

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560112

研究課題名（和文） プレス成形性と強度・剛性を考慮した軽量多孔質積層板最適設計技術の開発

研究課題名（英文） Development of Lightweight Sheet Metal Laminate Consisting of Porous Core Layer and Thin Skin Sheets in Consideration of Press Formability, Strength and Rigidity

研究代表者

日野 隆太郎（HINO RYUTARO）

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10283160

研究成果の概要（和文）：新たな軽量板材として、小円孔を規則的に配列した多孔質板をコア層とし、その両面に薄いスキン層を拡散接合した三層構造の軽量多孔質積層板を考案・試作した。この多孔質積層板について二軸応力状態下における等塑性仕事曲面を調査してその塑性変形挙動を明らかにするとともに、成形限界線図の調査によりそのプレス成形性を明らかにした。これらの結果から軽量多孔質積層板の構造とその変形挙動・成形性の関連を把握し積層板の設計指針を与えることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：As a new lightweight sheet material, a kind of porous sheet metal laminate was developed. The sheet metal laminate consists of three layers, i.e. two thin skin sheets and a perforated core layer with round holes, which are bonded together by diffusion bonding. Plastic deformation behavior and press formability of the laminate were clarified by investigating yield locus (equi-plastic work surface) under plane stress condition and forming limit diagram of the laminate. Results of this research make it possible to grasp the relation between the structure of the lightweight porous sheet metal laminate and its deformation behavior and formability, and help the design of the laminate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：弾塑性工学，塑性加工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：成形加工，軽量多孔質積層板，成形性，変形挙動，最適設計

## 1. 研究開始当初の背景

自動車車体構造などに代表される板材構造物の軽量化のアプローチとして、ハニカムパネル、異種材積層板、高強度アルミニウム合金、高張力鋼板、FRP等の複合材料パネル

といった材料が使用されている。しかし、これらの材料では軽量化とプレス成形性、コスト、リサイクル性などの諸特性が相反することが多く、低コストでの製品開発が困難であるといった欠点がある。そこで、構造用板材

の軽量化を、製品性能を損なわない範囲でプレス成形性などの諸特性とのバランスを取りながら低コストで実現するという技術課題を解決する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では板材プレス成形における製品の軽量化と製品性能、成形性などを低コストで両立する新たな板材として、多孔質積層構造を有する板材の開発とその最適設計を目標とする。多孔質積層構造とは軽量多孔質コア層とそれを挟むスキン層から成る三層構造を想定しており、コア層に小さな円孔を適切に配列することで製品性能を損なわない範囲で軽量化とプレス成形性の制御（成形性の維持あるいは向上、材料流動の制御）を達成する最適な板材設計を実現しようとするものである。

## 3. 研究の方法

本研究で開発しようとする多孔質積層板とは、小さな円孔を適切に配列した軽量多孔質コア層とそれを挟むスキン層から成る三層構造の積層板（図1参照）である。研究方法の概要は以下のとおりである。

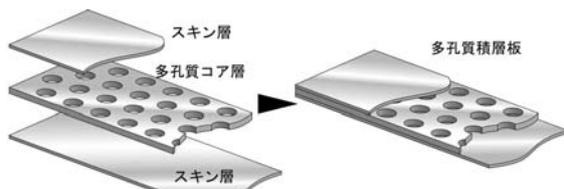


図1 多孔質積層板の模式図

まず既知の機械的性質をもつ板材を用いて多孔質積層板を作製し、コア層の孔の配列、各層の板厚によって多孔質積層板の機械的性質がどのように変化するかを実験的に調査するとともに、数値解析によってそれを予測する。多孔質積層板は機械加工および拡散接合によって作製し、材料はモデル材として拡散接合が容易な銅板を使用する。

基礎的変形特性（応力-ひずみ曲線）を調べる単軸引張試験のほか、降伏曲面（等塑性仕事曲面）を取得するための二軸引張試験、成形限界線図（FLD）を取得するための張出し試験を多孔質積層板とその構成素材について行う。また有限要素法（FEM）解析により多孔質コア層と多孔質積層板の変形挙動の特徴を把握し、その機械的性質を解析的に予測することを試みる。

続いて多孔質積層板のプレス成形において製品性能や成形性を損なわない範囲で軽量化を実現するための最適設計手法を検討するとともに、簡単なプレス成形問題を例題として多孔質積層板の成形実験を行い、得られた結果の妥当性を検討する。

## 4. 研究成果

(1) 多孔質積層板：本研究で試作した多孔質積層板の例を図2に示す。積層板は板厚0.6mmの多孔質コア層とその両面に接合された板厚0.2, 0.4または0.6mmのスキン層から成る三層構造であり、その全板厚は1.0, 1.4または1.8mmである。多孔質コア層には機械加工による直径2.5mmの円孔が規則的に配列されている。配列パターンは一辺4.5mmの正三角形格子配列または一辺4.19mmの正方格子配列とした（円孔直径2.5mmのとき、両者の質量はほぼ同一となる）。多孔質積層板の、同一厚さの単一板に対する重量低下率は、スキン層厚さ0.2, 0.4, 0.6mmのときそれぞれ16.8, 12.0, 9.3%となる。また比較のために円孔直径を3.0mmとした場合の検討も（部分的にはあるが）行った。

多孔質積層板は温度673ないし873Kの真空雰囲気中で面圧10MPaを負荷し60分間保持して拡散接合することで作製した。積層板の素材としては拡散接合性の観点から純銅板（C1100）を使用した。

(2) 単軸引張特性：図2中に示した単軸引張試験片により得られた正三角形格子孔配列の多孔質積層板とその構成素材（スキン層および多孔質コア層とその素材）のマクロ応力-マクロひずみ曲線の例を図3に示す。ここでマクロ応力、マクロひずみとは多孔質積層板や多孔質コア層を均質な板材とみなしたときの見かけの応力・ひずみである。図3(a)は673Kで接合した積層板とその構成素材の0°方向（圧延方向R.D.）におけるマクロ応力-マクロひずみ曲線であり、図3(b)はスキン層厚さ0.2mm、接合温度873Kの場合の0°方向および90°方向（圧延直交方向T.D.）におけるマクロ応力-マクロひずみ曲線である。なお、構成素材の試験片に対しても多孔質積層板接合時と同じ温度・負荷履歴を与えている。

これらの結果から、円孔により軽量化され

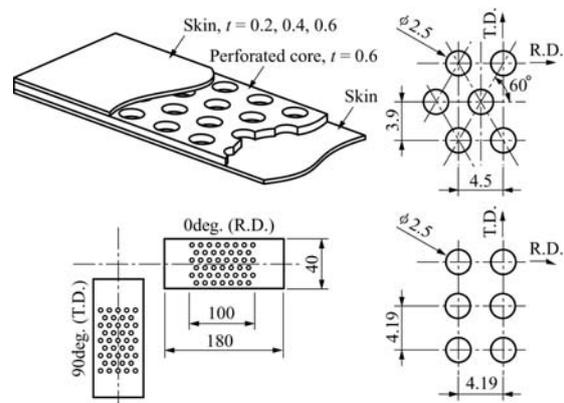
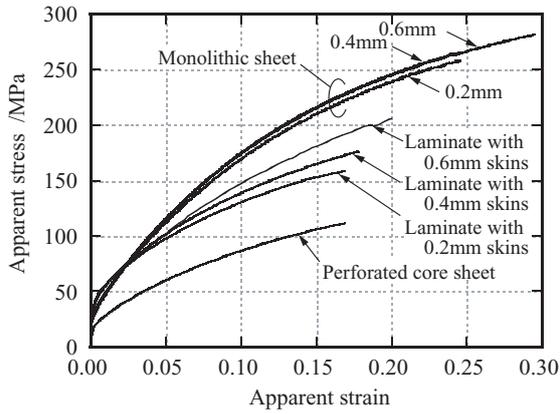
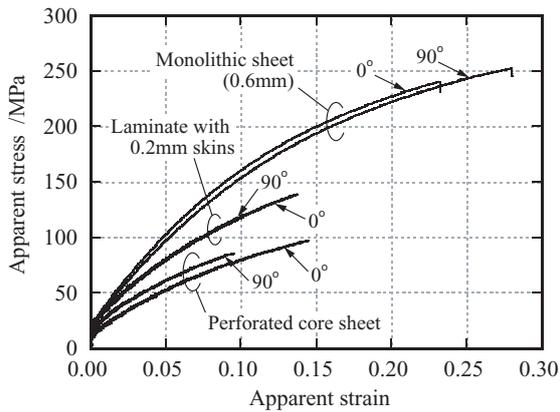


図2 多孔質積層板の構造、軽量コア層の円孔配列および単軸引張試験片



(a) 接合温度 673K, 0°方向引張の場合



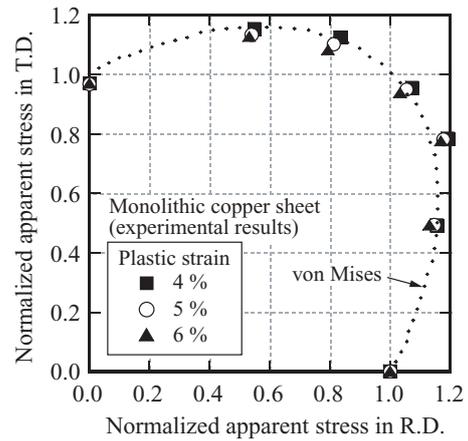
(b) 接合温度 873K, 0°および 90° 方向引張, スキン層厚さ 0.2mm の場合

図 3 多孔質積層板 (正三角形格子孔配列) とその構成素材の単軸引張におけるマクロ応力-マクロひずみ曲線

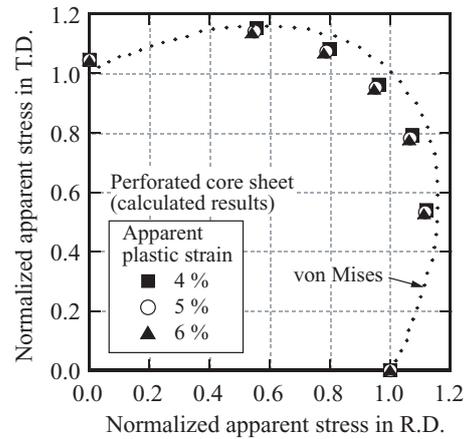
た多孔質コア層の強度と伸びは素材単一板に比べて大幅に低下するが, これにスキン層を接合して多孔質積層板とすることで強度, 伸びともに向上することがわかる. とくに低ひずみ域では素材に匹敵する強度があり, 条件を選べば素材に対する多孔質積層板の比強度低下率(ひずみ 0.1 における応力で比較)を 5%程度に抑えることもできる.

(3) 降伏曲面: 板材の塑性変形挙動を記述するには降伏曲面形状の把握が重要である. 板材の二軸平面応力状態下の降伏曲面は十字型試験片を用いた二軸引張試験によって測定することが多い. 本研究でも同様の実験を試みたが, 多孔質積層板と多孔質コア層についてはその応力・ひずみ分布の不均一さのため二軸引張試験による降伏曲面(マクロ等塑性仕事曲面)の取得が困難であった. そこで素材の銅単一板のみ二軸引張試験による降伏曲面の測定を行い, 多孔質積層板と多孔質コア層については 3 次元 FEM 解析により降伏曲面(マクロ等塑性仕事曲面)を求めた.

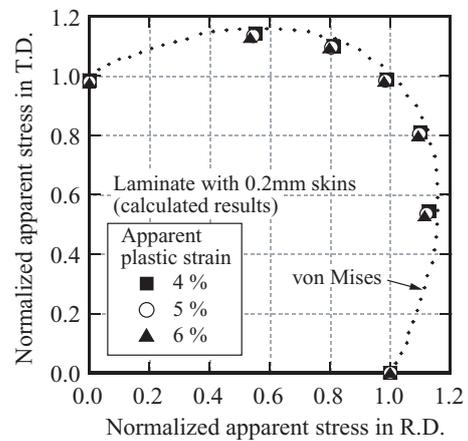
図 4 に素材の銅単一板, 多孔質コア層およ



(a) 素材の銅単一板についての測定結果



(b) 多孔質コア層についての計算結果



(c) 多孔質積層板についての計算結果

図 4 多孔質積層板 (接合温度 873K, スキン層厚さ 0.2mm, 正三角形格子孔配列) と構成素材のマクロ塑性ひずみ 4, 5, 6%における正規化された降伏曲面(マクロ等塑性仕事曲面)の測定結果および計算結果

び多孔質積層板のマクロ塑性ひずみ 4, 5, 6%における降伏曲面(マクロ等塑性仕事曲面)を示す. これらの結果は正三角形格子孔配列,

接合温度 873K, スキン層厚さ 0.2mm の場合のものであり, いずれの結果も 0° 方向の単軸引張降伏応力で正規化した形で表示している. また比較のためミーゼスの降伏曲面も図中に示した.

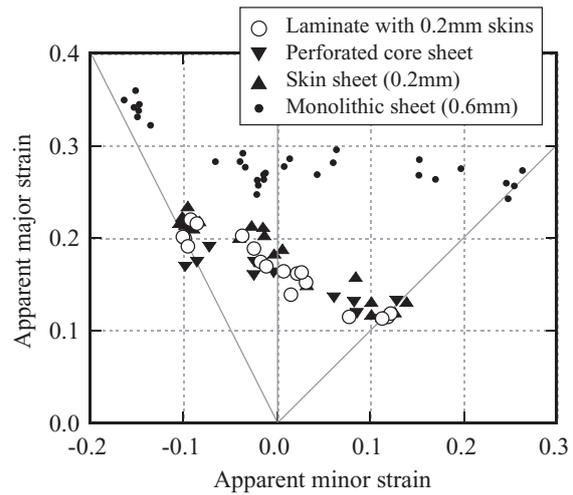
素材の銅単一板の降伏曲面はミーゼスの降伏曲面とほぼ一致しており, 多孔質積層板の降伏曲面もほぼ同様の傾向を示している. 一方, 多孔質コア層の降伏曲面においては 90° 方向 (T.D.) の降伏応力が 0° 方向 (R.D.) のそれよりも若干高く, また等二軸引張とその近傍における降伏応力はミーゼスの降伏条件よりも明らかに低くなっている. この結果から, 軽量多孔質コア層は孔配列に起因する降伏挙動の異方性を示すが, 多孔質積層板ではスキン層の影響によってこの異方性が緩和され, 素材単一板に近い降伏挙動を示すようになると言える. このことはコア層の孔配列と積層構成の設計によって多孔質積層板の降伏曲面形状と塑性変形挙動を制御できることを示している.

(4) プレス成形性: 多孔質積層板のプレス成形性を調査するため, 積層板とその構成素材について平頭円筒パンチ (直径 92mm) を用いた張出試験を実施し, 成形限界線図 (FLD) を取得した. 図 5 にその結果の例を示す. これらの結果は正三角形格子孔配列, 接合温度 673K, スキン層厚さ 0.2, 0.4 および 0.6mm の場合のものである.

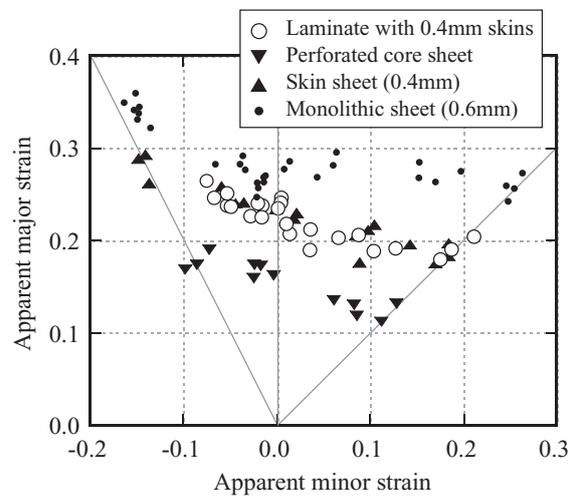
多孔質コア層の成形限界は素材単一板 (板厚 0.6mm) のそれと比べて大幅に低下する. これは孔周辺の応力・ひずみ集中が早期破壊をもたらすためである. 一方, スキン層の成形限界には板厚依存性があり, 厚さ 0.2mm のスキン層の成形限界は多孔質コア層と同レベルになっている. その結果として, スキン層厚さ 0.2mm の多孔質積層板の成形限界は素材の銅単一板よりも大幅に低下することとなる (図 5(a)参照).

しかしながら, ここで注目すべきはスキン層厚さ 0.4mm の多孔質積層板の成形限界がスキン層厚さ 0.2mm の場合よりも向上し, 厚さ 0.4mm のスキン層の成形限界と同レベルになっていることである (図 5(b)参照). その結果として, ひずみ比が負の場合の多孔質積層板の成形限界は素材単一板に匹敵するレベルになっている. このことから, 接合されたスキン層の拘束により多孔質コア層の応力・ひずみ集中が緩和され, その結果として多孔質積層板としての成形性が向上するものと考えられる. 言い方を換えれば, 成形性の低い軽量多孔質コア層も, スキン層を接合して積層板化することにより成形限界を向上させることができるのである.

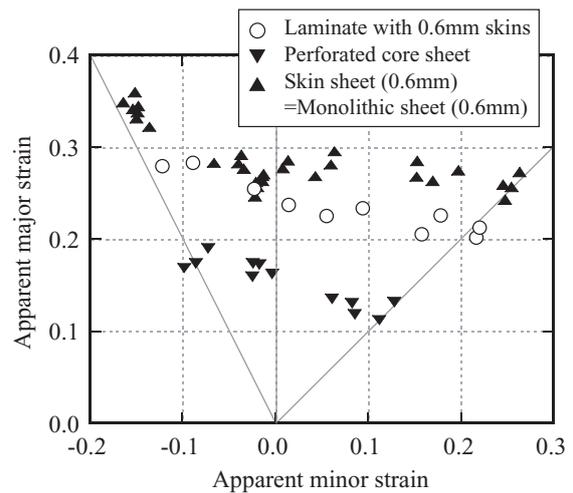
それではスキン層厚さを 0.6mm とすれば多孔質積層板の成形限界は 0.6mm スキン層



(a) スキン層厚さ 0.2mm の場合



(b) スキン層厚さ 0.4mm の場合



(c) スキン層厚さ 0.6mm の場合

図 5 多孔質積層板 (接合温度 673K, 正三角形格子孔配列) と構成素材の成形限界線図測定結果



図 6 球頭パンチにより張出成形された多孔質積層板 (接合温度 673K, 正三角形格子孔配列, 孔直径 2.5mm, スキン層厚さ 0.2mm, 張出高さ 27mm)

のそれと同レベルになるかといえ、必ずしもそうはならない (図 5(c)参照)。なぜなら、積層板全体の破断に先行して多孔質コア層の接合界面剥離、およびコア層のみの断裂が生じるからである。つまりスキン層接合による成形限界向上効果にはある限界が存在するものと考えられる。

なお、多くの金属板材では周知のとおり平面ひずみ引張近傍において成形限界が最も低くなる。一方、本研究で用いたスキン層、軽量多孔質コア層および多孔質積層板の成形限界は等二軸引張において最も低くなるという異なった傾向を示す。このことは軽量多孔質板および多孔質積層板の成形限界検討において注意すべき点である。また、本研究では正方形格子孔配列の多孔質積層板についても成形限界の調査を行ったが、空孔率が同じであれば正方形格子孔配列での成形限界は正三角形格子孔配列での成形限界とほぼ同じであった。

(5) 曲げ剛性：多孔質コア層および多孔質積層板の弾性曲げ剛性は、孔配列の影響により曲げ方向および曲げ断面位置に応じて変化する。例として正三角形格子孔配列、孔直径 2.5mm, スキン層厚さ 0.2mm の場合の理論曲げ剛性を種々の方向・断面位置で計算した。その結果、多孔質コア層の最大曲げ剛性と最小曲げ剛性には 2 倍以上の違いがあったが、多孔質積層板ではその違いが 1.13 倍にまで減少し、曲げ剛性の分布が均一化されたと言える。また多孔質積層板の最小曲げ剛性と同一質量の単一板の曲げ剛性を比較すると、前者は後者の約 1.7 倍となった。したがって製品の曲げ剛性の観点から見ると、多孔質積層板は軽量化に大きな効果がある。

(6) 成形実験と成形解析：一例として正三角形格子孔配列、孔直径 2.5mm, 接合温度 673K, スキン層厚さ 0.2mm の多孔質積層板について、直径 100mm の球頭パンチによる張出成形試験と対応する有限要素解析を行った。解

析には、前記(1)で取得した応力-ひずみ曲線と前記(2)で得られた降伏曲面をそれぞれモデル化して使用した。

図 6 は張出高さ 27mm まで成形した多孔質積層板試験片の写真である。成形品の形状とひずみ分布について実験結果と解析結果を比較したところ、一部に定量的な差異はあるものの概ね良好な解析結果となった。このことから多孔質積層板を均質な単一板とみなし、そのマクロな材料特性を用いた成形解析を行うことはある程度可能だと思われる。

(7) まとめ：小円孔を規則的に配列した多孔質板をコア層とし、その両面に薄いスキン層を拡散接合した三層構造の軽量多孔質積層板について、単軸引張特性、降伏曲面 (等塑性仕事曲面) や成形限界線図を実験的・解析的に調査し、その特徴を明らかにした。これらの結果から、構成素材の機械的特性および多孔質積層板の構造と、多孔質積層板の変形挙動・プレス成形性の関係が把握でき、多孔質積層板の設計とプレス成形に寄与することができる。また多孔質積層板の強度や成形性は、スキン層の強度・成形性の改善と接合強度の向上、および孔配列の最適化によって大きく向上させる余地があり、プレス成形可能な軽量板材として発展の可能性がある。

なお、前記(1)~(6)の検討に時間を要したため、当初目標に記載された多孔質積層板の最適設計に関しては十分な検討ができなかった。この問題については今後の課題として引き続き検討したい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Ryutaro Hino, Masato Nakamura, Yo Ishida and Fusahito Yoshida: Deformation Behavior and Formability of Sheet Metal Laminate Consisting of Perforated Core Sheet and Thin Skin Sheets, *Key Engineering Materials*, **535-536**, (2013), 254-257. (査読有)  
(DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.254)

[学会発表] (計 3 件)

1. Ryutaro Hino, Masato Nakamura, Yo Ishida and Fusahito Yoshida: Deformation Behavior and Formability of Sheet Metal Laminate Consisting of Perforated Core Sheet and Thin Skin Sheets, 11th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and its Application (AEP2012), 5-7 Dec. 2012, Singapore.
2. 石田庸, 金本大志, 日野隆太郎, 吉田総仁: 多孔質積層板の二軸引張りにおける

変形挙動, 日本機械学会中国四国支部第49期総会・講演会, 5 Mar. 2011, 岡山理科大学.

3. 金本大志, 石田庸, 日野隆太郎, 吉田総仁: 種々の構造を持つ多孔質積層板の二軸引張りにおける変形挙動, 日本機械学会中国四国学生会第41回学生員卒業研究発表講演会, 4 Mar. 2011, 岡山理科大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日野 隆太郎 (HINO RYUTARO)  
広島大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 10283160

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

吉田 総仁 (YOSHIDA FUSAHITO)  
広島大学・大学院工学研究院・教授

中村 真人 (NAKAMURA MASATO)  
広島大学・大学院工学研究科・博士課程前期学生

石田 庸 (ISHIDA YO)  
広島大学・大学院工学研究科・博士課程前期学生

金本 大志 (KANAMOTO DAISHI)  
広島大学・工学部第一類・学生