

燃料電池用高分子電解質膜の機械劣化に対する 寿命予測技術

Life Prediction Technology of Fuel Cell Polymer Electrolyte Membrane
under Mechanical Degradation

杉 下 昌 史*

Masashi SUGISHITA

大 森 優*

Suguru OHMORI

要 旨

燃料電池用高分子電解質膜に発生する機械的な応力を数値化し、機械劣化への影響度を定量的に把握することで、電解質膜の機械劣化に対する寿命を予測する手法を開発した。乾燥と湿潤を繰り返す環境下において、電解質膜に密着している触媒層内のクラック部で電解質膜の機械劣化が進行する。応力増大の要因となっている電解質膜と触媒層の燃料電池の作動する温度および湿度の環境における物性の変化に着目し、燃料電池が作動する温度および湿度における電解質膜と触媒層の物性を計測した。また、計測した物性値を有限要素法による応力解析モデルに反映し、発生応力の予測精度の向上をはかった。発生応力および頻度と材料限界線の関係から累積疲労損傷則を用いて寿命への機械劣化の影響度を寿命消費率として数値化し、寿命消費率が耐久試験後の電解質膜の膜厚との相関があることを確認した。その結果、機械的な応力による電解質膜の寿命を予測することが可能となった。車両搭載サイズの膜電極接合体を用いて機械劣化を加速する耐久試験をおこない本寿命予測技術の精度検証をおこなった。高い相関が得られたため、本寿命予測技術が車両搭載サイズに適用可能であることが確認された。

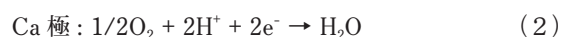
ABSTRACT

A method was developed for predicting electrolyte membrane life under mechanical degradation, by quantifying the mechanical stress generated on the fuel cell polymer electrolyte membrane and quantitatively understanding the impact on mechanical degradation. In an environment with repeated drying and wetting, mechanical degradation of the electrolyte membrane progresses at the cracks inside the catalyst layers that are bonded to the electrolyte membrane. This study focused on changes in the electrolyte membrane and catalyst layer properties in the temperature and humidity environment in which fuel cells operate as a factor that increases stress. The electrolyte membrane and catalyst layer properties were measured at the temperatures and humidity under which fuel cells operate, and the measured property values were reflected to a stress analysis model that uses the finite element method in an effort to increase the stress prediction accuracy. The cumulative fatigue damage law was applied to the relationship between the generated stress and stress frequency and the material limit line to quantify the impact of mechanical degradation on life as the life consumption rate, and it was confirmed that the life consumption rate is correlated with the thickness of the electrolyte membrane after durability tests. This enabled prediction of electrolyte membrane life according to mechanical stress. Durability tests that accelerate mechanical degradation were performed using a full-scale-size membrane electrode assembly, and the accuracy of the developed life prediction technology was verified. A high correlation was obtained, which confirmed that the developed life prediction technology can be applied to an on-board-size membrane electrode assembly.

1. まえがき

燃料電池は水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す発電装置である。実際の反応は、反応式(1)に示すアノード(An)極における水素の酸化反応と反応式(2)に示すカソード(Ca)極における酸素還元反応からなる。

*四輪 R&D センター



燃料電池における電気化学反応は、まず An 極へ供給された水素が触媒上でプロトン (H^+) と電子にわかれ、 H^+ は高分子電解質膜 (polymer electrolyte membrane: PEM) を通り、Ca 極へ移動する。Ca 極では供給された酸素が An 極か

ら外部を通ってきた電子と PEM を通ってきた H^+ と結びつき、水を生成する。このときに Ca 触媒上で酸素の還元反応が起き、起電力が発生する。Fig. 1 に燃料電池の概略図を示す。燃料電池の構造は、PEM を中心に触媒層 (catalyst layer: CL) とガス拡散層 (gas diffusion layer: GDL) を挟持した膜電極接合体 (membrane electrode assembly: MEA)、およびガスや冷媒の流路が形成されたセパレータから構成される。

自動車用途の燃料電池スタックは家庭用途に対し、小型化、高出力化が求められる。特に高出力化のために PEM を薄くすることで H^+ の伝導性を向上させているため一般的に数十 μm の薄い PEM を用いている。また、さらなる薄膜化に向けた開発が進んでいる。一方で薄膜化した PEM の耐久信頼性の確保が課題となっている。燃料電池の発電環境では熱、生成水、不純物イオンなどによる高分子特有の化学劣化因子に加え^{(1), (2)}、差圧、冷熱、乾湿を要因とした繰返し応力によるさまざまな機械的疲労の劣化因子が存在する。その中でも過度に PEM が乾燥による収縮と湿潤による膨潤を繰り返す環境 (乾湿環境) において PEM の機械劣化が進行することが知られている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。本稿では PEM の機械劣化について着目した。燃料電池の発電中には発電負荷に応じて生成水の量が変化するため、PEM の含水量は発電負荷に応じて変動する。PEM は含水量に応じて膜厚および平面寸法が変化し、発電負荷が高い状態では多くの生成水が発生することで PEM は高含水状態となり膨潤する。一方で発電負荷が低い、もしくは発電が停止した状態では低含水状態となり PEM は収縮する。Fig. 2 に X 線 CT で撮影した電極表面のスライス画像を示す。Fig. 3 に電極クラック部の断面イメージを示す。CL には製造時に数 μm から数十 μm の微小なサイズの PEM 表面まで貫通した電極クラックが発生する。Fig. 4 に湿潤環境での電極クラック部の PEM の変形の断面イメージを示す。また、Fig. 5 に乾燥環境での電極クラックの PEM の変形の断面イメージを示す。電極クラック部ではこのような乾湿環境下でさらなる PEM の機械劣化が進行すると報告されている^{(2), (3), (5)}。

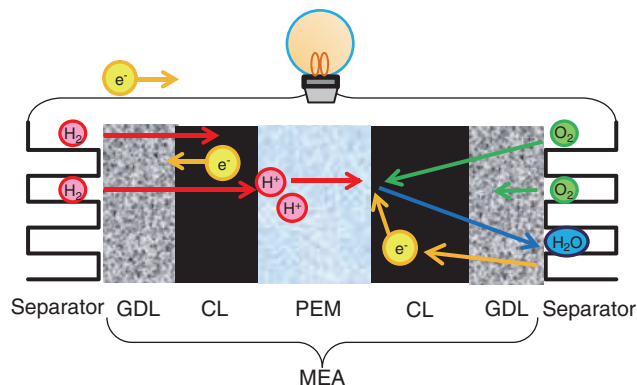


Fig. 1 Schematic image of fuel cell

近年、このような現象による劣化を低減させるために PEM の含水量の変動を制御する手法や、製造時に発生する電極クラックを抑制する触媒層の製造技術、PEM の疲労耐性の向上などが解決手法として報告されている⁽³⁾。しかしながら、単一の手法のみでは十分な発電性能と耐久信頼性を得ることはできない。PEM の含水量をコントロールする制御技術、触媒層の製造技術、材料技術のそれぞれを最適化し対応することが必要である。そのためには乾湿環境時の PEM の変形挙動の把握と PEM に与える応力の明確化および寿命への影響度を把握することが重要になる。しかしながら、現在まで PEM の機械劣化の寿命への影響度を把握する寿命予測技術は確立されていなかった。

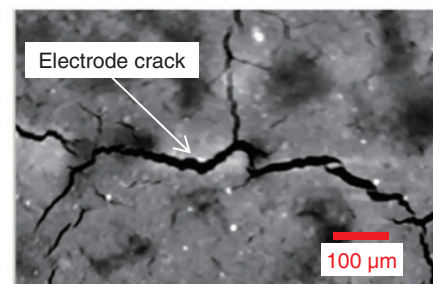


Fig. 2 Image of electrode surface using X-ray computed tomography

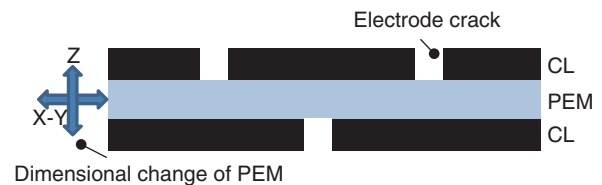


Fig. 3 Cross-sectional image of electrode crack

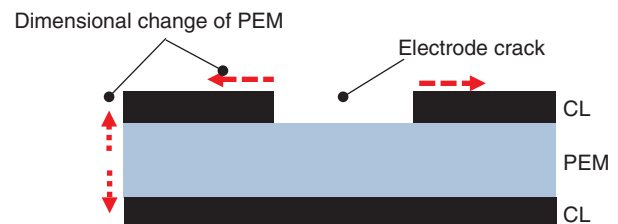


Fig. 4 Cross-sectional image of electrode crack at wet condition

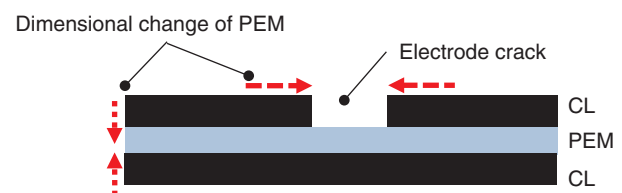


Fig. 5 Cross-sectional image of electrode crack at dry condition

2. 目的

電極クラック部の PEM の劣化は乾湿環境下で進行する。そのため、PEM の機械劣化は発電中の PEM の含水量変化とそれに伴う PEM の寸法変化、および CL と PEM のヤング率の差が関与することによって発生応力が集中し、機械劣化が進行していることが考えられる。発電中の PEM の含水量変化はインピーダンス法を用いて把握する手法が提案されている^{(7), (8)}。しかしながら、PEM は Fig. 1 に示すように両電極に挟持されており、PEM の寸法変化量含水量変動時に直接的に把握するのは容易ではない。さらに数%の寸法変化を生じる部品であるため、発電中に水が存在する環境下でひずみゲージなどを用いて PEM に発生する応力を直接的に計測することに課題があった。そのため、有限要素法 (FEM) を用いた応力解析モデルから PEM に発生する応力を見積もる手法が採用されている⁽⁴⁾。

PEM の機械劣化における寿命予測技術の構築に際し重要な因子となるのが、発生応力の明確化と発生応力に対する PEM の寿命への影響度の明確化である。そこで、これらの因子を明確にし PEM の機械劣化の寿命予測技術を確立することを本研究の目的とした。

3. 寿命予測技術の確立

電極クラック部の PEM の機械劣化は一般的な樹脂材料と同様に発生応力とその発生応力に対する寿命への影響度から予測できると考えた。CL と PEM のヤング率の差と含水環境における PEM の寸法変化率から FEM を用いて各環境での発生応力を導き、その環境下での材料限界線と発生応力および頻度の関係から疲労寿命への影響度を見積もることができると考えた。また、PEM は応力を繰り返し与えることにより、塑性変形および亀裂が発生し、PEM の厚みが低下する⁽⁹⁾。このことから寿命と膜厚の関係性を得ることにより PEM の機械劣化の寿命を予測することを試みた。

3.1. 応力解析に反映する PEM, CL 物性の取得

3.1.1. PEM, CL のヤング率の取得

PEM および CL のヤング率は温度および湿度依存性があるため、恒温恒湿チャンバ内で各環境での Stress-Strain カーブ (SS カーブ) を計測し、SS カーブからヤング率を算出した。測定に用いた環境条件を Table 1 に示す。測定に使用したサンプルの形状は 10 mm × 50 mm の長方形とし、チャック間距離は 20 mm、引っ張り速度は 50 mm/min に設定した。CL のヤング率 E_{CL} は単独で測定することが容易ではないため、式 (1) に示すように、PEM のヤング率 E_{PEM} と CL を PEM に塗布した catalyst coated membrane

Table 1 Measurement conditions of Young's modulus

	PEM and CL (CCM)	
	Temperature (°C)	RH (%)
SS curve (Young's modulus)	-35	Dry
	23	50
	70	Dry
		95
	90	Dry
		95

Relative humidity: RH

Table 2 Measurement conditions of dimensional change rate

	Direction	PEM		CCM
Dimensional change rate	X-Y (in-plane)	23°C RH50%, 70°C RH95%, 70°C dry, -35°C		
	Z (thickness)	23°C	Wet to dry	
		70°C	Wet to dry	

(CCM) のヤング率 E_{CCM} 、そして CL の体積分率 V_{CL} から算出した。

$$E_{CL} = \frac{[E_{CCM} - (1 - V_{CL})E_{PEM}]}{V_{CL}} \quad (1)$$

3.1.2. PEM の寸法変化率の測定

PEM は湿度によって含水量が変動し、寸法が変化するため、恒温恒湿チャンバ内で Table 2 に示す各温度、湿度条件にて寸法変化率を計測した。また平面方向の寸法変化率の測定に使用したサンプル形状は 10 mm × 50 mm の長方形とした。チャック間距離は 20 mm とし、測定サンプルの下部に変位センサを取り付け、各環境での平面方向の寸法変化率を計測した。厚み方向の寸法変化率の測定に使用したサンプル形状は 3 mm × 3 mm の正方形とし、各環境での厚み方向の寸法変化率を測定した。

3.2. 応力解析

燃料電池内部の環境や形状などにはさまざまな条件が存在する。このような条件下での PEM の変形挙動の直接的な可視化は時間を要する。正確な寿命評価には応力の数値化が必要であり、FEM を用いた応力解析は有効な手段である。

セパレータ、GDL、クラック構造を含む CL、PEM までの燃料電池の断面構造をモデル化し、平面ひずみ状態での応力解析をおこなった。FEM のソフトウェアには NASTRAN を用い、PEM の材料特性をより忠実に再現するために、材料特性の定義は材料非線形かつ異方性材料として取り扱った。また、MEA 製造時には加熱および加圧による加工がされているため GDL と CL および CL と PEM

界面は接着していると定義した。本研究でFEM解析をおこなったモデルをFig. 6に示す。FEM解析は、Step 1としてセパレータによるMEAへの締結荷重の入力、Step 2としてPEM、CLの膨潤、収縮の入力の二段階でおこない、PEMの膨潤時および収縮時に電極クラック部のPEMに発生する応力を算出した。

3.3. 材料限界線の取得

PEMの膨潤、収縮による疲労の耐性は一般的な樹脂材料と同様に高温かつ高湿度の環境下で疲労耐性が低下する。また一般的なPEMの軟化点温度が80℃付近にあり、温度依存性の方が大きいことが想定されたため、恒温恒湿チャンバ内でRH95%に固定し各温度にて材料限界線を取得した。測定に用いた環境条件をTable 3に示す。

Stress-Number (S-N) 線図取得に使用したサンプル形状は10 mm × 50 mmの長方形とした。チャック間距離は20 mm、繰返し速度は20 mm/minに設定した。

3.4. PEMの機械劣化に対する寿命予測

3.4.1. 累積疲労損傷則を用いた寿命消費率の算出方法

累積疲労損傷則とは材料の疲労において、変動する応力を受けるときに疲労破壊までの寿命を予測する経験則である。S-N線図および、応力頻度をFig. 7に示す。材料限界線の繰返し応力 P_i に対する破断繰返し回数を N_i と定義し、繰返し応力 P_i の頻度回数を n_i と定義する。疲労損傷度を ΔD_i と定義すると式(2)のように示すことができる。

$$\Delta D_i = n_i / N_i \quad (2)$$

さらに、さまざまな異なる応力振幅の頻度回数により累積した疲労損傷度 D を各疲労損傷の累積値で表すと式(3)のように整理できる。

$$D = \sum \Delta D_i = \sum (n_i / N_i) \quad (3)$$

累積した疲労損傷度を百分率で示した値を寿命消費率 (Life consumption rate: Lcr) と定義し、式(4)に示す。材料限界線と各応力頻度との関係を Lcr で表すことにより寿命への影響を把握することが可能となる。

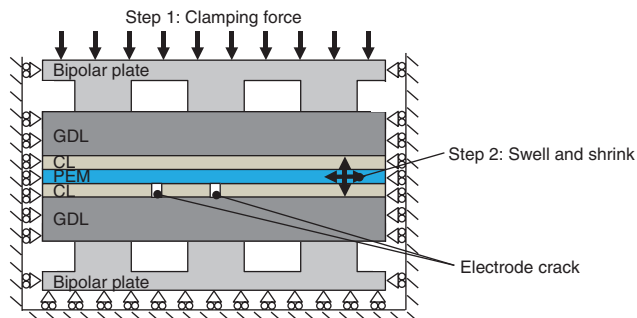


Fig. 6 FEM analysis model for dry-wet cycle

Table 3 Measurement conditions of S-N diagram

	Temperature (°C)	RH (%)
S-N diagram	70	95
	80	
	90	

Table 4 Conditions of RH cycle test

	Test condition
Temperature (°C)	90
RH (%)	30, 70, 120
Gas supply	Gas: N ₂ (Both anode and cathode) Pressure supply: Normal pressure Flow rate: 2 L/min (Both anode and cathode)

$$Lcr [\%] = \sum (n_i / N_i) \times 100 \quad (4)$$

PEMは温度条件により物性および材料限界線が変化するため、環境に応じた材料限界線と発生応力値から Lcr を算出する必要がある。3.2.節で示した、FEMを用いた応力解析から求めた発生応力値に対して、3.3.節に示したPEMの材料限界線との関係から累積疲労損傷則を用いて Lcr を算出した。

3.4.2. Lcr と膜厚の換算式の作成

発生応力は乾湿環境下における電解質膜の含水量差に依存するため、乾湿サイクル耐久試験を実施した。乾湿サイクルの耐久条件は低湿度側をdryに設定し、高湿度側はTable 4に示すとおり三つの湿度条件で実施した。車両搭載サイズのMEAは発電面積が数百cm²のサイズであり、乾湿サイクル中に面内で湿度分布が発生する。そこで、面内の湿度分布への影響を低減させるために、40 mm × 60 mmサイズのMEAを用いて試験をおこなった。

乾湿サイクル耐久試験後に電極クラック部のPEMの膜厚を解析した。3.4.1.項で示した Lcr と膜厚の相関を取得し、 Lcr から膜厚を導く相関線を作成した。

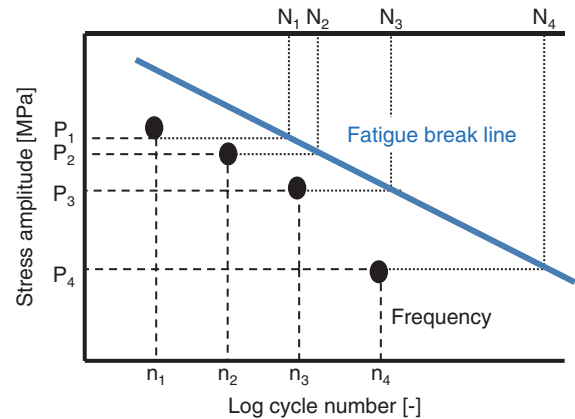


Fig. 7 Cumulative fatigue damage law

3.5. 車両搭載サイズの MEA を用いた検証

3.5.1. 車両搭載サイズの MEA での予測精度の検証

予測の精度を検証するために車両搭載用の数百 cm² の発電面積を有するサイズの MEA を用いて検証した。検証に用いた耐久試験条件を Fig. 8 に示す。高温環境下で乾湿、差圧を付加することにより PEM の機械劣化を加速する耐久条件とした。温度は 90℃ に設定し、PEM の機械劣化に対する疲労の耐性を低下させる条件とした。また、乾湿条件は湿潤側を RH100%，乾燥側を RH1% とし、含水量差が大きな条件に設定した。差圧条件は An 圧力を一定とし、Ca 圧力を変動させることにより差圧を付加した。MEA の大面積化に伴い面内湿度に分布が発生するが、面内の状態については面内の湿度分布の実測と面内の含水量分布の予測技術を用いて把握した^{(7), (8), (10)}。PEM の機械劣化は発電部面内の含水量差が発生する箇所で進行するため、最も大きな含水量差が発生する箇所の電極クラック部で PEM の寿命予測精度の検証をおこなった。

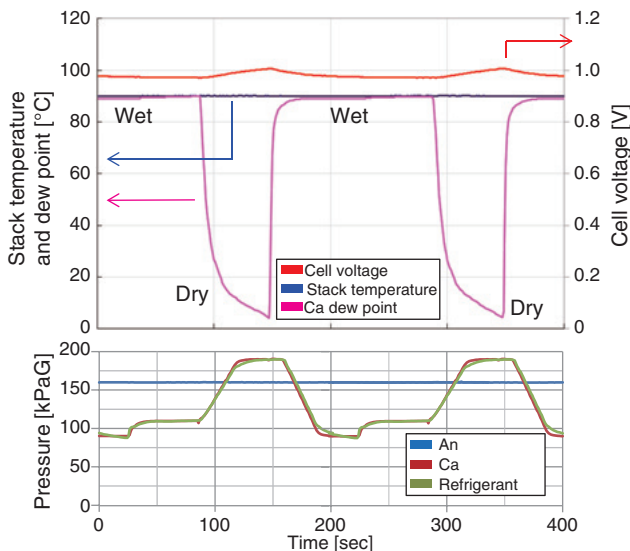


Fig. 8 Profile of accelerated stress test for mechanical degradation of PEM

4. 検証結果

4.1. 応力解析に反映する PEM, CL 物性の取得結果

4.1.1. PEM, CL のヤング率取得結果

式(1)を用いて算出した CL のヤング率と PEM のヤング率の温度に対する依存性の結果を Fig. 9 に示す。この結果から各ヤング率は温度の上昇とともに低下することがわかる。また、RH が高い条件の方がさらにヤング率が低下することがわかる。CL のヤング率は各温湿度領域において PEM のヤング率より高いことが確認できる。

4.1.2. PEM の寸法変化率の取得結果

PEM, CCM の平面方向の寸法変化率の測定結果を Fig.

10 に示す。常温時の寸法から高湿度側では CCM は膨潤し、低湿度側では収縮する。また、CCM に加工すると平面方向の寸法変化が PEM 単体と比較して抑制されていることがわかる。これは CL のヤング率が PEM よりも高いことで PEM の平面方向の寸法変化を抑制する効果があることを示している。

Fig. 11 に PEM の厚み方向の寸法変化率測定結果を示

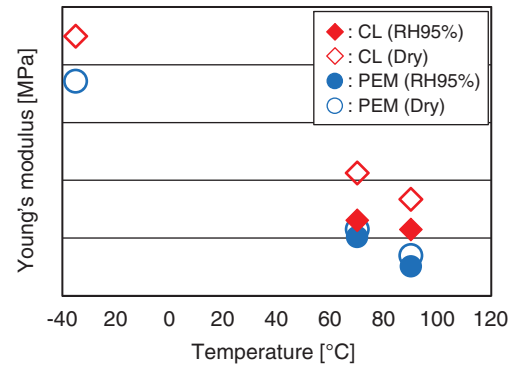


Fig. 9 Results of Young's modulus at various conditions

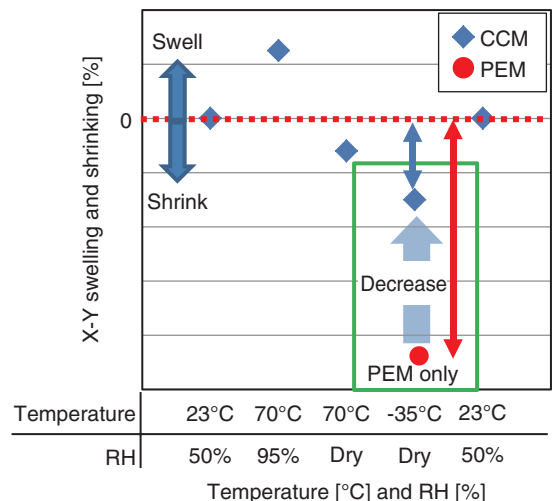


Fig. 10 Results of X-Y dimensional change rate of CCM and PEM

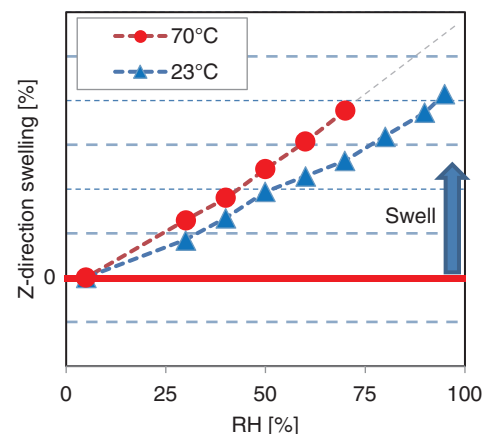


Fig. 11 Results of Z dimensional change rate of PEM

す。厚み方向の PEM の寸法変化量は温度および RH の増加に応じて上昇することがわかる。

4.2. FEM を用いた応力解析結果

4.1.1. 項および 4.1.2. 項で示した, PEM と CCM の各温湿度環境での物性を Fig. 6 に示した FEM モデルに反映し, 各環境での PEM の変形挙動を解析した。Fig. 12 に FEM を用いて電極クラック部における PEM 膨潤時の変形挙動を解析した結果を示す。PEM は含水量が増加すると膨潤する傾向が 4.1.2. 項で得られており, 電極クラックが存在すると PEM はクラック部にめり込むように変形することがわかった。Fig. 13 に Fig. 12 の赤枠部の拡大図を示す。電極の端部に引っ張り方向の応力が集中していることがわかる。これは, 4.1.1 項で示した, ヤング率が PEM よりも CL の方が高い結果により説明できる。この結果により, 電極クラック部の PEM の機械劣化が進行する要因は乾湿環境下において電極端に応力が集中し, 高い応力が発生することに起因するものであることがわかった。燃料電池の発電中には負荷に応じて生成水が発生し, それに伴って PEM は膨潤, 収縮を繰り返すため, 電極クラック部の電極端の周辺の PEM には高い応力が繰り返し入力され, 機械的な疲労劣化が進行すると推測される。

4.3. 材料限界線の取得結果

PEM の S-N 線図取得結果を Fig. 14 に示す。この結果から PEM の応力疲労耐性は温度上昇とともに低下することが確認できる。また, PEM の疲労曲線は 10^6 回を超えた高サイクルの疲労回数においても, 累積疲労により破断することを確認した。そのため, 式 (4) で示した Lcr を算出する際には低応力時にも応力疲労が入力されることを反映し, 低応力の入力を含めた累積疲労から算出した。

4.4. 累積疲労損傷則を用いた Lcr の算出

4.4.1. FEM を用いた応力解析による発生応力の予測

4.1. 節で示した, ヤング率と寸法変化率, 実際の電極ク

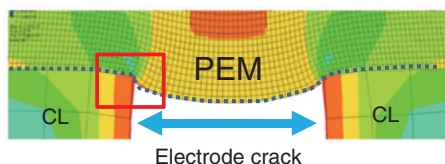


Fig. 12 Stress distribution in PEM simulation at PEM swelling

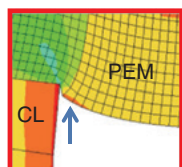


Fig. 13 Enlarged view of red frame in Fig. 12

ラック幅を 4.2. 節の FEM を用いた応力解析により, 発生応力を算出した。

Fig. 15 に電極クラック部の PEM の厚み方向の寸法変化率と電極クラック幅の発生応力に対する依存性を示す。この結果から, PEM の厚み方向の膨潤率が大きくなるとクラック部の PEM の発生応力は増大し, かつクラック幅が大きい程発生応力が増大する結果が得られた。

4.4.2. Lcr の算出

材料限界線と発生応力値を用い, 3.4. 節で示したように累積疲労損傷則を用いて Lcr を算出した。また, 各条件での算出には, 3.4.2. 項で示した RH 違いの乾湿サイクル試験の環境条件を用いた。算出結果を Fig. 16 に示す。こ

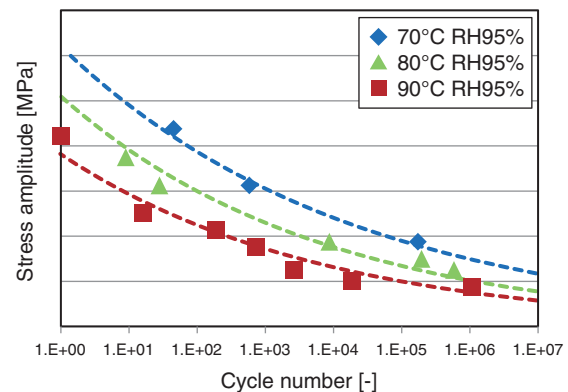


Fig. 14 Results of S-N diagram at various temperature conditions

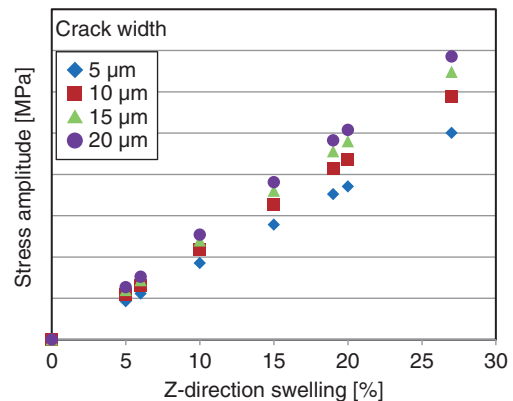


Fig. 15 Calculation results of stress amplitude at various conditions (FEM)

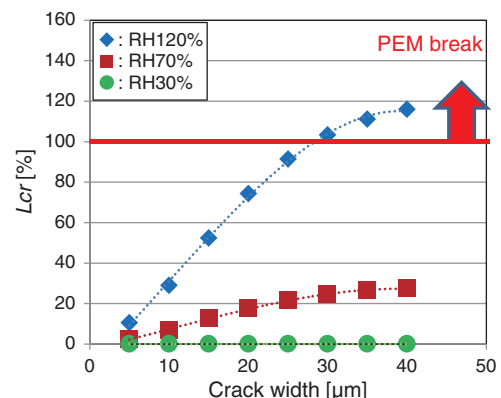


Fig. 16 Calculation results of Lcr in RH cycle test

の結果から乾湿差が大きいほど Lcr が増大し、本テストの RH120% から dry を繰り返す耐久条件では約 30 μm 幅以上の電極クラック部で PEM が破損することが予測結果より得られた。一方で乾湿差が小さいほど Lcr は低下し、RH30% から dry を繰り返す耐久条件では PEM に対する疲労劣化の影響が小さいことを示している。

4.4.3. RH 違いの乾湿サイクル試験後の膜厚解析結果

RH 違いの乾湿サイクル試験後の電極クラック部の PEM の膜厚計測結果を Fig. 17 に示す。クラック幅が大きくなるほど膜厚低下率が顕著であり、約 30 μm の電極クラックでは PEM が破損することを確認した。また、電極クラック部の膜劣化は dry から wet の乾湿差が大きい条件では膜厚低下の影響度が増大しており、FEM を用いた応力解析の予測と傾向が一致することを確認した。これは電極クラック部の PEM の膨潤変化に伴う発生応力の増大が PEM の機械劣化事象に対して支配的であることを示している。

4.4.4. Lcr と膜厚の換算式

4.4.2. 項で示した各耐久条件で算出したクラック幅に対する Lcr の計算結果と、4.4.3. 項で示した解析結果を用いて Lcr と膜厚低下率の関係性を取得した。

その結果を Fig. 18 に示す。 Lcr が大きくなるとともに膜

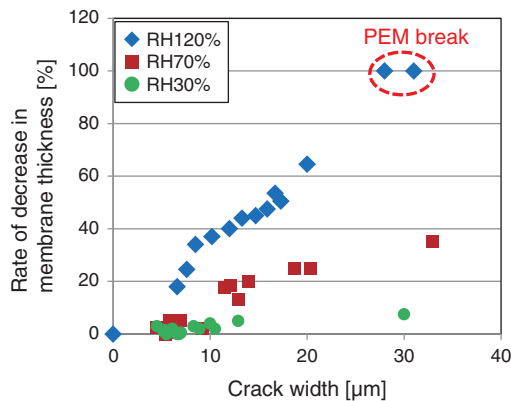


Fig. 17 Analysis results of membrane thickness in RH cycle test

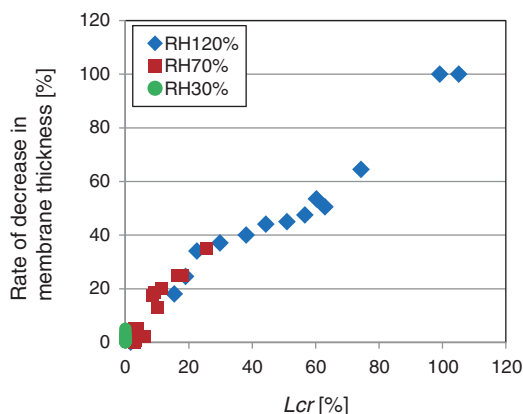


Fig. 18 Relationship between Lcr and rate of decrease in membrane thickness

厚低下率が上昇するという結果が得られた。これは電極クラック部の PEM に高い応力が発生することで PEM の機械劣化が進行し、材料限界線と発生応力の関係から定まる Lcr が膜厚低下率に影響を及ぼすということを示している。また、乾湿差が異なる耐久条件の場合でも Lcr と膜厚低下率は高い相関が得られた。この結果により、耐久条件が異なる場合においても機械的な劣化ストレスを Lcr に置き換えることによって耐久中に低下する膜厚を予測することが可能となった。電極クラック部の PEM の機械劣化を抑制する手法として、PEM の含水量の変動を制御する手法や、CL の製造技術、PEM の疲労耐性の向上などが挙げられる。本寿命予測技術を用いることによって、それぞれの対策手法の PEM の膜厚の寿命への向上効果を定量化することが可能となり、十分な発電性能と耐久信頼性を確保できる最適な対策手法の検討が可能となった。

4.5. 車両搭載サイズの MEA での予測精度の検証結果

車両搭載サイズの MEA を用いた機械劣化耐久試験後の膜厚計測結果を Fig. 19 に示す。実機サイズの MEA においても電極クラック幅に応じて機械劣化が進行することを確認した。また、膜厚低下率の解析結果と本寿命予測技術を用いた膜厚低下率の予測計算によって算出した膜厚低下率の傾向が一致しており、車両搭載サイズの MEA においても本寿命予測技術が適用可能であることを確認した。

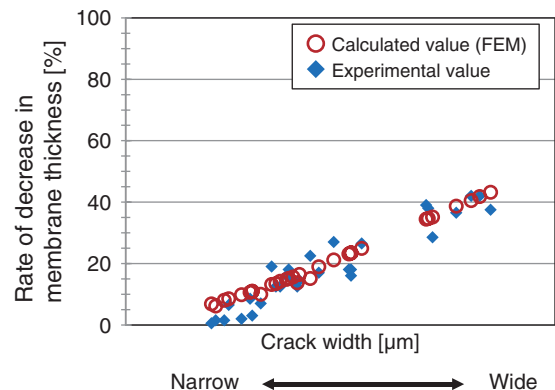


Fig. 19 Analysis results of membrane thickness in accelerated stress test using on-board-size MEA

5. まとめ

PEM の機械劣化に対する寿命予測技術を構築した。

- (1) PEM と CL の物性取得の結果から CL のヤング率は PEM よりも高く、平面寸法変化の抑制に寄与する一方で電極クラックが存在する場合には電極クラック幅に応じて応力を増大させる要因となっていることを FEM 解析にて明らかにした。

- (2) 各温度および各湿度に応じた材料物性値を FEM モデルに反映することにより、各温湿度環境下で PEM に発生する応力を見積もることが可能となり、RH 違いの乾湿サイクル試験の結果との相関が得られた。
- (3) 累積疲労損傷則を用いて PEM の Lcr を定義することにより、機械劣化の寿命への影響度を定量化することが可能となった。また、車両搭載サイズの MEA で機械劣化耐久後の膜厚を予測できることを確認した。

参考文献

- (1) 平出篤志: 燃料電池用高分子電解質膜の化学劣化に対する寿命予測技術, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.45-53
- (2) Lai, Y. H., Dillard, D. A.: Handbook of Fuel Cells: Advances in Electrocatalysis, Materials, Diagnostics and Durability, Vol. 5, ed. Vielstich, W., Gasteiger, H. A., Yokokawa, H., John Wiley & Sons, Ltd., p. 403-419, (2009)
- (3) Gittleman, C. S., Coms, F. D., Lai, Y. H.: Chapter 2: Membrane Durability: Physical and Chemical Degradation, Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation, Ed. Mench, M. M., Kumbur, E. C., Veziroglu, T. N., Elsevier, (2012)
- (4) Tang, H., Peikang, S., Jiang, S. P., Wang, F., Pan, M.: A Degradation Study of Nafion Proton Exchange Membrane of PEM Fuel Cells, J. Power Sources, 170(1), p. 85-92, (2007)
- (5) Uchiyama, T., Kato, M., Ikogi, Y., Yoshida, T.: Mechanical Degradation Mechanism of Membrane Electrode Assemblies in Bucking Test Under Humidity Cycles, ASME J. Fuel Cell Sci. Technol., Vol. 9(6) p.0210071-0210078, (2012)
- (6) Kai, Y., Kitayama, Y., Omiya, M., Uchiyama, T., Kumei, H.: In Situ Observation of Deformation Behavior of Membrane Electrode Assembly Under Humidity Cycles, ASME J. Fuel Cell Sci. Technol., Vol. 11(5), p.0510061-0510067, (2014)
- (7) 岩成亨, 宮島一嘉, 古澤宏一郎, 井ノ上雅次郎: 実車搭載発電システムにおける燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量のリアルタイム計測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.31-36
- (8) 佐藤雅彦, 千葉裕人, 井ノ上雅次郎: 燃料電池スタックにおけるセル面内 CCM 含水量分布計測システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.15-23
- (9) 内山智暁: 固体高分子型燃料電池における膜電極接合体の力学モデルと機械耐久性, 日本ゴム協会誌, 第 87

巻, 第 6 号, p.236-242, (2014)

- (10) 南雲健司, 井ノ上雅次郎: シミュレーションによる燃料電池スタックセル面内 CCM 含水量分布予測, Honda R&D Technical Review, Vol.28, No.1, p.24-30

■ 著 者 ■



杉下 昌史



大森 優