

逐次成形を用いた燃料電池用金属セパレータの流路の成形に関する研究

神奈川工科大学 自動車システム開発工学科
教授 西口磯春
(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012019)

キーワード：逐次成形，金属セパレータ，燃料電池

1. 研究の目的と背景

燃料電池は地球環境に対して負荷が少なく、発電効率も高いため、これからのエネルギー源として期待されている。なかでも、固体高分子型燃料電池(PEFC)は、小型軽量化が可能のため、様々な分野での利用が期待されている。PEFCは現在実用化の過程にあるが、市場で普及するには課題が残されており、その一つがセパレータの製造コストである。セパレータは黒鉛の板を用いて切削加工で燃料が流れる流路の溝を成型するため、製造コストが高くなっている。そのため、ステンレスやチタンなどを用いた金属薄板製のセパレータの研究が行われている^{1,2)}。

これらの金属セパレータ製造の重要な要件の一つとして、黒鉛セパレータと同様に、表裏で方向の異なる溝を成型することが挙げられる。材料に金属を使用し、表裏で異なる方向の溝を成型する場合、ある程度の厚さの板に冷間鍛造を用いて溝形状を成型することが考えられるが、冷間鍛造には大きな加工力を必要とするため、設備が限られ、生産コストが上昇する。

このため、一度の加工に必要とされる加工力を低減させるため、金属セパレータの溝形状を一回ではなく、数回に分けて成形することにより要求される溝形状を成型する方法(以下、逐次成形と呼ぶ)が考えられる。本研究では、この逐次成形について検討を行った。

具体的には、複数の溝を表裏で交差させている形状を成型するための実験結果³⁾をもとに、有限変形理論に基づく有限要素法による数値シミュレーションの精度を検討した。

2. プレス加工実験

本研究の数値シミュレーションが対象とする、複数の溝を表裏で交差させている形状を成型するための実験³⁾について以下にまとめる。

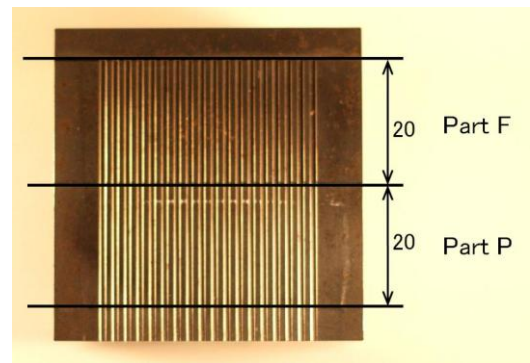
2.1 実験方法

実験に使用した金型を図1に示す。(a)は上面、(b)は下面用である。また、金型断面図を図2に示す。

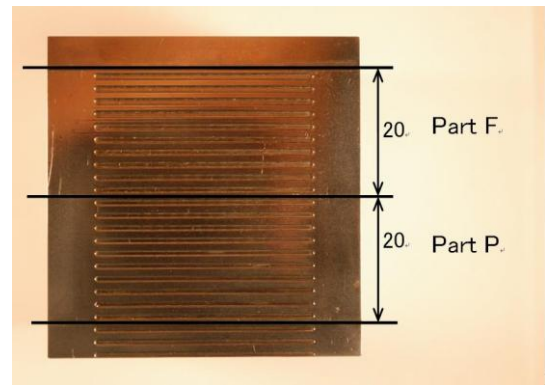
Part Fには最終製品形状の溝が設けてある。また、Part Pには逐次成形を行う際のガイドとなる溝を設けてある。溝ピッチは2.0mmで、溝の深さと溝幅は、それぞれPart Fが深さ0.5mm、幅1.0mm、Part Fが深さ0.375mm、幅0.9

mmとなっている。

試験体には、板厚2mmのアルミニウム合金の平板を使用した。材質はA1100-OとA1100-H14である。これらの材料特性を表1に示す。



(a) 上面用金型



(b) 下面用金型

図1 プレス加工実験用金型

実験で行った4つのパターンを表2に示す。

Pattern Aでは試験片を1回で40mm送るため、試験体は金型のPart PおよびPart Fで同時に成形される。

Pattern Bでは一回目の成形で20mm送るため、試験体の先端から20mmの部分がPart Pで成形される。二回目には更に20mm送るため、先端から20mmはPart Fにより、後の20mmについてはPart Pにより成形される。

Pattern Cでは、一回目に20mm送り、先端から20mm

が Part P により成形される。その後、10mm 送るため、先端から 10mm の部分が Part F により、成形され、残りの 20mm の部分は Part P により成形される。三回目は更に 10mm 送り、成形を終了する。

Pattern D では、一回目に 20mm 送り、先端から 20mm が Part P により成形される。その後、5mm ずつ送り、合計で 5 回の成形を行う。

以上のそれぞれの Pattern により、試験体の各部は Part P あるいは Part F により、成形される。試験体の先端から 20mm の部分について、各部の成形される Part の履歴を表 3 に示す。

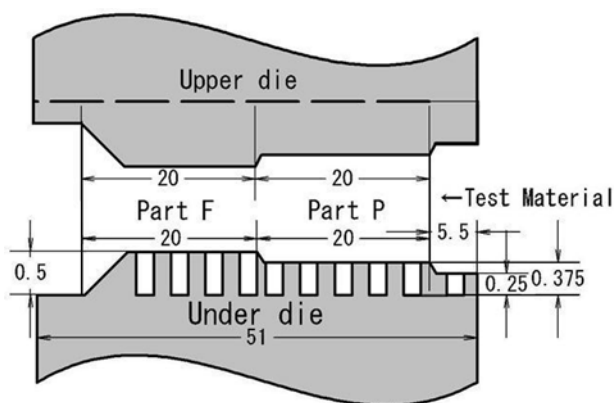


図 2 金型の断面模式図。(溝のサイズと数は実際とは異なる。)

表 1 試験体の材料定数

	Elastic coefficient (GPa)	Yield stress (N/mm ²)
A1100-O	70	25
A1100-H14		95

表 2 試験体の送り長さのパターン

Pattern	No. of feeding	Combination of feed lengths
A	1	40mm
B	2	20mm+20mm
C	3	20mm+10mm+10mm
D	5	20mm+5mm+5mm+5mm+5mm

表 3 試験体の先端から20mmの部分の受けるPartの履歴

Pattern	Distance from the head of the specimen			
	0cm-5cm	5cm-10cm	10cm-15cm	15-20cm
A	F	F	F	F
B	P-F	P-F	P-F	P-F
C	P-F-F	P-F-F	P-P-F	P-P-F
D	P-F-F-F-F	P-P-F-F-F	P-P-P-F-F	P-P-P-P-F

2.2 試験結果

成形後の試験体形状の一例を図 3 および図 4 に示す。図 3 は Pattern A の A1100-O 試験体の上面を示し、図 4 は下面を示している。また、レーザ変位計を用いて溝形状の計測を行い、計測結果から溝形状の評価を行った、計測箇所に関しては図 5 に示す。(a)は上面、(b)は下面の計測地点及び計測結果の一例を示している。上面は試験片上端部を基準とし、4 mm、10 mm、16 mm地点の計測を行い、下面は、試験片左端部を基準とし、6 mm、12 mm、18 mm、24 mm、30 mm地点の計測を行った。

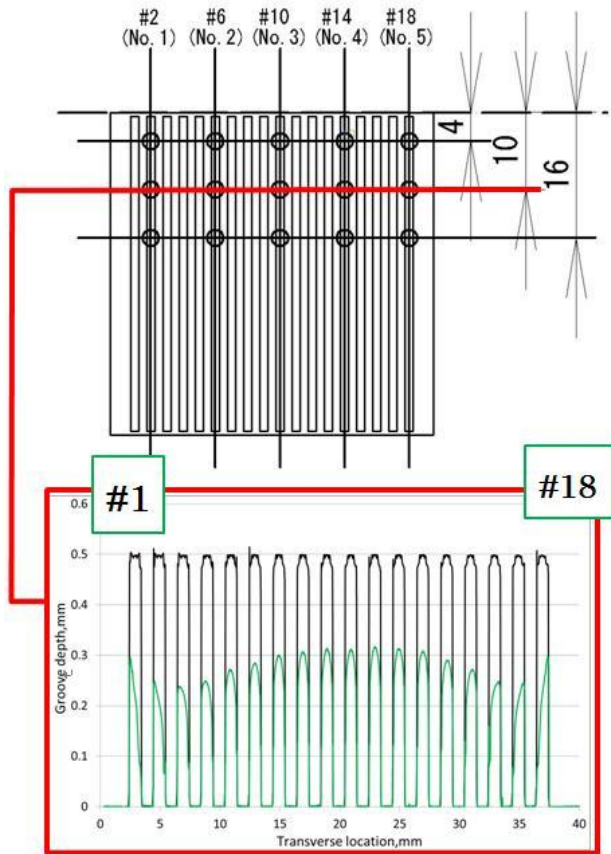
上面における Pattern A~D の溝深さグラフの比較によれば、Pattern A と比較し、Pattern B~D の溝がより深く成形されている結果が得られた。



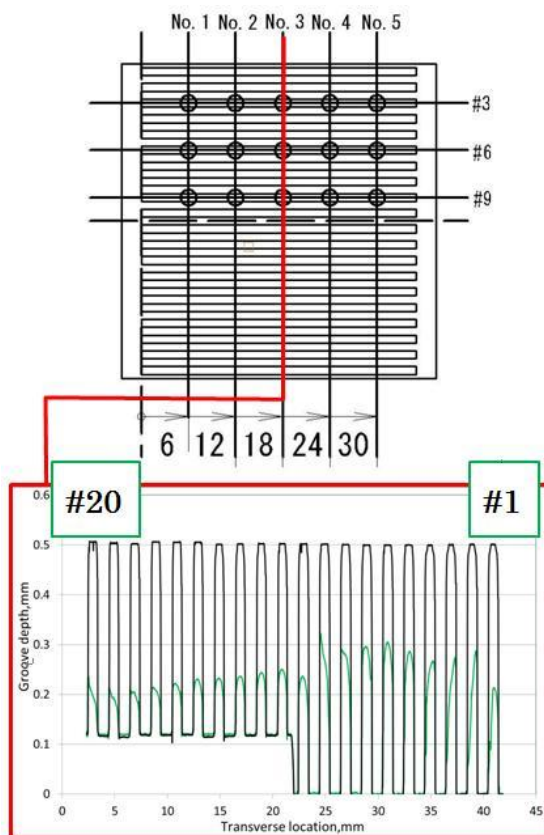
図 3 Pattern A 試験後上面



図 4 Pattern A 試験後下面



(a)上面



(b)下面

図5 試験体形状計測結果の例 (A1100-0, Pattern A)

3. 数値シミュレーション

1950から60年代に台頭した有限要素法は、構造および連続体力学分野の弾性問題の数値解析に大きな成功を収め、60年代の終わり頃から塑性を含む非線形問題に関心が寄せられるようになった⁴⁾。それ以降、塑性加工解析の数値シミュレーションの主流は有限要素法であり、その状況は現在でも変わっていない⁵⁾。本研究においても有限変形理論に基づく有限要素法を用いて、上述のプレス加工実験の数値シミュレーションを試みた。

3.1 有限要素モデル化

従来、塑性変形の有限要素法解析においては、節点と要素が材料の変形に従って移動する Lagrange 要素の使用が一般的であったが、塑性変形量が大きくなると、要素のゆがみ生じることにより、精度が低下したり、解が得られなくなる。このような場合に対応できる方法として、空間に固定された Euler 要素を用いる方法がある。変形体は Euler 要素で構成されたメッシュ内を移動することができ、変形体の表面は Euler 要素の境界に一致する必要はない。また、Euler 要素は Lagrange 要素と共存することが可能であり、Euler 要素で構成されたメッシュ内の変形体と Lagrange 要素で構成された変形体あるいは剛体との接触をモデル化することができる。これらの相互作用を含むシミュレーションは Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) 解析と呼ばれ、本研究の対象とする実験についても有効である。解析には汎用有限要素法コードである ABAQUS を用いた。

具体的には、上面および下面の金型を Lagrange 要素でモデル化し、試験体を含む空間を Euler 要素でモデル化した。金型および試験体を含む空間のモデルを図6および図7に示す。図6は金型であり、剛体を仮定した。図7においては、Lagrange 要素でモデル化した上下の金型の間に Euler 要素のメッシュを配置している。

試験体としては、A1100-O を仮定し、材料定数は表1の値を用いた。また、塑性ひずみ ϵ_p と応力 σ の関係式としては、

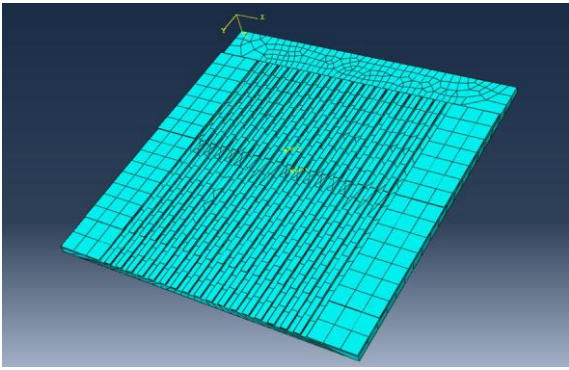
$$\sigma = \sigma_Y + F \epsilon_p^n$$

を用いた。ここで、 $F = 153 \text{MPa}$ 、 $n = 0.25$ とした。また、金型と試験体の摩擦係数は 0.1 とした。

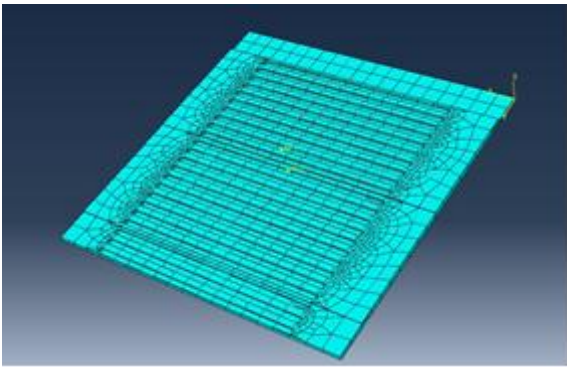
3.2 解析結果

Pattern A の場合の解析結果の一例を図8に示す。金型が押し込まれていくとともに材料が変形し、試験体に溝が成形されている。また、実験結果と同様、試験体の横幅が広がっていることが分かる。

FEM により得られた試験体上面の解析結果の例を図9に示す。溝深さは中央部が高く、両端部へ向かうにつれて徐々に低くなるが、両端部で再び高くなっており、図5の実験結果と同じ傾向が得られている。しかし、溝高さは FEM 解の方が大きくなっている。



(a) 上面用



(b) 下面用

図6 金型のFEMモデル

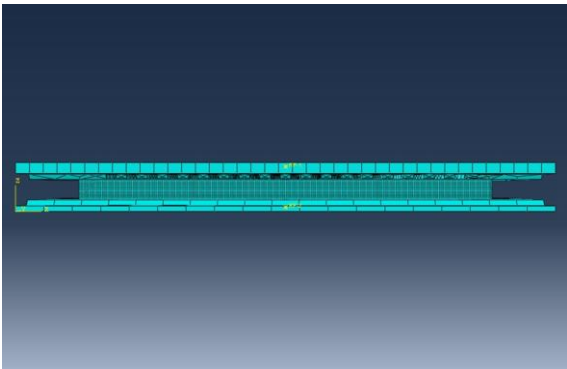
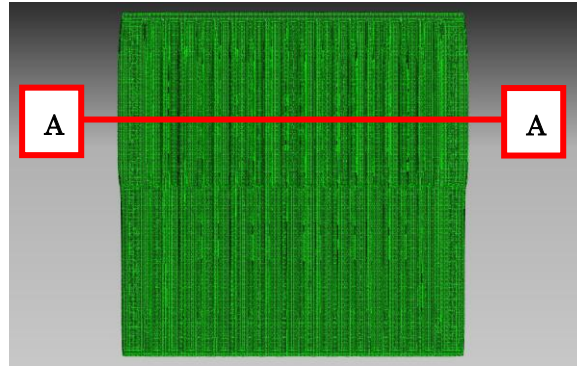
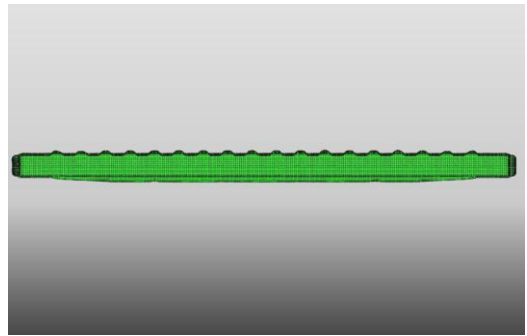


図7 金型および試験体のFEMモデル

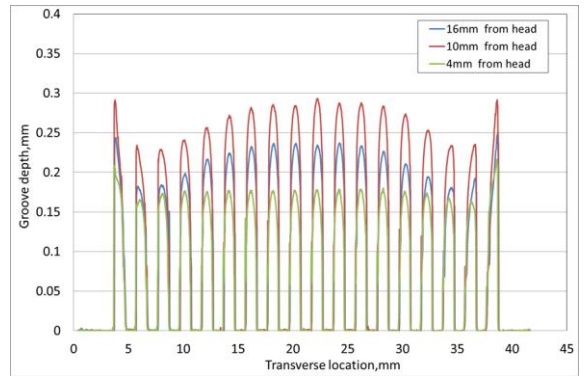


(a) 上面

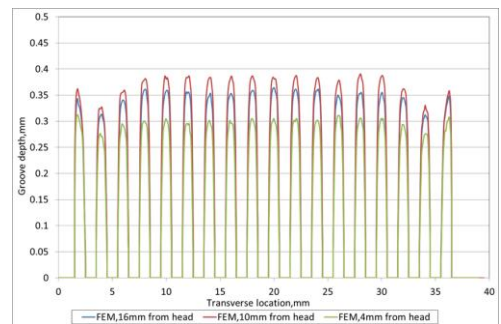


(b) A-A 断面

図8 FEM解析結果



(a) 実験



(b) FEM 解析

図9 溝形状の比較

3.3 解析パラメータの影響の検討

FEM 解析を行う際に用いたパラメータを変更することにより、解析結果にどのような影響を及ぼすか調べた。パラメータとしては材料の塑性特性、摩擦係数、オイラー要素のメッシュ分割を対象とした。その結果、実験と FEM 解析における溝深さの差異には、摩擦係数が影響を与えていることが分かった。しかしながら、試験体の位置による溝形状の定性的な分布については、一致をみたものの、特に下面も含めて溝深さの定量的な一致を得ることは困難であった。

4. おわりに

文献^{6,7)}によれば、逐次成形あるいはインクリメンタルフォーミングは 1990 年代に日本で提案された成形技術である。「現在の塑性加工よりも古い技術と言ってよい」⁸⁾とあるように、概念としては産業革命以前の鍛冶屋の手作業の時代にまでさかのぼることになるが、日本でインクリメンタルフォーミングという言葉が定着しはじめた 1990 年代においては、汎用金型を用いて、知能化した塑性加工を行うこと⁹⁾をさしており、低コストで多品種少量生産を行うことが主な目的であったと言えよう。

これを一般化し、材料に対する工具の作用を、材料の存在する空間内の位置と時間の関数として捉えれば、製品に特化した金型により一度で成形する従来の方法と比較して、遙かに大きな解空間のもとでの最適化が可能となるのは当然のことである。もちろん、どのような目的関数のもとで最適化するか、そのような加工が実際に実現できるのか、など現実問題としての課題は大きいですが、本研究で取り上げたような個別の課題への取り組みの一方で、一般論からのインクリメンタルフォーミングへのアプローチも興味あるところである。

参考文献

- 1) 日本セラミックス協会, “環境調和型新材料シリーズ 燃料電池材料”, 日刊工業出版プロダクション, (2007).
- 2) 日本金属プレス工業協会, 平成 19~21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「燃料電池用金属セパレータのプレス加工技術の開発」成果報告書, (2010).
- 3) J. Endo, I. Nishiguchi, Y. Ochiai, M. Sasaki, “A study on the shaping of the flow channels of the metallic separator for fuel cells by incremental forging,” Proceedings of the 4th international conference on Advanced Manufacturing, (2012).
- 4) 山田嘉昭, “非線形プログラム研究会の 35 年 回顧”, NAPRA 設立 35 年周年記念講演会要旨集, (2014), 1-4.
- 5) 吉田亨, “塑性加工解析に必要なソフトウェアスキル① FEM コード”, 塑性と加工, 56-649, (2015), 124-128.
- 6) 松原茂夫ら, “21 世紀のインクリメンタルフォーミング小特集”, 塑性と加工, 42-489 (2001), 983-1055.
- 7) 田中繁一, “インクリメンタルフォーミング — 金型レス・CNC フレキシブル塑性加工の新展開 —”, 日本機械学会誌, 110-1059, (2007), 142.
- 8) 遠藤順一, 北澤君義, “インクリメンタルフォーミングと知能化技術”, 塑性と加工, 42-489 (2001), 983-1055.
- 9) 遠藤順一, “塑性加工機の知能化とインクリメンタルフォーミングと知能化技術”, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1304-1310.