

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246093

研究課題名(和文)超軽量薄肉構造を実現する高比強度材料の精密スプリングバックフリー成形

研究課題名(英文)Precise Springback-free Forming of High Specific Strength Sheet for Realizing Ultra-Lightweight Construction

研究代表者

柳本 潤 (YANAGIMOTO, Jun)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90220194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：超軽量薄肉構造体は、輸送用機器等への適用でエネルギー利用効率向上などの利益が得られる。超軽量構造体部材に利用される高比強度材料では、弾性回復や残留応力に伴う変形(スプリングバック)により、加工で目的形状へ成形することが難しい。本研究では、温間温度域を成形によりスプリングバックを抑制する方法、さらに、超軽量構造体とするための薄板の異材接合について、金属薄板および非金属薄板を対象とし検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Ultra-lightweight construction is advantageous to promote the effective use of energy, when it is applied to vehicles et al. Elastic recovery and large amount of springback, which is induced by the residual stress of stamped high specific strength material used in ultra-lightweight construction, makes the forming into the desired shape. In this research, forming in the warm temperature range to suppress spring back and joining of dissimilar thin sheets were investigated, taking metallic sheets and non-metallic sheets as target materials.

研究分野：工学

キーワード：薄板成形 温間成形 超軽量構造 ステンレス鋼板 成形性向上 CFRP 異材接合 薄板接合

### 1. 研究開始当初の背景

超軽量薄肉構造体は、人類の生活が環境に調和したものとなり、また人類にとって快適な社会が実現されるために、不可欠な要素であり、今後長期間にわたり変わらずに高い意義を保つ。

超軽量薄肉構造体の素材は、高比強度材料である。高比強度材料を超軽量薄肉構造体とするためには、成形加工によって構造体を造らねばならない。高比強度材料の成形加工には、①(強度)÷(弾性率)である弾性回復量が大い、②成形後残留応力に伴う変形量が大い、の2つの理由により、成形加工時に金型を取り除いた後のスプリングバックが大い。故に求められる形への安定した加工は難しく、精密な形状造形さらに困難である。

### 2. 研究の目的

超軽量薄肉構造体は、移動体応用⇒軽量化によるエミッションの低減・エネルギー利用効率向上、建築構造利用⇒大型構造物の実現によるスペース節減、熱交換デバイス利用⇒熱交換効率の向上、につながり、現在の社会的価値が高く今後長期間にわたり意義を持ち続ける研究課題である。この研究では、1) 高強度鋼材・航空機素材・耐熱合金の温間成形試験で成形性やスプリングバック低減の基礎データを取得し、2) 温度とデジタルプレスモーションの統合制御による成形試験研究を行うことで最適制御方法を明らかにし、3) 成形された部材を超軽量薄肉構造体として実体化するためのレーザ接合・塑性締結の研究を行い、これらの3段階ロケット方式の研究によって、超軽量薄肉構造体を実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 成形後のスプリングバックの温度依存性とスプリングバックフリー現象の発現メカニズムを、体系的に明らかにするために、既存設備である高速多段圧縮試験設備および高歪速度付与試験設備を利用し、加工温度を精密に制御しつつV曲げ試験およびハット曲げ試験を行う。曲げ試験後のスプリングバックを測定し、加工温度とスプリングバック量との関係を、高張力鋼板、Al合金、Mg合金、N耐熱合金と非金属複合素材(Ni-Co耐熱合金、CFRP/炭素繊維強化複合材料)などの、金属材料および非金属材料について系統的に明らかにする。

(2) 得られたデータをもとに、スプリングバック量と温度、加工速度との関係、さらにスプリングバックフリー成形が実現される条件に対応して、生じている金属組織変化を明らかにする。具体的には、以下の手順で実験結果を整理し、考察する。

- ・加工温度とスプリングバックとの関係
- ・材料種類とスプリングバック量との関係
- ・温度履歴とスプリングバック量との関係

- ・保持時間とスプリングバック量との関係
- ・硬度とスプリングバック量との関係
- ・高温での応力-ひずみ関係とスプリングバック量との関係
- ・材料内部組織変化とスプリングバック量との関係

(3) 上記で取得されたデータを利用して、300mmサイズの超軽量薄肉成形体を高い精度、低いスプリングバック量で実現するための、実体化研究を推進する。デジタルサーボプレスを利用し、プレスモーション制御すなわち加工量・加工速度を最適化した状態での成形を行い、これにさらに温度制御を組み合わせることで、プレスモーション(加工量、加工速度)と温度との統合制御方法を行い、300mmサイズの超軽量薄肉成形体を高い精度、低いスプリングバック量で実現する。本研究は、CFRP薄板を対象材料として実施した。

(4) 超軽量成形体を構造化するための溶接・接合について、研究を行う。熱ひずみ極小化レーザ溶接と塑性締結(かしめ、かんごう、分流接合)について研究するとともに、複合化接合、1mm以下の薄板を対象とした異材接合を研究する。ここでは、CFRPなど非金属材料と金属材料の接合を可能とする、ハイブリッド接合を考案した。

### 4. 研究成果

(1) 加工温度を精密に制御した90度V曲げ成形を行った。装置には高温高速圧縮実験装置と新規製作した超硬合金製金型を使用した。材料は板厚1.0mm以下の薄鋼板およびステンレス鋼板、0.1mmまでの極薄ステンレス鋼板等の金属材料や炭素繊維強化プラスチック(CFRP)等の非金属材料を対象とした。加工温度は室温~600℃の温間温度域、加工速度は1~10mm/s、加工後保持時間は0s~5s程度、曲げ半径は1~2mmとした。実験中は温度・荷重履歴を新規購入のデジタルストレージで取得した。実験後の試験片画像から曲げ角を取得し、90度との差を成形性の指標であるスプリングバック量とした。また内部組織画像を顕微鏡で取得し、これら画像データを新規購入の情報処理装置に格納した。以上の結果より、スプリングバック量と各成形条件との関係を明らかにした。

板厚0.1mmの極薄ステンレス鋼板では、室温での成形では20度前後だったスプリングバック量が300℃では半分の約10度となった。さらに下死点で5s保持すると約6度、下死点で保持せず曲げ半径を1mmにするとスプリングバック量がほぼゼロとなったことから、スプリングバックフリー条件が明らかになった。これら事象の要因は高温での機械的特性の変化や曲げひずみ量の増大と考えられる。これ以外にも各種鋼板やCFRPでのスプリングバックの温度依存性が明らかになった。図1にステンレス鋼の、図2にCFRP薄板のV曲げ後のスプリングバックの温度依

存性を示す。Rはパンチの曲げ部半径である。

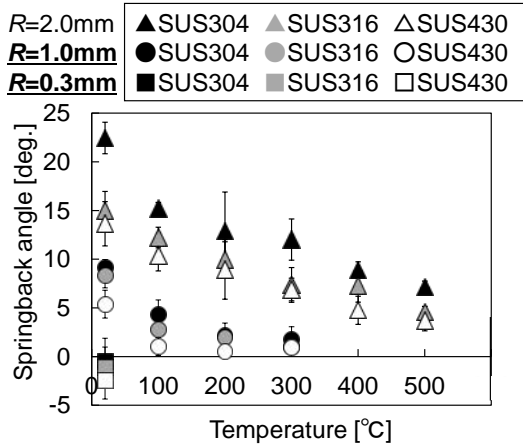


図1 ステンレス鋼のV曲げ後のスプリングバックの温度依存性 (板厚 0.1 mm)

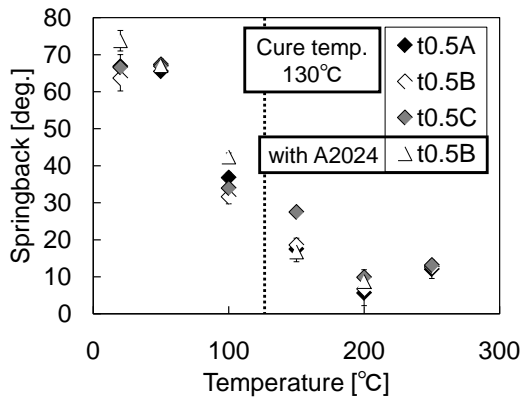


図2 CFRP 薄板のV曲げ後のスプリングバックの温度依存性 (板厚 0.5 mm)

なお、ここでCFRP薄板の曲げ成形には、図3に示す通りの、ダミー薄板を利用した曲げ成形を新たに考案し、加熱温度はダミー薄板の間接加熱により制御した。本方法は脆性材料からなる薄板の成形に利用できる工法として新たに考案したもので、産業財産権 (国内特許、国際特許) を出願済みである。

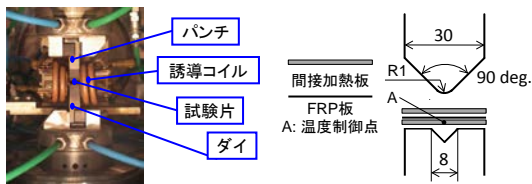
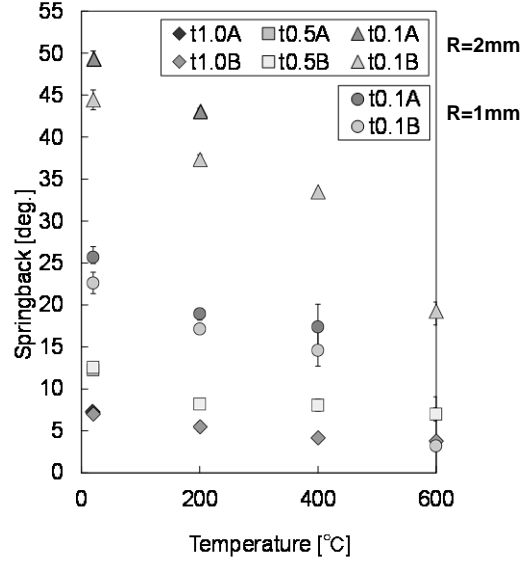


図3 ダミー薄板を利用した曲げ成形法

(2) 各種金属薄板のV曲げ後のスプリングバック量を系統的に測定してまとめた。図4は、Ni基耐熱合金X750、Mg合金AZ31のスプリングバックの温度依存性である。

X750



AZ31

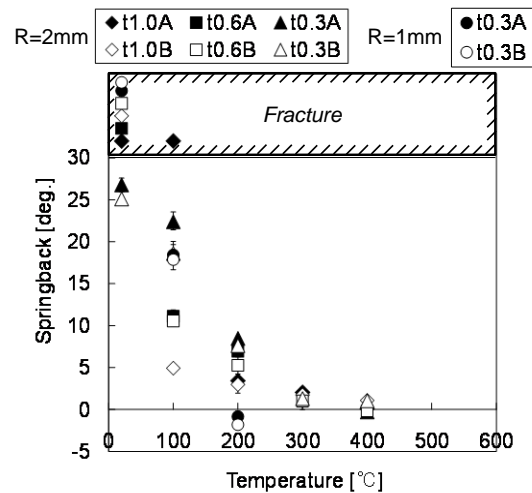


図4 上より、Ni基耐熱合金、Al合金、Mg合金のスプリングバックの温度依存性

(3) 金型を加熱することによる温度制御を利用した温間成形により、□300mm薄板の成形試験を行った。成形には1100kNサーボプレスを利用した。図5は成形試験装置とCFRP薄板のハット曲げ成形試験結果である。他にも長尺V曲げ部材の成形試験を行っている。

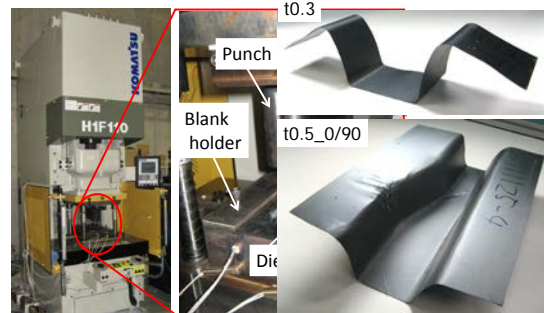


図5 □300mmCFRP薄板の成形試験

(4) 超軽量成形体を構造体化するための異材接合について研究した。研究対象は、CFRP薄板と金属薄板の接合の、接着と塑性変形を利用したハイブリッド接合であり、本研究によって新たに考案された方法である。図6に、ハイブリッド接合により接合された部材のせん断試験結果を示す。A2021-CFRPのハイブリッド接合により、良好な接合が実現されている。

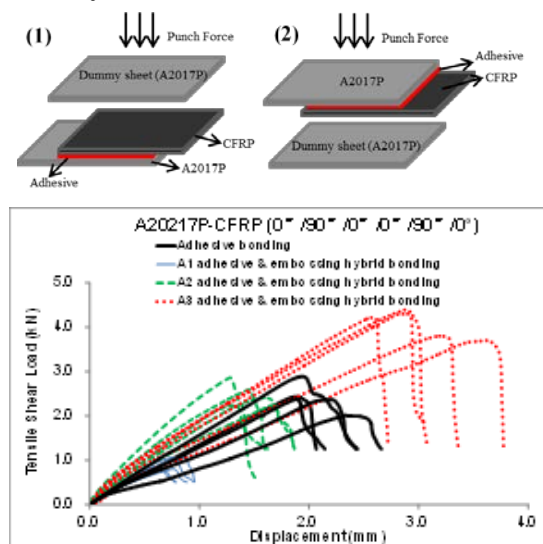


図6 CFRPと金属薄板のハイブリッド接合

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

[1]Z.Q. Huang, S. Sugiyama and J. Yanagimoto, Applicability of Adhesive Embossing Hybrid Joining Process to Glass-Fiber-Reinforced Plastic and Metallic Thin Sheets, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.214,2014, pp.2018-2028, doi.10.1016/j.jmatprotec.2013.11.020

[2]池内健義、柳本潤、CFRP薄板の冷間・温間V曲げ成形、塑性と加工、査読有、Vol.54、2013、pp.973-977、<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/sosei/-char/ja>

[3]Z.Q. Huang, S. Sugiyama and J. Yanagimoto, Hybrid Joining Process for Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastic and Metallic Thin Sheets by Chemical Bonding and Plastic Deformation, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.213, 2013, pp.1864-1874, doi.10.1016/j.jmatprotec.2013.04.015

[4]Jun Yanagimoto, K. Ikeuchi, Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, Vol.61, 2012, pp.247-250, doi.10.1016/j.cirp.2012.03.129

[5]池内健義、柳本潤、ホットスタンピング加工特性の高精度評価手法、生産研究、査読なし、Vol.64、2012、pp.75-82、<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/seisankenkyu/-char/ja/>

[6]K. Ikeuchi, J. Yanagimoto, Valuation Method for Effects of Hot Stamping Process Parameters on Product Properties Using Hot Forming Simulator, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.211-8, 2011, pp.1441-1447, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.017

[7]K. Ikeuchi and J. Yanagimoto, Characterization of Die Quenching Process by Water-Cooled Dies and High-Precision Compression Testing machine, Steel Research International, 査読有, Vol.81-9, 2010, pp.869-871, doi.org/10.11188/seisankenkyu.61.967

〔学会発表〕(計16件)

[1]Z.Q. Huang, S. Sugiyama and J. Yanagimoto, Cost Effective and Novel Adhesive-Embossing Hybrid Joining Process for Thermosetting Class-Fiber-Reinforced Plastic and Metallic Thin Sheets, SAMPE Europe 35th International Technical Conference & Forum (SEICO14Paris), 2014年03月10日～2014年03月11日, Paris, France

[2]瓜屋祐、柳本潤、連続炭素繊維強化複合材料(CFRP)薄板の成形性評価、第64回塑性加工連合講演会講演論文集、2013年11月01日～2013年11月03日、吹田市、大阪大学、吹田キャンパス

[3]Z.Q. Huang, S. Sugiyama and J. Yanagimoto, Application of Adhesive-Embossing Hybrid Joining Process for Fiber Reinforced Thermosetting Plastic (FRP) and Metallic Thin Sheets, The Proceedings of the 2013 Japanese spring Conference for the Technology of Plasticity, 2013年06月07日～2013年06月09日、名古屋市 ウィンクあいち、大同大学

[4]瓜屋祐、柳本潤、成形性に優れた連続炭素繊維強化複合材料(CFRP)薄板の構造最適化の研究、塑性加工春季講演会、2013年06月07日～2013年06月09日、名古屋市 ウィンクあいち、大同大学

[5]黄哲群、池内健義、瓜屋祐、杉山澄雄、柳本潤、超軽量構造実現のための長炭素繊維強化樹脂(CFRP)板と金属板との塑性変形・化学ハイブリッド接合、第63回塑性加工連合

講演会、2012年11月05日、北九州国際会議場、西日本総合展示場 AIM(福岡県北九州市)

[6]池内健義、瓜屋祐、柳本潤、長炭素繊維強化熱硬化性樹脂薄板(CFRP 薄板)の冷間・温間曲げ成形特性、第 63 回塑性加工連合講演会、2012年11月05日、北九州国際会議場、西日本総合展示場 AIM(福岡県北九州市)

[7]柳本潤、池内健義、長炭素繊維強化熱硬化性樹脂薄板(CFRP 薄板)の冷間・温間曲げ成形および絞り成形、塑性加工春季講演会、2012年06月08日、コマツウェイ総合研修センター、石川県こまつ芸術劇場うらら(石川県小松市)

[8]柳本潤、瓜屋祐、成形性向上のための長炭素繊維強化熱硬化性樹脂薄板(CFRP 薄板)の構造最適化、塑性加工春季講演会、2012年06月08日、コマツウェイ総合研修センター、石川県こまつ芸術劇場うらら(石川県小松市)

[9]K.Ikeuchi, J.Yanagimoto, Sheet Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Lightweight Parts, The 4th GMSI International Symposium, 2012/3/2, 東京大学 (東京都文京区)

[10]柳本潤、池内健義、CFRP 薄板の冷間・温間 V 曲げ成形、CFRP 薄板の冷間・温間 V 曲げ成形、第 62 回塑性加工連合講演会、2011/10/29、ホテル日航豊橋 (愛知県豊橋市)

[11]池内健義、朴亨原、柳本潤、各種金属薄板の冷間・温間成形におけるスプリングバック、第 62 回塑性加工連合講演会、2011/10/29、ホテル日航豊橋 (愛知県豊橋市)

[12]K.Ikeuchi, Y.Wake, T.Wake, S.Ikuta, N.Shikazono, J.Yanagimoto, Springback of Ultra-Thin Stainless Steel Sheet after Cold and Warm Forming, 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011, 2011/9/29, Germany, Aachen, Eurogress Convention Center

[13]池内健義、和氣靖人、和氣庸人、生田四朗、鹿園直毅、柳本潤、極薄ステンレス板の冷間・温間成形におけるスプリングバック (第 2 報)、第 42 回塑性加工春季講演会、2011/5/22、早稲田大学理工学部 (東京都新宿区)

[14]池内健義、極薄ステンレス板の冷間・温間成形におけるスプリングバック、日本塑性加工学会東関東支部第 30 回技術懇談会、2011/1/21、住友金属鹿島人材開発センター (茨城県鹿嶋市)

[15]和氣靖人、和氣庸人、生田四朗、柳本潤、鹿園直毅、池内健義、極薄ステンレス板の冷

間・温間成形におけるスプリングバック、第 61 回塑性加工連合講演会 (日本塑性加工学会)、2010/10/15、山形大学 (米沢市)

[16]池内健義、柳本潤、水冷金型および高精度材料試験機によるダイクエンチ加工特性の評価 (第 3 報)、平成 22 年度塑性加工春季講演会、2010/5/30、電気通信大学 (調布市)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

[1]名称: Forming Method of Fiber Reinforced Composite Sheet

発明者: 柳本潤、池内健義

権利者: 財団法人生産技術研究奨励会

種類: PCT/J P 2 0 1 2

番号: 0 6 9 9 6 2

出願年月日: 2012/6/12

国内外の別: 海外

[2]名称: 繊維強化複合板の成形方法

発明者: 柳本潤、池内健義

権利者: 財団法人生産技術研究奨励会

種類: 特願 2 0 1 2

番号: 0 6 9 4 7 0

出願年月日: 2012/3/26

国内外の別: 国内

[3]名称: 繊維強化複合板の成形方法

発明者: 柳本潤、池内健義

権利者: 財団法人生産技術研究奨励会

種類: 特願 2 0 1 1

番号: 1 7 3 6 8 2

出願年月日: 2011/8/9

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等 [www.yanlab.iis.u-tokyo.ac.jp](http://www.yanlab.iis.u-tokyo.ac.jp)

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳本潤 (YANAGIMOTO, Jun)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号: 9 0 2 2 0 1 9 4

(2)研究分担者

杉山澄雄 (SUGIYAMA, Sumio)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号: 9 0 2 4 2 1 2 2