

燃料電池用金属セパレータの強度設計手法

Strength Design Method of Metallic Separator for Fuel Cell

齋 木 克 里*

Katsunori SAIKI

要 旨

燃料電池用金属セパレータの構造設計において、極薄のステンレス箔で流路形成をおこなうための強度設計手法を構築した。ステンレス鋼の加工硬化特性に着目し、金属材料の強度物性値を基にして、金属箔の変形挙動をひずみ値の関数として定義した。材料の物性値測定から算出した局所ひずみ値と成形限界線図を用いて、金属箔で形成可能な形状の範囲を求めた。また、燃料電池スタックの発電時に燃料電池用金属セパレータに発生する機械的な応力をマイクロビッカース硬さ測定により算出した局所ひずみ値から求めた。この応力値を材料の疲労限度線図内に描くことで、金属箔の機械劣化に対する寿命評価を可能にした。

ABSTRACT

A strength design method was developed to form channels using ultrathin stainless steel foil in the structural design of metallic separators for a fuel cell. This method focused on the work hardening characteristic of stainless steel, and defined the deformation behavior of the metallic foil as a function of the strain value, based on the strength-related physical property values of the metallic materials. The shape range that can be formed with metallic foil was obtained using a forming limit diagram and localized strain values calculated from measurements of the material physical property values. In addition, the mechanical stress produced on the metallic separators of the fuel cell during fuel cell stack power generation was obtained from localized strain values calculated by micro Vickers hardness measurements. The metallic foil life with respect to mechanical degradation could be evaluated by plotting this stress value in the material fatigue limit diagram.

1. まえがき

燃料電池自動車 (fuel cell vehicle: FCV) は内燃機関を搭載した車両と同様な使い方を実現することを目的としている。Honda のFCV はマンマキシマム・メカミニマムの思想のもと、セダンとして快適な居住空間を確保するために、搭載される燃料電池スタックは小型軽量化、高出力密度化が求められる。燃料電池スタックには数百枚のセパレータと膜電極接合体 (membrane electrode assembly: MEA) が積層されており (Fig. 1), 燃料電池スタックの小型軽量化、高出力密度化を実現するためには金属セパレータの厚さ低減と、緻密な流路形状設計が求められている⁽¹⁾。これらを実現するにはステンレス素材の極薄化が必要である。

しかし、極薄化したステンレス箔でプレス加工により緻密な流路形状にすると、板厚減少やクラックを発生させやすい (Fig. 2)。

こういった板厚減少やクラックを発生させないためには局所的な塑性変形を避け均一に加工硬化させる必要がある。

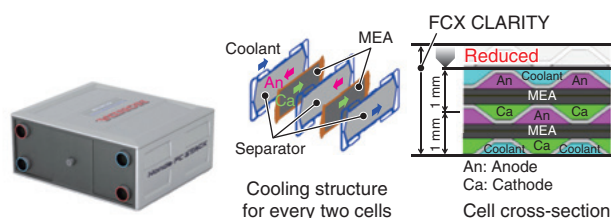


Fig. 1 FC stack and structure

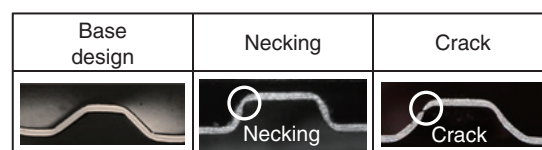


Fig. 2 Issue due to forming

* 四輪 R&D センター

さらに、燃料電池スタックの発電時にはセパレータとセパレータとの間にあるMEAの膨潤収縮による荷重の変動およびガスや冷媒による圧力の変動が発生する。この荷重や圧力の変動によって、燃料電池用金属セパレータには常に応力変動が生じる。極薄なステンレス箔で形成されるセパレータにとっては、発電時に発生する応力によって塑性変形や、疲労破壊を発生させないように強度設計する必要がある (Fig. 3)。そこで、本研究では加工硬化特性に注目し、材料の硬さという物性値からひずみや応力を定義した。このようにして得られた応力値から材料の疲労限度線図を描くことで、寿命評価を可能にした。

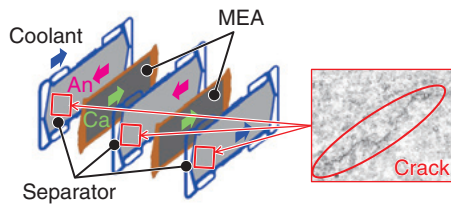


Fig. 3 Issue due to plate fatigue

2. 従来の確認手法の課題

2.1. 成形限界の見極め

従来は、ステンレス箔で局所的な板厚の減少やクラックのないプレス加工をするには、Fig. 4で示した平坦部の長さ、内角R、抜き角、流路深さ、流路ピッチといった設計パラメータを変化させた多くのサンプルをプレス加工により作製していた。作製したサンプルの断面観察などで局所的な板厚の減少やクラックを確認することで塑性変形限界を見極めていた。

一般的にプレス成形品の塑性変形の限界を見極める手法として成形限界線図 (forming limit diagram: FLD) (Fig. 5) がある。Fig. 5に示すFLDは成形限界線 (forming limit curve: FLC) よりも小さなひずみであれば局所的な肉痩せが発生しないことを表しており、FLCよりも大きなひずみでは著しい肉痩せやクラックが発生することを表す。そのため、プレス加工品の成形可能な範囲を簡易的に見極めるものとして広く用いられている。

FLDを描く際に用いられるスクライブドサークル試験方法 (Fig. 6) では、あらかじめφ5 mmからφ20 mmの大きさの基準図形を描いた鋼板をプレス加工により所定の形状にする。プレス加工によりあらかじめ描いた基準図形の形状が変化した量と方向をそれぞれ測定し、最大主ひずみ ε_1 を横軸に最小主ひずみ ε_2 を縦軸とする座標内にプロットすることにより、評価対象部位の変形状態を把握することができる⁽²⁾。

しかしながら、セパレータは複雑かつ緻密な形状をしているため、この基準図形を、セパレータの評価したい箇所

に微視的に描くことは、変形箇所の特定と測定精度の観点から容易ではないため、緻密で高精度な設計をおこなうセパレータに対しては精度の高いデータが得られにくいことが課題であった。

2.2. 疲労限界の見極め

ステンレス箔で形成されるセパレータの強度設計をする上で、燃料電池スタックの発電時に発生する応力によって塑性変形や疲労破壊を発生させないようにするには、局所的な応力を正確に把握する必要があった。

局所的な応力を算出する手法の一つにひずみゲージを用いた応力計測法があるが、この手法では特定の箇所にひずみゲージを貼り、測定したひずみ値から応力を算出する。しかしながら、セパレータの緻密な表面にひずみゲージを貼り付けて、発電し実際の挙動を確認することは容易ではない。その理由としてまず、ひずみゲージを緻密な流路に配線した状態で発電することになるので、燃料電池の発電に必要なガスを流路へ供給する妨げとなる。また、極薄の

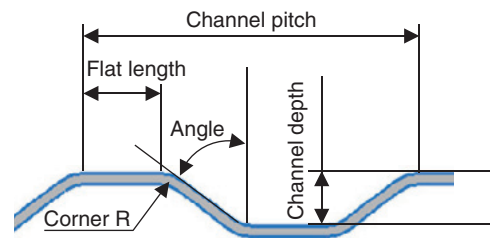


Fig. 4 Design parameters

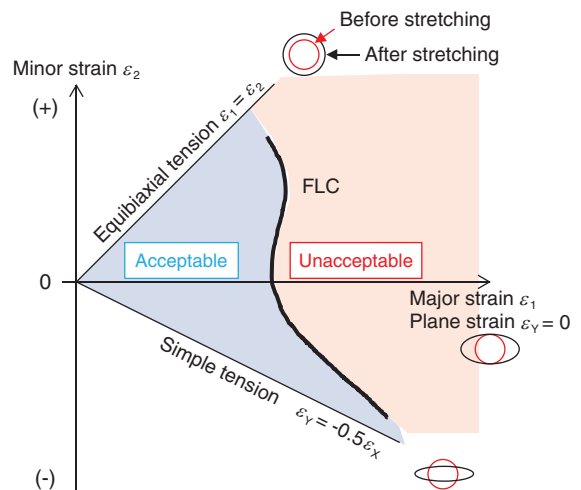


Fig. 5 FLD

Before stretching	After stretching	Definition of 'strain'
		Major strain $\varepsilon_1 = \ln (d_1/d_0)$ Minor strain $\varepsilon_2 = \ln (d_2/d_0)$

Fig. 6 Scribed circle method

金属箔にひずみゲージを貼り付けてしまうとひずみゲージによる補強効果で発電時のセパレータに発生する局所的な応力を測定することは測定精度の観点から適切ではない。

そのため、燃料電池スタックの発電時にセパレータに発生する局所的な応力を把握することが課題であった。

3. セパレータ流路の強度設計手法

セパレータの局所的な変形状態と応力による疲労破壊寿命をより正確にかつ短期間で見極める方法として、我々はステンレス箔の加工硬化特性に着目し、従来の手法で容易ではなかった局所的なひずみの計測を硬さ測定から導くことを試みた。

成形限界を見極めるために、プレス加工したセパレータの局所的なひずみ値を硬さや板厚減少率から算出した。このひずみ値とFLDを用いて塑性変形限界を見極めた。次に疲労限界を見極めるために、セパレータに発生する局所的な応力をステンレス箔の硬さから局所ひずみ値を算出した。この値と疲労限度線図を用いることで疲労破壊寿命を見極めた。このように、セパレータに発生する応力や変形の挙動をそれぞれひずみ値の関数として定義することで、セパレータ流路の強度設計手法を構築した。

4. FLD を用いた塑性変形限界の予測技術

はじめに、所定の形状にプレス加工したセパレータ流路の局所的なひずみ箇所やひずみの方向を明らかにするために、プレス成形シミュレーションを用いてひずみの箇所と方向を予測した。そこで得た局所的に変形した箇所に対して微小硬さ測定から算出したひずみ値をFLDへ適用することで、形状形成の可能な範囲を求めた。

4.1. プレス成形時のセパレータに発生するひずみ解析

4.1.1. ひずみ挙動の確認

燃料電池用セパレータは緻密な流路形状をしているため、測定精度の観点から局所変形箇所の特定と変形方向については、プレス成形シミュレーションを用いて予測した。

プレス成形シミュレーションについてはTable 1で示した形状サンプルについておこなった。その代表的な形状で実施した条件と解析結果を示す。解析条件については、緻密な流路形状の平面方向での局所変形箇所を特定するために、セパレータ流路形状の一部を模擬した範囲で実施した(Fig. 7)。

また、局所的に発生するひずみを確認するために、メッシュサイズは1 μm と微小範囲に設定し解析をおこなった。

まず、緻密な流路形状の平面方向で局所的に変形が発生する箇所を予測した結果を示す(Fig. 8)。

Fig. 8 図中の赤丸で印した箇所に最も大きなひずみが発

Table 1 Conventional method samples

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8
Flat length	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.53	0.34
Angle	1.00	1.07	1.10	1.11	1.07	1.10	0.80	0.89
Corner R	1.00	0.83	0.67	0.50	0.83	0.67	0.67	0.83
Channel depth	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Channel pitch	1.00	0.96	0.92	0.88	0.48	0.44	0.76	0.76
Judge	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good

生していることを特定した。そして、Fig. 8 で示した A-A' 面における局所ひずみの発生方向をシミュレーションにより示す(Fig. 9)。

成形による平面の変形する方向をシミュレーション解析した結果、Fig. 9 図中 A-A' 面の赤丸で印した最も大きく局所的なひずみが発生した箇所については、Fig. 5 図中の最大主ひずみ ε_1 軸方向に伸びている。Wave 形状の流路では、Fig. 8 図中の赤丸部で印した内角 R が最も大きく局所的に変形し、FLD の最大主ひずみ ε_1 軸方向に対応していることを確認した。

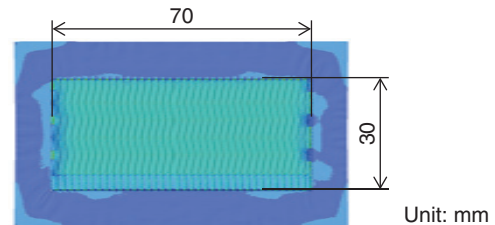


Fig. 7 Simulation method

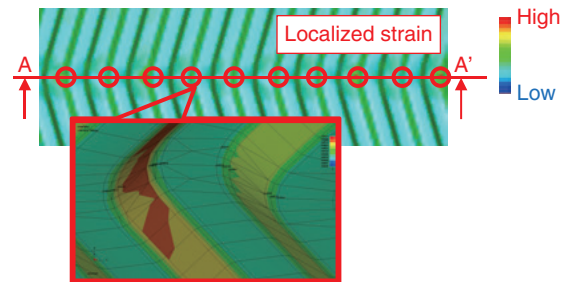


Fig. 8 Localized strain point in plane direction

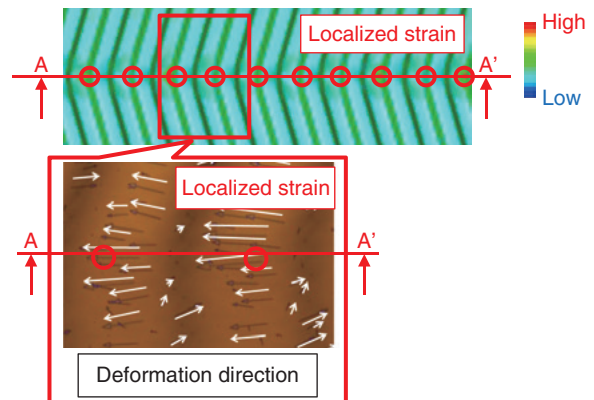


Fig. 9 Deformation direction of plane

4.1.2. ステンレス箔の微小硬さとひずみの数式化

セパレータ流路形状の強度設計をおこなうために、極薄ステンレス箔の加工硬化特性に着目した。加工硬化特性とはひずみによって硬さが変化する特性である。この加工硬化特性を利用し、従来の手法で容易ではなかった局所的なひずみの計測を硬さの測定から導くことを試みた。

緻密な流路形状をしているセパレータの局所的なひずみを求めるために、微視的な箇所を測定することができるマイクロビッカース硬さ計を用いた。硬さ試験方法は JIS Z 2244 (ビッカース硬さ試験—試験方法)⁽³⁾ の規定に準じて実施した。マイクロビッカース硬さ試験で使用した、ダイヤモンド圧子形状は対面角 136° の四角錐である。ステンレス箔の微小硬さとひずみの関係を取得するために、引張試験により所定のひずみを与えた試験片を製作し、マイクロビッカース硬さ試験法により、ステンレス箔の硬さを計測した。引張試験の試験片については JIS Z 2201 (金属材料引張試験片)⁽⁴⁾ の規定に準ずる 13B 号試験片を用いた。

ステンレス箔の加工硬化特性を定式化するために、微小硬さをひずみ値の関数として数式化した。加工硬化とは材料の塑性ひずみにより転位のすべり運動が引き起こされ、その塑性ひずみの増加とともに材料中の転位密度の増加によって起こる現象のことである。そこで、加工硬化とひずみの関係を定式化するために、まず加工硬化を転位密度として扱った。この転位密度と真応力の間には正の相関がある。また、真応力は材料の引張強度特性からひずみの関数として定式化できることから、転位密度とひずみの関係が求まる。よって、加工硬化をひずみの関数として表すことができる。以下に詳細な結果を示す。

まず、転位密度 ρ と真応力 σ の間には正の相関があり、式 (1) で表されている⁽⁵⁾。 M はテーラー因子、 ϕ_D は定数、 G は剛性率、 b はパーガースペクトルの大きさとする。

$$\sigma = M\phi_D G b \sqrt{\rho} \quad (1)$$

そこで、加工硬化は転位のすべり運動によって引き起こされることから、加工硬化による微小硬さ H_v と真応力 σ との間にも関係があると考えた。また、一般的な鋼には試験荷重の大きいビッカース硬さやロックウェル硬さと応力の間には直線関係がある。微小硬さとひずみの関係を実験から求めた。

$$f(H_v) = A * \sigma + B \quad (2)$$

真応力 σ と真ひずみ ε_P は公称応力 σ_0 と公称ひずみ ε_0 の関数で表すことができる⁽⁶⁾。式 (3)、(4) を以下に示す。

$$\sigma = \sigma_0 * (1 + \varepsilon_0) \quad (3)$$

$$\varepsilon_P = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (4)$$

式 (2) に式 (3) と (4) を代入することで微小硬さは公称応力と公称ひずみの関数として表すことができる。

4.1.4 項で後述する一般的なステンレス鋼板の真応力と真ひずみ線図に対してよい近似をあたえる Swift タイプの構成式 (5) を用いることで、ビッカース硬さをひずみ値の関数と定式化することができる。

真応力を σ 、真ひずみを ε_P とし、 F 、 b および n は定数である。加工硬化係数を F 、加工硬化指数を n として材料の強度物性値を Swift の式から求めた。

$$\sigma = F(b + \varepsilon_P)^n \quad (5)$$

f は関数を表す記号とし、 A 、 B は定数、加工硬化係数を F 、加工硬化指数を n とする。

$$f(H_v) = A * F[b + \ln(1 + \varepsilon_0)]^n + B \quad (6)$$

燃料電池セパレータに適用した薄板ステンレス材料のひずみと硬さの関係をプロットし、定式化した式 (6) を実験で表した結果を Fig. 10 に示す。定数 A と B については、実験から求めた。

Fig. 10 で示したように、硬さをひずみ値の関数として計算できることを確認した。

以上の結果から、ステンレス箔の硬さといった強度物性値を基にして、セパレータに発生する微視的なひずみ値に変換することで、複雑かつ緻密な形状のセパレータにおいても、局所的な変形状態を正確に把握することを可能にした。

4.1.3. ステンレス箔の板厚減少率とひずみの数式化

ステンレスは加工硬化特性を有していることと、体積一定の条件下において、塑性変形による局所的に発生したひずみを板厚減少率の関数と定義することで、断面観察により板厚を測定した結果から、局所ひずみを導いた。燃料電池セパレータに適用した極薄ステンレス箔の局所的なひずみと板厚減少率の関係を取得する。

引張試験により所定のひずみを与えたサンプルを製作し、板厚を測定することでひずみと板厚減少率の関係を実

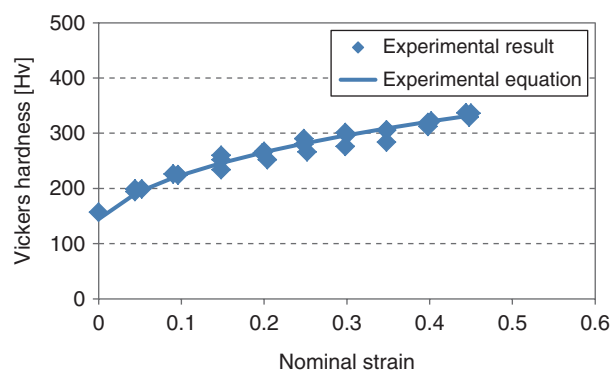


Fig. 10 Vickers hardness results under various strain conditions

験から導いた。

引張試験によりサンプルに与えるひずみ量 ε は式 (7) で表されている⁽⁶⁾。初期評価長さを L_0 、所定のひずみ量での評価長さを L_1 とする。

$$\varepsilon [\%] = (L_1 - L_0) / L_0 * 100 \quad (7)$$

また、初期板厚を T_0 、所定のひずみを与えたサンプルの板厚を T_1 としたときに、板厚減少率 ΔT は式 (8) で表されている⁽⁶⁾。

$$\Delta T [\%] = (T_1 - T_0) / T_0 * 100 \quad (8)$$

引張試験の試験片については JIS Z 2201 (金属材料引張試験片)⁽⁴⁾ の規定に準ずる 13B 号試験片を用いた。

さらに、平面方向のひずみをそれぞれ ε_1 、 ε_2 とし、厚み方向のひずみを真ひずみ ε_3 としたときに、 ε_3 は式 (9)、(10) で表せる⁽⁶⁾。

$$\varepsilon_3 = \ln (T_1 / T_0) \quad (9)$$

体積一定の条件を用いて式 (10) を導いた。

$$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (10)$$

式 (8)、(9)、(10) より、板厚減少率 ΔT は式 (11) で表せる。

$$\Delta T [\%] = \{1 - \exp [-(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]\} * 100 \quad (11)$$

極薄ステンレス箔のひずみと板厚減少率の関係をプロットし、定式化した式 (11) を実線で表した結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 で示したように、板厚減少率をひずみ値の関数として計算できることを確認した。

以上の結果から、微細な箇所を測定できる板厚減少率を確認することで、プレス成形時に発生する微視的なひずみを定量化する手法を構築した。

4.1.2. 項と 4.1.3. 項の結果を基に、極薄なステンレス箔で形成可能な範囲を求めるために FLD への適用を検討した。

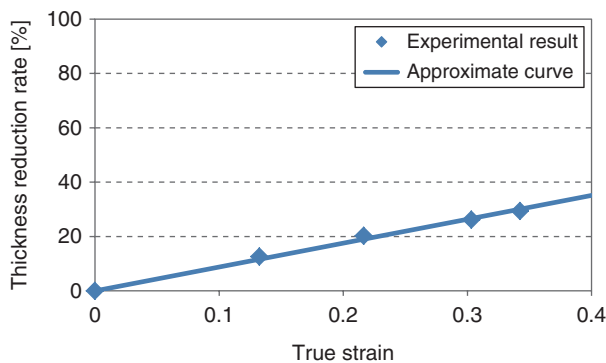


Fig. 11 Thickness reduction rate results

4.1.4. FLD への適用

4.1.1. 項で示したセパレータの局所変形箇所について極薄なステンレス箔の局所的な硬さや板厚減少率などの強度物性値を測定し、局所的なひずみ値として算出することで、極薄な箔で形成するセパレータの流路形状の設計にも FLD が使えると考え、検証した。

Table 1 の従来製作したサンプルを用いて、Fig. 5 で示した FLD 上に局所的な硬さや板厚減少率から算出したひずみと Stören-Rice の局所くびれ発生の理論⁽⁷⁾を用いた FLC を描いた。

Stören-Rice の局所くびれ発生の理論式を式 (12) で表す。

$$\varepsilon_1 = [3\beta^2 + n(2+\beta)^2] / [2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)] \quad (12)$$

ひずみ比 $\beta: \varepsilon_2 / \varepsilon_1$

n : 加工硬化指数

局所くびれとは、板材が引張られると塑性変形を起こすが、破断の直前で板厚方向に厚みが減少することをいう。薄板材に局所くびれが発生するということは、すなわち局所くびれが発生した点を成形限界としてとらえられることができる。極薄なステンレス箔での成形限界の理論的な予測についても、局所くびれ発生の理論式を用いて FLC を描いた。

ここで、加工硬化指数などを求めるために、ステンレス箔の材料強度試験をおこない、ステンレス箔の応力とひずみの関係を数式化した。一般的に、応力とひずみの関係を取得するためには引張試験片を用いた、静的引張試験がある。

そこで、燃料電池セパレータに適用したステンレス箔の Stress-Strain カーブ (S-S カーブ) を静的引張試験により取得した (Fig. 12)。

引張試験方法は JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) の規定に準じて実施した⁽⁸⁾。引張試験の試験片については JIS Z 2201 (金属材料引張試験片)⁽⁴⁾ の規定に準ずる 13B 号試験片を用いた。

Swift の式で最小自乗近似した実験結果を Fig. 12 に示す。

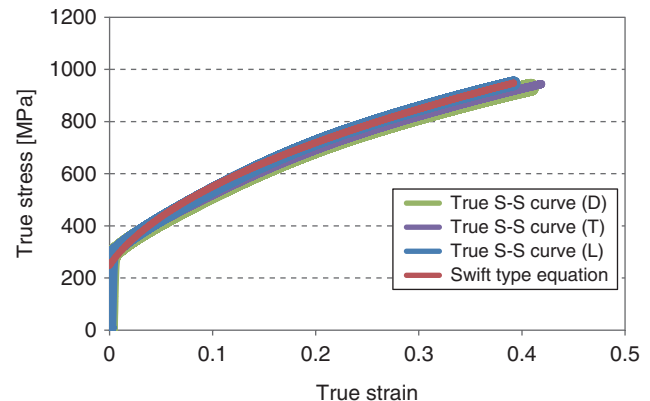


Fig. 12 True stress-true strain curve

Swift タイプの構成式 (5) は一般的なステンレス鋼板の真応力-真ひずみ線図に対してよい近似を与えることは知られている⁽⁹⁾。

Fig. 12 図中にステンレス箔の圧延方向に対して垂直方向を T, 流れ方向を L, 45° 方向を D として示した。

T, L, D 方向で真応力, 真ひずみ線図はほぼ同じ線上にあることから, 異方性の無い材料である。さらに, 実験結果は Swift の式で近似でき, 応力を算出するために必要なステンレス箔の強度物性値を求めることができた。

局所的な硬さや板厚減少率から算出したひずみを FLD 上に描いた (Fig. 13)。

得られた結果を, 青のプロットは局所くびれの発生していない点で, 赤のプロットは局所くびれが発生している点で表した。それぞれのプロットは最大主ひずみ ε_1 軸上において FLC を境にして局所くびれ発生の有無が確認できた。材料の微視的な硬さから算出したひずみ値を用いることで, ステンレス箔で形成するセパレータの流路形状の設計にも FLD が適用できることを明らかにした。

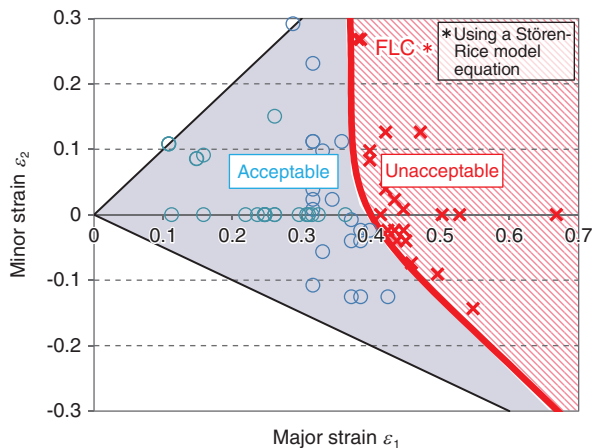


Fig. 13 FLD results

5. 疲労限度線図を用いた寿命予測技術

次に, 燃料電池スタックの発電時にセパレータに発生する応力を求めるために, 有限要素法 (finite element method: FEM) 解析により応力の発生箇所と大きさを予測した。予測結果に対して, 微小硬さ測定から算出したひずみ値を応力に換算し比較検討をおこなった。疲労限度線図内に発電時セパレータに発生する応力を描くことで, セパレータ流路の機械劣化に対する寿命評価ができると考えた。

5.1. 発電時のセパレータに発生する応力解析

5.1.1. ステンレス箔の微小硬さと応力の数式化

2章で述べたように, 発電時のセパレータに発生する応

力を把握するには, 従来の手法で容易ではなかった局所的な応力値を微小硬さから算出した。

まず, 微小硬さと応力の関係を定量化する。ステンレス箔の応力とひずみの関係を式 (5) で定式化した上で, 微小硬さから算出したひずみ値を応力に変換することで式 (2) を定量化できた。

微小硬さや板厚減少率の測定をすることで, 極薄なステンレス箔でかつ緻密な流路を形成するセパレータに発生するひずみや応力の測定を可能にした。

5.1.2. FEM を用いた応力解析結果

燃料電池スタックの発電時にはセパレータとセパレータとにある MEA の膨潤収縮による荷重変動およびガスや冷媒による圧力の変動が発生するため, 燃料電池用金属セパレータには常に応力の変動が発生する (Fig. 14)。

燃料電池内部は発電の状態によりさまざまな条件が存在する。燃料電池内部が湿潤な環境では MEA は膨潤し, 反対に低温や乾燥した環境では MEA は収縮する。発電により MEA が膨潤収縮する際には隣接しているセパレータに対して荷重の変動が生じる。また, セパレータ流路にはガスや冷媒が流れており, 発電時にはガスや冷媒の内圧の変動によりセパレータにも圧力の変動が生じる。これらの荷重と圧力によるセパレータにおける応力変動について FEM 解析をおこなった (Fig. 15)。

ステンレス箔の疲労限度線図と FEM を用いた応力発生箇所の特定と, 材料強度物性値である微小硬さから算出し

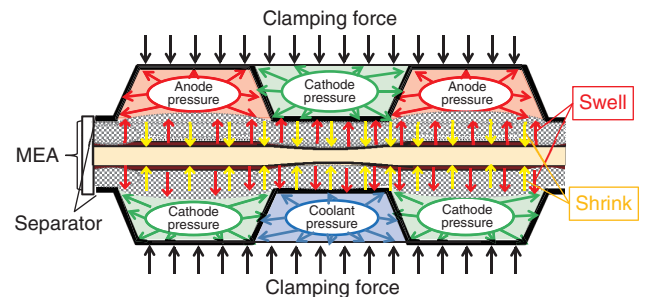


Fig. 14 Image of stress occurrence

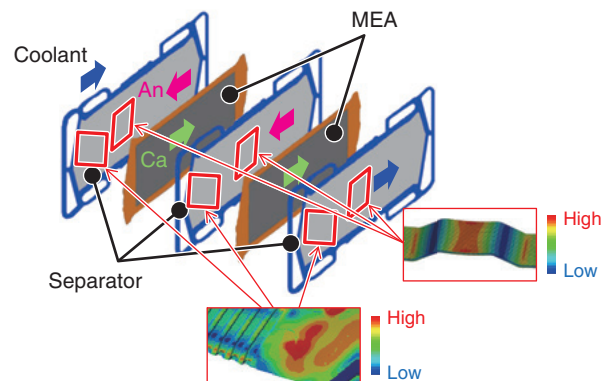


Fig. 15 Stress occurrence location by FEA

た応力値を用いて、燃料電池スタックの発電時に燃料電池用金属セパレータに発生する機械的な応力を数値化した。

FEMによるセパレータ面内のさまざまな箇所に発生する応力計算結果と同箇所を実測した硬さから算出した応力の相関性を Fig. 16 に示す。

FEMによる応力の計算結果と微小硬さから算出した応力の結果は相関係数が 0.98 と高い相関性があることが確認できた。

FEM と実験によって求めた応力を基に、ステンレス箔で形成するセパレータの機械的な寿命予測を簡易に予測するために疲労限度線図への適用を検討した。

5.1.3. 疲労限度線図への適用

局所的に発生する応力を算出する一般的な手法の一つにひずみゲージを用いた応力計測法があるが、2章で既に述べたようにセパレータの緻密な表面にひずみゲージを貼り付けて、発電し実際の挙動を確認することは容易ではない。そこで、燃料電池スタックの発電時に発生する応力を微小硬さから算出した応力値を用いて疲労限度線図内に描くことで、簡易的に寿命予測ができると考えた。

強度設計する上で、発生する応力は材料の強度限界以下でなければならない。そこで、燃料電池セパレータに適用した薄板ステンレス材料のひずみ振幅－破断繰返し数曲線 (ε -N 曲線) を取得し、薄板ステンレス材料の疲労限度線図を描いた。 ε -N 曲線はプリー曲げ疲労試験によりひずみ値を制御してステンレス箔の疲労を評価した。疲労試験方法は JIS Z 2274 (金属材料の回転曲げ疲れ試験方法)⁽¹⁰⁾ の規定に準じて実施した。

疲労限度線図とは材料の疲労において、変動する応力を受けるときに平均応力の影響を加味した疲労強度を評価するための手法の一つで、横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとり、降伏限界内で疲労限度線以下の範囲が疲労破壊しない領域と評価できる。

これまで述べてきたとおり、燃料電池スタックの発電時に発生する応力が疲労限度線図内にあることを確認するた

めに、微小硬さの実測から算出した応力値を疲労限度線図内に描いた (Fig. 17)。

ステンレス箔の微視的な硬さから算出したひずみ値を用いることで、セパレータ流路の機械劣化に対する寿命評価を可能にすることが確認できた。

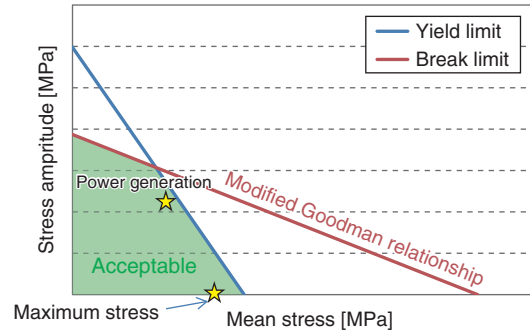


Fig. 17 Fatigue limit diagram

6. まとめ

本稿では燃料電池セパレータに適用した極薄のステンレス箔の加工硬化特性に着目した。材料の強度物性値を把握することで、セパレータの構造成立性の観点から形状形成と寿命評価の両面で、強度設計が可能な範囲を簡易に予測できる手法を構築した。

- (1) 金属材料の硬さといった強度物性値を基にして、金属薄板に発生する応力や変形挙動をひずみ値の関数として定義できることを実験と理論式の両面から明らかにした。
- (2) セパレータ面内の局所的な硬さ測定をすることで、応力やひずみ値への換算を可能にしたため、薄板で形成するセパレータの流路形状の強度設計に FLD や疲労限度線図が適用できることを確認した。

参考文献

- (1) 木村顕一郎, 河崎輝明, 大村孝之, 渥美淑弘, 清水潔: 新型燃料電池自動車 CLARITY FUEL CELL の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 1-7
- (2) 中村和彦, 桑原利彦: 2 章プレス成形における破断と対策, プレス絞り加工, 日刊工業新聞社, p. 5-6, (2002)
- (3) JIS Z 2244:2009, ビッカース硬さ試験—試験方法
- (4) JIS Z 2201:1998, 金属材料引張試験片
- (5) 澤田浩太, 丸山公一, 小峰龍司, 永江勇二: Mod9Cr-1Mo 鋼のクリープ寿命に関する研究, 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター, 公開資料 PNC TN9410 97-035, p. 8, (1997)

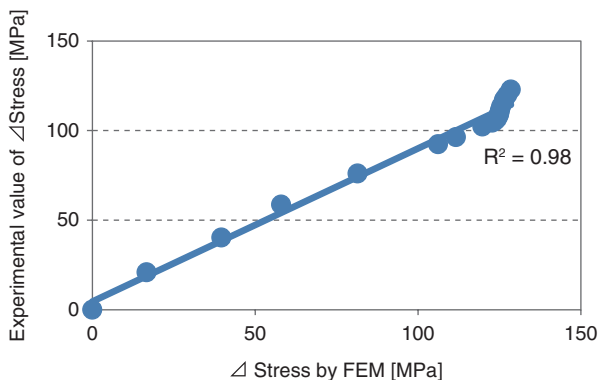


Fig. 16 Test results and correlation between FEM stress simulation and measurement results

- (6) Ashby, M. F. Jones, D. R. H. 堀内良: 8 章材料工学入門, 株式会社内田老鶴圃, p. 84-124, (2004)
- (7) Stören, S., Rice, J. R.: Localized necking in thin sheets, J. Mech. Phys. Solids, 23, p. 421-441, (1975)
- (8) JIS Z 2241:1998, 金属材料引張試験方法
- (9) 釜谷昌幸: 一様伸び限界以降を含む応力・ひずみ曲線の取得方法 (ステンレス鋼に対する実験方法 (IFD 法) と簡易推定法 (K-fit 法) の適用性), INSS JOURNAL Vol. 21, NT-11, p. 177, (2014)
- (10) JIS Z 2274:1978, 金属材料の回転曲げ疲れ試験方法

■ 著 者 ■



齋 木 克 里