

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2009

課題番号：20686047

研究課題名（和文）板厚方向に強度勾配を有する薄鋼板の特異な力学特性とその応用

研究課題名（英文）Mechanical property and its application of steel sheets with strength gradient through sheet thickness direction

研究代表者

土山 聡宏（TSUCHIYAMA TOSHIHIRO）

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40315106

研究成果の概要（和文）：プレス成形用薄鋼板の力学特性を制御するための新しいアプローチとして、板厚方向に対して材料強度を連続的に変化させることの有効性について検討を行った。本研究では、ステンレス鋼中の窒素の濃度分布を変化させることによって、鋼板の表面を最大強度に調整した材料、および中心部を最大強度に調整した材料（強度傾斜鋼板）を製造し、その力学特性の評価を行った。その結果、同一の引張強さを有する鋼板であっても強度傾斜によって曲げ強度が顕著に変化することが明らかとなり、本手法によりプレス成形用薄鋼板の力学特性を改善できる可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：As a new approach to control mechanical properties of steel sheets for press forming, the effectiveness of changing material strength continuously through sheet thickness direction was investigated. In this study, nitrogen concentration distribution was controlled for stainless steel to obtain 'strength-gradient steel sheets' with a maximum strength at the surface or in the center of the sheet, and then the mechanical properties of these specimens were evaluated. As a result, the bending strength was found to be varied depending on the strength-gradient even when the tensile strength is identical. This suggests that it would be possible to improve mechanical properties of steel sheets for press forming by this method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：強度勾配、加工用薄鋼板、強度傾斜鋼板、ステンレス鋼、固相窒素吸収法、固溶強化、引張特性、曲げ加工

1. 研究開始当初の背景

| （1）構造物や自動車などの軽量化を目的と

して、プレス成形用薄鋼板のさらなる高強度化が望まれている。ただし、強度と同時に加工性や延性を確保することも必要不可欠である。従来、合金設計や熱処理による鋼の組織制御により強度-加工性バランスの改善が図られてきたが、今後、さらに材料の強度レベルが高まっていった場合、従来の組織制御による手法のみでは要求特性を満たせなくなることが懸念される。

(2) 鋼材の組織や特性は一般的にはマクロに均一と見なされるため、引張試験等により得られるバルク特性が材料の評価対象となる。しかしながら薄板のプレス成形などの一般的な加工時には、材料全体が均一に変形するわけではなく、場所によって歪の大きさが異なる。例えば曲げ変形の場合、鋼板の表層部と中心部を比べると歪の大きさ、および応力は表層部で大きい。従って、板厚方向の強度勾配を制御することができれば、バルク特性では評価できない新しい機能が発現する可能性があると考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 薄鋼板の強度-加工性バランスを改善するための新しいアプローチとして、板厚方向に対する強度傾斜化(強度勾配制御)の有効性を明らかにする。

(2) 種々の強度勾配を有する試料の作製方法を確立する。

(2) 強度勾配を有する薄鋼板の引張変形挙動ならびに加工性評価を行い、機械的性質に及ぼす強度勾配の影響を明らかにする。

## 3. 研究の方法

供試材には、厚さ 1.0mm の SUS316L (Fe-18%Cr-12%Ni-2.0%Mo) の板材を用いた。これに適当な条件で固相窒素吸収処理および

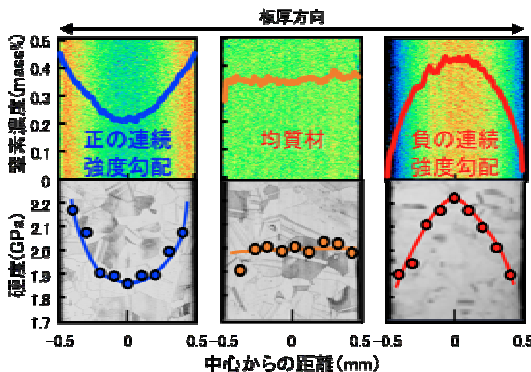


図 1 固相窒素吸収法により製造した強度傾斜鋼板における窒素濃度分布と硬さ分布

び脱窒処理を施した。図 1 は、EPMA により測定した試料切断面における窒素濃度分布を示しており、板厚方向に対して窒素濃度が連続的に変化した試料が作製されていることがわかる。各試料の強度(硬さ)分布は、窒素濃度分布によく対応しており、表層部で強度が高く中心部で低い「順傾斜材(Normal gradient)」、材料内で強度が均一な「均一材(Uniform)」、表層部で強度が低く中心部で高い「逆傾斜材(Reverse gradient)」が得られていることを確認している。各試料の平均窒素濃度は約 0.17mass%または 0.33mass%に揃えており、結晶粒径もほぼ等しい。得られた試料を顕微鏡観察、EPMA、硬度試験、引張試験および三点曲げ試験に供した。

## 4. 研究成果

図 2 は、平均窒素濃度が 0.17mass%、0.33mass%の順傾斜材、均一材および逆傾斜材の公称応力-公称歪曲線を示す。0.17N 材と 0.33N 材を比較すると平均窒素濃度の差に起因した強度レベルの違いは見られるものの、各窒素濃度の試料においては降伏応力、引張強度は、強度傾斜の影響を受けず平均窒素濃度のみに依存している。なお、全伸びには差が見られるが、これは測定誤差の範囲内である。図 3 は、各試料の真応力と加工硬化率を真歪で整理したものを示す。加工硬化挙動も、明白な強度傾斜依存性は認められない。このように、引張変形挙動が強度傾斜にほとんど影響を受けない原因について、降伏応力に関して考察を行った。

図 4 は、順傾斜材の板厚方向の窒素濃度分布を模式的に示す。ここで、高窒素系ステンレス鋼の降伏応力は、添加合金元素の種類や量によらず、窒素濃度(at.%)の 2/3 乗で整理できることが報告されている。そこで、本研究においても、窒素濃度の異なる均一材を引張試験に供して降伏応力を測定し、同様に整理したところ以下の式を得た。

$$\sigma_y = 180 \times [\text{at.}\% \text{N}]^{2/3} + 157 \text{ (MPa)} \dots (1)$$

窒素濃度と降伏応力にこのような関係がある

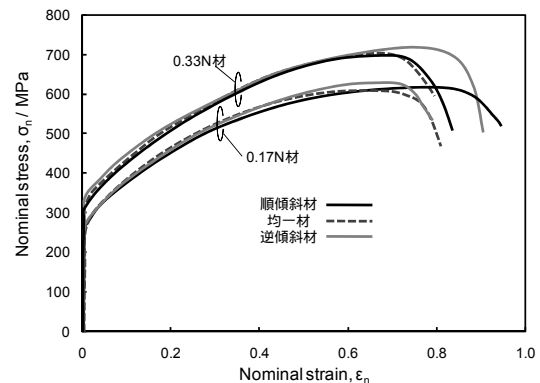


図 2 平均窒素濃度が 0.17mass% および 0.33mass%の強度傾斜鋼板の引張応力-歪み曲線

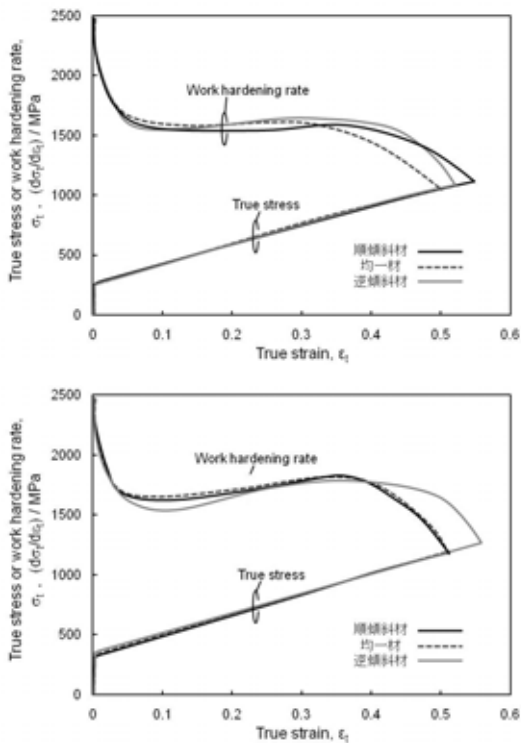


図 3 強度傾斜鋼板における真応力、加工硬化率と真歪みの関係

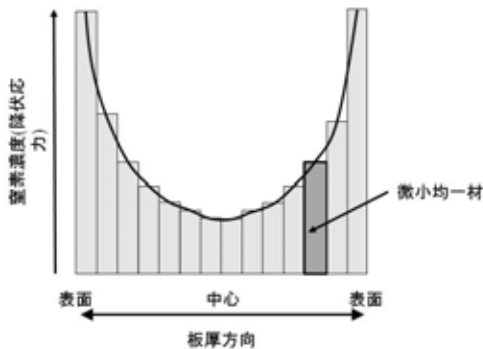


図 4 順傾斜材における窒素濃度分布と並列型複合強化則を示す模式図

ため、図 1 の窒素濃度分布は、降伏応力分布と見なすことができる。次に、強度傾斜材を板厚方向に対して微小領域に分割し、各領域を強度傾斜の存在しない均一材とすると、強度傾斜材は異なる降伏応力を有する均一材が並列的に積層した複合材料とみなすことができる。このような並列型複合材料の降伏応力は、一般に以下の式で整理することができる。

$$y = (\sigma_k \times V_k) \dots \dots (2)$$

- y : 複合材料の降伏応力
- k : k 番目の層の降伏応力
- V<sub>k</sub> : k 番目の層の面積率

微小領域に分割した降伏応力の積分値は平均窒素濃度に対応するため、平均窒素濃度が

等しい試料同士の降伏応力等しくなることとなる。EPMA により測定した板厚方向の窒素濃度分布(図 1)を微小領域に分割し、各領域の窒素濃度を(1)式に代入し降伏応力に変換し、さらに並列型複合則((2)式)を用いて強度傾斜材の降伏応力を求めた。図 5 は、各試料の降伏応力の計算値と実験値を比較した結果を示す。窒素濃度が等しい試料の降伏応力は同程度に見積もられており、さらに、計算値と実験値はほぼ 1 対 1 の関係を示している。このように、強度傾斜材の降伏応力は複合則で見積もることができることが示された。以上のことから、単軸引張変形の場合は板厚方向の強度勾配に影響を受けず、材料の平均の特性に依存すると結論できる。

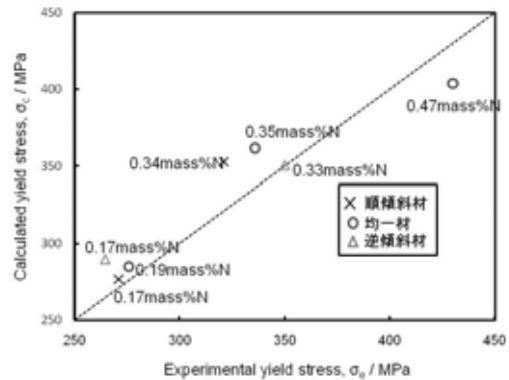


図 5 強度傾斜鋼板における降伏応力の計算値(積分強度)と実験値

図 6 は、平均窒素濃度が 0.33mass% の 順傾斜材、均一材および逆傾斜材を三点曲げ試験に供した際の曲げ応力 - 変位曲線を示す。試料間で降伏後の加工硬化挙動には大きな差異は認められないが、曲げ降伏応力には顕著な差が生じている。引張変形時の降伏応力の差は最大で 30MPa 程度であるのに対して、曲げ降伏応力が最も小さい逆傾斜材と最も大きい順傾斜材では 130MPa もの差が生じており、これは有意な差といえる。図 7 は、曲げ変形時の歪および応力の分布を模式的に示

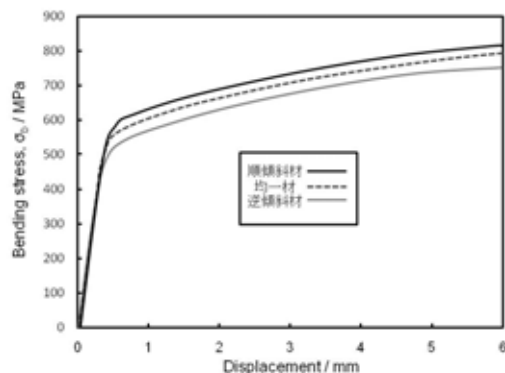


図 6 強度傾斜鋼板における曲げ応力-歪み曲線

す。曲げ変形では板厚方向に対して、歪量が連続的に変化しており、板の中心で最小、表面で最大となる。弾性変形時に材料に発生する応力が歪量に比例すると仮定した場合、最大の応力が生じる表面部が最初に降伏応力に達することになる。そのため、表面強度が低い逆傾斜材では、表面において低い応力で降伏に達し、均一材、順傾斜材と表面強度が高くなるにつれて表面での降伏に要する応力が上昇するため曲げ降伏応力が上昇したものと考えられる。

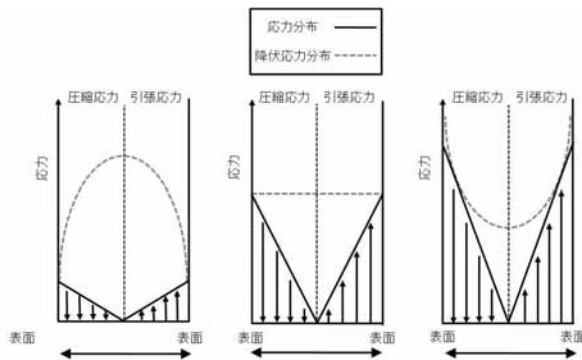


図 7 強度傾斜鋼板の曲げ変形時における応力分布と降伏応力分布の関係を示す模式図

## 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 6 件)

T. TSUCHIYAMA, H. TAKEBE, K. TSUBOI and S. TAKAKI

Surface-layer microstructure control for metastable austenitic stainless steel to prevent hydrogen permeation  
Scripta Materialia, 査読あり, 62, 2010, 731-734.

K. L. NGO HUYNH, H. TAKEBE, K. NAKASHIMA, T. TSUCHIYAMA and S. TAKAKI

Effect of Solution Nitriding on Hardness and Microstructure of Martensitic Stainless Steel  
Journal of The Japan Society for Heat Treatment (Special Issue), 査読あり, 49, 2009, 549-552.

Y. TERAZAWA, T. ANDO, T. TSUCHIYAMA and S. TAKAKI

Relationship between Work Hardening Behavior and Deformation Structure in Ni-free High Nitrogen Austenitic Stainless Steels  
steel research international, 80, 2009, 473-476.

〔学会発表〕(計 11 件)

K. TSUBOI, T. TSUCHIYAMA and S. TAKAKI  
Mechanical Property of Steel Sheets with Strength Gradient through Thickness Direction

18th Processing and Fabrication of Advanced Materials, Sendai, 2009.

坪井耕一、寺澤祐介、安東知洋、土山聡宏、高木節雄

板厚方向に強度勾配を有する薄鋼板の機械的性質

日本鉄鋼協会春季講演大会、ポスターセッション、東京工業大学、2009.

坪井耕一、井上良平、土山聡宏、高木節雄

固相窒素吸収法により製造した強度傾斜ステンレス鋼板の機械的性質

日本鉄鋼協会秋季講演大会、口頭発表、京都大学、2009.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: マルテンサイト系ステンレス鋼の耐食性と強度の改善方法

発明者: 土山聡宏 他

権利者: 九州大学 他

種類: 特許

番号: 特願 2008-313166

出願年月日: 20 年 11 月 27 日

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://takaki.zaiko.kyushu-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

土山 聡宏 (TSUCHIYAMA TOSHIHIRO)

研究者番号: 4 0 3 1 5 1 0 6

(2) 研究分担者

該当無し