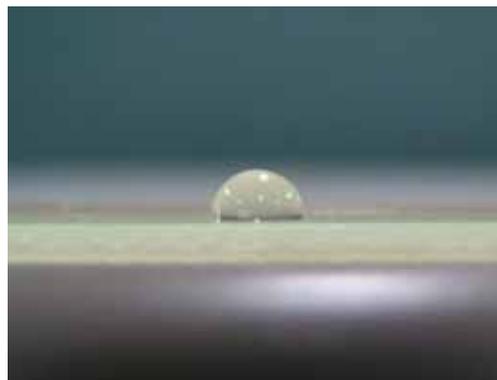


↑
接触角大
(超撥水性)

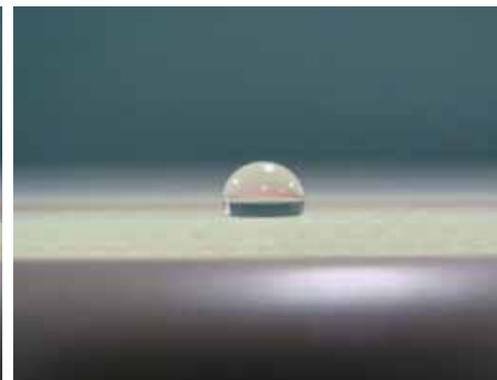
クリアコート/ Bicoat (125°)



シリコーン (95°)



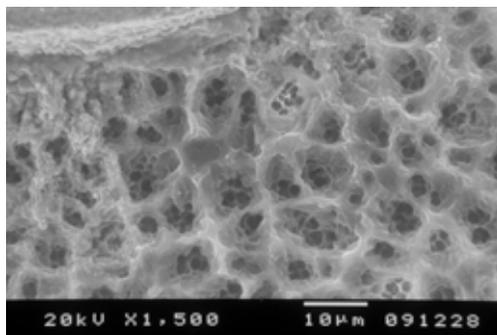
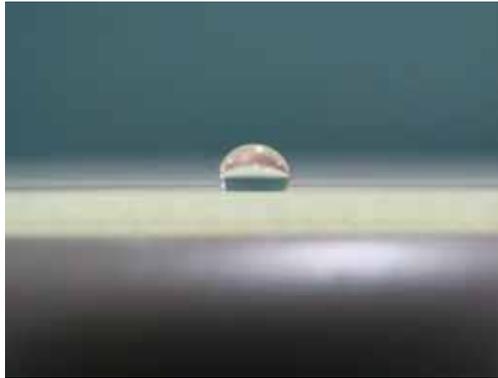
クリアコート/ Bicoat(厚塗り) (113°)



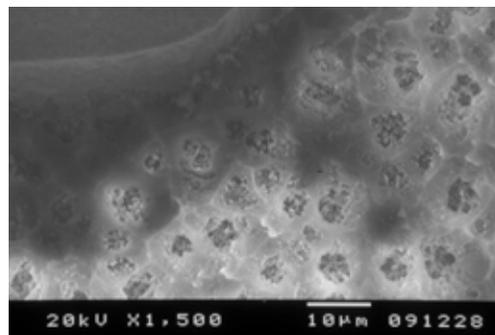
基板表面微細構造と濡れ性

クリアコート

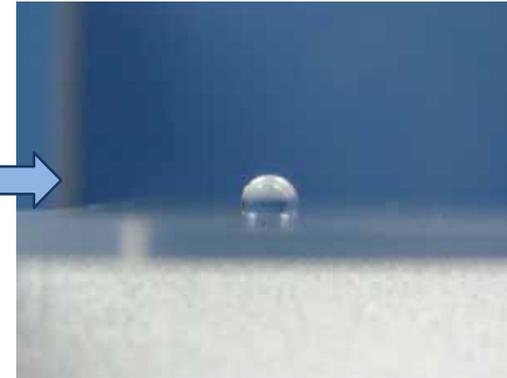
未処理基板
FR-4基板上 (~ 110°)



処理基板
FR-4基板上 (~ 150°)



ガラス基板上 (~ 110°)

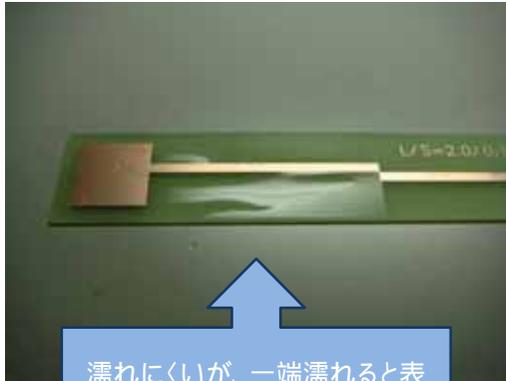


FR-4基板表面の微細構造により、超撥水性発現

接触角大
(超撥水性)

コーティング条件とディップ後の濡れ性(イオン交換水) 外観写真

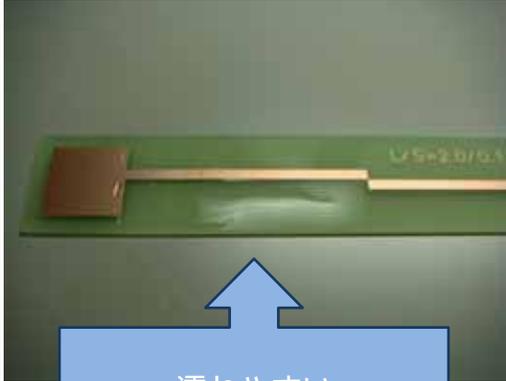
未処理



濡れにくい、一端濡れると表面に液体が保持される

クリアコート/ Bicoat

BICOAT



濡れやすい

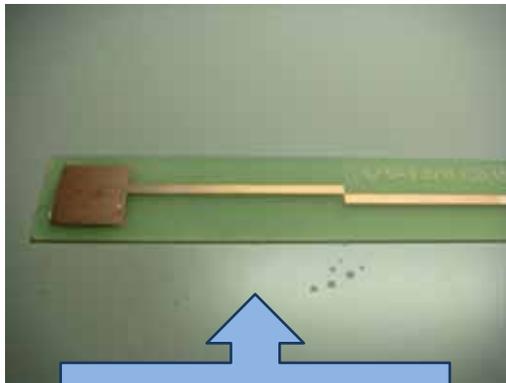
シリコーン

クリアコート

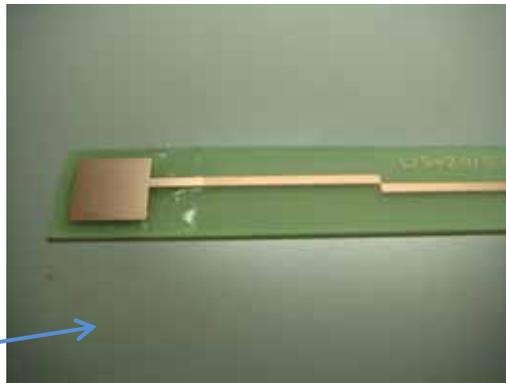
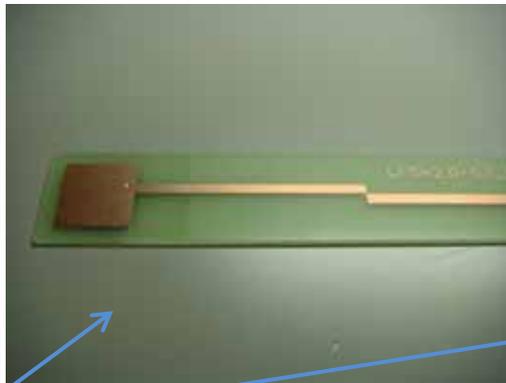


水を完全にはじく

クリアコート/ Bicoat(厚塗り)



水をはじく



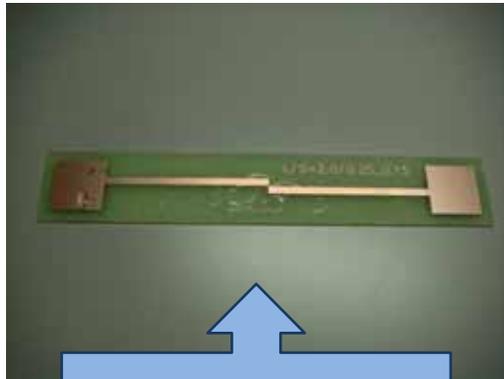
NaCl 0.01% pH2 塗布(30秒ディップ後引き上げ) 直後の濡れ性 外観写真

未処理



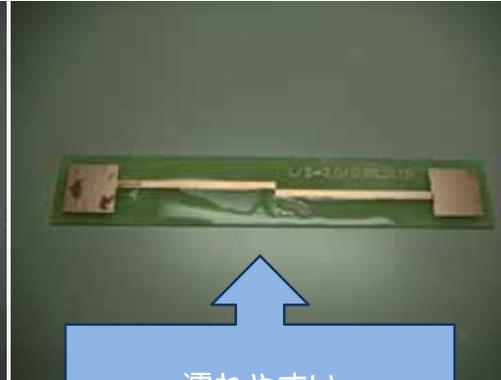
イオン交換水と同様に
一端濡れると表面に液体が保
持される。

クリアコート/ Bicoat



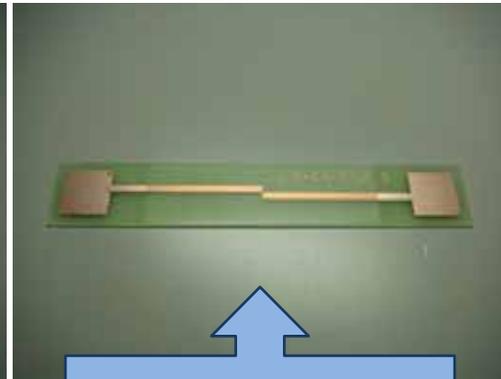
部分的に濡れた領域有り

BICOAT



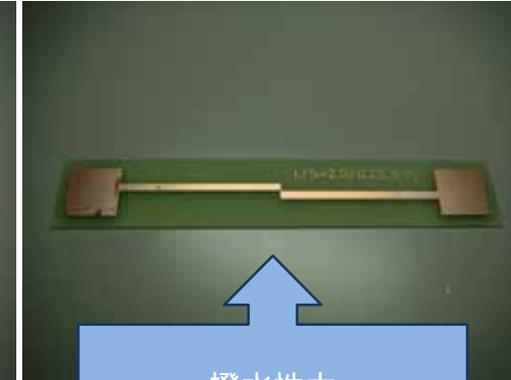
濡れやすい

シリコーン



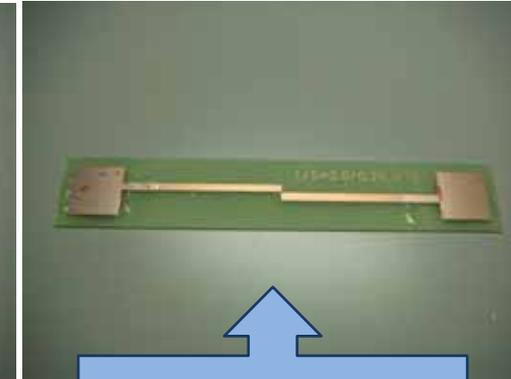
疎水性

クリアコート



撥水性大

クリアコート/ Bicoat(厚塗り)



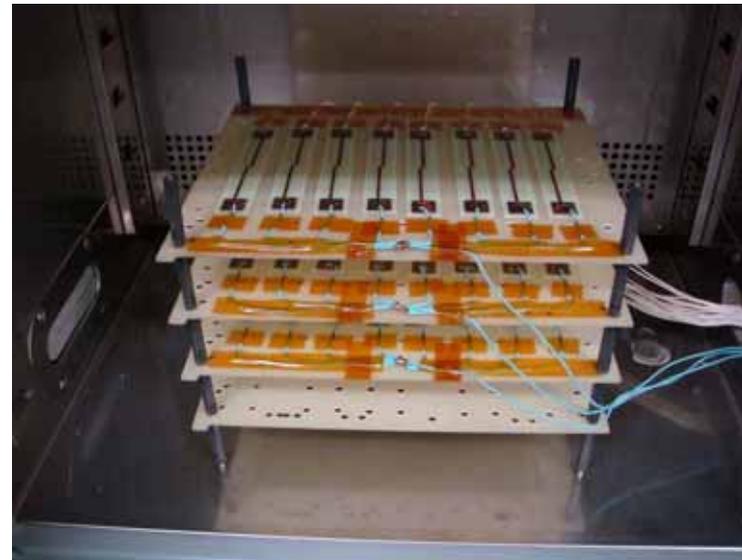
疎水性

試験条件

放電・イオンマイグレーション (恒温槽2台使用し、同時に異なる環境で試験実施)

40 90% RH NaCl0.01% pH2

85 85% RH NaCl0.01% pH2



恒温恒湿試験結果(~ 100時間)

撥水処理基板では総じて、絶縁落ち抑制効果有り。

Xは絶縁落ちしたパターン(約40時間経過時点)

1. 40°C90%RH

(mm)	normal 未処理基板	I BICOAT	II クリアコート	III BICOAT/ クリアコート	IV シリコーン	V BICOAT(3回)/ クリアコート
0.25	X	X				
0.2	X	X				
0.15	X	X				
0.1	X	X		X	X	

親水性のBICOATは低温高湿
で絶縁落ちが顕著

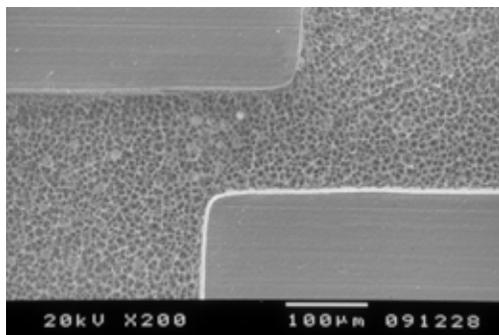
2. 85°C85%RH

(mm)	normal 未処理基板	I BICOAT	II クリアコート	III BICOAT/ クリアコート	IV シリコーン	V BICOAT(3回)/ クリアコート
0.25					X	
0.2	X				X	
0.15	X					
0.1	X	X	X	X	X	

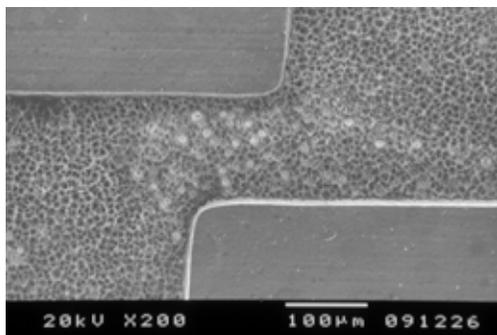
シリコーン樹脂は高温高湿
条件で絶縁落ちが顕著

基板表面 SEM像

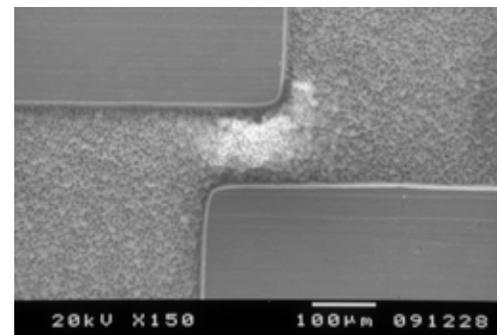
未処理



BICOAT

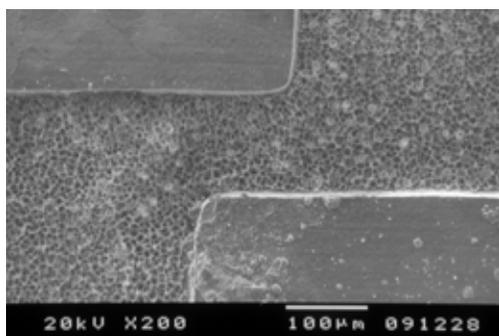


クリアコート

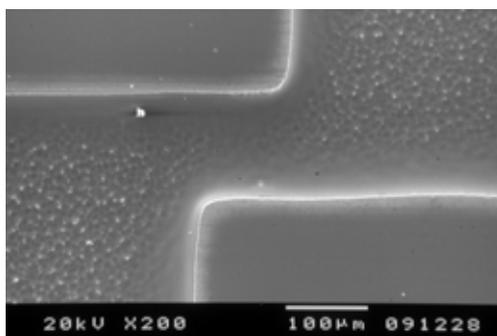


基板表面微細構造が保持

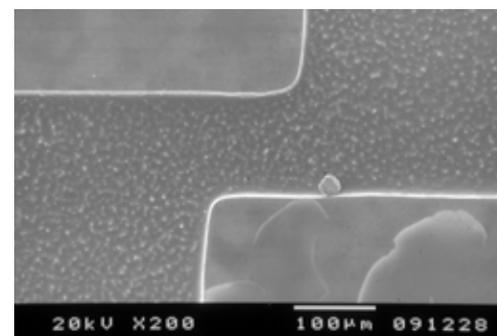
クリアコート/ Bicoat



シリコーン

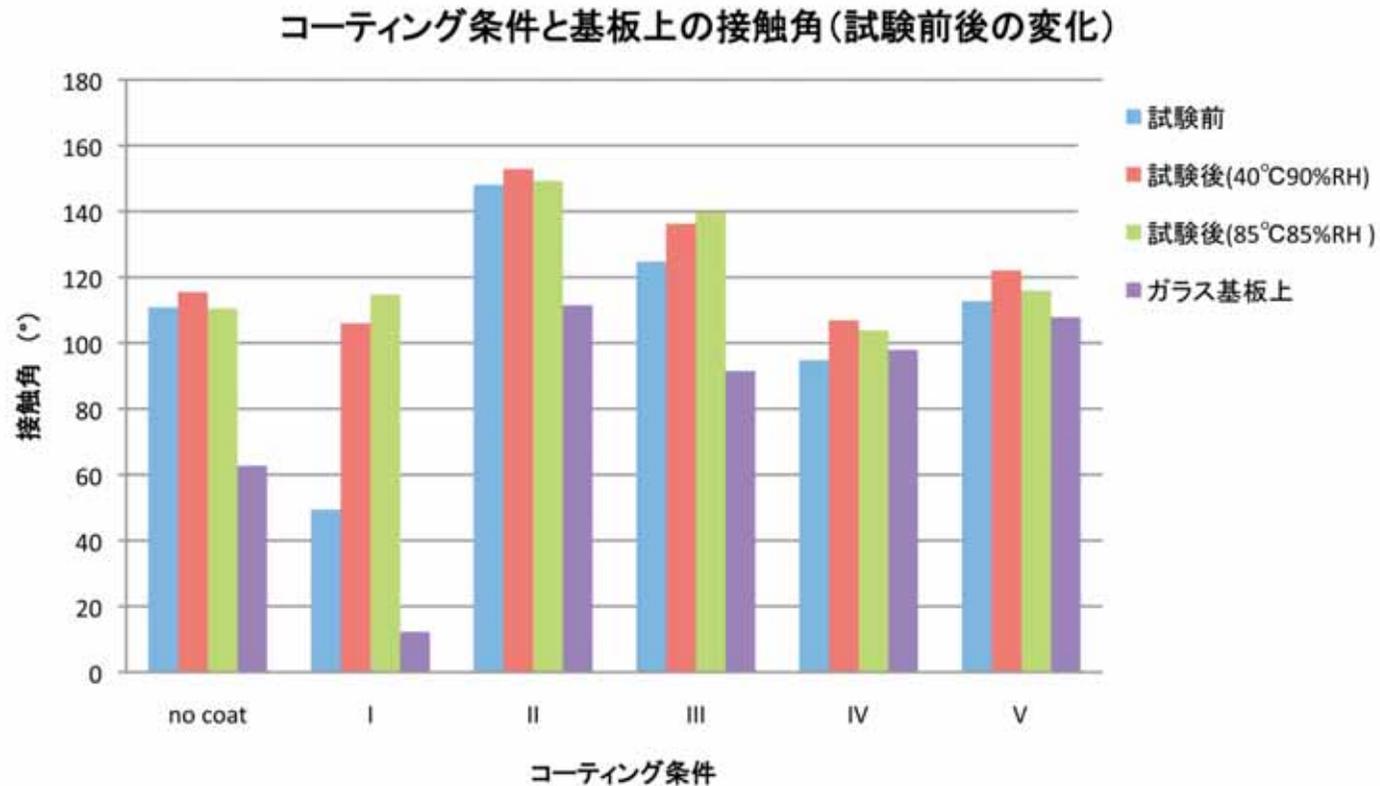


クリアコート/ Bicoat(厚塗り)



基板表面微細構造が消失

コーティング条件と基板上の接触角 (試験前後の変化)



放電・イオンマイグレーション (恒温槽2台使用し、同時に異なる環境で試験実施)

1. normal

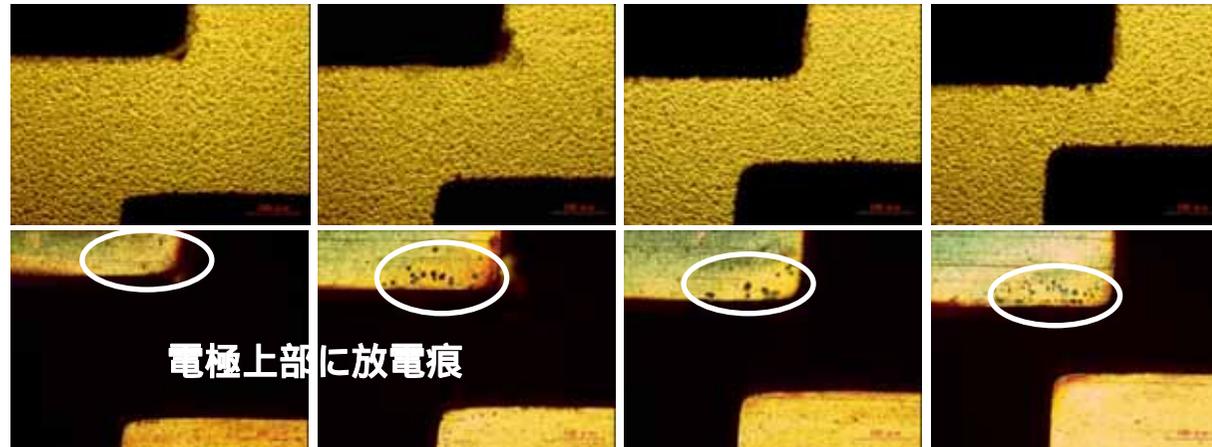
40 90%RH

X(1min)

X(6min)

X(2min)

X(1min)

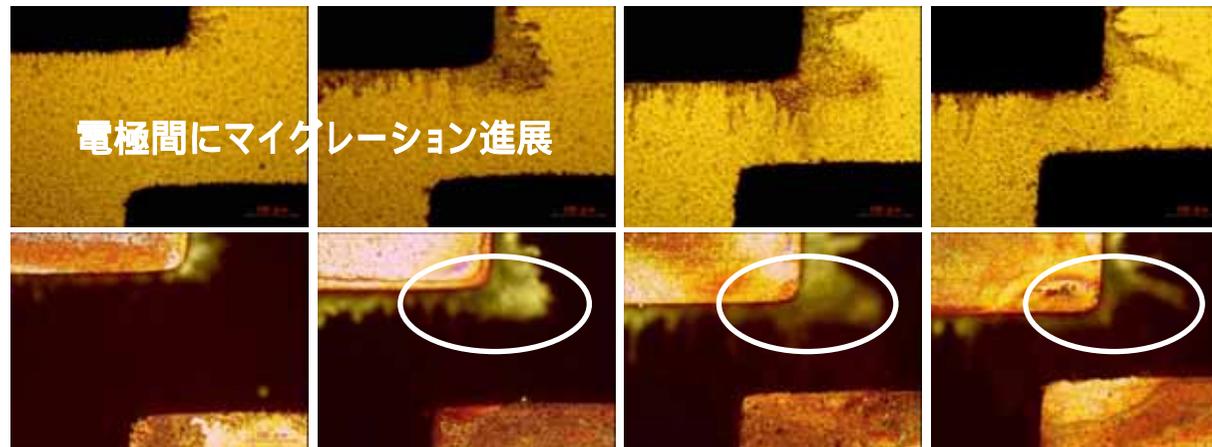


85 85%RH

X(8min)

X(6min)

X(2min)



2. BICOR

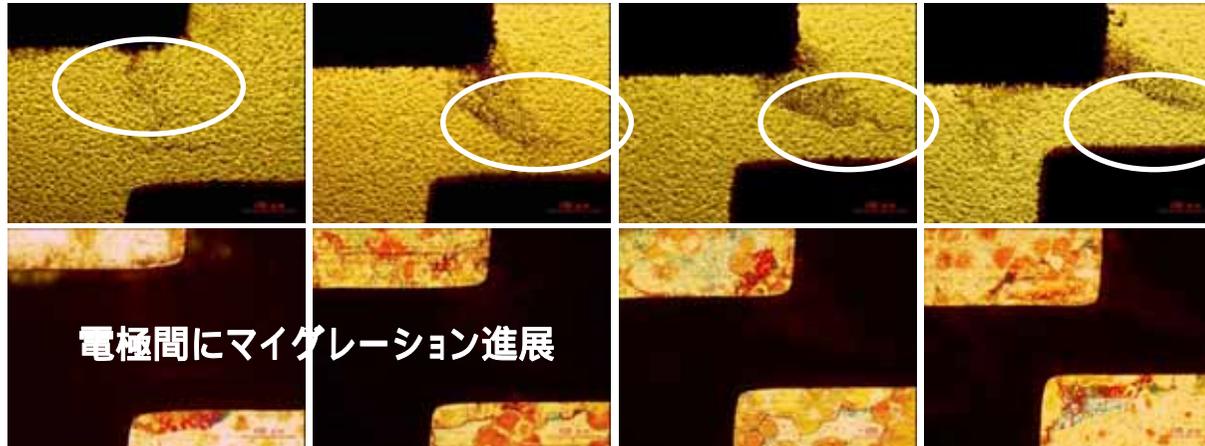
40 90%RH

X(1min)

X(1min)

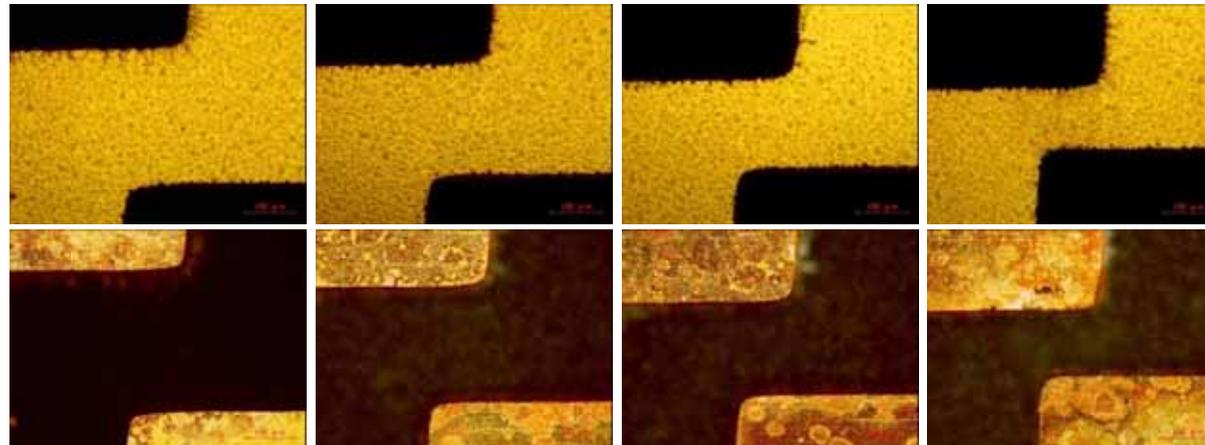
X(1min)

X(1min)



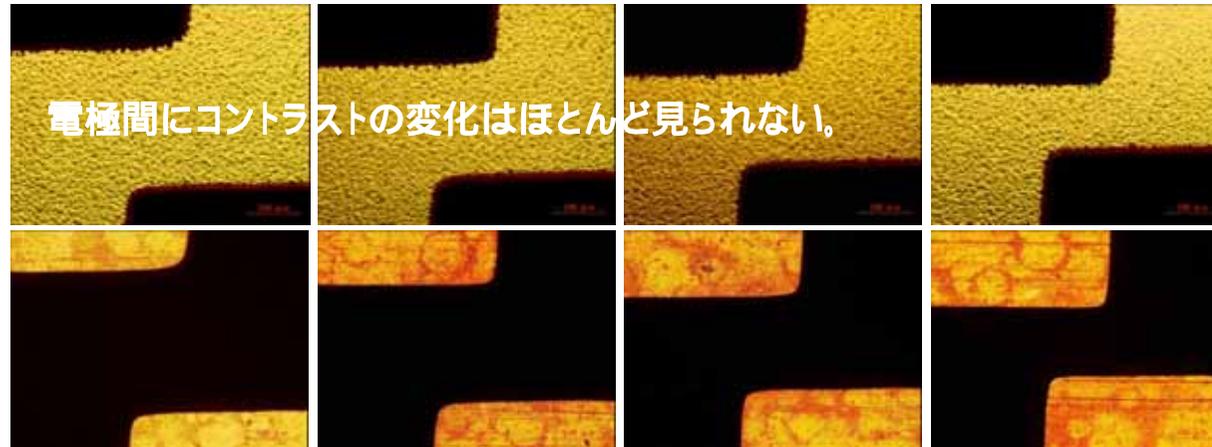
85 85%RH

X(1min)

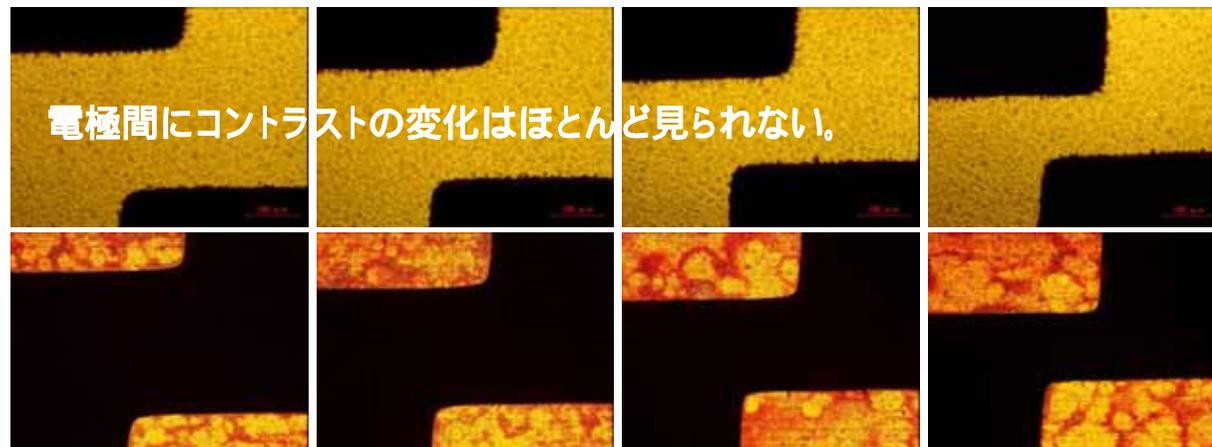


3. Clear Coat

40 90%RH



85 85%RH

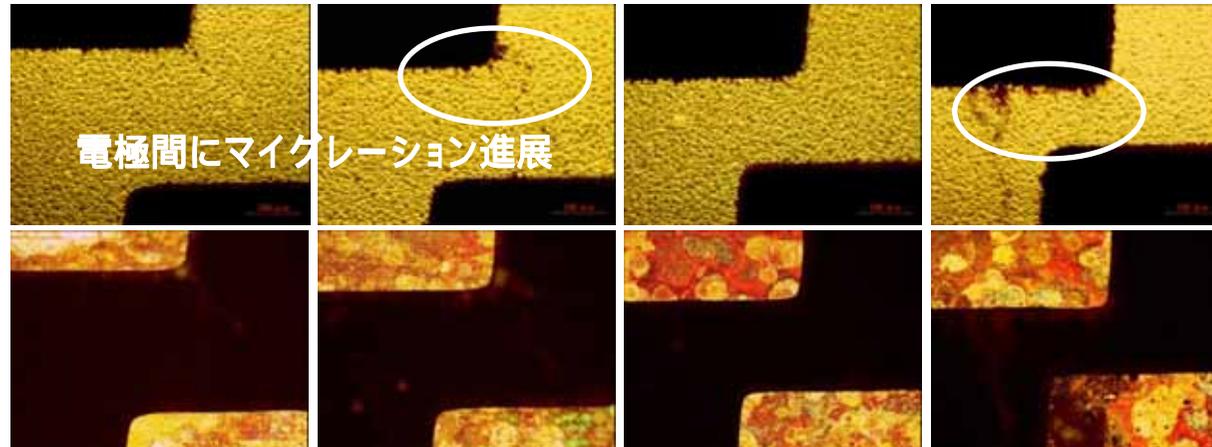


4. Clear Coat/BICOR

40 90%RH

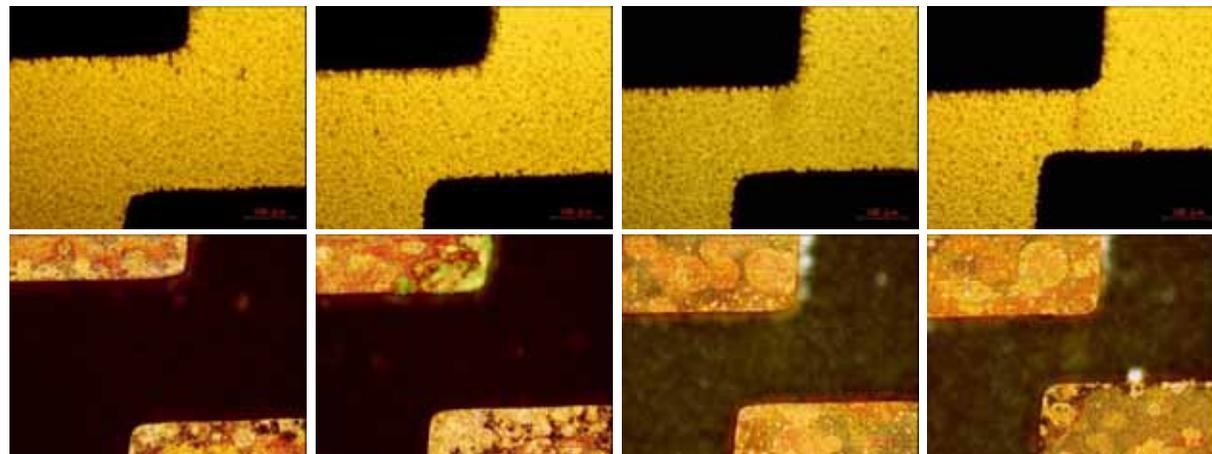
X(2514min)

X(3min)



85 85%RH

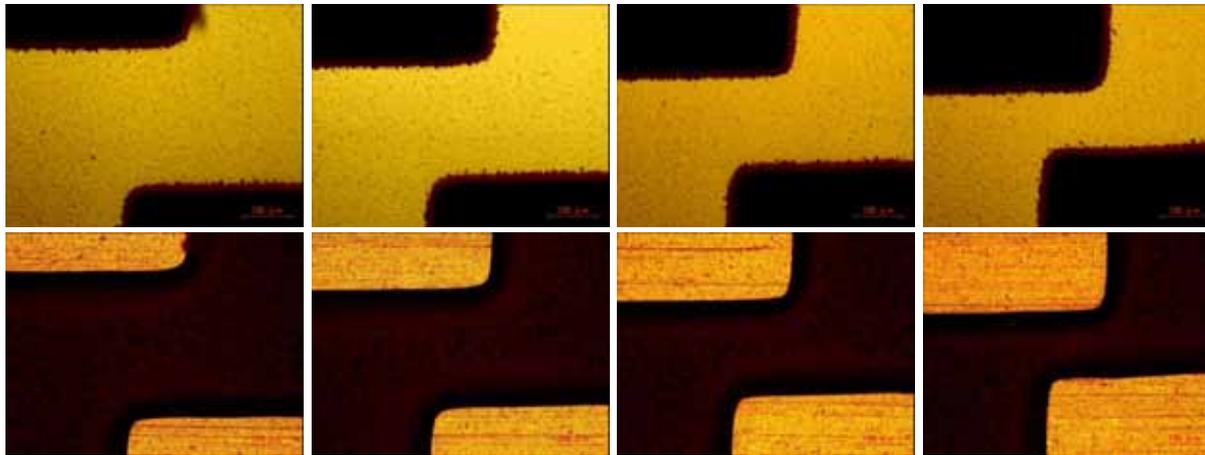
X(1min)



5.シリコン樹脂

40 90%RH

X(1min)

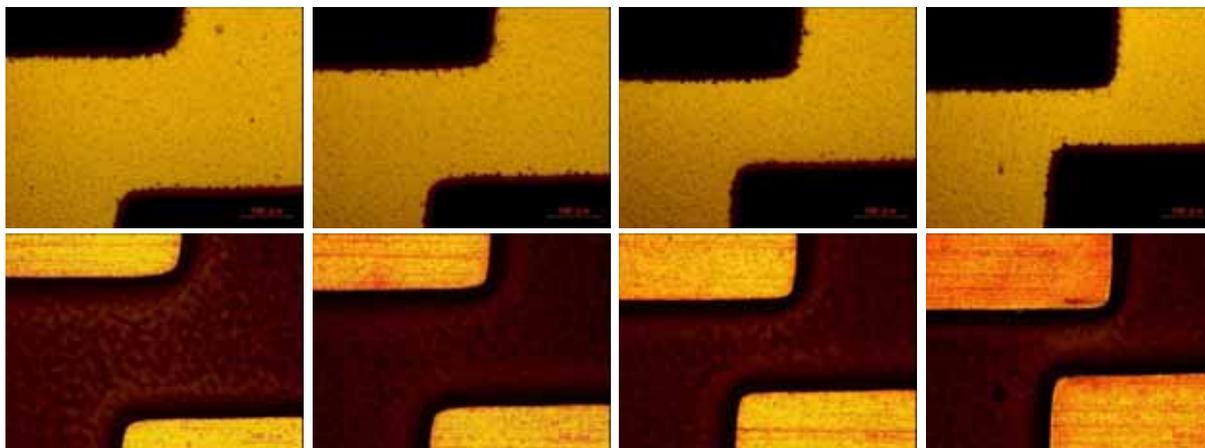


85 85%RH

X (39min)

X(17min)

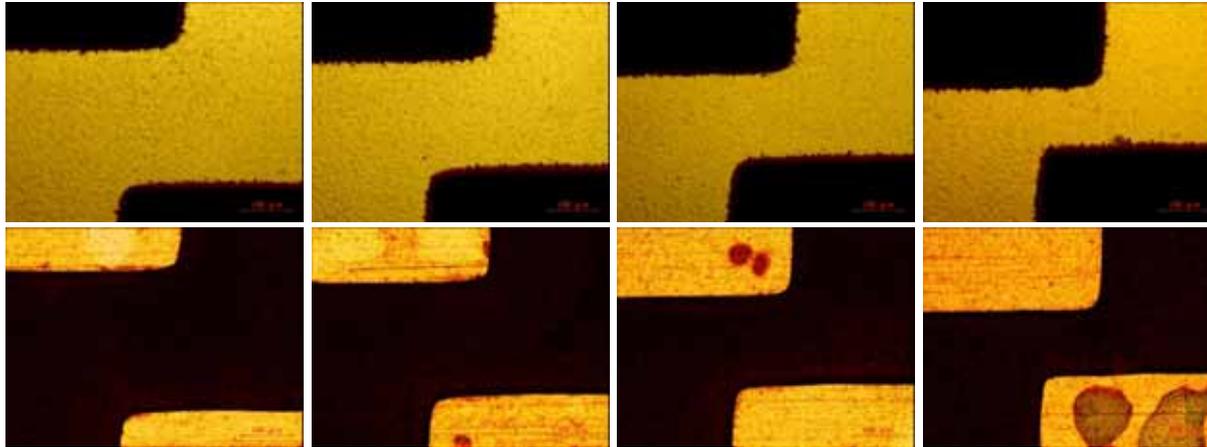
X(155min)



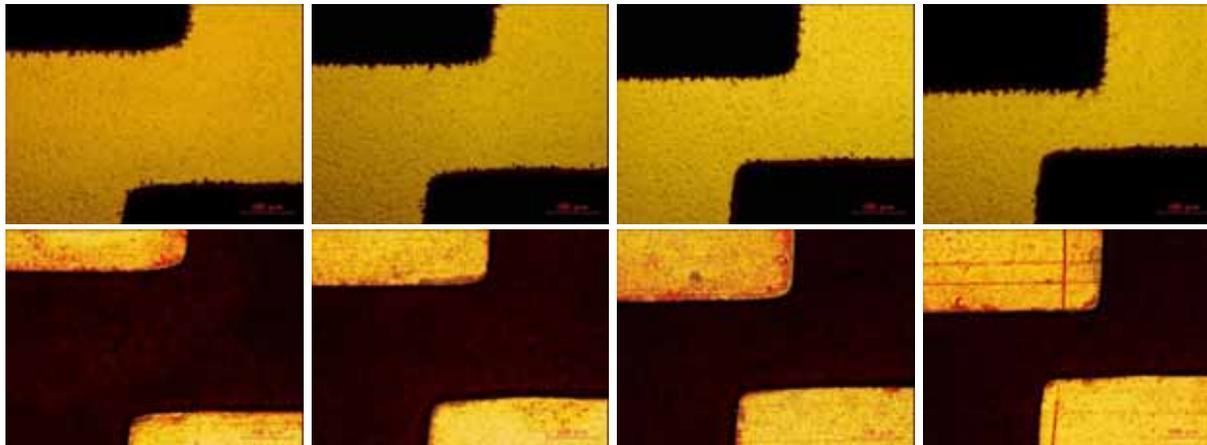
6. Clear Coat/BICOR

40 90%RH

X(6964min)

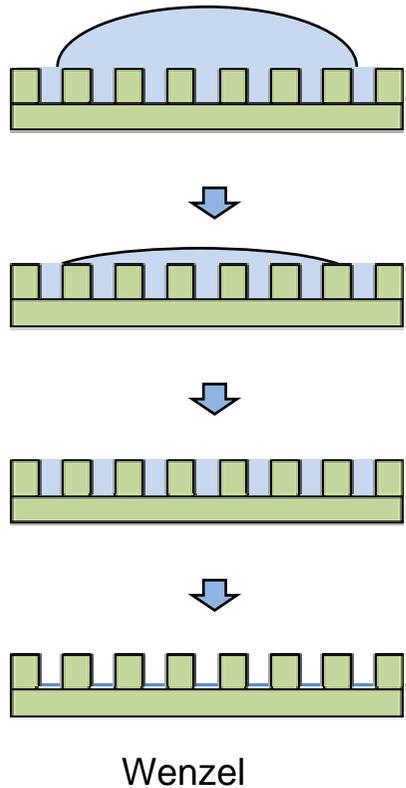


85 85%RH



表面処理と汚染物質付着のモデル

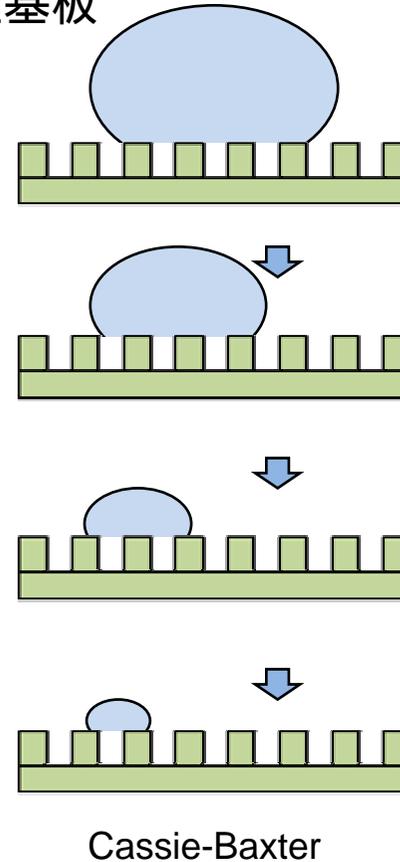
通常基板（未処理）



処理基板



撥水処理



端部はピンニングされたままクレータ底に汚染物質濃縮

空気層を介して汚染物質が保持されている。完全疎水性

撥水処理により、表面に汚染物質を保持しにくい構造

まとめ(中間)

01

BICOATは親水性、クリアコートは撥水性表面を有する。

02

親水性BICOAT単層処理基板では、40～90%RH温湿度条件において1000V高電圧印加後短時間で絶縁落ちが生じた。これに対し、クリアコート塗布基板では、NaCl水溶液浸漬後においても、撥水性により絶縁低下が生じにくくなることを確認した。

03

基板の濡れ性制御により放電・マイグレーションを抑制し、電気絶縁性を良好に保つことができると考えられる。

全体まとめ

01 高電圧における 放電・マイグレーション評価技術

実基板の1000V放電およびイオンマイグレーション発生・成長を顕微鏡下で観察しながら環境試験可能な機器を開発した。
放電・イオンマイグレーションでは、表面汚染による影響が大

02 耐放電・イオンマイグレーション性改善法に関する提案

電極埋め込み構造：電極上部での放電・マイグレーション抑制効果が期待出来る。
ただし埋め込み材料および方法の最適化必要

コーティング：撥水処理を施すことにより、耐放電・マイグレーション改善効果が期待出来る。

今後の課題

電極および基材表面形状と微細構造の制御による耐放電・イオンマイグレーション性のさらなる向上