

## 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 24 日現在

機関番号： 12701  
 研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2010 ～ 2012  
 課題番号： 22560692  
 研究課題名（和文） 超音波印加加工処理によるアルミニウム合金板材の成形性および表面品質の向上  
 研究課題名（英文） Improvement of formability and surface quality of aluminum alloy sheets by ultrasound treatment  
 研究代表者  
 廣澤 渉一 (HIROSAWA SHOICHI)  
 横浜国立大学・工学研究院・准教授  
 研究者番号： 20345359

## 研究成果の概要（和文）：

自動車ボディパネル材料として使用されている Al-Mg 系合金板材は、引張変形やプレス成形、張出し成形などによって板表面にストレッチャ・ストレイン（SS）マークと呼ばれるひずみ模様が生じ、製品の外観が損なわれることが問題となっている。そこで本研究では、まず結晶粒径ならびに合金組成の違いが SS マークの形成に与える影響を明らかにし、その後新たな試みとして、電子スペックルパターン干渉法による SS マークの動的観察、形成挙動評価を行った。さらに、得られた実験結果をもとに、Al-Mg 系合金板材のセレーシヨンの出現ならびに SS マークの形成機構についての提案も行った。

## 研究成果の概要（英文）：

Weight reduction of gasoline cars is one of the effective means to reduce greenhouse gas such as CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. Aluminum alloy sheets, especially Al-Mg alloy sheets, are quite attractive as a body panel material because of the smaller specific gravity. However, there is a problem that diagonal patterns called stretcher-strain marks (SS marks) are produced after plastic deformation, resulting in the diminished surface quality of such panel products. In this study, the formation behavior of SS marks during tensile testing of Al-Mg alloy sheets was aimed at elucidating through a newly developed electronic speckle pattern interferometry (ESPI).

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

## 研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 材料工学・構造・機能材料

キーワード： アルミニウム-マグネシウム系合金、ストレッチャ・ストレインマーク、表面品質、自動車ボディパネル、電子スペックルパターン干渉法、ホワイトバンド

## 1. 研究開始当初の背景

自動車重量の軽減による燃費効率の向上が期待されるなか、自動車部品の中でも特に

軽量化効果が大きいボディパネルへのアルミニウム合金板材の適用が進んでいる。しかしながら、成形性に優れる Al-Mg 系合金の場

合でも、プレス成形後の板表面にストレッチャ・ストレイン (SS) マーク (図1内写真) といわれるひずみ模様が生じ、表面品質が著しく低下することが問題となっている。SS マークの形成機構については、応力-ひずみ曲線上に現れるセレーション (図1矢印) との対応からいくつか報告がなされているが、その詳細については不明な点が多かった。

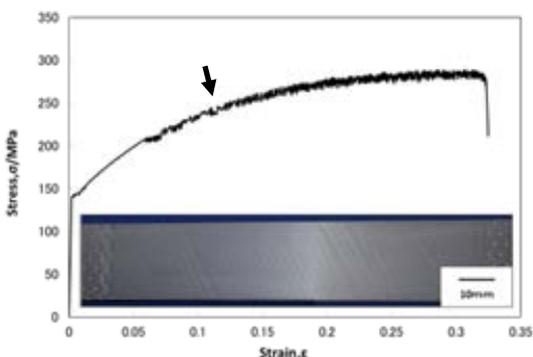


図1 Al-Mg系合金板材の応力-ひずみ曲線ならびにSSマークの例

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、まず結晶粒径ならびに合金組成の違いがSSマークの形成に与える影響を板表面のマクロ観察によって調べ、その後、新たな試みとして電子スペックルパターン干渉法 (ESPI法) による、引張試験中のSSマークの動的観察ならびに形成挙動評価を行った。そして、表面品質に優れた高成形性 Al-Mg系合金板材を創製するための新たな指針を得ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、冷間圧延によって厚さ 1mm とした後に、様々な焼なまし処理を施した 5182Al-4.5%Mg-0.23%Mn 合金および 5022Al-4.4%Mg-0.44%Cu 合金板材を使用した。引張試験後の板表面を一眼レフカメラでマクロ撮影し、結晶粒径ならびに合金組成の違いがSSマークの形成やセレーションの出現に与える影響を明らかにした。また、同じカメラで引張試験中のSSマークの形成挙動を動的に観察することを試みたが、板表面全体でSSマークが見やすくなるよう、光の入射方向や加減を適宜調整することが難しく、後述するESPI法によるホワイトバンド (WB) の観察によってこれを実現することとした。

ここで、ESPI法の原理を図2に示す。引張試験片表面でヘリウムネオンレーザー光 (波長  $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) が干渉するよう調整す

ると、両光路からの光  $I_1$ 、 $I_2$  が重ね合わせられて、スペックルパターンが形成される。そして、引張方向の変位を  $u$ 、変形前後のスペックルパターンを  $I_{bf}$  (位相  $\theta$ )、 $I_{af}$  (位相  $\theta + \phi$ )。ただし  $\phi = 2\pi/\lambda \cdot 2u \sin \alpha$ 、試料片表面法線との角度を  $\pm \alpha$  とすれば、変形前後のスペックルパターンの差の絶対値が

$$I = |I_{bf} - I_{af}| = 4 |\sin(\theta + \phi/2)| |\sin(\phi/2)|$$

となり、位相差  $\phi = 2n\pi$  で強度が最も大きく、 $\phi = (2n+1)\pi$  で強度がゼロとなる (ただし  $n$  は整数)。そのため、CCDカメラの撮影データをもとに、時系列的にスペックルパターンの差画像を計算することで、変形中の干渉縞の変化を動的に観察することが可能となる。なお、この干渉縞はSSマークと1対1で対応しており (本研究では、この干渉縞をホワイトバンド (WB) と呼ぶ)、本手法によってSSマークの形成挙動や形成機構が明らかになるものと期待される。

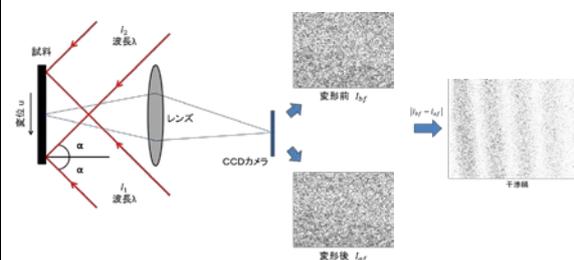


図2 ESPI法の原理

## 4. 研究成果

まず、結晶粒径ならびに合金組成の違いがSSマークの形成に与える影響を板表面のマクロ観察によって調べた。得られた結果は以下のとおりである。

### (1) 結晶粒径の違いによる影響

熱処理条件を調整することで、5182合金の平均結晶粒径を 15、32、44  $\mu\text{m}$  の順に増加させ、それぞれの引張特性ならびに表面品質を比較した。結晶粒径が大きくなると機械的強度は低下するものの、SSマークは目立たなくなり、表面品質が向上することが確認された。また、同時に応力-ひずみ曲線上に現れるセレーションの振幅も小さくなり、降伏現象も出現しなくなった。このような結晶粒径依存性は、従来知られている傾向と合致するものであった。

### (2) 合金組成の違いによる影響

結晶粒径を揃え、合金組成のみが異なる

5182、5022 合金板材の引張特性ならびに表面品質を比較した。0.2%耐力や引張強さなどの機械的強度には違いが見られたものの、セレーシヨンの形態や、SS マークの形成状況には差異が見られず、表面品質もほぼ同程度であった。

これらの結果から、Al-Mg 系合金のセレーシヨンの出現および SS マークの形成に及ぼす結晶粒径の影響は大きく、粒径を大きくすることで表面品質の向上が見込まれることがわかった。しかしながら、マクロ観察では引張試験中の SS マークの形成挙動を詳細に調べることができず、連続的な観察を行うことは困難であった。そこで本研究では、ESPI 法を用いた WB の動的観察および形成挙動評価を行うこととした。

### (3) WB と SS マークの関係

まず、WB と SS マークの対応関係を調べるため、5182 合金の引張試験において降伏点直後に試験を中断した際の WB を試験片表面側で、SS マークを裏面側で同時観察した結果を図 3 に示す。観察された 5 本の SS マーク (図 3 上段赤枠) すべてが WB (図 3 下段) と対応しており、WB と SS マークが同一の情報を含むことが確認された (板の表裏のため、方向は反対となる)。したがって、WB の動的な挙動を SS マークの挙動として扱うことができ、ESPI 法は Al-Mg 系合金で問題となる SS マークの形成挙動を明らかにするのに非常に有効な手段であるといえる。

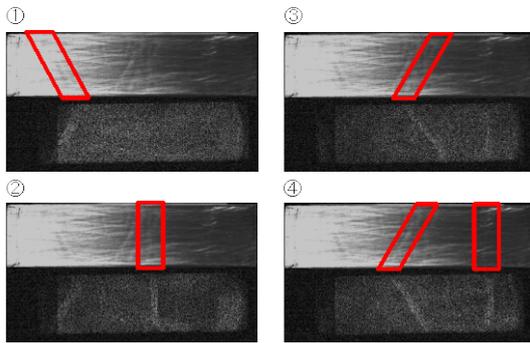


図 3 5182 合金の SS マーク (上段赤枠) と WB (下段)

### (4) ESPI 法による WB の動的観察結果

図 4 に、ESPI 法によって得られた引張試験中の WB の動的観察結果を示す。WB の挙動を解析することで、SS マークの形成挙動を伝播ステージ、ランダムステージ、停滞ステージの 3 つに分類することができ、さらに WB の内部構造についても、伝播ステージで

は縞構造、ランダムステージ以降では一本線構造になることが明らかになった。したがって、ESPI 法の適用により、SS マークの形成挙動を明瞭に可視化することに成功できたといえる。

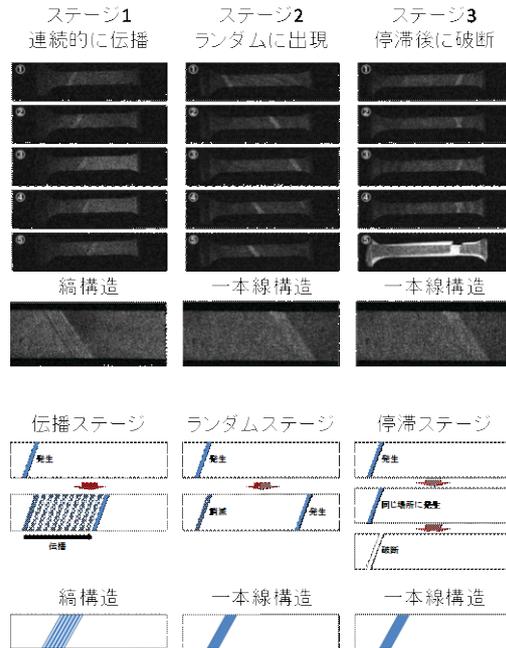


図 4 5182 合金の引張試験中に観察される WB (SS マーク) の形成挙動

### (5) WB (SS マーク) の形成機構

WB の形成機構を明らかにするために、まず対応するセレーシヨンの振幅  $F[N]$ 、周期  $s[m]$  から、WB の形成に必要な仕事  $W[J]$

$$W = F \times s$$

を算出し、固着雰囲気から離脱する転位数  $N$

$$N = W / w$$

を概算した (図 5)。ここで、 $w$  は Mg と転位との相互作用エネルギーであり、 $0.28\text{eV}$  ( $1\text{eV} = 27.0\text{kJ/mol}$ ) と仮定した。

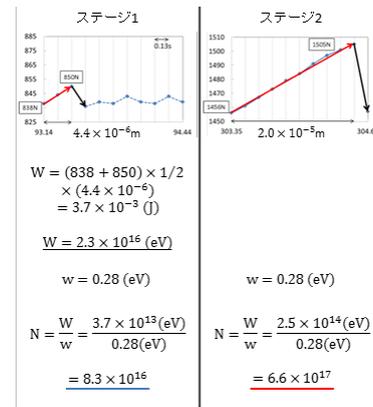


図 5 ステージ 1、2 で観察される WB (SS マーク) の形成に必要な転位数

上記の概算により、ステージ2ではステージ1よりも約8倍の転位が固着雰囲気から一斉に離脱する必要があり、これにともなってWB (SS マーク)の幅や内部構造が決まるものと考えられる。すなわち、ステージ1では溶質原子による転位の固着と解放が連続的に起こることで、細かなセレーションならびに幅の狭いWBが形成し、一方ステージ2では、溶質原子を引きずりながら移動する転位が、ある応力に達した時点で一斉に集団で固着雰囲気から離脱することにより、大きなセレーションならびに幅の広いWBが形成するものと考えられる (図6)。

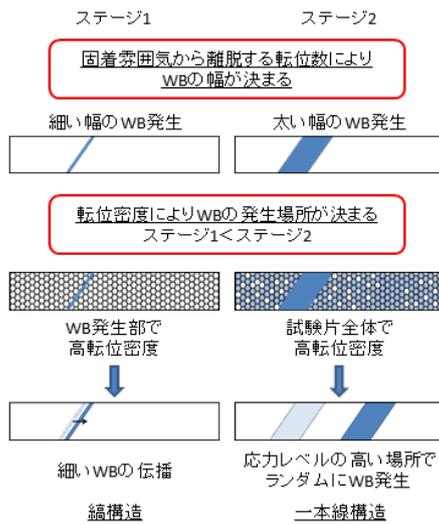


図6 WB(SS マーク)の形成機構の模式図

(6) まとめ

① Al-Mg 系合金の引張試験中に ESPI 法による動的観察を行うと、多数の WB が観察された。WB は SS マークと対応しているため、WB の動的観察により SS マークの形成挙動を明らかにすることが可能となった。

② WB を形成挙動の違いから3つのステージに分類することができた。ステージ1は伝播ステージ、ステージ2はランダムステージ、ステージ3は停滞ステージである。また、ステージ1はWB内部が縞構造であり、ステージ2は一本線構造となることが明らかとなった。

③ WB の形成機構は、ステージ1では溶質原子による転位の固着と解放が連続的に起こることが原因であり、またステージ2では、溶質原子を引きずりながら移動する転位が、ある応力に達した時点で一斉に集団で固着雰囲気から離脱することが原因であると考

えられる。

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 Shoichi HIROSAWA, Naoki TANUMA, Sanichiro YOSHIDA: Dynamic observation and evaluation of formation behavior of stretcher-strain marks during tensile testing of Al-Mg alloys, Proc. Thermec 2013, (2013) in print. 査読有

[学会発表] (計1件)

① 田沼尚樹, 濱岡巧, 廣澤渉一, 吉田賛一郎: Al-Mg 系合金の引張加工時に観察されるセレーションおよび SS マークの動的観察ならびに形成挙動評価, 横浜国立大学-横浜市立大学第8回ナノテク交流シンポジウム, 2013年3月6日, 横浜市立大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣澤 渉一 (HIROSAWA SHOICHI)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 20345359

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

吉田賛一郎 (YOSHIDA SANICHIRO)  
Southeastern Louisiana 大学・Dept.  
Chemistry and Physics・教授