

温間異周速圧延によるAl-Mg-Si系合金の成形性向上

Improvement of Formability in Al-Mg-Si Alloy Sheets by Asymmetric Warm Rolling

小松原 俊雄
Toshio Komatsubara

小山 克己
Katumi Koyama

野口 修
Osamu Noguchi

上野 洋一
Yoichi Ueno

三木 善樹
Yoshiki Miki

概要 アルミニウム合金板の成形性を向上させるため、温間異周速圧延による集合組織の改善を試みた。異周速比、圧下率などの諸条件を最適化して温間異周速圧延を施すことにより鋼板の圧延集合組織とほぼ同様なせん断集合組織が得られた。これを再結晶熱処理すると深絞り性を向上させる{111}//ND方位がわずかに形成された。温間異周速圧延材は成形性の指標となるランクフォード値や限界絞り比が通常冷延のアルミニウム合金板に比べて向上した。強度、伸びなどの材料特性は温間異周速圧延材と通常冷延材はほぼ同等であった。

Abstract: To improve the formability of aluminum alloy sheets, texture control by asymmetric warm rolling has been studied. Shear texture which is similar to the rolling texture of steel was developed by asymmetric warm rolling. After recrystallizing, a small amount of {111}//ND orientation suitable for deep drawing was observed. The Lankford value and limiting drawing ratio of asymmetric warm rolled sheets were higher than those of conventionally cold rolled sheets. Other properties such as strength and elongation of asymmetric warm rolled sheets were almost the same as those of cold rolled sheets.

1. はじめに

地球環境保全、省資源などの観点から自動車の軽量化が望まれている。アルミニウム材料の自動車部品への適用は軽量化には有効であるが、鋼板に比べてプレス成形性が劣るため、一部の高級車や高機能車のみへの適用にとどまっているのが現状である。プレス成形性の指標の1つとしてランクフォード値(r 値:引張試験における板厚ひずみと板幅ひずみの比)がしばしば用いられ、また r 値は結晶方位の配向すなわち集合組織に強く依存していることが知られている。したがって材料のプレス成形性を改善するには集合組織を適切に制御することが重要である。

鋼板などの体心立方晶金属を冷間圧延すると α ファイバと呼ばれる $\langle 110 \rangle$ //RD方位が発達し、これを再結晶熱処理すると{111} $\langle 110 \rangle$ ~{111} $\langle 112 \rangle$ 方位の γ ファイバ集合組織が形成される^{1),2)}。結晶方位と r 値の面内異方性との関係はTaylor理論やBishop and Hillの多結晶塑性モデルにより計算されている^{3)~5)}。板面に{111}面が形成されると材料の r 値が向上するとともに、 r 値

の面内異方性も小さい。一方、アルミニウムなどの面心立方晶金属を冷間圧延すると β ファイバ集合組織が発達し、再結晶後は立方体方位{100} $\langle 001 \rangle$ 方位が主方位となる。立方体方位は板面に{100}面が形成され、 r 値は低く深絞りには好ましくない方位である。

井上らは β ファイバの発達した1100アルミニウム熱延板から切出し後の板面が{111}面となるような角度で板状試料を切出し、引張試験による r 値と限界絞り比(L.D.R.)を測定した。その結果、 r 値は通常の試料の2倍以上の1.6であり、限界絞り比も高いことが確認された。面心立方晶金属であるアルミニウム合金でも板面に{111}面を形成することができれば r 値の向上、成形性改善ができることを示した⁶⁾。

結晶構造の異なる鋼板とアルミニウム板の加工集合組織は加工モードにより異なり、鋼板の圧延集合組織である α ファイバはアルミニウム板をせん断加工することにより得られることが知られている^{7),8)}。通常の圧延は平面ひずみであるが、ロールとの界面では摩擦のためせん断が付与されることは知られている。摩擦を上げるために例えば温間圧延などでせん断変形を付与した報告⁹⁾

もあるが、板厚方向のせん断変形領域は表皮部から 20%～30%に限られ、板厚全域の集合組織制御には不十分であった。

そこで本研究ではアルミニウム合金板に温間異周速圧延を行い、板厚内部まで強いせん断変形を与えることにより集合組織を最適化し¹⁰⁾、r 値および深絞り性の改善を図る。

2. 温間異周速圧延機の設計と導入

本研究にあたり、大型の成形性試験が可能な板材を試作できるように板幅 500 mm の温間異周速圧延機を設計し製作した。上下ロールを異周速にするには、1つのモータからの回転を異なったギア比で上下ロールに伝える方法、上下異なったロール径で圧延する方法、上下ロールに個別のモータを設置する方法などがある。1モータ/ギア式や異ロール径方式では機械的に確実に設定異周速比が得られる利点はあるが、異周速比を変えるにはその都度ギアあるいはロールを交換しなければならないこと、工業化を想定したリバース圧延が難しいことなどの欠点がある。そのため今回設計した異周速圧延機は上下独立ツインモータ方式として、それぞれのロールを 300 kW の交流ベクトルインバータモータで駆動することにした。異周速圧延では高速側ロールは通板による抵抗でトルクが増し、低速側ロールでは板に引きずられないようにブレーキをかけることになり逆トルクが発生する。

この異周速圧延に耐えるため、モータ、シャフトなどを設計するうえで、通常の等速圧延で発生するトルクの約 6 倍のトルクに耐えられるように機械設計した。また、電気回路上、低速側モータからの回生電力を高速側モータに戻すことで省電力をはかった。

圧延中の温度をできるだけ均一にするため、上下ロールにカートリッジヒータを内装し、ロール表面温度を最高 350℃ まで加熱できるように設計した。

新設した温間異周速圧延機の外観を図 1 に、主な仕様を表 1 に示す。

表 1 温間異周速圧延機的主要仕様
Table 1 Specification of asymmetric warm rolling mill.

ミル形式	2 段可逆転
ロール寸法	Φ 450 × 600
圧延モータ	AC300 kW 2 基
圧延荷重	最大 3500 kN
圧延トルク	最大 120 kN・m
ロール速度	最大 40 mpm
ロール加熱	最高 350℃
異周速比	等速～250%
ブラシロール	最大 600 mpm
潤滑装置	ロール塗油, スプレ塗油, 静電塗油
巻取装置	最大 Φ 800 mm
巻取張力	最大 50 kN
自動巻取	可能
センサ	圧延荷重, 圧延トルク, 張力, 板速度, 板厚

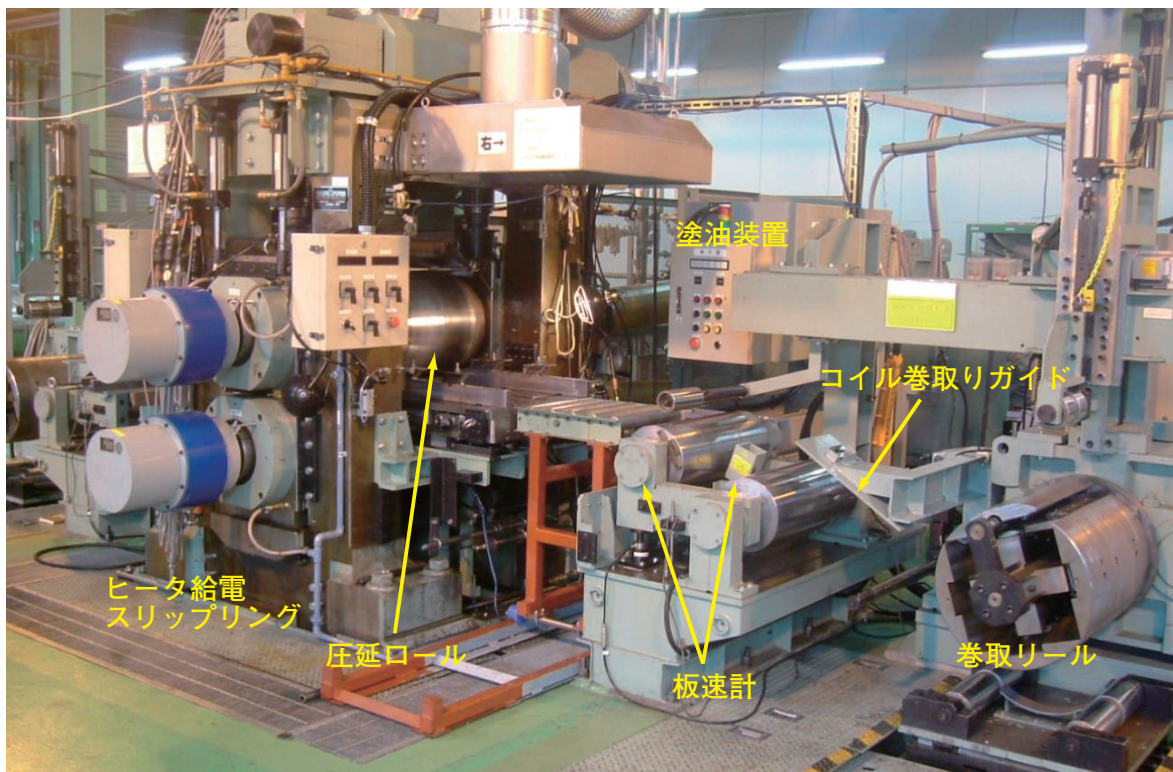


図 1 温間異周速圧延機外観
Fig.1 Appearance of asymmetric warm rolling mill.

3. 実験方法

5 mm厚に熱間圧延した6061合金, 6 mm厚まで熱間圧延した6022合金, さらに実験室でDC 鋳造した72 mm厚の6022合金鋳塊を供試材とした。温間異周速圧延はロール, 材料ともに200℃~300℃に加熱し, 上下ロールの速度比(異周速比)は120%~250%で所定の板厚までリバース圧延した。この際, 奇数パスと偶数パスで上下ロールの高速側を変え, 圧延材に対して常に同じ方向にせん断変形が付与されるようにした。

異周速圧延によるせん断ひずみを測定するため, 5 mm厚の6061合金熱延板にあらかじめ板厚を垂直に貫通するφ1.6 mmの穴を開けた後, ここにアルミニウム合金ワイヤを埋め込み, 圧延後のワイヤの傾きを測定し, 次式によりせん断ひずみを計測した¹¹⁾。

$$\text{相当ひずみ } \epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \phi \ln \frac{1}{1-r} \quad (1)$$

$$\text{せん断ひずみ } \gamma = 2\sqrt{\phi^2 - 1} \ln \frac{1}{1-r} \quad (2)$$

ただし

$$r = 1 - H_1/H_0$$

$$\phi = \sqrt{1 + \left\{ 1 + \frac{(1-r)^2}{r(2-r)} \tan^2 \theta_1 \right\}^2} \quad (3)$$

ここで, H_0 , H_1 はそれぞれ圧延前後の板厚, θ_1 は見掛けのせん断角である。

圧延後の再結晶熱処理(溶体化処理)は540℃の塩浴炉中に投入30秒保持後に強制空冷, もしくは550℃の電気炉に炉中投入し5分保持後にスプレ焼入れした。

引張試験は圧延方向に対して0°, 45°および90°方向からJIS 5号試験片を採取し, クロスヘッド速度10 mm/min一定として実施した。r値は引張試験片に伸び計と幅計を取付け, 7.5%~20%変形時のr値を計測した。平均r値は各方向のr値から($r_0 + 2 \times r_{45} + r_{90}$)/4として求めた。

集合組織は圧延上面, 下面および板厚中心についてSchulzの反射法で{100}面, {110}面, {111}面の3面の不完全極点図を測定し, ゴースト補正した級数展開法で結晶方位分布関数(ODF)解析を行った。

深絞り性は種々のブランクサイズでφ32 mm円筒パンチによる限界絞り比(LDR)を測定し, 張出性はエリクセン試験で評価した。

4. 実験結果

4.1 温間異周速圧延の特徴

ワイヤを埋め込んだ5 mm厚の6061合金熱延板を1 mm厚まで種々の異周速比で250℃温間異周速圧延し

た。ワイヤ部の断面観察では, 図2に示すように異周速比が大きくなるほどワイヤ部分の傾きは大きくなり, 板厚方向の見掛けのせん断角は均一化する。(2)式から求めたせん断ひずみは異周速比とともに大きくなり, 異周速比200%で2を超える強いせん断変形が付与されている。

6 mm厚の6022合金熱延板をロールギャップ2.5 mm

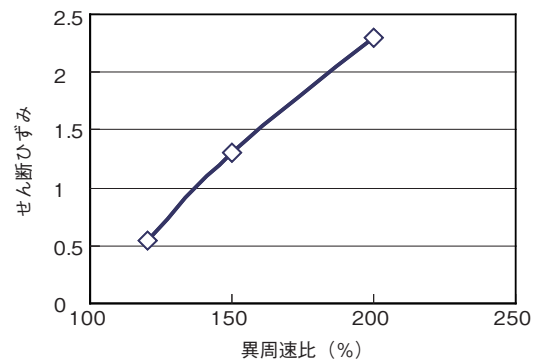
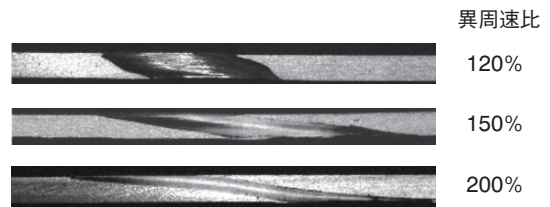


図2 異周速比とせん断ひずみの関係
Fig.2 Relationship between asymmetric ratio and shear strain.

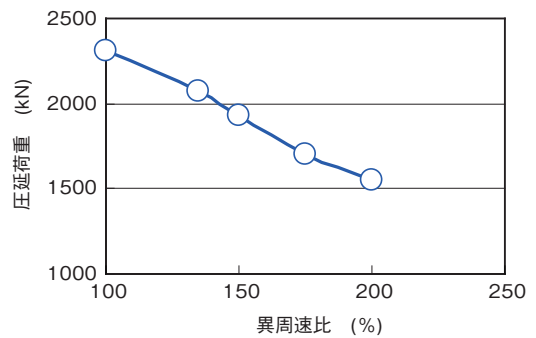


図3 異周速比と圧延荷重の関係
Fig.3 Relationship between asymmetric ratio and rolling load.

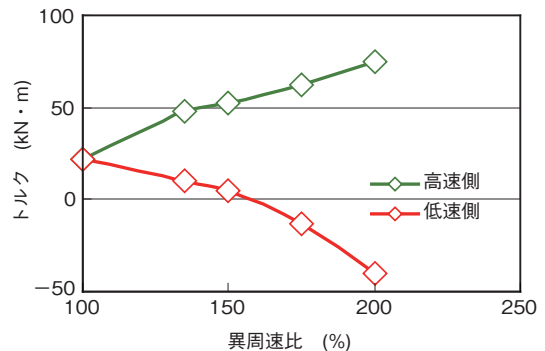


図4 異周速比と圧延トルクの関係
Fig.4 Relationship between asymmetric ratio and rolling torque.

一定として250℃で1パス温間異周速圧延したときの圧延荷重と圧延トルクの変化を図3および図4に示す。異周速比が大きくなるにつれて圧延荷重は低下し、圧延トルクは上昇する。等速圧延に比べて異周速比200%では圧延荷重は約30%減少し、圧延トルクは約4倍となる。また、圧延後の板厚は約20%薄くなり、圧延荷重の低下により1パス高圧下ができる利点がある。しかし圧延トルクの上昇はモータ容量アップおよび圧延機の剛性アップが必要となる。

4.2 温間異周速圧延材のr値と成形性

図5に6 mm厚の6022合金熱延板を1 mmまで種々の異周速比で200℃温間異周速圧延した後、540℃の塩浴炉中で再結晶熱処理した材料の平均r値を示す。異周速比が大きくなり、せん断変形が強くなるほど平均r値は上昇する。

表2に72 mm厚さの6022合金DC鋳塊および6 mm厚さの6022合金熱延板を1 mmまで異周速比200%で200℃温間異周速圧延した後、550℃の電気炉中で再結晶熱処理した材料の各方向の引張特性、r値の面内異方性および深絞りりと張出の成形特性を示す。表中には比較と

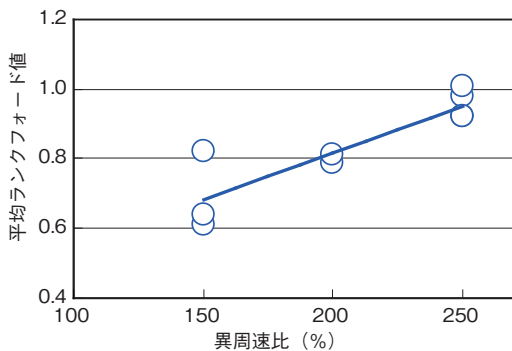


図5 異周速比と平均ラン克福ード値の関係
Fig.5 Relationship between asymmetric ratio and average Lankford value.

して6 mm厚の6022合金熱延板を1 mmまで通常の冷間圧延後、同様の再結晶熱処理を施した材料の諸特性も合わせて示す。引張強さ、耐力および伸びは通常の冷間圧延および温間異周速圧延いずれの圧延条件でも大きな違いはない。これに対してr値は圧延条件で大きく変化する。通常の冷間圧延材では45°方向のr値が低く、平均r値は0.6程度である。これに対して温間異周速圧延材では45°方向のr値が向上し、熱延板を温間異周速圧延した材料では各方向のr値の異方性が少なく、平均r値0.8が得られ、さらに異周速圧延率を上げた鋳塊の温間異周速圧延材では45°方向のr値が著しく向上し、異方性は強まるものの平均r値は通常の冷間圧延板の約2倍となる1.2を達成した。これまでアルミニウム合金の再結晶材で平均r値が1を超えた報告は極めて稀であり、温間異周速圧延チャンスを変えたn増し試験でも平均r値は1.1~1.2が安定して得られている。

平均r値の向上とともに深絞り性も向上し、r値が高い鋳塊の温間異周速圧延材で限界絞り比が通常冷間圧延材に比べて0.1程度も向上している。

4.3 温間異周速圧延材の集合組織

図6に6022合金6 mm厚の熱延板を1 mmまで通常の冷間圧延した材料と6022合金72 mm厚の鋳塊を1 mmまで異周速比200%で200℃温間異周速圧延した材料のψ2 = 45°断面のODFを示す。冷間圧延ままでは図6(a)のようにB方位{011}<211>とC方位{112}<111>の強い集積が認められ、全断面のODFを参照するとβファイバが強く発達している。再結晶熱処理後は図6(b)のように立方体方位が主方位となり、他方位の強い集積はない。

これに対して、温間異周速圧延ままでは図6(c)のように{001}<110>~{112}<110>~{111}<110>方位に至るせん断集合組織が発達しており、これは鋼板の冷間圧延集

表2 温間異周速圧延材、冷間圧延材の機械的性質と成形性
Table 2 Mechanical properties and formabilities of asymmetric warm rolled and cold rolled sheets.

	圧延温度	異周速比	方向	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	r値	LDR	エリクセン
鋳塊 温間 異周速 圧延	200℃	200%	0°	227	113	29	0.75	2.22	11.0
			45°	221	108	32	1.53		
			90°	226	113	29	1.00		
			平均	224	111	30	1.20		
コイル 温間 異周速 圧延	200℃	200%	0°	233	121	30	0.81	2.16	10.0
			45°	231	121	32	0.83		
			90°	230	120	27	0.74		
			平均	231	121	30	0.80		
冷間 圧延	RT	等速	0°	231	120	28	0.73	2.11	9.9
			45°	230	118	29	0.50		
			90°	230	118	27	0.75		
			平均	230	119	28	0.62		

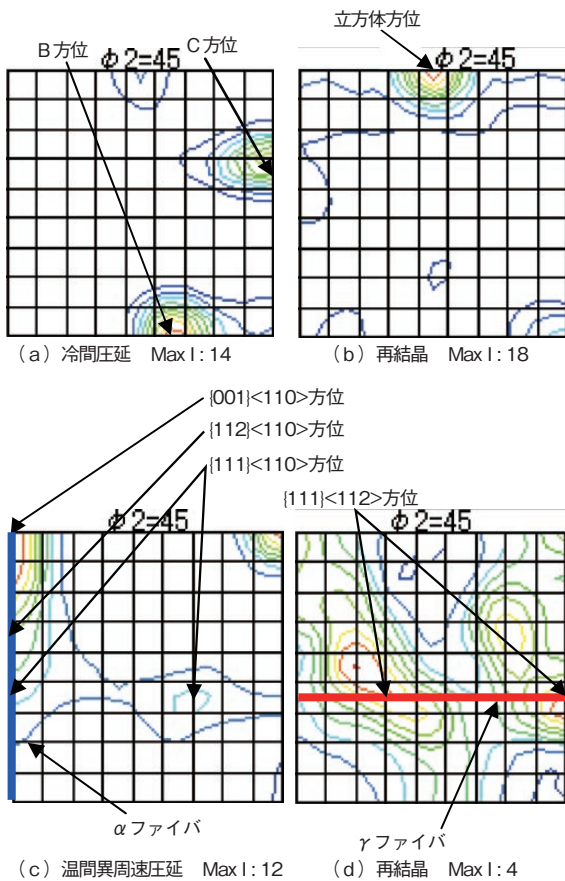


図6 冷間圧延材と温間異周速圧延材の集合組織
 Fig.6 ODFs of cold rolled and asymmetric warm rolled specimens (a) as cold rolled (b) cold rolled and recrystallized (c) as asymmetric warm rolled (d) asymmetric warm rolled and recrystallized.

合組織 α ファイバに類似している。アルミニウムの冷間圧延集合組織である β ファイバの形成はみられない。温間異周速圧延材の板厚方向の集合組織は板厚中央で理想的な方位から 10° 程度のずれるものがあるがせん断集合組織が板厚内部まで発達していた。

再結晶熱処理後は図6 (d)のように理想方位からのずれはあるものの、鋼板の再結晶集合組織である γ ファイバに相当する $\{111\}\langle 112 \rangle$ 方位が形成される。さらにアルミニウムの再結晶集合組織である成形性に好ましくない立方体方位の形成は全くみられない。また、わずかながらB方位 $\{011\}\langle 211 \rangle$ に相当する集積も形成される。これらの $\{111\}\langle 112 \rangle$ 、B方位は温間異周速圧延まま材には認められず、再結晶により新たに形成された方位であると考えられる。ただし温間異周速圧延後再結晶熱処理した材料は方位集積の最大強度が低く、他に比べてランダムである。

多結晶塑性モデルから計算された r 値面内異方性の一例を図7に示す^{3)~5)}。通常の冷間圧延材を再結晶熱処理したときに形成される立方体方位の面内異方性は図7 (a)のように、 0° 、 90° 方向で r 値 ~ 1 、 45° 方向では r 値 \sim

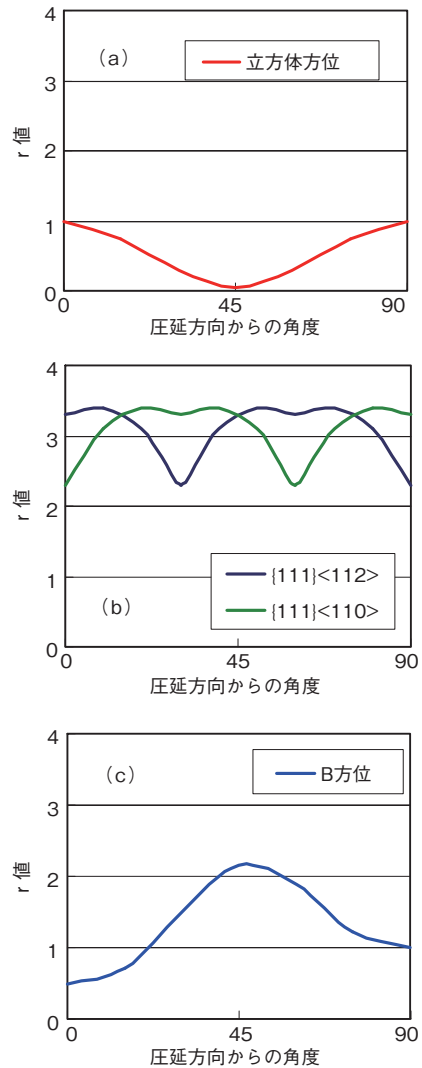


図7 理想方位の r 値異方性(計算値)^{3)~5)}
 Fig.7 Calculated plastic anisotropies of ideal orientations^{3)~5)}.

0 に近い。これは表2に示した冷間圧延材の r 値異方性とその傾向はよく一致している。

深絞り性に好ましい $\{111\}\langle 112 \rangle$ 方位の r 値面内異方性は図7 (b)のように全方向で r 値が高いが、温間異周速圧延後の再結晶処理で得られた集合組織は比較的ランダムに近いので、理論計算値まで r 値の向上はなかった。しかし 45° 方位の r 値を減少させる立方体方位の集積がないため r 値の面内異方性が低減されたと考えられる。高圧下温間異周速圧延では 45° 方向の r 値が顕著に向上しているが、これは副方位としてB方位に近い方位が形成されたことによると考えられる。B方位は図6 (c)のように 45° 方向の r 値が高く、これらの集合組織の総和として全体的に特に 45° 、 90° 方向の r 値が高くなったと考えられる。

5. おわりに

アルミニウム合金の成形性向上のため集合組織制御を試みた。成形性良好な鋼板並みの集合組織を確保する手段として温間異周速圧延機を設計し製作した。

温間異周速圧延することにより板厚全域に強いせん断集合組織が形成され、これは鋼板の圧延集合組織 α ファイバに類似している。再結晶熱処理後には鋼板の γ ファイバに相当する深絞り成形性に好ましい板面{111}面の集合組織が形成され、通常の冷間圧延・再結晶熱処理で形成される β ファイバや立方体方位は見とめられなかった。

温間異周速圧延時の異周速比を大きく、あるいは異周速圧延率を大きくするとせん断集合組織が強化され、再結晶熱処理後の平均 r 値は通常の冷間圧延材に比べて約2倍の1.2を達成した。

温間異周速圧延材では r 値の向上とともに深絞り性の指標である限界絞り比(LDR)が向上した。

本研究は経済産業省「革新的温暖化対策技術プロジェクト」を受けた新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術」の研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 瀬沼武秀, 亀田正春: 日本金属学会誌, **60** (1996), 717.
- 2) 松岡才二, 森田正彦, 古君修, 小原隆史: 鉄と鋼, **83** (1997), 127.
- 3) 井上博史, 稲数直次: 軽金属, **44** (1994), 97.
- 4) 胡建国, 石川孝司: 軽金属, **48** (1998), 540.
- 5) PH. Lequeu and J. J. Jonas: Metal. Trans. A, **19A** (1988), 105.
- 6) 井上博史: 軽金属学会第103回秋期大会講演概要, (2002), 319.
- 7) O. Engler, M. Y. Huh and C. N. Tome: Metal. Trans. A **31A** (2000), 2299.
- 8) 村上陽太郎: NMC マンスリー, **7**. (1996.3)
- 9) T. Kamijo and H. Fukutomi: Proc. 16th Riso Int. Symp. on Materials Science, (1995), 377.
- 10) 小松原俊雄, 小山克己, 上野洋一, 三木善樹: 第57回塑性加工連合講演会, (2006), 321.
- 11) 斎藤好弘, 左海哲夫, 前田太, 加藤健三: 鉄と鋼, **72** (1986), 91.



小松原 俊雄 (Toshio Komatsubara)
技術研究所 室長



小山 克己 (Katsumi Koyama, Ph.D.)
技術研究所 マネージャ



野口 修 (Osamu Noguchi)
技術研究所



上野 洋一 (Yoichi Ueno)
技術研究所



三木 善樹 (Yoshiki Miki)
技術研究所