



インクリメンタル成形の研究動向と 高精度・高機能化への試み

田中 繁一*

S. Tanaka

1. はじめに

インクリメンタル・フォーミングは、塑性加工のダイレス化とインテリジェント化を目指した新しい成形技術である(図1)。その基本的なアイデアは国内外でかなり前から提案されていたが、現在の研究の潮流は 1990 年前後の日本の研究者らから始まったことに敬意を表したい。インクリメンタルフォーミングは、広義には空間逐次的に成形を行う塑性加工の総称であり、フレキシブルダイスのように形状を制御するものから、レーザ成形のように局所的なひずみ導入を繰り返して形状を得るものまで様々な原理が提案された。また、マイクロ部品から航空機の大型部品の加工に及ぶ広い分野で利用されている、あるいは利用される可能性を秘めている。インクリメンタルフォーミングに代表される優れた日本のフレキシブル塑性加工技術は海外からも注目されており、これらを紹介したレビューも海外誌に掲載された¹⁾。2000 年以降、海外を含めて様々な研究者がこの分野に参入して、その研究が活性化している。

本記事では、当技術の研究・開発の経緯と最近の研究動向の主要なものを紹介するとともに、助成研究を中心に著者の取組みを示す。

2. インクリメンタルフォーミングとは

2.1 歴史(インクリメンタル成形の胎動期)

現代の塑性加工は金型を使用した大量生産を支える最重要な生産技術として進歩し、高度化してきた。一方で、多品種少量生産やオーダーメイドの単品生産の要求も常に存在した。図 2の鍛金や鍛冶屋の職人技、車体板金技術がそれであり、これらを自動化する試みがなされてきた。1970 年頃には図 3, 図 4などの提案^{2),3)}もなされたが、この提案は、それを支えるコンピュータ、モーション制御技術および人工知能の進歩には現在のように恵まれず、その後の展開もなく実用化にも至らなかった。



図2 金属工芸に用いられる技法:鍛金²⁾

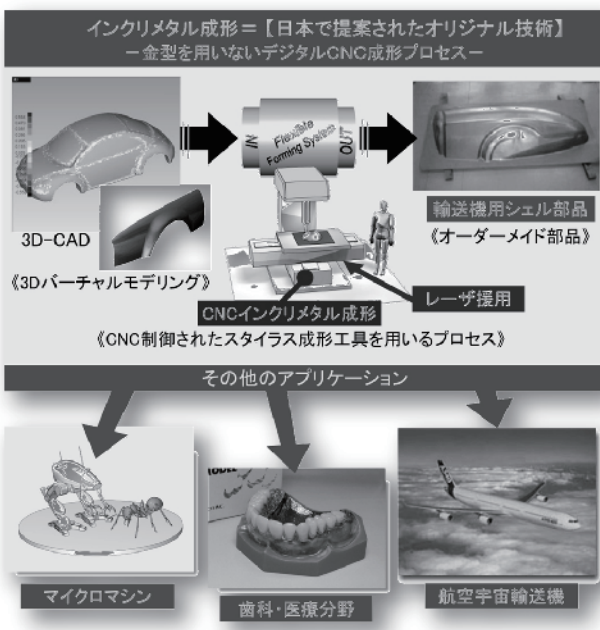


図1 CNCフレキシブル成形

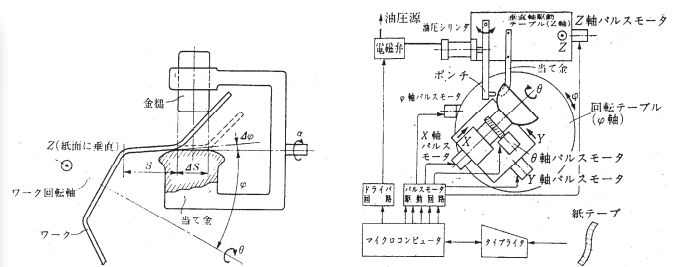


図3 鍛金加工の数値制御化 (1970)³⁾

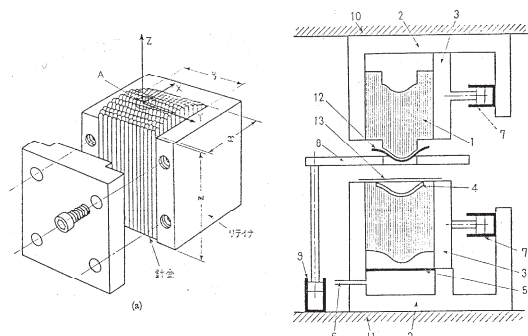


図4 針金束の金型 (1969)⁴⁾

* 静岡大学工学部 教授

インクリメンタルフォーミングは、広義には空間逐次的に成形を行う塑性加工の総称である。図 5 のようにフレキシブルダイスのように形状を制御変数とするものから、レーザ成形のように局所的なひずみ導入を繰り返して形状を得るものまで、現在までに様々な原理が提案されている。

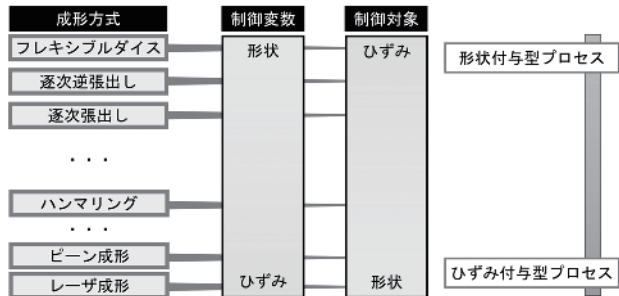


図5 フレキシブル成形加工

図 6 は、マトリクス配置したシリンダ群により形状を制御されるフレキシブルダイス方式であり⁴⁾、核融合容器壁の成形に使用された。対照的なのが図 8 のショットにより素材にひずみを逐次的に導入して形状を得るピーン成形で⁷⁾、航空機翼のキャンパー成形などへ応用され、図 7 のレーザフォーミングでは最初、スペースコロニー建築のためにコイル状に巻いて運んだ金属板をレーザフォーミングで展開する構想が紹介された⁶⁾。造船で用いられる撓鉄(ぎょうてつ)は同じ加工原理に基づくもので、熱源にトーチを用いる。

形状付与型に近い位置にあるのが、図 9 (a) と (b) の逐次張出し成形と逐次逆張出し成形である^{3), 4)}。これらのプロセスは 1990 年代に国内で数名の研究者らにより活発に研究された方式であり、今日の国内外のインクリメンタルフォーミング研究の源である。名称は各研究者により「棒状工具を用いた CNC 成形」、「ボールローラを用いた・・・」および「逆張出し逐次成形」などの名称で呼ばれた。現在、海外では (a) のタイプを Single Point incremental forming (SPIF)、(b) のタイプを Double Points incremental forming (DPIF) と呼ばれている。ちなみに、1967 年には、既に図 10 の「インクリメンタル・ダイレス・フォーミング」という名称の特許³⁾がとられており、これを本プロセスの起源として引用する研究者も多い。

	金型成形	多点成形
概略図	上型 成形品 下型	上ポンチ群 成形品 下ポンチ群
特徴	12種類の金型要	ポンチ群による型の代替
精度確保	型修正 (修正費大)	ポンチ高さ調整

図6 フレキシブル型(多点成形⁴⁾)

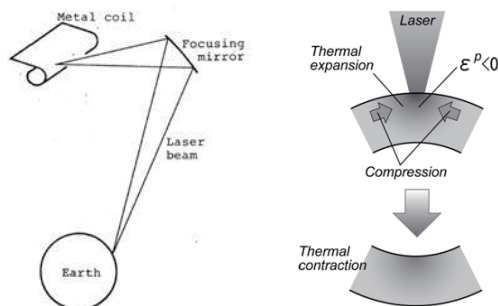


図7 レーザフォーミング⁶⁾

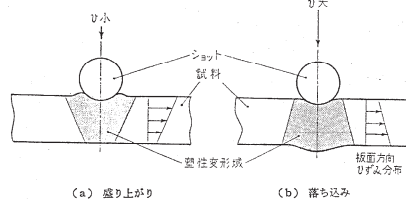
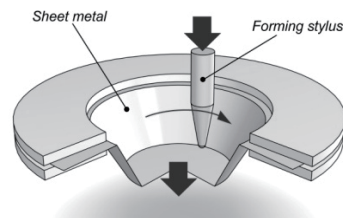
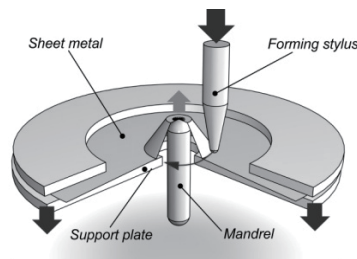


図8 ピーンフォーミング³⁾



(a) 逐次張出し成形 (SPIF: Single Point incremental forming)



(b) 逐次逆張出し成形 (DPIF: Double Points incremental forming)

図9 逐次張出し型インクリメンタルフォーミング

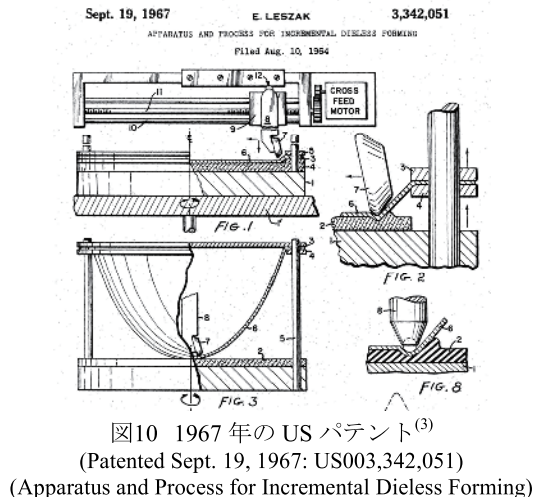


図10 1967年のUS特許³⁾
(Patented Sept. 19, 1967: US003,342,051)
(Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming)

図 11は、松原によって提案された「逐次逆張出し成形」の装置構造である。板材は上下にスライド可能な上プレートに固定され、さらに板の中央部は棒状の固定工具によって支えられている。成形工具を固定工具のまわりに周回させながら下降させる動作を繰り返すと、成形工具側に凸の形状が形成される。このプロセスにより、同図(b)のように急傾な壁面とシャープな稜線をもつ成形品形状が得られる。絞り加工も可能であり、多数回の工具経路を用いて背の高い垂直壁が得られている。さらに、同図(c)のような複雑な形状も、固定工具を製品形状をもつ総型に交換することにより成形可能である。後述のように、この方式は世界最初のインクリメンタル成形機に採用され、企業等へ導入されて活躍している⁸⁾。

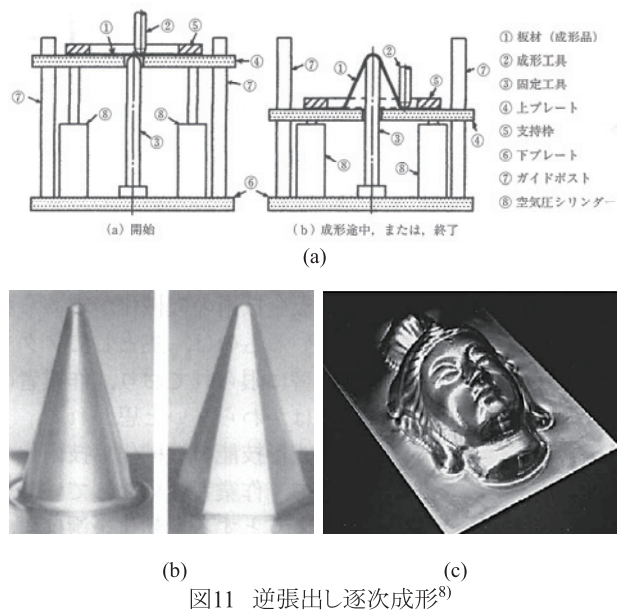


図11 逆張出し逐次成形⁸⁾

北澤は、図 12の棒状工具を用いた逐次張出し成形において、同図の多パス成形を用いて垂直壁を得ている。さらに、同方法により成形したオーバーハングした球形状の報告は衝撃的であった。また、そのメタルフローをひずみの適合条件によりその候補を絞り込み、ひずみ配分を議論した。当時、インクリメンタルフォーミングの異常に大きな成形限界は注目されたが、スローイングを用いたその試験法を提案して検討を進め、幾何学的のみならず材料的な観点から考察をしている^{9),10)}。

井関は、剛体工具を用いるプロセスから一歩先へ進めて、成形工具をウォータージェットに置き換えた図 13のプロセスを提案し、それによりフレキシブルな薄板シェルの成形が可能であることを示した。その成形品の多様性と変形特性および簡易な変形解析法を報告している¹²⁾。

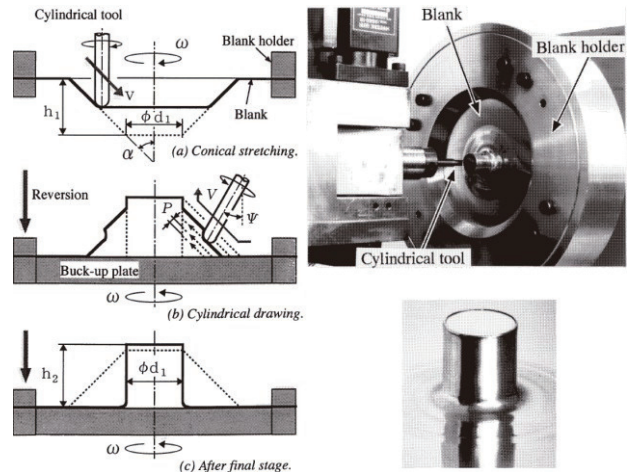


図12 棒状工具を用いた CNC インクリメンタルフォーミング¹⁰⁾

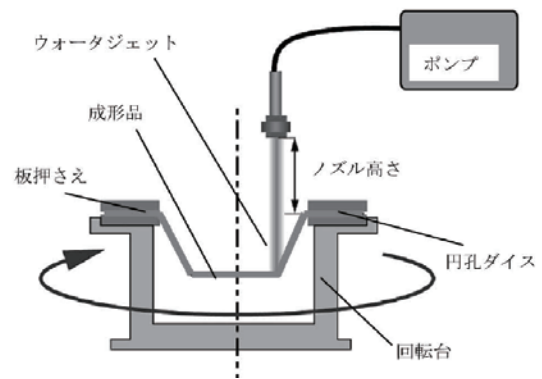


図13 ウォータージェットによる逐次張出し成形¹²⁾

2.2 方法と特徴

図 14は、逐次張出し型インクリメンタルフォーミングの基本的な成形プロセスである、工具パスは目的製品形状の等高線あるいはそれを補間したらせんパスであり、CNC制御された工具をそれに沿って動かす。工具は外周から中心に向かって周回移動し、周回ごとに工具パス内側が剛体的に徐々に下降し、最終的に工具の運動軌跡の包絡面が製品形状となる。

一方、図 9(b)の逐次逆張出し型インクリメンタルフォーミングでは、工具は中心から外周に周回移動して材料を工具押込み方向と逆の工具側に逐次的に張出す。

インクリメンタルフォーミングで得られる製品の板厚は、しごきスピニング成形の \sin 則¹⁶⁾に従うことが知られている。つまり、平坦素板を図 15のように半頂角 θ に成形した場合には、板厚は $t_0 \sin \theta$ となる。成形前の材料が平坦面であれば多パス・プロセスであっても、図 15のように \sin 則を用いて成形後の板厚およびひずみを算出することができる。

本プロセスの最大の特徴の一つは、従来法を凌駕する成形限界である。ひずみが図 16 のように数 100% を超えるひずみを導入することも可能である。ひずみが配分されるために、不安定現象を引き起こすような欠陥が製品上に発生しても成形が進行する。

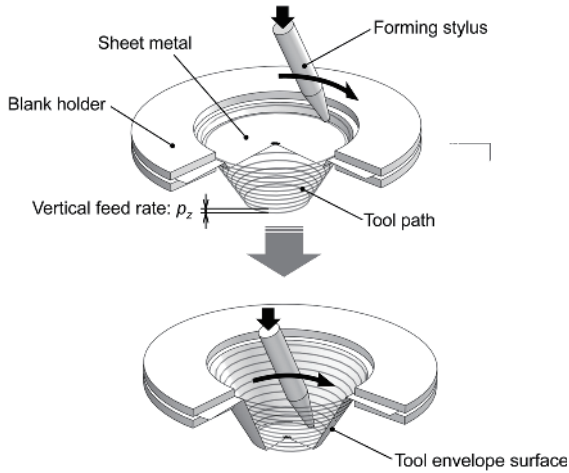


図14 インクリメンタルフォーミングによる曲面創成

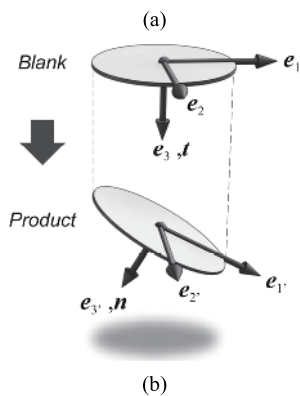
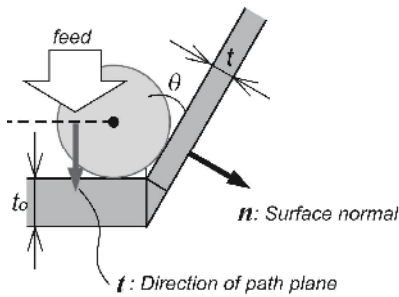


図15 板厚に関する sin 則

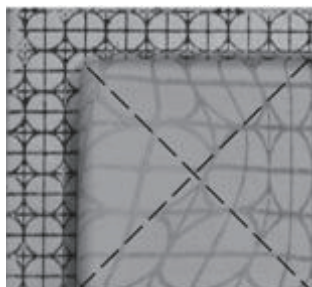


図16 インクリメンタルフォーミングにおける大ひずみ導入

2.3 応用事例

図 9 (b)の逐次逆張出し成形の原理を具体化した成形機は図 17 のように商品化されている^{18),19)}。この実機の導入の貢献は大きく、多くの応用事例が紹介されている。自動車車体パネルの試作や、金型が存在しない古い車種の補修部品の成形、限定車のロゴ成形などに応用されている。国内外の自動車メーカー等がこの技術に注目しており、公開されていない試行された例も含めれば既に多くの応用があるようである。

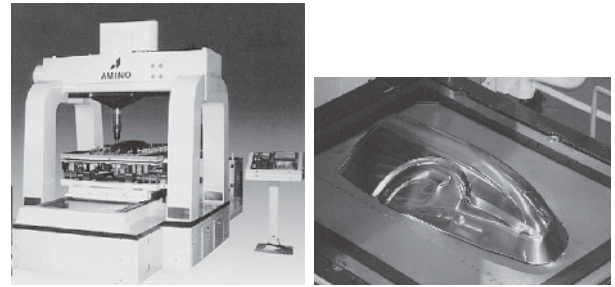
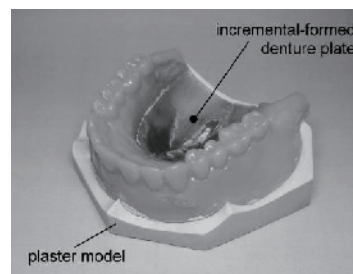
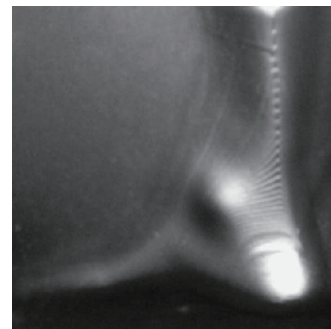


図17 ダイレクス NC フォーミング機^{18),19)}
(<http://www.amino.co.jp/>)

もう一つの重要な応用分野は、歯科や医療分野である。例えば、歯科分野においては、軽く生体親和性に優れたチタンが医療用素材として注目されている。その加工は主に精密鋳造により行われているが、高温活性に関わる問題を克服するのは容易でない。図 18(a)は、純チタン製の義歯床(総入れ歯の底部)の製作に本成形技術を用いた例である。同図(b)は足の医療ギブスをスキャンデータをもとに作成した例である²²⁾。



(a) 純チタン製義歯床



(b) 医療ギブス²²⁾

図18 医療応用の例

3. 最近の研究動向など

世界初のインクリメンタル成形機¹⁸⁾が海外へ紹介されて、一気に国内外の研究が活性化した。ここでは、前述のインクリメンタルフォーミング胎動期を経て、21世紀に入ってから国内外での、成形メカニズム、FEM解析、新しいプロセス、製品の評価などの研究動向について紹介する。

3.1 メカニズム

板厚に関する \sin 則の精度²³⁾、板厚ひずみ予測のための幾何学モデルの提案²³⁾、DICによるひずみ計測²⁵⁾、に関する報告がある。また、前述のように従来のプロセスと比較して非常に大きい本プロセスの成形限界は最大の関心事であり、実験的、理論的な検討が多くされている^{28),29),30)}。形状精度改善のための工具パスの補償³²⁾、マルチステップ・工具パス³⁴⁾に関する検討がされている。成形品の機械的特性の評価はまだ少ないが、疲労強度などが調べられている²⁷⁾

3.2 難加工材の成形

基礎研究では、成形が容易な純アルミニウム、アルミニウム合金あるいは軟鋼板が用いられることが多いが、難加工材への取組みも報告されている。図19は、航空機用チタン合金の局所加熱インクリメンタルフォーミングへである²³⁾。高周波誘導加熱で素材を加熱しながら成形している。

マグネシウム合金は、室温では延性に乏しいために温感間でのインクリメンタルフォーミングの報告がある³⁶⁾。加熱工具やレーザを用いた局所加熱プロセスも提案されている^{36),37)}。また、図20は、摩擦攪拌による熱源を用いて室温では延性に乏しいマグネシウム合金(AZ31)の成形を試みている³⁸⁾。棒状工具を数1000rpmで回転させて半頂角25°の成形に成功しており、動的再結晶とそれによる結晶粒微細化やひずみ開放の効果も報告されている。

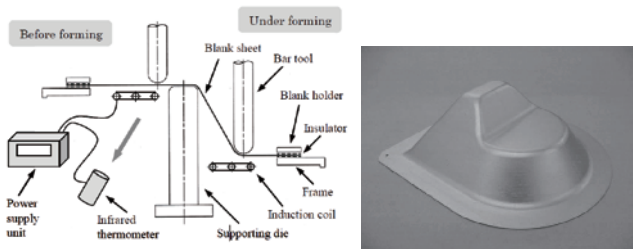


図19 チタン合金の局所加熱インクリメンタルフォーミング³⁵⁾

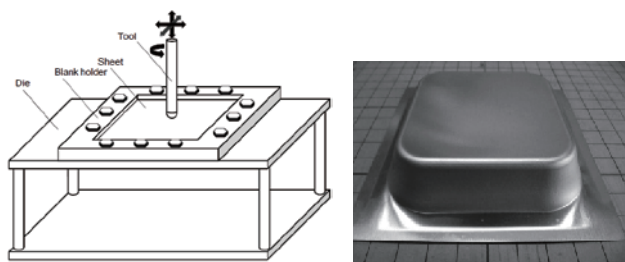


図20 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング³⁸⁾

3.3 数値シミュレーション

有限要素解析は、インクリメンタルフォーミングにおいても重要な道具である。しかし、素材の大きさに対して工具および変形域は非常に小さい。さらに、その領域は素材全体を刻々と移動し、それを繰り返す。したがって、計算コストは他の成形プロセスと比較して過大である。

図21のような全体モデルを用いた解析^{40),41)}の他に、計算コストを下げる工夫や⁴²⁾、図22のような部分モデルを用いた解析⁴³⁾や、弾性体の一部に弾塑性モデルを組み込んだ特殊な解析法⁴⁴⁾が提案されている。一例として、成形中に示すような工具直下の曲げ・曲げ戻しに起因する特徴的な履歴をたどることが示されている⁴⁵⁾。

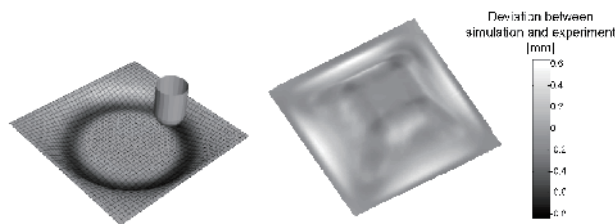


図21 全体モデルを用いるシミュレーション⁴⁰⁾

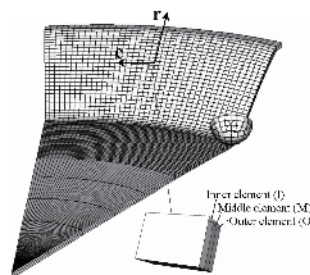


図22 部分モデルを用いるシミュレーション⁴³⁾

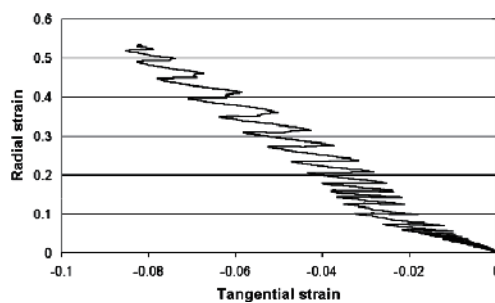


図23 成形中の塑性ひずみモード⁴⁵⁾

3.4 新プロセス

新プロセスへの取組みについては、前述の加熱を併用するプロセスに関するものが多い。図24は、レーザによる局所加熱で援用されるインクリメンタル成形である⁴⁶⁾。成形は多関節ロボット先端に付けた棒状工具により行われ、裏面はレーザにより局所加熱される。大量の熱が材料に導入

されるために局所加熱とするために大量のクーラントにより冷却が必要である。成形荷重の低減や形状精度の向上について報告されている。さらに、このプロセスを残留応力の低減熱処理に使用する試みがされている⁴⁸⁾。また、逐次張出し型プロセス(SPIF)を用いたマイクロ部品の成形の試みも報告されている^{53),54)}。

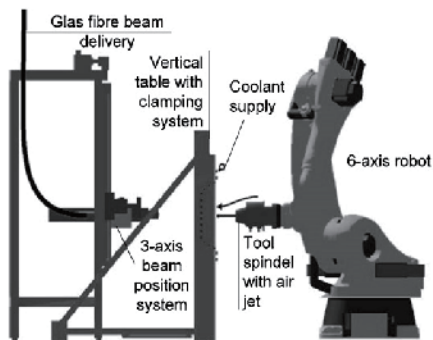


図24 レーザ局所加熱を併用するインクリメンタル成形⁴⁵⁾

図25は、対向する2つの工具を用いるインクリメンタルフォーミングで(DSIF)。凹凸形状や浮島形状の成形例が報告されている^{49),50)}。図26も、対向複工具方式のインクリメンタルフォーミングで⁵¹⁾、電流塑性効果⁵²⁾を狙って加工中に工具間に120A、20ms程度のパルス通電を行っている。その効果の信憑性には若干欠けるが、チタン合金等の難加工材の加工力低減や製品のゆがみ抑制に対する効果があり、航空機部品への応用も視野に入れている。

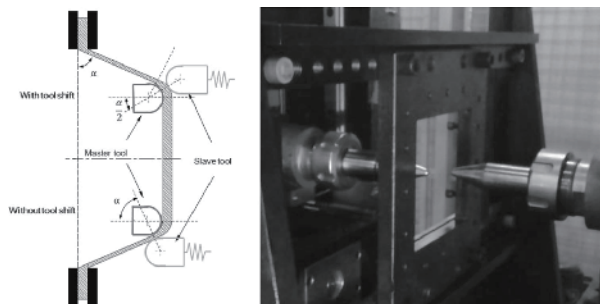


図25 対向工具を用いるインクリメンタル成形⁴⁹⁾

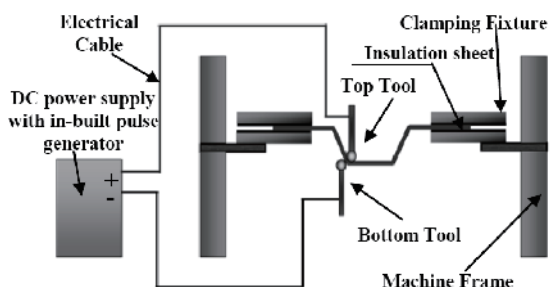


図26 パルス通電を併用するインクリメンタル成形⁵¹⁾

3.5 成形機

前述の世界最初の実用機¹⁸⁾に続き、実生産を睨んだ本格的な成形機が試作されている。図27では、下型に張り付けるように引張られた素板を棒状工具で成形している。また、図28は自動車部品の成形用に提案されているシステムで、成形工具を取り付けた6軸パラレルリンク型アクチュエータを素板の上下に配置した対向工具システムである。

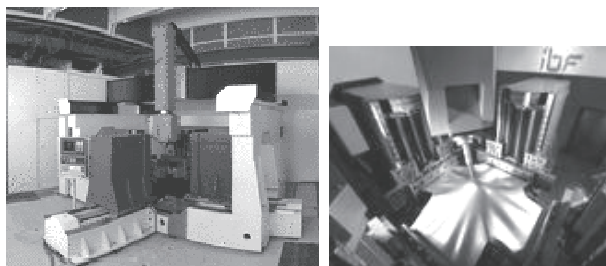


図27 アーヘン工科大のインクリメンタル成形機⁵⁵⁾
(<http://www.ibf.rwth-aachen.de/en/research-development/sheet-metal-forming/incremental-sheet-forming/>)

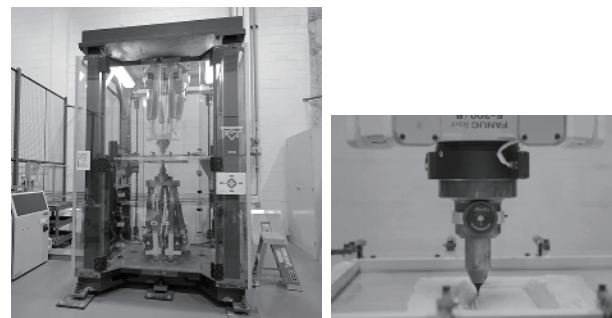


図28 輸送機用板成形への応用⁵⁶⁾
(<http://www.core77.com/posts/25163/fords-new-freeform-fabrication-technology-produces-metal-stamped-parts-without-any-stamping-or-dies-25163>)

4. 解決すべき課題について — 実用化へ向けて —

現代のインクリメンタルフォーミングに関する研究が本格的になり20年以上が経過して、基礎研究とともに徐々に具体的な応用へ向けた取組みが始まっている。しかし、具体的な製品形状や材料に対する要求に直面して、様々な課題が明らかになりつつある。

まず、sin 則が適用できる特別なケースを除き、多パス・プロセスでの板厚分布を予測する簡便な手段がない。FEM を用いた解析例も多く報告されているが、成形条件探索には計算コストが大きすぎ、部分モデルを用いる特殊な解析法も提案されているが、それらを用いた板厚制御にはまだ時間を要する。

第2に、標準的なインクリメンタル成形により得られた製品内には過大な残留応力が存在し、クランプ解放後やトリミング後に図29のように大きなゆがみが発生する。逆張出

し成形では図 30のように成形部に圧縮力を付与する対策がとられている。また、局所加熱を併用する方法が試みられ⁵⁸⁾、摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにはスプリングバック減少効果もあるようで、そのメカニズムの解明とともに実用化が期待される。

第 3 に、インクリメンタル成形により材料には大きな塑性ひずみが導入されるが、その成形品の機械的特性、疲労特性および微細組織の特性は明らかにされておらず、安全性が重要な輸送機械等の分野への応用にはその検討は不可欠である。

第 4 に、一部を除きほとんどのインクリメンタル成形は張出し型のプロセスであり、増肉変形を組み入れるのは容易でない。とくに、加工硬化性の強い材料では面内で一方向のひずみを圧縮とするのも困難である。

その他、自由端をもつ素材/製品形状の成形、プロセスの高速化、バックプレートや対向工具を用いるプロセスのメカニズムの解明、浮島や凹凸形状を含む製品のプロセス、および実用材料への適用など多くのテーマが残されている。

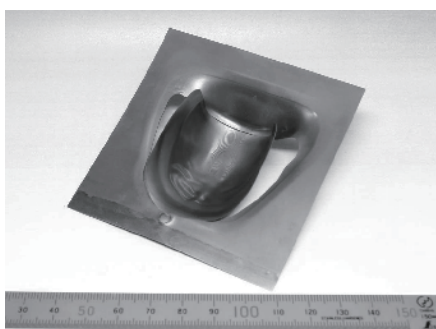


図29 逐次張出し方式インクリメンタル成形品のゆがみ⁵⁹⁾

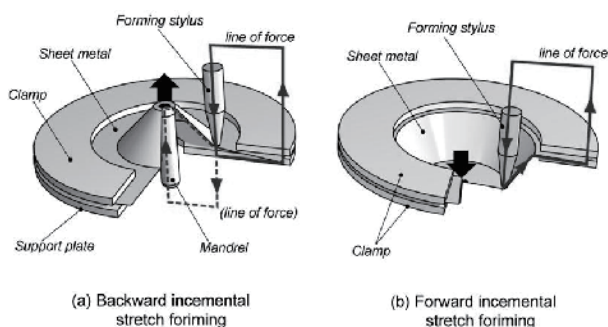


図30 インクリメンタル成形時の力線

5. 高精度・高機能化への取り組み — 助成研究課題を中心に —

5.1 成形品の残留応力と対向工具によるその抑制

一方で、歯科医療におけるチタン製の補綴物などはインクリメンタル成形の有望な応用分野である。とくに、チタン製の補綴物の製作においては、その高温活性に起因する鑄造の難しさや装置の高コスト化を克服する有望な技術である⁵⁾。図 29はこの成形技術を総義歯用チタン床の製作に応用した例である。単一工具前方張出し方式のインクリメンタル成形により純チタン薄板を上顎形状に成形するもので、従来のロストワックスプロセスの置き換えを目的としている。しかし、不要な外周部位を成形後に切断すると同図(c)のように、スプリングゴ一的な大きなゆがみが発生する。不均一に分布する残留応力によるゆがみや低剛性形状部位のだけ変形等に起因する形状精度の不足は実用に際して重大な問題となる。

本研究では、前方張出し方式のインクリメンタル成形により製作された部品の一部を短冊状に切断して、その反りから工具形状や工具送りなどが残留モーメントに及ぼす影響を考察するとともに、残留応力の生成メカニズムを弾塑性有限要素シミュレーションにより検討した。さらに、対向する二工具による曲げ・曲げ戻しおよび逐次ハンマリングを伴うプロセスの残留応力低減効果についても弾塑性有限要素解析を用いて検討した。

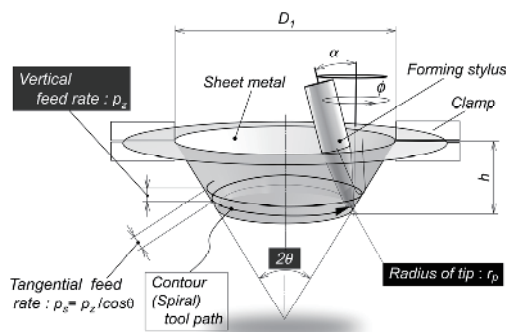


図31 加工変数

5.1.1 インクリメンタル成形品のトリム後のゆがみ

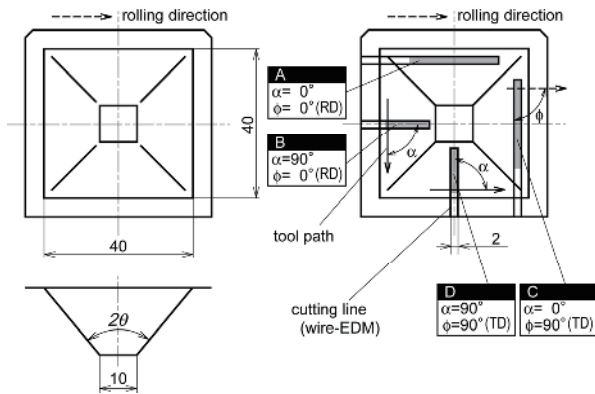
(1) 実験方法

本研究では、製品の一部を短冊に切断してその曲率によりスプリングゴ一現象を考察した。純チタン薄板を図 32のように四角錐台形状に成形した後、ワイヤ放電加工によりA-Dの4種類の短冊片を切り出して曲率を測定した。実験には市販の純チタン薄板(JIS#1)を用い、工具によるかじりを防ぐために試験片はりん酸溶液を用いた陽極酸化皮膜処理を施し植物油により潤滑した。実験条件を表1に示す。成形変数は工具送り p_z 、工具先端半径 r_p 、製品半頂角 θ

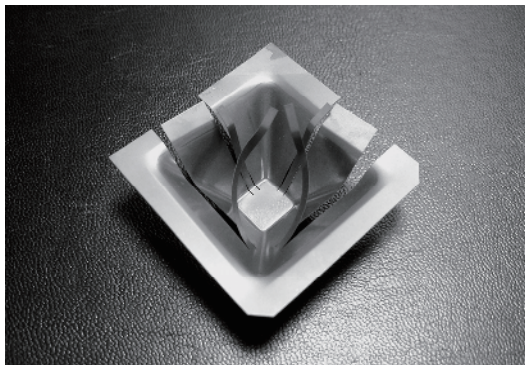
および圧延方向 α である。成形実験には図 31の傾斜工具方式の4軸インクリメンタル成形機を用いた。

表 1 実験条件

Blank	Commercial pure titanium (JIS#1)
Thickness: t_0	0.2 mm
Tip radius: r_p	0.5, 1.0, 2.0 mm
Tool feed rate: p_z	0.05 - 0.20 mm/rev.
Lubrication:	Vegetable oil with anodic oxidation (phosphoric acid)



(a) 試験片形状と短冊片の配置



(b) インクリメンタル成形四角錐台から切り出された短冊片の反り ($t_0 = 0.2$ mm, $r_p = 1.0$ mm, $\theta = 45^\circ$)

図32 試験片

(2) 実験結果

図 33～図 35は、インクリメンタル成形された四角錐台から切り取られた短冊片の曲率を示している。ここで、曲率の正值は図 32(b)のように凹形に反るスプリングオー変形を意味する。図 5.3 から明らかなように、圧延方向は曲率にほとんど影響を及ぼさない。工具送り p_z が減少すると工具パスに垂直な短冊片($\alpha=90^\circ$)の曲率は増加するが、工具パスに沿う短冊片($\alpha=0^\circ$)では p_z の減少により曲率は減少あるいは $p_z=0.1$ 近傍でピーク値をもつ。図 34は工具先端半径を変更した場合の結果であるが、工具先端半径が大きくなると、短冊片 B と D($\alpha=90^\circ$)の曲率は減少する。一方、短冊片 A と C($\alpha=0^\circ$)においては工具先端半径の増加は曲率の増加をもたらす。図 35は半頂角 θ を変更した場合の結果である。接線方向の工具送り p_s は $p_s = p_z / \cos\theta$ により得られるので、

半頂点角度 θ が増加すると接線工具送り p_s が増加し、 θ の増加は工具経路($\alpha=90^\circ$)に垂直な短冊片の曲率を増加させる。一方、 θ の増加に従って、短冊片($\alpha=0^\circ$)の曲率は減少する。

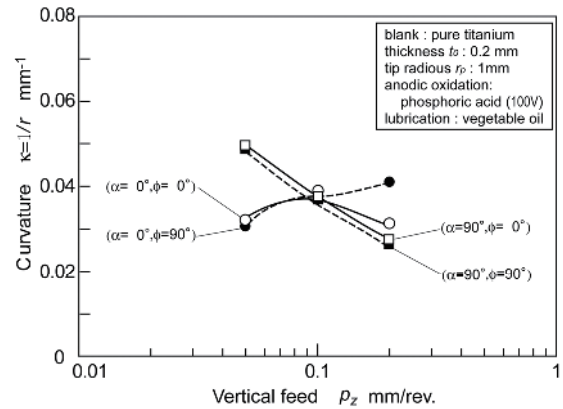


図33 切出し短冊片の曲率 (圧延方向: $\phi = 0, 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$)

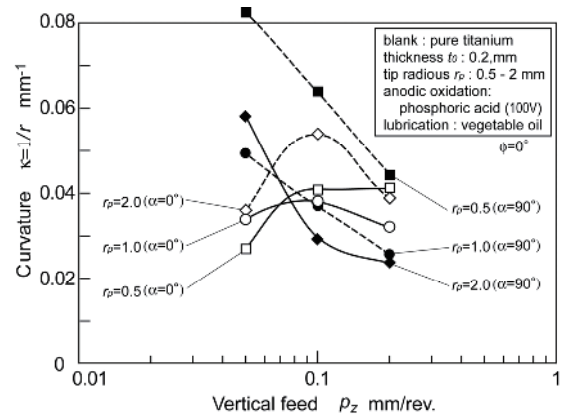


図34 切出し短冊片の曲率 (工具先端半径: $r_p = 0.5 - 2.0$ mm, $\theta = 45^\circ$)

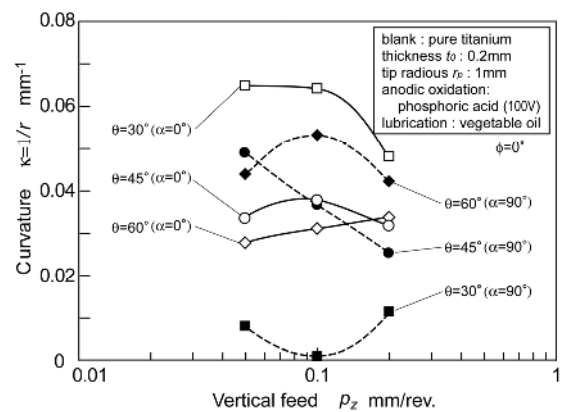


図35 切出し短冊片の曲率 (四角錐台の半頂角: $\theta = 30 - 60^\circ$)

5.1.2 FEM 解析

(1) 計算モデル①

FEM 解析には、商用ソフトウェア MARC2005R3 を用いた。図 5 は単一工具プロセスの計算に用いたメッ

シュモデルである。工具先端寸法が素材の板厚に近いために、素板は厚さ方向に 8 層にソリッド要素を配置してモデル化した。しかし、計算コストの問題から工具下の部分領域のみをモデル化した。部分モデルにはモデル化されない周囲材料の剛性を補償する適切な境界条件が必要であるが⁶⁰⁾、ここでは図 36 の単純な境界条件を部分モデルに適用した。材料のヤング弾性率は $E=110.7\text{GPa}$ で、ポアソン比は $\nu=0.338$ である。降伏応力は $\sigma = 467(\epsilon+0.002)^{0.143}\text{MPa}$ とし、平均 r 値を $r=5.25$ として Hill の二次の降伏関数を用いた。

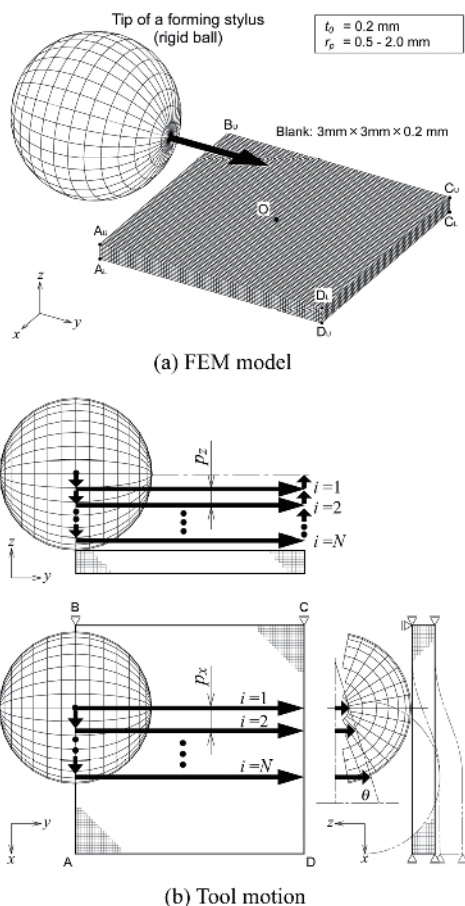
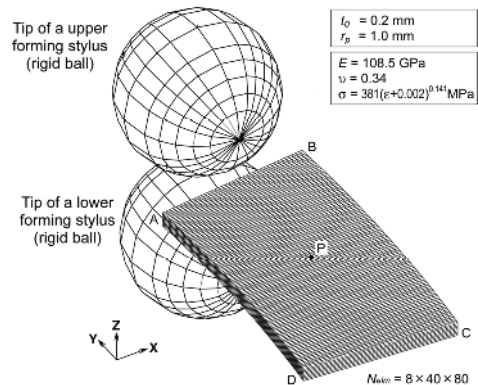


図36 計算モデル① (単一工具プロセス)

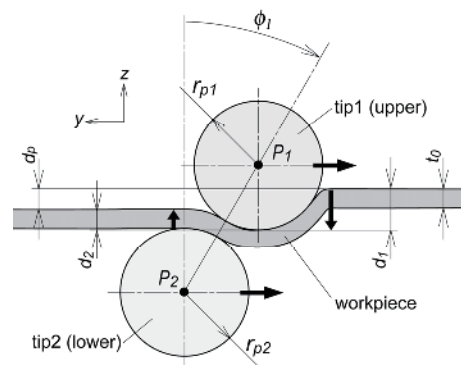
(2) 計算モデル②

クランプ除去あるいはトリム後の製品のゆがみに対して、逐次逆張り出し成形では工具・支持板間の圧縮力によるスプリングバック状の形状不良の低減が試みられている。しかし、この方式は、多パスプロセスに対応できない点や複雑形状の成形においては総型などで素板を支持しなければならない。本研究では、図 37 (a) のように裏面に対向する 2 つめの工具を配置してその動作を同図(b)および(c)のように制御した場合の残留モーメント低減効果を検討した。同図(b)では、下工具により曲げ戻しを行い、(c)では振幅 a と波長 λ の正弦波

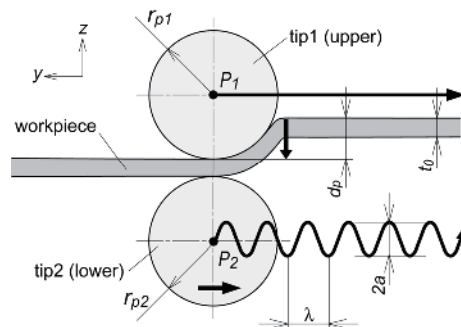
パスに沿って移動する下工具により周期的に素板を裏面から圧縮する。



(a) FEM model



(b) Re-bending mode



(c) Hammering mode

図37 計算モデル②(対向二工具プロセス)

(3) 計算結果①

図 38は、工具が素材中央を通過するときの工具進行方向の垂直応力と塑性ひずみの分布を示している。ここで、三角形は工具位置を表している。工具通過後の帯状領域の上層と下層にはそれぞれ引張応力および圧縮応力が残留しており、これは必然的に経路に沿って素材を切り出した場合にそれに上向きの反りを引き起こす。また、素材は工具先端前方で y 方向に圧縮され

て塑性圧縮ひずみが生じ、素材が工具直下を過ぎた後の平坦化においても完全には 0 にはならず引張り残留応力を生成している。

図 39 - 図 41は素材中央 O 点に位置する板厚方向の 8 要素の応力 σ_y を示している。図 39は、その応力分布の遷移を示しているが、その分布は工具の通過に伴い 2 回反転している。素材は、曲げ、逆曲げおよび再曲げ(平坦化)をうけている。図 40は、工具先端半径を変更した場合の結果であるが、素材中央 O 点の応力のみに着目した場合には大きな差異はない。図 41は、工具の送り量を変更した場合の結果で、工具の送りを小さくすると応力の板厚方向の勾配は減少し、 $p_z = 0.05\text{mm}$ では上面の残留応力は負となる。

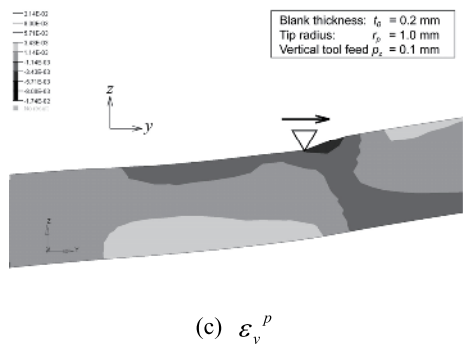
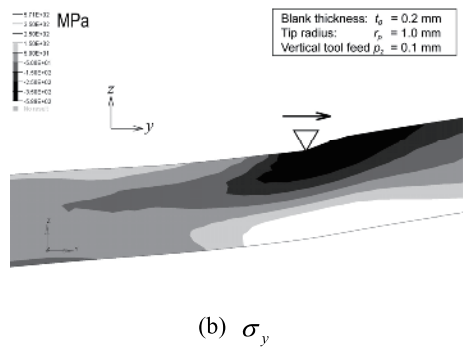
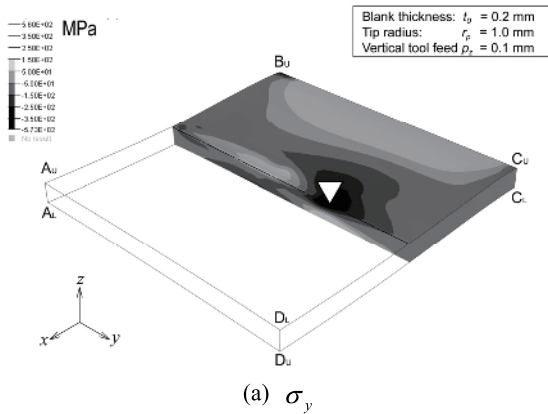


図38 成形工具直下の応力および塑性ひずみ分布 ($t_0=0.2\text{mm}, r_p=1.0\text{mm}, p_z=0.10\text{mm}, N=1$) (displacement: $\times 5$)

(4) 計算結果②

図 42は、下工具を用いて曲げ・曲げ戻しを行った場合の結果であり、下工具による最初の曲げ量を大きくすれば分布を反転させることはできるが、残留曲げモーメントが 0 になる条件域は狭く両工具の押し込み量をそのように制御するのは容易でない。

図 43, 図 44は対向する下工具による裏面からのハンマリングを併用した場合の結果である。図 43は応力 σ_θ の分布を示しているが、板厚方向の圧力勾配は、下工具によるハンマリングにより減少している。また、図 44は素材中央 O 点での板厚方向の残留応力分布を示している。単一工具の場合に比べて明らかに残留曲げモーメントは減少している。とくに、振幅が $a/t_0 = 0.1$ の場合には曲げモーメントは非常に小さい。

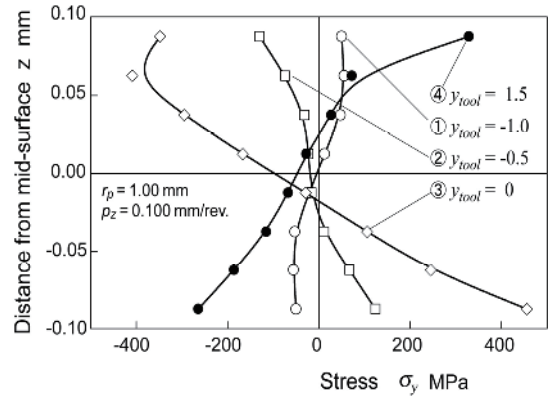


図39 板厚方向の応力分布 ($t_0 = 0.2\text{mm}, r_p = 1.0\text{mm}, p_z = 0.1\text{mm}, N = 1$)

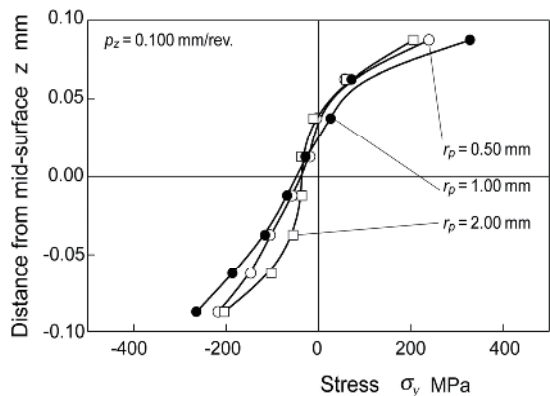


図40 板厚方向の応力分布 ($t_0 = 0.2\text{mm}, r_p = 0.5 - 2.0\text{mm}, p_z = 0.1\text{mm}, N = 1$)

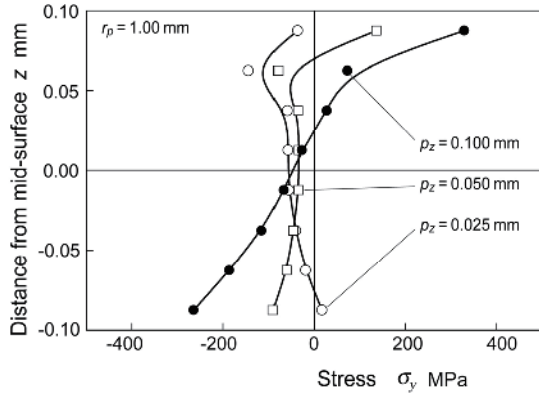


図41 板厚方向の応力分布
($t_0 = 0.2\text{mm}, r_p = 1.0\text{mm}, \rho_z = 0.025 - 0.100\text{mm}, N = 1$)

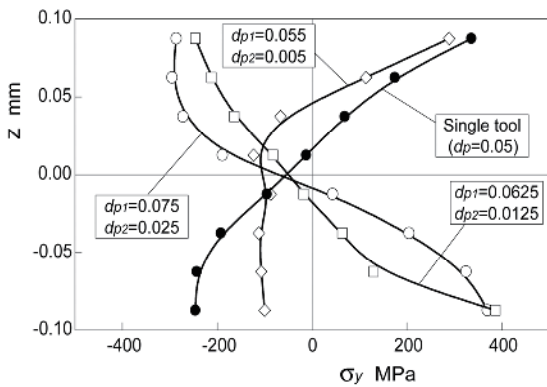


図42 板厚方向の応力分布(曲げ・曲げ戻し方式)

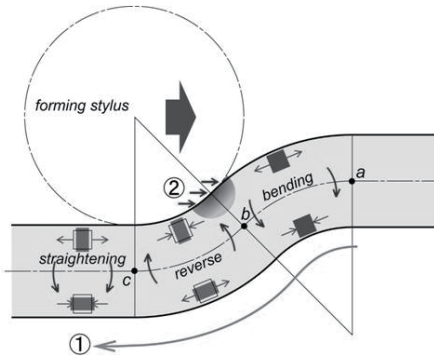


図43 工具直下の応力(曲げ・曲げ戻し)の概要

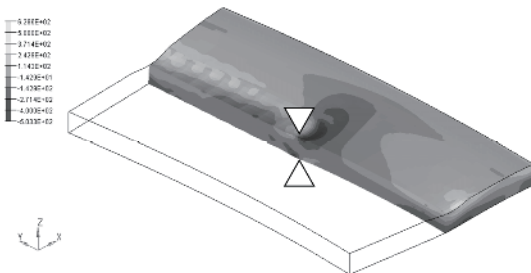
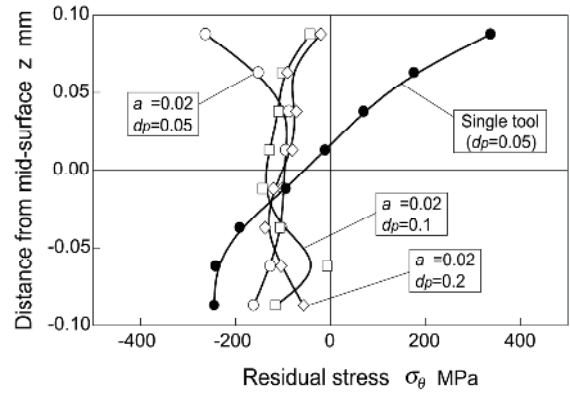
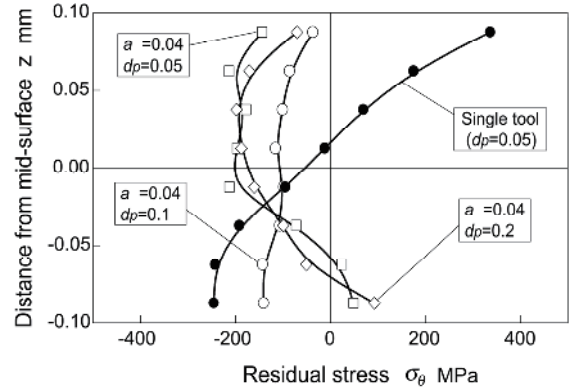


図44 応力分布(ハンマリング方式)
($t_0 = 0.2\text{mm}, r_p = 1.0\text{mm}, \rho_z = 0.1\text{mm}, a = 0.02\text{mm}, \lambda = 0.2\text{mm}$)



(a) $a/t_0 = 0.1$



(b) $a/t_0 = 0.2$

図45 板厚方向の応力分布 (ハンマリング方式)
($t_0 = 0.2\text{mm}, r_p = 1.0\text{mm}, \rho_z = 0.05-0.2\text{mm}$)

5.2 多パス成形

前述の sin 則に従えば、急傾壁や垂直壁をもつ製品は単一パス(ステップ)では成形が困難か不可能である。これに対する有効な解決策はマルチパス成形であり、既に1990年代に北澤はこれを用いて垂直壁のみならずオーバーハング壁の成形ができることを示している。形状面の問題があるとすると、成形中にその天井が伸び上がる現象である。

図46は、角筒容器のマルチパス・プロセスである。近年のモーション制御技術を用いれば容易に工具パス面を三次元的に任意方向に向けることが可能であり、このプロセスでは各パス面は各成形ブロック底面に並行である。また、各パスでスタート形状は平板であるので sin 則を適用でき、その板厚を正確に予測することができる。さらに、図47のように天井の伸び上がりは発生しない。

図49は、図48に示す各区画のひずみ履歴を表しているが、ひずみの差は大きく極薄が局所的に起こっている。このプロセスは最小パス数で構成されているために、板厚を制御する余裕がなく、成形ブロックと成形パスを増やす必要がある。

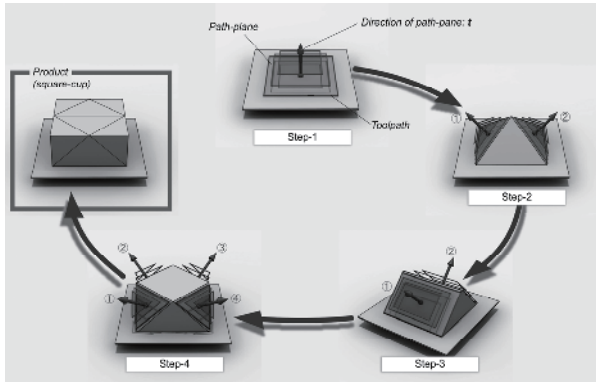


図46 角筒容器のマルチ・パスプロセス

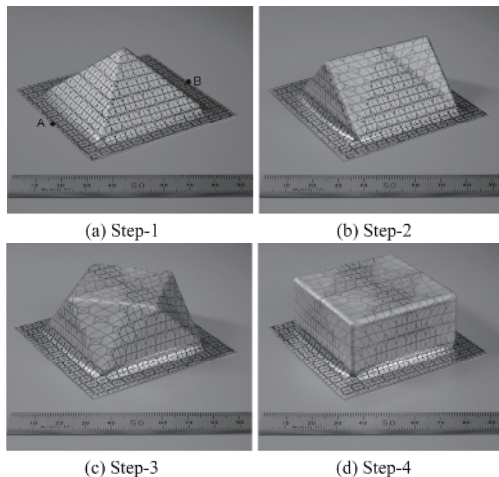


図47 マルチ・パスプロセスによる成形結果

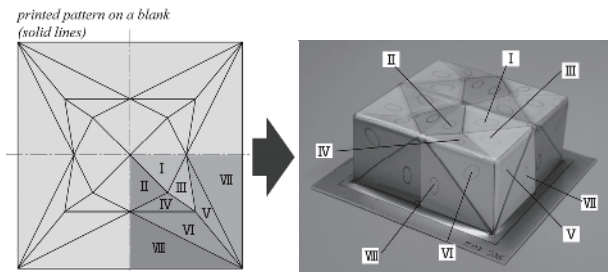


図48 マルチ・パスプロセス成形区域

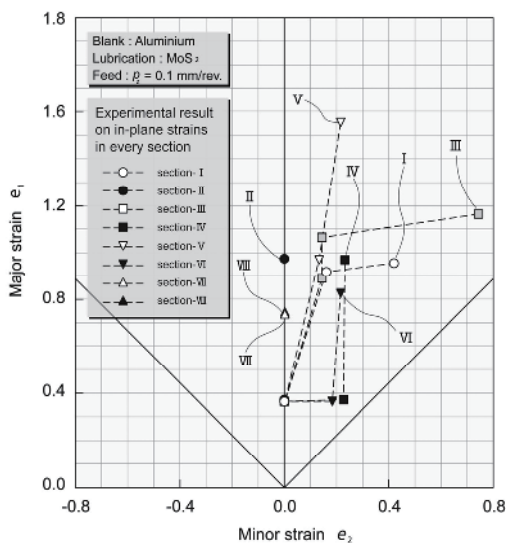
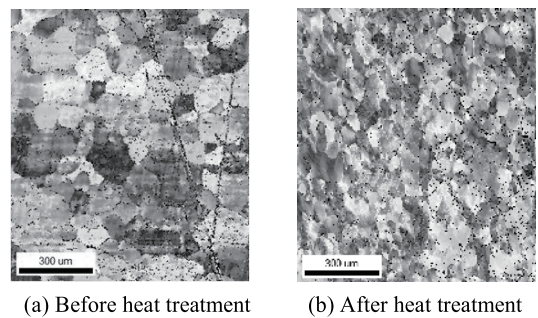


図49 各成形区域のひずみ履歴

5.3 成形品の(逐次)熱処理による組織制御

インクリメンタル成形により数 100%のひずみが導入された製品材料の諸特性や微細組織を把握すること重要であるが、そのような検討はほとんどない。

一方で、強塑性ひずみが導入された材料に対して適切な熱処理を施せば結晶粒微細化を達成できる。図 50は、インクリメンタル成形されたステンレス鋼薄板を熱処理した結果で、結晶粒が微細化していることが確認できる。この変化は数秒程度の短時間の加熱でも生じる。効果的な静水圧の付与や繰り返しひずみ導入等の課題は未解決であるが、図 51のようなレーザ援用プロセスをうまく利用できれば、逐次的に組織分布を制御する機能をもった新プロセスの開発が期待できる。



(a) Before heat treatment (b) After heat treatment

図50 成形品の熱処理による結晶粒サイズの変化 (Blank: SUS304, $t_0=0.3\text{mm}$)

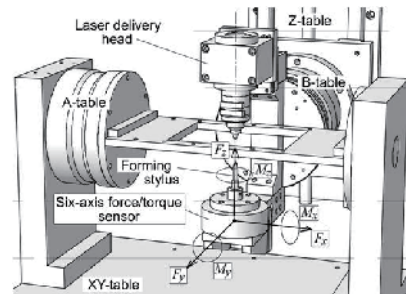


図51 レーザ援用インクリメンタル成形

6. まとめ

インクリメンタルフォーミングは、1990 年代の胎動期を経て国内外で活発に研究開発が進めれる 21 世紀の新しい成形技術となった。最近では、教科書や一般向けの書誌などにもその名称を見つけることができる。先行したコンピュータ, CNC 技術および人工知能などの飛躍的な進歩にも支えられて、過去のアイデアが現実の技術として具体化した。さらに、本技術は 3D プリンタ/ラピッドプロトタイプング技術の一つとしても注目されている⁶⁾。

高精度化や高機能化を目指した研究室での基礎研究に加えて、本技術は実用化を検討するステージに入った。それにより新たな課題も明らかにされ、それらを克服する新しいアイデアが提案され、ますます高機能な完成された

プロセスに成熟していくことが予測される。

最後に、見学者が必ず質問されるのが成形時間である。インクリメンタルフォーミングは遅いというイメージがあり、実際に早い加工法ではない。近い将来、新たな加工原理が提案されて高速化の壁を一気に突破されることを期待したい。

参考文献

- 1) Allwood, J.M., Utsunomiya, H., “A survey of flexible forming processes in Japan”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, pp. 1939-1960.
- 2) 山下, 鍛金の実際—美しい形をつくり出す手と槌の技法, 美術出版社, 1978.
- 3) 中島, “鍛金加工の数値制御化”, 塑性と加工, 20-223, 1970, pp. 696.
- 4) 中島, “針金型を用いた金型電極の研究”, 機械学会誌, 72-603, 1969, pp. 32.
- 5) 畑田, 上野, 中村: “重電におけるフレキシブルなインクリメンタルフォーミング技術-ヘリカル形核融合装置用部品を中心として”, 塑性と加工, 42-489(2001), pp.1040-1045.
- 6) Namba, Y., *Proceedings of the International Conference on Lasers '85*, 403-407.
- 7) 近藤: “ピーンフォーミング”, 塑性と加工, 42-489(2001), pp.1008-1013.
- 8) 松原: “薄板の逆張出しインクリメンタルフォーミング”, 塑性と加工, 35-406(1994), pp.1311-1316.
- 9) Kitazawa K., “Incremental sheet metals stretch-expanding with CNC machine tools”, *Advanced Technology of Plasticity 1993*, pp. 1899-1904.
- 10) Kitazawa K., “Cylindrical incremental drawing of sheet metals by CNC incremental forming process”, *Advanced Technology of Plasticity 1999*, pp. 1495-1500.
- 11) Iseki H., Kato K., Sakamoto S., “Forming Limit of Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging with a Spherical Roller”, *Advanced Technology of Plasticity 1993*, pp. 1635-1640.
- 12) 井関, “ウォータージェットによるフレキシブルな薄板逐次張出し成形”, 機論 C, 65-635, 1999, pp. 2912-2918.
- 13) Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Dufloy J., Allwood J., “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal” *CIRP Annals*, 54/2. 2005.
- 14) US 3,342,051; Apparatus and process for incremental dieless forming; Edward Leszak; filed August 10, 1964, issued September 19, 1967.
- 15) Emmens, W.C., Sebastiani, G. & van den Boogaard, a. H., 2010. The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(8), pp.981-997.
- 16) 葉山, 回転塑性加工学, 近代編集社, 1981.
- 17) Jackson, K. & Allwood, J., The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 2009, pp.1158-1174.
- 18) <http://www.amino.co.jp/>
- 19) 網野: “金属板材のダイレスフォーミング加工機の開発”, 塑性と加工, 51-599(2010), pp.1119-1123.
- 20) <http://www.ibf.rwth-aachen.de/en/research-development/sheet-metal-forming/incremental-sheet-forming/>
- 21) <http://www.core77.com/posts/25163/fords-new-freeform-fabrication-technology-produces-metal-stamped-parts-without-any-stamping-or-dies-25163>
- 22) Ambrogio, G. et al., Application of Incremental Forming process for high customized medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 2005, pp.156-162.
- 23) Jackson, K. & Allwood, J., The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 2009, pp.1158-1174.
- 24) Bambach, M., A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12), 2010, pp.1562-1573.
- 25) Eyckens, P. et al., Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction. *International Journal of Material Forming*, 4(1), 2010, pp.55-71.
- 26) Emmens, W.C. & Boogaard, A.H. Van Den, Tensile tests with bending : a mechanism for incremental forming, 2008, pp.1155-1158.
- 27) Xu, R. et al., A preliminary study on the fatigue behavior of sheet metal parts formed with accumulative -double -sided incremental forming. *Manufacturing Letters*, 2(1), 2014, pp.8-11.
- 28) Ham, M. & Jeswiet, J., Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 2007, pp.277-280.
- 29) Bael, A. Van et al., Forming Limit Predictions for Single-Point Incremental Sheet Metal Forming, 10th ESAFORM, 2007, pp.309-314.
- 30) Emmens, W.C. & van den Boogaard, a. H., An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 2009, pp.3688-3695.
- 31) Emmens, W.C. & Boogaard, A.H. Van Den, Tensile tests with bending : a mechanism for incremental forming, 2008, pp.1155-1158.
- 32) Behera, A.K. et al., Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate adaptive regression splines. *Computer-Aided Design*, 45(3), 2013, pp.575-590.
- 33) Fratini, L. et al., Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1), 2004, pp.207-210.
- 34) Dufloy, J.R., Verbert, J., et al., Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 2008, pp.253-256.
- 35) 鈴木: “チタン合金の局部加熱インクリメンタルフォーミング

- の適用検討”, 塑性と加工, **52**-613(2012), pp. 155-159.
- 36) Ambrogio, G., Filice, L. & Manco, G.L., “Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **57**(1), 2008, pp.257–260.
- 37) Zhang, Q. et al., Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology*, **210**(2), 2010, pp.323–329.
- 38) 日野, 吉田: “板材の局所加熱インクリメンタル成形”, 塑性と加工, **51**-591(2010), pp. 297-301.
- 39) 大津: “摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発”, 塑性と加工, **52**-603(2011), pp. 490-494.
- 40) Bambach, M. & Hirt, G., “Error Analysis In Explicit Finite Element Analysis Of Incremental Sheet Forming” *Proc. NUMI-FORM'07*, 2007, pp.859–864.
- 41) Yamashita, M., Gotoh, M. & Atsumi, S.-Y., “Numerical simulation of incremental forming of sheet metal”. *Journal of Materials Processing Technology*, **199**(1-3), 2008, pp.163–172.
- 42) Ben Ayed, L. et al., Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process. *Engineering Structures*, **62**-63, 2014, pp.75–86.
- 43) Eyckens, Dufloy, J.R., et al. “Forming limit prediction for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming” *Proc. NUMI-FORM'07*, 2007, pp.141–146.
- 44) Sebastiani, G., Brosius, A., Tekkaya, A. E., et al. “Decoupled simulation method for incremental sheet metal forming” *Proc. NUMI-FORM'07*, 2007, pp. 1501-1506.
- 45) Flores, P. et al., Model identification and FE simulations: Effect of different yield loci and hardening laws in sheet forming. *International Journal of Plasticity*, **23**(3), 2007, pp.420–449.
- 46) Dufloy, J.R., Callebaut, B., et al., 2008. Improved SPIF performance through dynamic local heating. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**(5), pp.543–549.
- 47) Dufloy, J.R., Callebaut, B., et al., 2008. Improved SPIF performance through dynamic local heating. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**(5), 2008, pp.543–549
- 48) Mohammadi, A., Vanhove, H., Bael, A. V., Seefeldt, M., The effect of laser radiation on the residual stress levels of Single Point Incrementally Formed (SPIF) parts, **48**(5), 2008, pp.543–549.
- 49) Lu, B. et al., Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **93**, 2015, pp.37–48.
- 50) Malhotra, R., Cao, J., et al., Accumulative-DSIF strategy for enhancing process capabilities in incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **61**(1), 2012, pp.251–254..
- 51) Javed Asghar, Reddy, N.V., “Importance of Tool Configuration in Incremental Sheet Metal Forming of Difficult to Form Materials using Electro-Plasticity” *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2013.
- 52) Conrad, H., Sprecher, A. F., Cao, W. D., Lu, X. P., “Electro-plasticity - The effect of electricity on the mechanical properties of metals” *Technical Physics Letters*, **29**, 1990, pp. 28–33.
- 53) Obikawa, T., Satou, S. & Hakutani, T., Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **49**(12-13), 2009, pp.906–915.
- 54) Ben Hmida, R. et al., Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. *Materials & Design*, **45**, 2013, pp.155–165.
- 55) <http://www.ibf.rwth-aachen.de/en/research-development/sheet-metal-forming/incremental-sheet-forming/>
- 56) <http://www.core77.com/posts/25163/fords-new-freeform-fabrication-technology-produces-metal-stamped-parts-without-any-stamping-or-dies-25163>
- 57) Chatti, S. et al., New incremental methods for springback compensation by stress superposition. *International Journal of Material Forming*, **2**(S1), 2009, pp.817–820.
- 58) Mohammadi, A. et al., The effect of laser radiation on the residual stress levels of Single Point Incrementally Formed (SPIF) parts. , 2014, pp.83–92.
- 59) Tanaka S., Nakamura T., Hayakawa K., Nakamura H., Motomura K., “Incremental sheet metal forming process for denture plate”, *Advanced Technology of Plasticity 2005*, pp. 349-350.
- 60) Sebastiani G, Brosius A., Tekkaya A. E., Homerg W., Kleiner M., “Decoupled Simulation Method For Incremental sheet Metal Forming”, *Proc. NUMI-FORM'07*, 2007, pp. 1501-1506.
- 61) 中川: “日本のラピッドプロトタイピングの現状”, *電気加工学会誌*, **34**-76(2000), pp.8-17.