

「燃料電池先端科学研究事業」  
 (事後評価)  
 資料6-3

# 「物質移動研究」 セル構成要素及び界面における 物質移動速度向上のための 物質移動メカニズム解明

産業技術総合研究所  
 山本 義明



The University of Texas at Austin  
 テキサス大学オースチン校  
 Prof. Jeremy Meyers



## 発表内容

評価項目	内容	ページ
(1) 目標の達成度	研究体制・研究開発項目	3,4
	全研究開発項目の達成度一覧表	5
	総括的課題の説明	6
	研究開発項目ごとの詳細説明 『目標⇒課題⇒解決のひもとき ⇒新規開発した技術⇒成果の事例』を 研究開発項目ごとに説明	7~21
(2) 成果の意義	市場への影響・成果のレベル・新技術領域の開拓への寄与・汎用性の有無・予算との見合い・他技術に比べての優位性	22,23
(3) 知的財産権等の取得	特許出願・論文・研究発表・新聞雑誌への掲載・展示会への出展件数の一覧	24
(4) 成果の普及	『プロジェクト概要』で成果展開の詳細を説明	『プロジェクトの概要』参照

**セル構成要素及び界面における物質移動速度向上  
のための物質移動メカニズム解明**

**計測ツールの展開 (産総研・FC-Cubic)**

- 実作動環境を模擬した精緻な解析
- 定量評価による現象理解の深化

**セル構成要素及び界面における  
物質移動メカニズム解明**

**シミュレーションモデリング (テキサス大学)**

- 高温における水の挙動を  
正確に記述出来る  
新規モデルの構築



**研究開発項目・スケジュール・実施機関**

物質移動研究は2研究グループで実施

**(3) 物質移動研究開発事業**

研究開発項目 (サブテーマ)	スケジュール		実施機関
	H20年度	H21年度	
[1] セルを構成する各要素に関する 高温水蒸気・各種ガス・高温水の 透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析			産業技術総合 研究所 FC-Cubic
[2] 熱伝導率・電気伝導性の計測			
[3] 応力分布測定技術の確立			
[4] 計測データを活用したシミュレーションによる ミクロ物質移動メカニズムの解明			産総研 FC-Cubic テキサス大学 オースティン校

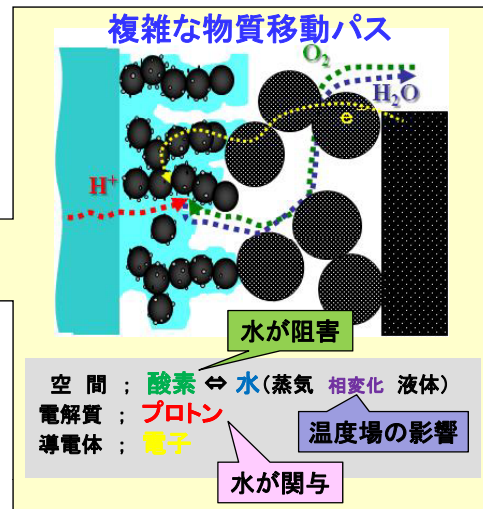
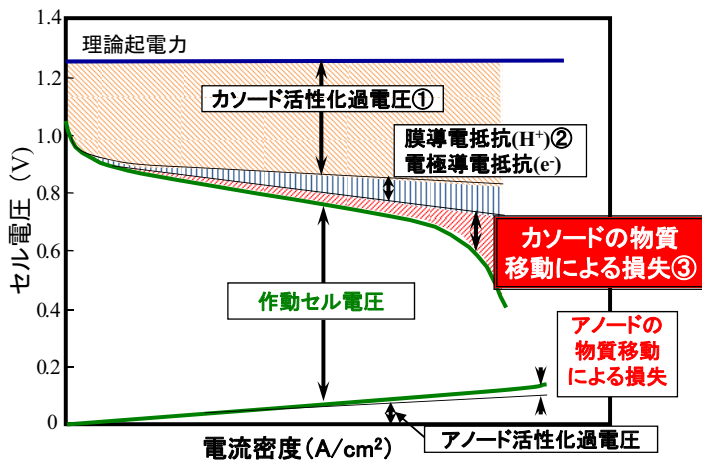
研究開発項目と達成状況

研究開発項目 (サブテーマ)	研究開発目標	研究成果	達成度
[1] セル構成各要素に関する高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析	セルを構成する各要素に関する高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析	・左記測定技術を確立 (温度/湿度/締結圧が独立に制御) ・データ蓄積および温度/湿度/締結圧の影響を把握  ⇒ データを企業のセル設計に活用 企業開発品の物性測定 研究開発機関より共同研究	○
[2] 熱伝導率・電気伝導性の計測	熱伝導・電気伝導の計測技術の確立とメカニズム解明		○
[3] 応力分布測定技術の確立	応力分布測定技術の確立		○
[4] 計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明	計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明	・上記測定データが使用可能な熱/物質シミュレーションモデルを開発した ・物質移動の限界の発生に関して指針提示 ⇒ 触媒層内物質移動が課題	△

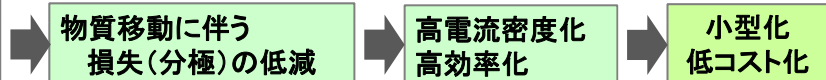


達成度: ◎充分以上、○達成、△一部未達

PEFCにおけるエネルギー損失



- [1]水蒸気・ガス、液体水等の透過挙動解析
- [2]熱伝導・電気伝導性計測
- [3]応力分布測定
- [4]計測値を活用したシミュレーション



[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

【産総研FC-Cubic】

I. 研究の狙い

《プロジェクトの活動》

《産業界への展開》

水蒸気・ガス、液体水等の透過挙動解析

物質移動に伴う損失の低減

高電流密度化

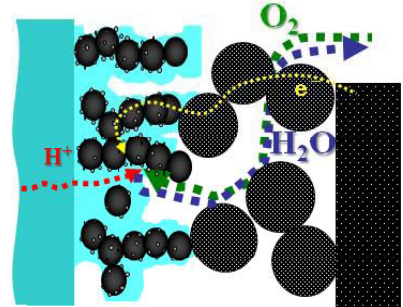
小型化  
低コスト化

燃料電池作動環境条件下で、精緻な解析が必須

II. 研究開発項目と目標

開発項目：燃料電池作動環境下における水蒸気・各種ガス・水の透過挙動計測技術の確立

目標：発電時の温度・湿度・締結圧下における、水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動メカニズム解析



III. 確立するための課題とアプローチ

- ①高温、加湿、締結圧下での精緻な計測技術確立
- ②材料物性(接触角等)の正確な測定手法の確立

- ・加湿、加圧方法に関して新規手法を開発
- ・新規手法の開発により解決

・測定技術を確立  
・データ蓄積と各因子の影響を把握  
⇒ 企業セル設計に活用  
企業MEAの測定



[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

【産総研FC-Cubic】

課題①

高温・加湿・締結圧下での物質透過挙動計測技術の開発

締結圧の制御下に恒温室を配置

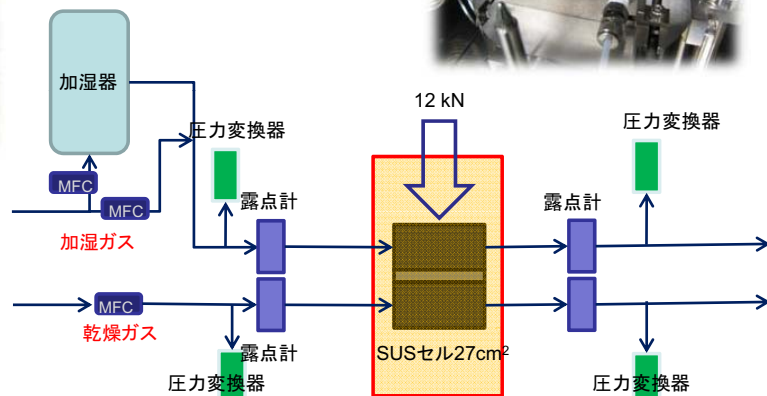
研究成果①-1 高温水蒸気・各種ガスの透過挙動計測技術開発



温度：～80℃ (120℃)  
湿度：～90 %RH  
応力設定可能



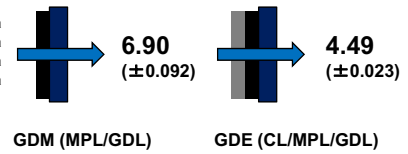
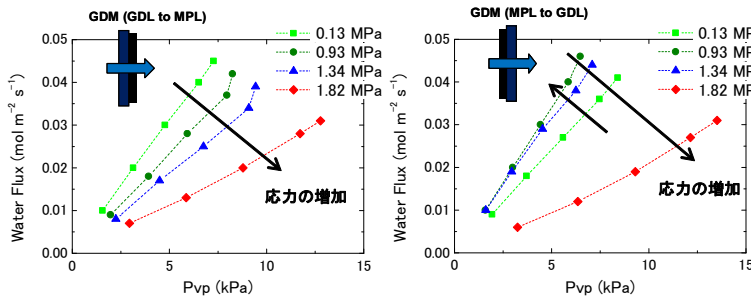
温度・湿度・締結圧を制御できる測定室を備えた計測装置を開発



[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

【産総研FC-Cubic】

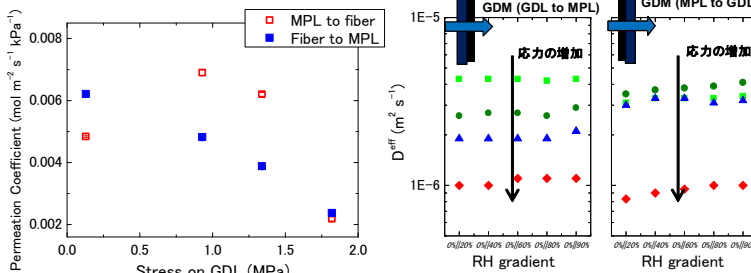
研究成果①-2 高温水蒸気・各種ガスの透過挙動解析



$$12.9 \times 10^{-3}, 12.1 \times 10^{-3} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$$

触媒層の透過係数

水蒸気透過流束(締結圧の影響)



水蒸気透過係数と拡散係数

- ・温度(～120℃), 湿度(～90%RH), 締結圧下における透過測定法を確立
- ・水蒸気透過・拡散を測定⇒締結圧の影響大

透過挙動に影響の大きい因子を特定



[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

【産総研FC-Cubic】

課題②

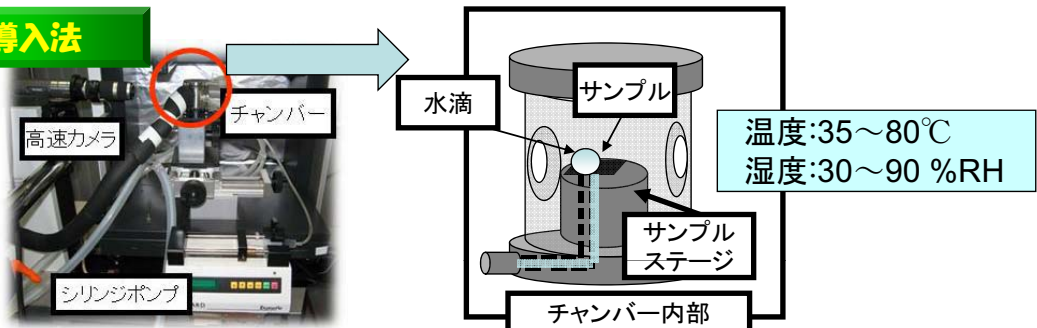
高温・加湿環境下での接触角計測技術の開発

加湿環境における撮影技術

微小液滴の形成技術

研究成果②-1 材料物性計測技術開発、親疎水性に関わる物性(接触角)計測

液体水導入法



微小sessile drop法



温度・湿度を制御できる測定室を備え、世界最小の液滴を形成可能な計測装置を開発



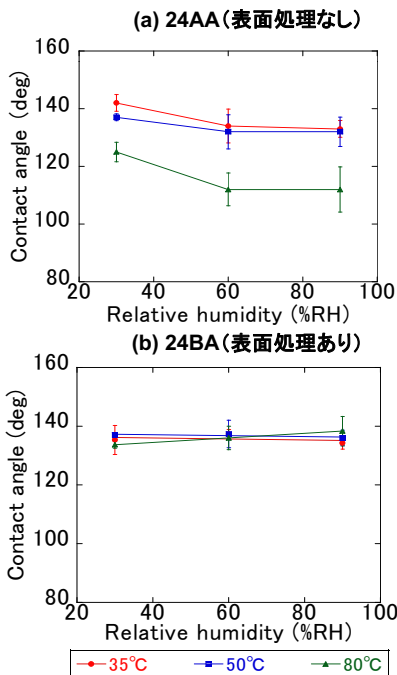
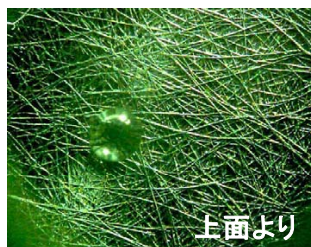
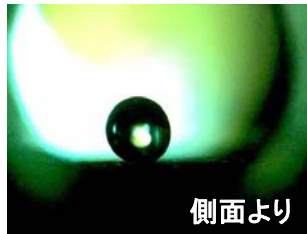


[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

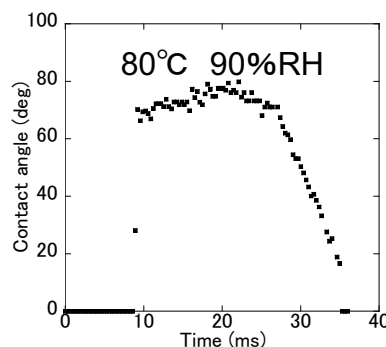
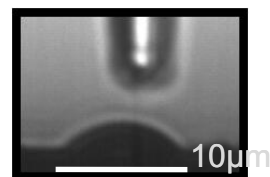
【産総研FC-Cubic】

研究成果②-2 親疎水性に関わる物性(接触角)解析

液体水導入法



微小sessile drop法



接触角の温度・湿度による変化 (表面処理の影響)

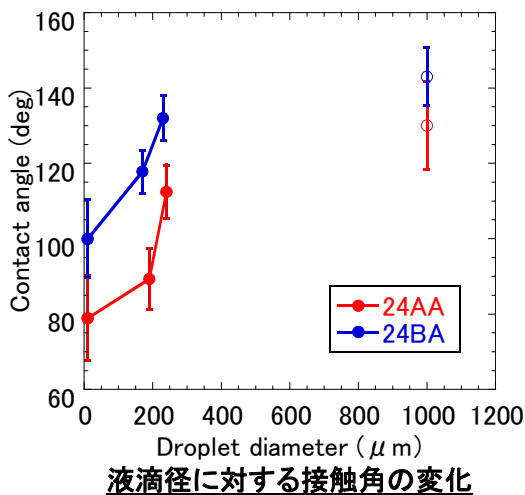
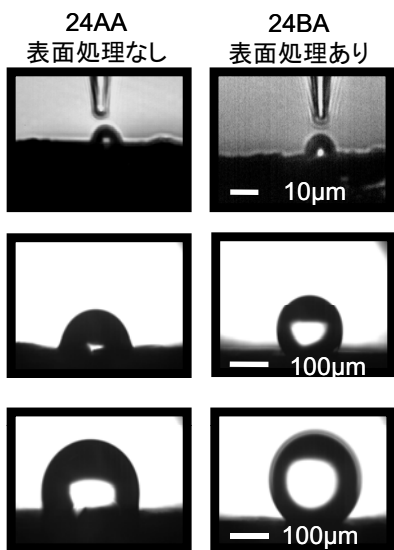
測定における接触角の経時変化 11



[1]高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析

【産総研FC-Cubic】

研究成果②-3 親疎水性に関わる物性(接触角)解析 液滴径の影響



- ・温度(〜80°C)、湿度(〜90%RH)における接触角測定法を確立
- ・接触角の温度、湿度、処理、液滴径の影響を測定
- ⇒ 材質によって温度の影響が大きい
- ⇒ 液滴径による影響も大きい

微小液滴では  
世界初の測定  
⇒ 企業からの要請  
⇒ 研究部門から依頼



[2]熱伝導率・電気伝導性の計測

【産総研FC-Cubic】

I. 研究の狙い

《プロジェクトの活動》

《産業界への展開》

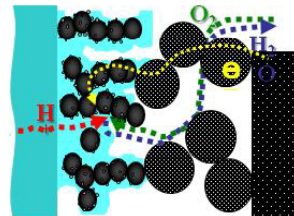
熱伝導・電気伝導に関する挙動解析

物質移動に及ぼす影響を把握

物質移動に伴う損失(分極)の低減

小型化  
低コスト化

燃料電池作動環境条件下で、精緻な解析が必須



水が阻害

空間 ; 酸素 ⇄ 水(蒸気 相変化 液体)  
電解質 ; プロトン  
導電体 ; 電子

温度場の影響

水が関与

II. 研究開発項目と目標

開発項目: 発電条件下における熱伝導・電気伝導の計測

目標: 高温・加湿・締結圧下における熱伝導・電気伝導の計測技術確立とメカニズム解明

III. 確立するための課題とアプローチ

- ① 高温、加湿、締結圧下での熱・電気伝導計測技術確立
- ② 発電条件下での異方性測定技術確立

・チャンバー内での非常測定法の導入により解決

測定技術の確立  
各因子の影響把握  
⇒ 企業セル設計に活用



[2]熱伝導率・電気伝導性の計測

【産総研FC-Cubic】

研究成果①-1 熱伝導率計測技術開発

恒温恒湿槽を用いて 30~80°C (120°C)  
35~80%RH  
厚さ方向のみ 締結圧可能

面内方向 (In-Plane)

非定常細線加熱法

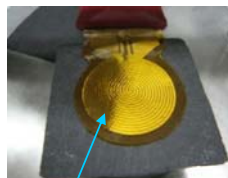


センサー

サンプル

厚さ方向 (Through-Plane)

Hot disk 法



センサー

サンプル

締結力を変えて  
応力を変化

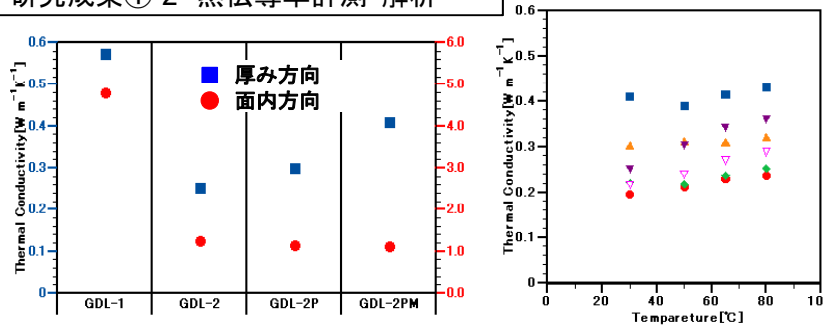
高温・加湿・締結圧を制御  
できる計測方法を開発



[2]熱伝導率・電気伝導性の計測

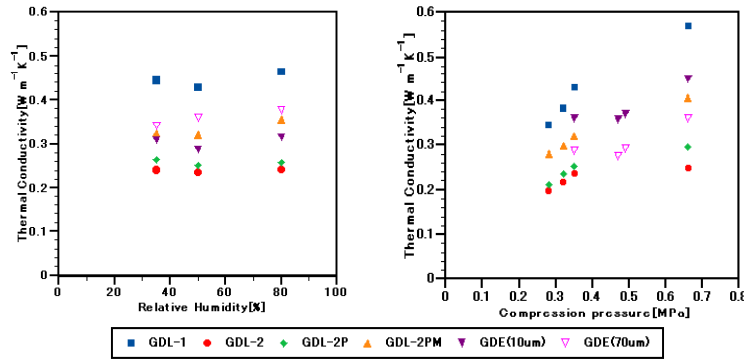
研究成果①-2 熱伝導率計測・解析

【産総研FC-Cubic】



異方性の確認

温度の影響



湿度の影響

締結圧の影響

- ・温度(～120℃),湿度(～80%RH)における熱伝導率測定法を確立
- ・熱伝導率の異方性、温度、湿度、締結圧の影響を測定
- ⇒ 数倍から1桁近い異方性
- 温度により増加傾向
- 湿度の影響は小さい
- 締結圧の影響が大きい
- ・触媒層の評価には改良が必要

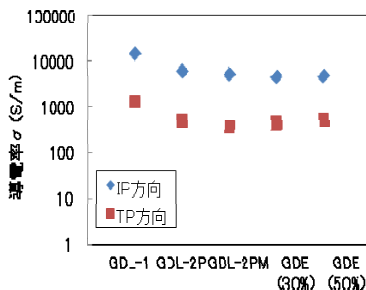
測定技術を確立に併せて  
データ蓄積と各因子の影響  
把握を実施

[2]熱伝導率・電気伝導性の計測

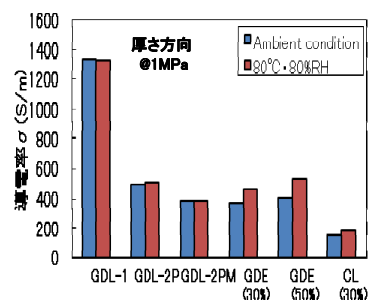
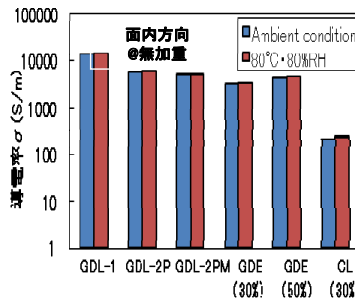
研究成果② 電気伝導性計測技術開発

恒温恒湿槽を用いて ～80℃ (120℃)  
35～80%RH  
厚さ方向のみ 締結圧調節可能

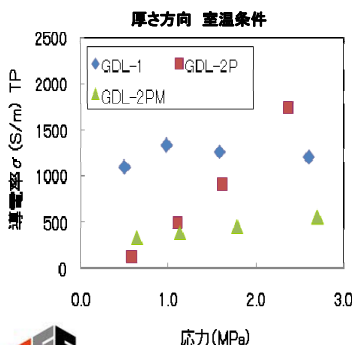
【産総研FC-Cubic】



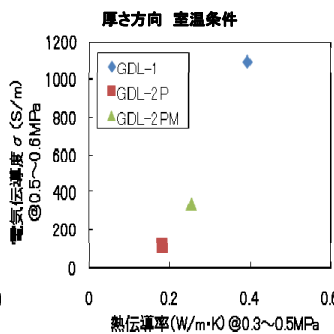
異方性の確認



温度・湿度の影響



締結圧の影響



熱伝導との相関

- ・温度(～120℃),湿度(～80%RH)における電気伝導測定法を確立
- ・電気伝導の異方性、温度、湿度、締結圧の影響を測定 ⇒ 異方性(約10倍)
- 温度・湿度の影響は小さい
- 締結圧の影響は大きい
- ・各層の比較 ガス拡散層>>MPL層>触媒層
- ・熱伝導率との相関が認められる



[3]応力分布測定技術の確立

【産総研FC-Cubic】

研究の狙い

《プロジェクトの活動》

応力分布の測定技術開発

発電条件下における物質移動各種測定条件の確認

燃料電池作動環境条件下で、解析が必須

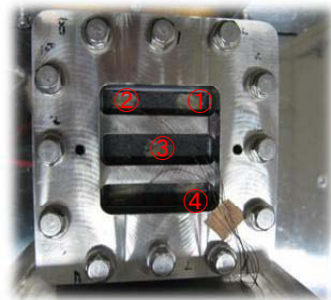
確立するための課題とアプローチ

①高温、加湿、加圧環境下での応力計測技術確立

・薄膜ストレインゲージにより解決

計測技術を確立  
企業でのセル設計に活用

研究成果① 応力分布計測技術開発



耐圧チャンバー  
~120℃, ~90%RH

＜成果＞

- ・温度(~120℃),湿度(~80%RH)における応力分布測定法を確立
- ・モデルセルを用いて面方向の応力分布を測定  
⇒ 締結圧>>面方向応力

①	②	③	④
9.4kPa	13.0kPa	-10.1kPa	8.3kPa



[4]計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明

【産総研FC-Cubic】

I. 研究の狙い

《プロジェクトの活動》

物質移動に関する挙動・物性の把握

計測データを活用したシミュレーション

物質移動の限界把握

《産業界への展開》

高電流密度化

小型化  
低コスト化

燃料電池作動環境条件下での測定値を用いた解析

II. 研究開発項目と目標

開発項目 : 計測データを活用した熱・物質シミュレーション

目標 : 物質移動の限界把握とマイクロ物質移動メカニズムの解明

III. 確立するための課題とアプローチ

①高温、加湿、加圧環境下での精緻な構造情報の把握

・環境制御下にSPMを導入

②測定データが使用可能なシミュレーションモデルの構築

・測定データをすべて利用できるCFDモデルを採用  
・温度に関しては、実験により検証

シミュレーションモデルを開発  
物質移動の限界について指針提示  
(FC-Cubicイブニングセミナー等)



[4]計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明

【産総研FC-Cubic】

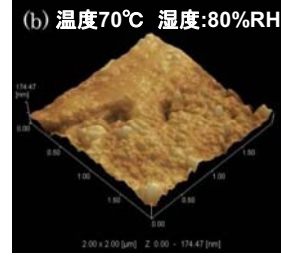
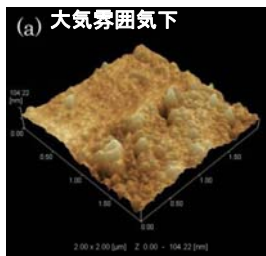
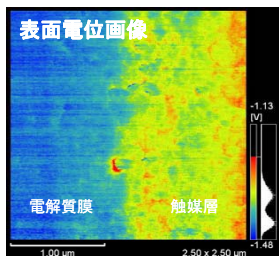
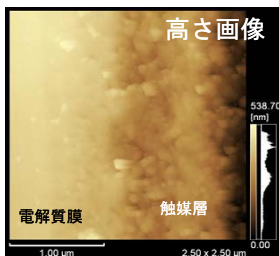
課題①

発電環境下における  
マイクロ構造観察技術がない

環境制御型 SPM



研究成果① ミクロ構造観察技術の開発



<成果>

- ・環境制御型SPM (～70°C,～80%RH)を製作
- ・表面電位像；電解質膜と触媒層に電位差があり、アイオノマーも観察

温度・湿度を制御  
できる測定室を  
備えた観察装置を  
開発



[4]計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明

【産総研FC-Cubic】、【テキサス大学】

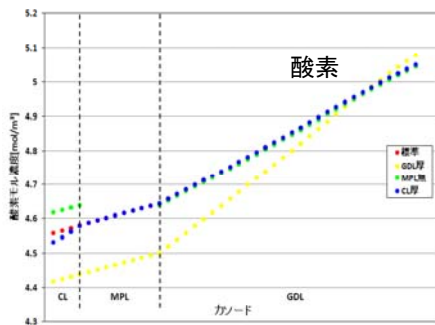
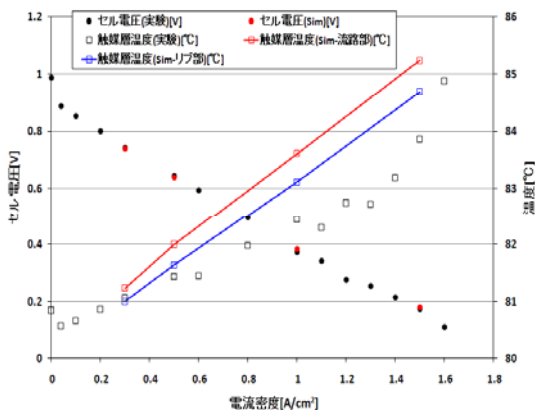
課題②

発電環境下の実測データを適用する  
シミュレーション技術の開発

汎用シミュレーションソフト  
は実測データの適用性が不明

研究成果②-1 シミュレーション技術の開発

セル ; □36単セル  
測定条件 ; 水素-空気系、利用率一定、  
フル加湿、冷却温度80°C  
測定 ; セル電圧、カソード触媒層の上昇温度



<成果>

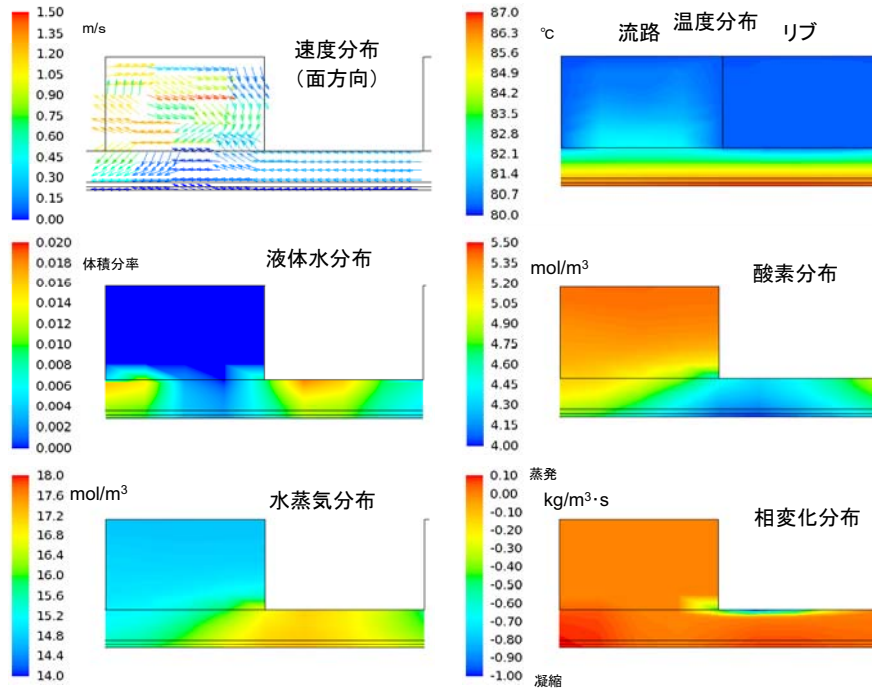
- ・測定データが使用可能な熱・物質シミュレーションモデルを開発
  - ・各層の厚さに比例して触媒温度が上昇
  - ・ガス拡散層が厚いと酸素濃度が低下
- <設計指針>  
ガス拡散層は薄い方が望ましい



[4]計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明

【産総研FC-Cubic】

研究成果②-2 シミュレーション解析 セル断面における熱・物質移動



<成果>

・電流密度が大きくなるとリブ下の触媒層で酸素不足が顕著となる。これが物質移動の限界を示唆するもの

・潜熱移動によって、熱の移動が助長されている

<設計指針>

流路・リブ幅は小さい方が望ましい

物質移動の限界については、触媒層内のより詳細な解析が必要である。  
 現状の測定データおよびCFDモデルでは、触媒層の扱いが充分ではない。  
 今後、触媒層にフォーカスした検討が必要である。



成果の意義-1

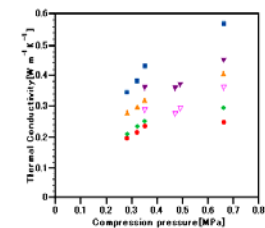
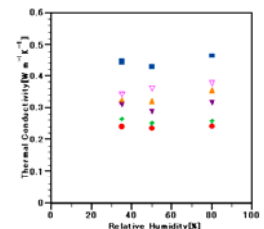
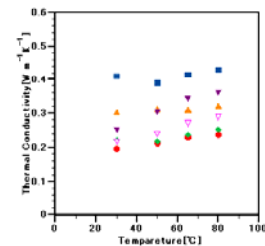
研究開発項目[1] セルを構成する各要素に関する高温水蒸気・各種ガス・高温水の透過挙動計測技術の確立とメカニズム解析、[2] 熱伝導率・電気伝導性の計測

燃料電池の発電状態における熱物質輸送に関連する物性値の計測は、世界的に測定技術そのものが開発課題となっているものもある。

現状の燃料電池の作動状態(温度~80°C、湿度~100%RH、締結圧力~2MPa)における熱・物質移動に関連する計測技術を確立、データ蓄積と各因子の影響の明確化は、今まで室温での物性値を使用せざるを得なかった業界に対して、有効な情報を提供した。

さらに、FCV業界が要望する120°Cまでの加湿状態の測定を可能にする技術に関して、加圧条件への対応とともに、高温の加圧下における湿度制御の確立は、世界に例を見ないものである。

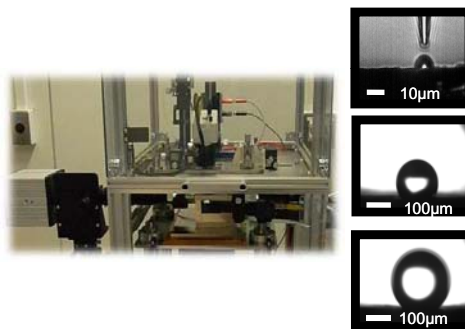
これらの計測技術により得られる計測データの蓄積と公開は、世界に先駆けるものであり、スタックメーカーにおいて設計およびシミュレーションに利用されている。



## 成果の意義-2

## 研究開発項目[1]-②親疎水性に関わる接触角計測

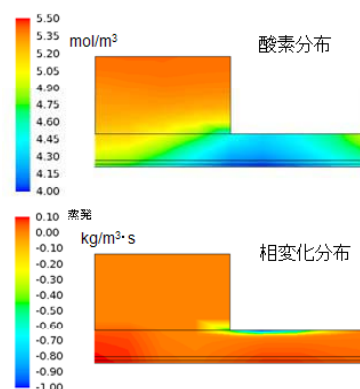
接触角の測定に関して $10\mu\text{m}$ 程度までの微小液滴を測定できる技術は世界初であり、今まで知見が得られていなかった液滴径の影響を明確化した。物質移動の確保には液滴の影響が大きく、GDLやMEAの設計に関して有益な情報を提供した。



## 研究開発項目[4] 計測データを活用したシミュレーションによるマイクロ物質移動メカニズムの解明

測定データを用いたシミュレーションを用いて、MEA内の熱および物質移動を解析し、物質移動の限界を推定した。限界はリブ部の触媒層において発生し、経験的な知見を裏付けることができた。

「物質移動の限界の把握とそれを打破する設計指針の確立」には、触媒層にフォーカスしたより詳細な解析が必要であり、次期事業の課題として提案している。



## 知的財産権、成果の普及の実績

※ : 平成22年8月31日現在

	2008年	2009年	計
	H20年	H21年	
論文(査読付き)	0	1	1件
研究発表・講演	3	7	10件