

H24/03/ 12

第2回次世代自動車公開シンポジウム 「超軽量化技術の深化をめざして」

マグネシウム合金板材の室温成形性 改善を目指した技術開発

独立行政法人産業技術総合研究所
サステナブルマテリアル研究部門
○千野 靖正

次世代自動車の車体設計を指向した軽量化技術開発

例) 次世代自動車の鋼製車体プログラム

(FSV: Future Steel Vehicle program)

: 世界鉄鋼協会車体分科会(世界の鉄鋼会社17社により構成)による環境対応車の鋼製車体設計の共同開発

実施内容

フェーズ1

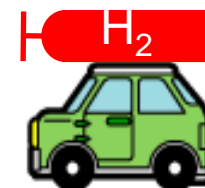
・2015～2020年に想定される車体についてBEV, PHEV, FCEVについて技術仕様を検討。

フェーズ2

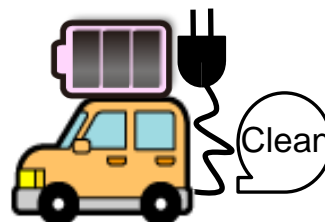
・BEVを対象として車体の詳細設計と最適化を実施。2001～2008年モデル車のホワイトボディー比35%減を達成。



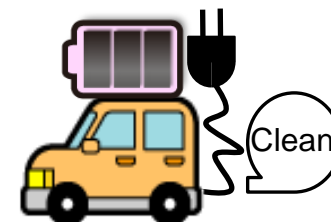
BEV(電気自動車)



FCEV(燃料電池車)



HEV
(ハイブリッド車)

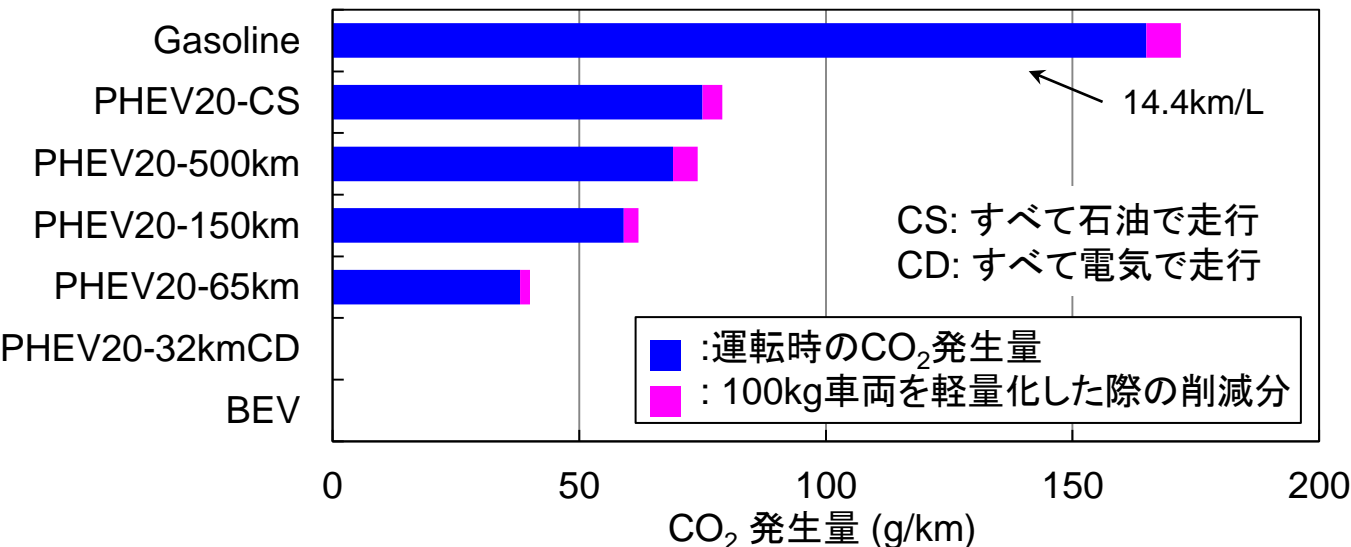


PHEV(プラグイン
ハイブリッド車)

栗山ら: 自動車技術 64-11(2011)10.

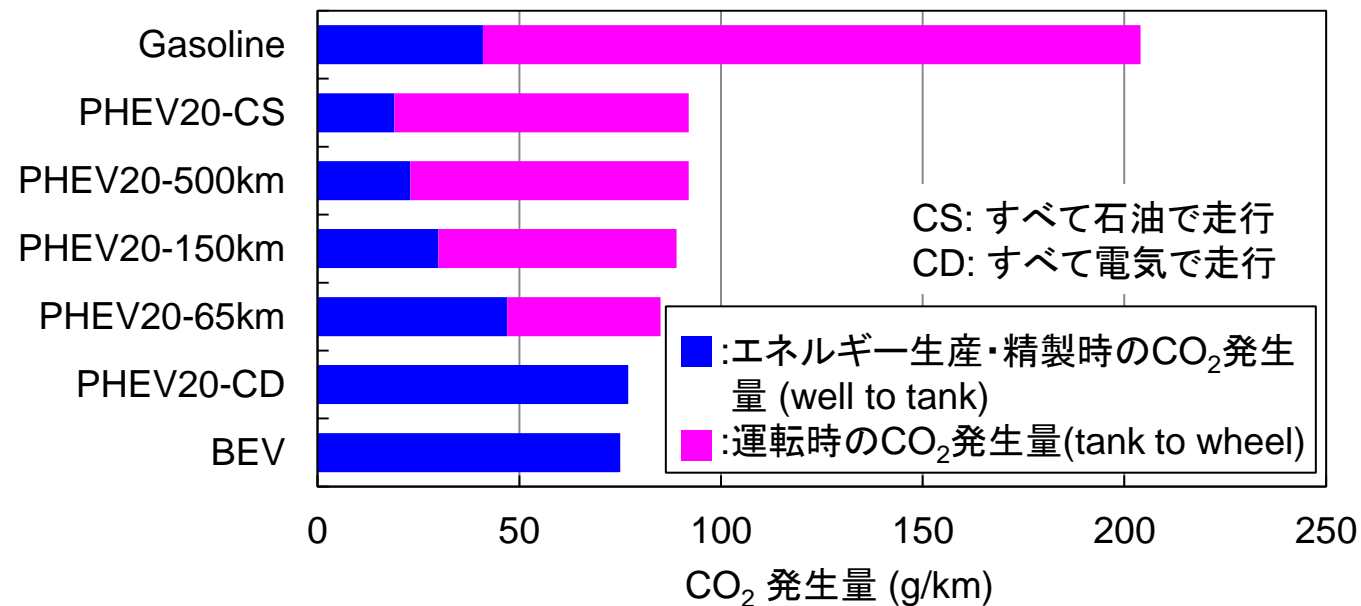
(a) 各駆動系での走行時のCO₂発生量

栗山ら:自動車技術 64-11(2011)10.



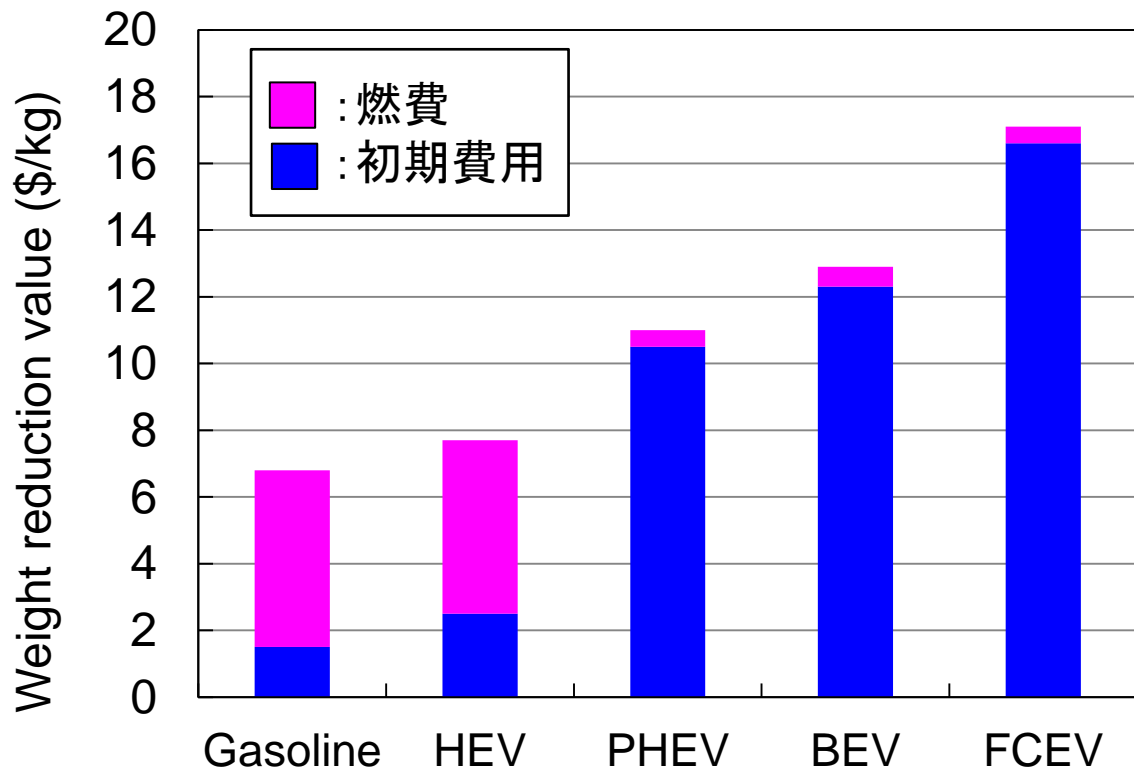
ガソリン車に比べ次世代車はベースの駆動系の効率が向上
→CO₂排出が少なく・軽量化効果が小さい。

(b)各駆動系でのWell to Wheel CO₂発生量



ガソリンは生産・精製し、タンクに積むまでのCO₂発生量は少ないが、総合排出では次世代車の方がCO₂発生量が少ない

各種次世代自動車の軽量化効果



ガソリン車 & HEV
→ 燃費削減効果

PHEV, BEV, FCEV
→ 電池容量・モーター容量の低減(車両コストの低減)

- 計算仮定
- ・次世代自動車の車体・蓋物・サスペンションが40%軽量化
 - ・10年間・12万マイル走行した際のコスト削減効果

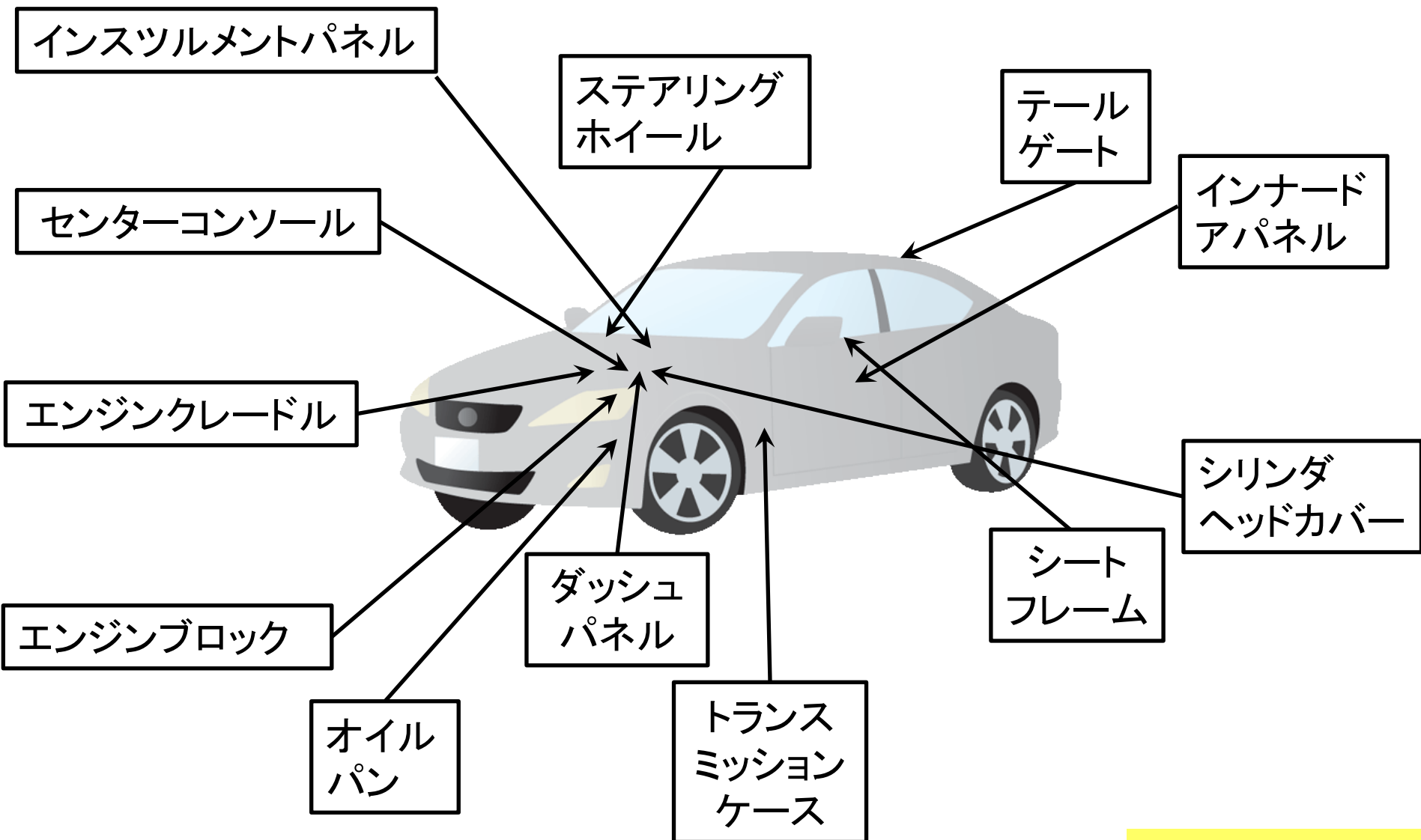
次世代自動車においても車両軽量化は重要課題

栗山ら:自動車技術 64-11 (2011)10.

マグネシウムの特徴

- ・ 周期律表2族の軽元素、原子番号12、**比重 1.74kg/m^3**
- ・ 自然界に豊富(地殻:21 g/kg, 海水:1.3 g/L)、動植物の生命維持に必要(ヒト:0.47 g/kg)
- ・ **軽量(Feの1/4、Alの2/3の比重)**
- ・ **比強度、曲げ剛性がAl、Tiと同等レベル**
- ・ ダイカスト法による薄肉複雑形状品の成形、塑性加工が可能
- ・ リサイクルが可能
- ・ 高純度Mg-Al合金の適度な機械的特性・耐食性
- ・ 優れた**耐くぼみ性、振動吸収性、快切削性、熱伝導性・放熱性**

自動車用マグネシウム部品の使用例



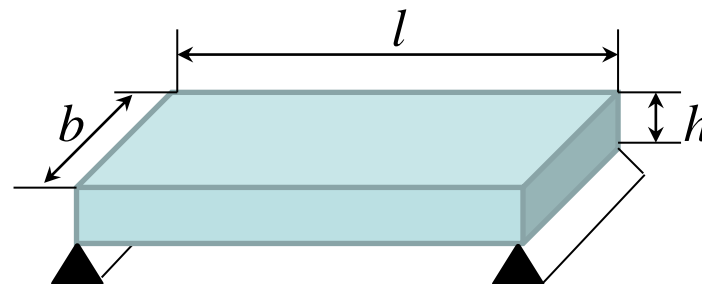
いずれも鋳造材

さらに具体的な使用例は以下のURLを参照ください。
 (URL下部PDFファイル参照) <http://www.magnesium.or.jp/a-yoto.html>

曲げ剛性について

M.F. Ashby: Materials selection in material design 2nd ed. (1999)

幅: b , 厚み: h 長さ l であり、端部が固定されていない矩形はりに、特定の力 (F) が印加され、 δ たわんだ系の剛性 (S) を考慮。



$$S = \frac{F}{\delta} = \frac{C_1 EI}{l^3} \quad (1) \text{式}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2) \text{式}$$

C_1 : 荷重分布に依存する定数
 E : ヤング率
 I : 断面2次モーメント
 ρ : 素材密度

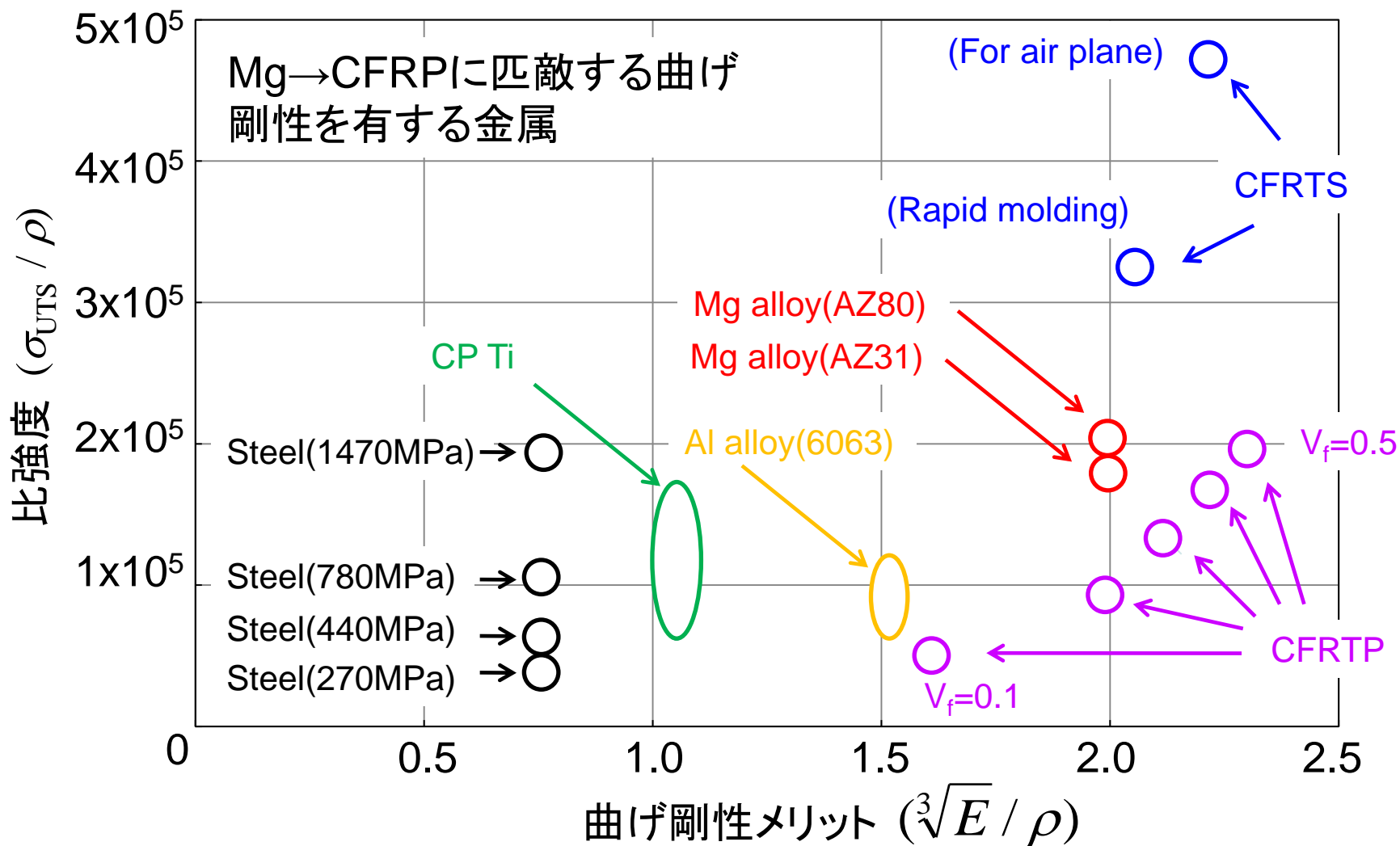
材料に要求される剛性、製品形状 (幅: b , 長さ l) が要求値として固定される場合、材料は(3)式で示される重量 (m) よりも重い必要がある。

$$m = blh\rho = \frac{12S}{C_1} b^2 l^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \quad (3) \text{式}$$

$$M_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

M_1 大 \rightarrow 必要な剛性を有し、かつ軽量な材料

各種金属&CFRPの比強度－曲げ剛性メリット

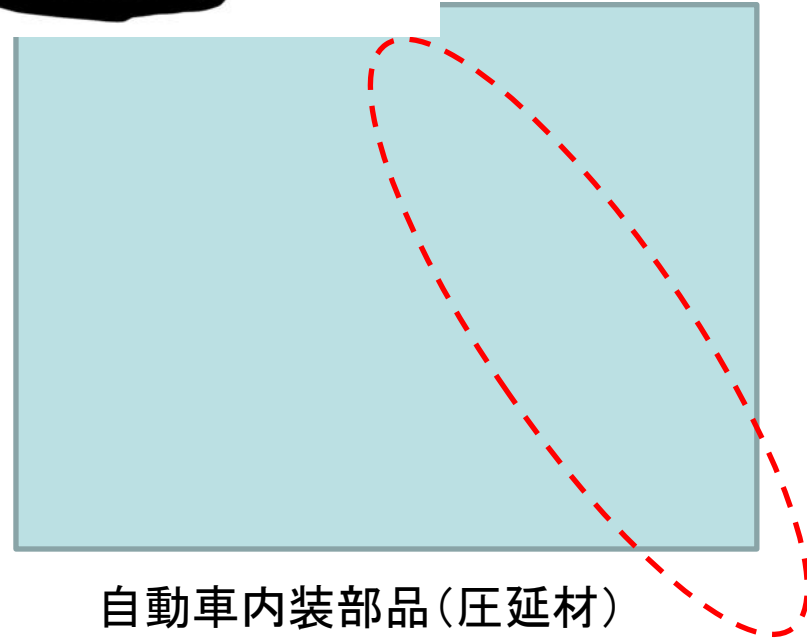


出典：高橋淳：自動車工業 2006年03月号, アルミニウムハンドブック(1990), マグネシウム加工技術(2004), チタンの基礎と加工(2008)

自動車マグネシウム部品の使用例(展伸材)



ホイール(鍛造材)



自動車内装部品(圧延材)

検討段階

フロントアッパーコントロールアーム
(鍛造材)

マグネシウム, 40巻2号(2011).

展伸材(板)の適用事例はわずか

マグネシウム合金 → 最軽量実用金属 (1.8 g/cm³)

構造材需用: 0.2万トン(1996年) → 1.2万トン(2007年) → 0.8万トン(2010年)



自動車部品



家電筐体



スポーツ用品


铸造品
(90%以上)



Al圧延板材国内需要: 126万トン (全需用の32% :2010年)

Mg圧延材 **比強度、薄肉化、寸法精度、歩留まり**

Mg圧延材の用途: 限定的




ノートPC
筐体・基板



携帯端末筐体



海水電池



音響機器
(スピーカ
振動板、
ケーブル)

弱点: コスト・成形性・耐食性

各種構造材料の価格比較(円/kg)

材料	原材料	板
Mg合金板	250 (Mg地金)	4,000~5,000 (AZ31合金)
ステンレス板	-	350~400 (SUS304)
Al合金板	250 (Al地金)	700 (1000系合金) 700 (5052合金) 600 (6063合金)
Ti板	1000 (Tiスポンジ)	3500 (純Ti) 5000 (Ti合金)
CFRP	3,000 (炭素繊維)	10,000 (CFRTS)



Mg合金地金



Mg合金圧延板

出展: 鉄鋼新聞, マグネシウム協会資料, 経済産業省非鉄金属課資料(2006), 日経ビジネスオンライン(2010/11/19)

Mg合金のコスト高 ⇔ 圧延材の少ない需要

高コストでも魅力的な特性

国内企業のマグネシウム合金圧延設備

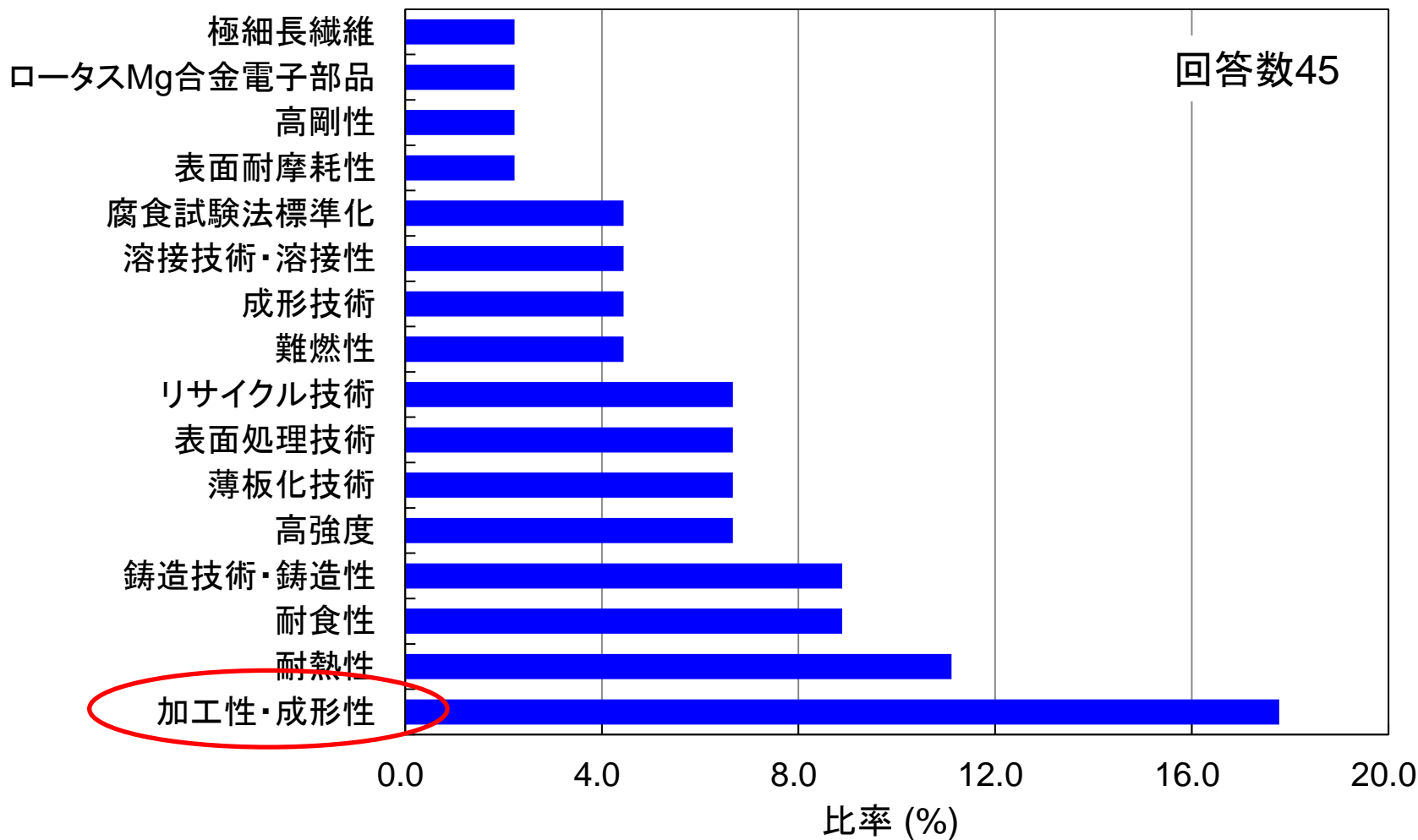
(2011年05月現在)

	製造方法	企業数	合金種	板厚 (mm)	板幅 (mm)
1	温間圧延	4	AZ31, AZ61, AM60	0.04~3.0	150~600
2	溶湯圧延	1	AZ61	0.5~2.0	600
3	独自技術	1	AZ91	0.6	—

マグネシウム協会資料 (第12回マグネ成形セミナー資料)

国内マグネシウム圧延産業 → 萌芽期

Mg材料に対する特性改善ニーズ



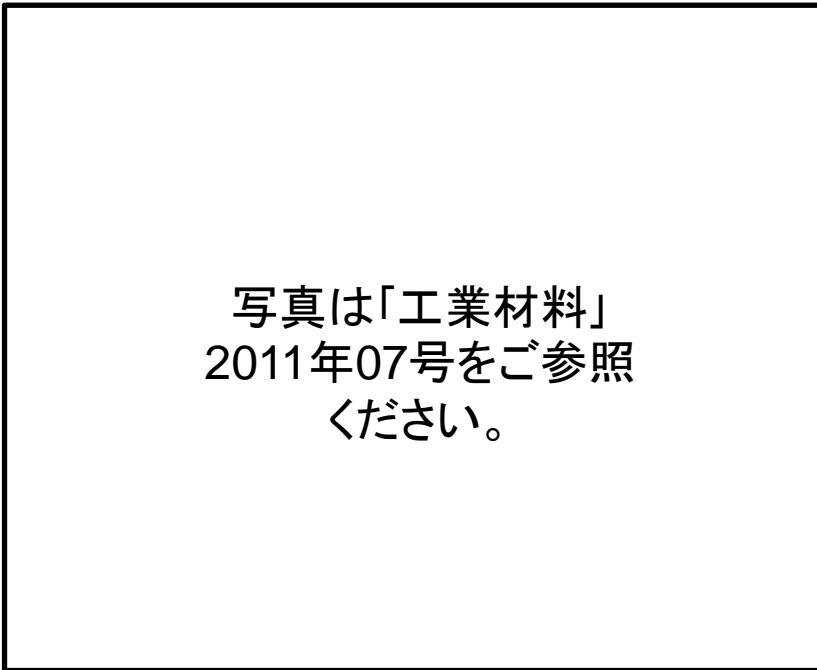
需要増大のキーテクノロジー



室温プレス可能な板材の創製

余談：韓国における広幅圧延材開発

小原久：工業材料 2011年07月号



写真は「工業材料」
2011年07号をご参照
ください。

図 RIST(POSCO社の付属研究所)で試験中の鋳造圧延
(コイル寸法： 2m幅×2.5m径、約16トン)

余談：韓国におけるWPM(World Premium Materials)事業

2010/10/08 (東洋経済日報WEB版)

<韓国経済>10大核心素材WPM事業団・各企業代表参加のもと出帆

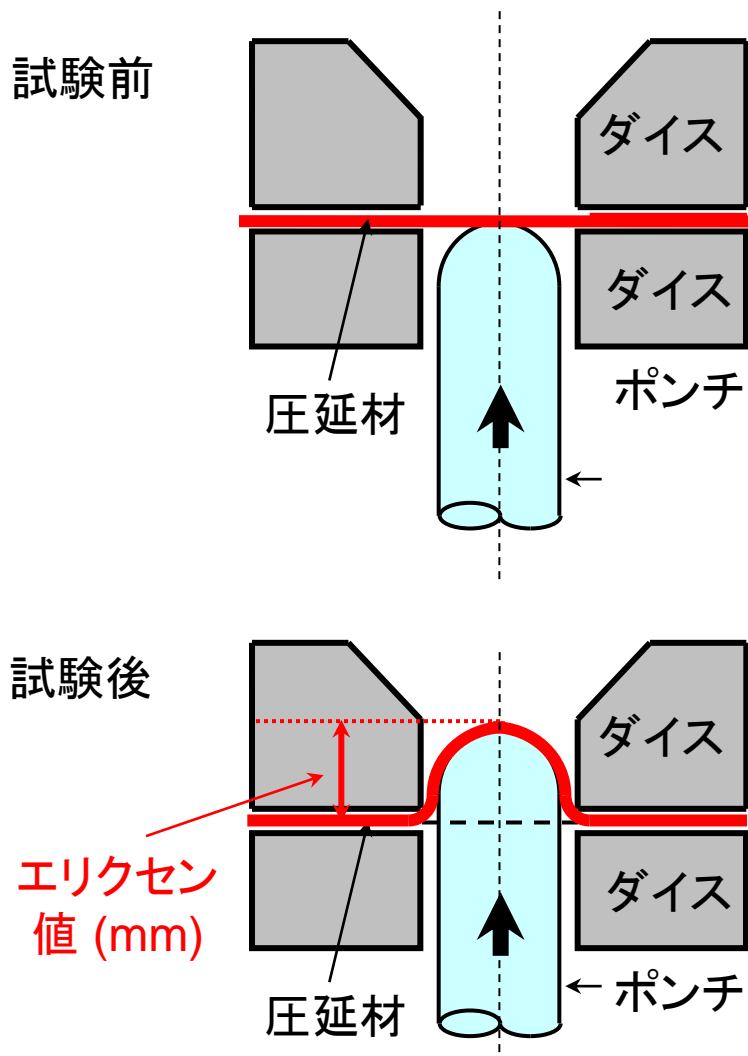
WPM事業とは、韓国が世界で初めて商用化及び持続的な市場支配力を持つ世界最高水準の10大核心素材を開発し、2018年までに40兆ウォン(2.8兆円)の売上達成をめざすプロジェクト。(ポスコは約1.1兆ウォン(約80億円)をマグネシウム関連に投資)

WPM事業に採択された10大核心素材

(1)親環境スマート表面処理鋼板(統括企業ポスコ)、(2)輸送機器用の超軽量マグネシウム素材(ポスコ)、(3)エネルギー節減・変換用の多機能性ナノ複合素材(LG化学)、(4)多機能性高分子メンブレン素材(コーロンFM)、(5)フレキシブル・ディスプレイ用プラスチック基板素材(第一毛織)、(6)高エネルギー二次電池用電極素材(サムスンSDI)、(7)バイオメディカル素材(アミノロジクス)、(8)超高純度シリコンカーボン素材(LGイノテック)、(9)LED(発光ダイオード)用サファイア結晶素材(サファイアテクノロジー)、(10)炭素低減型ケトン系プレミアム繊維(暁星)

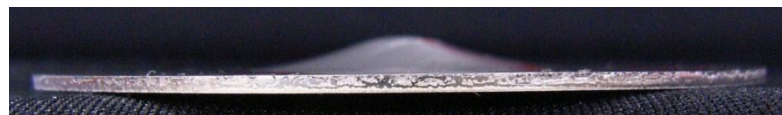
マグネシウム合金圧延材とアルミニウム合金圧延材の室温成形性

エリクセン試験(張出し成形試験)



市販Mg合金圧延材 (AZ31合金)

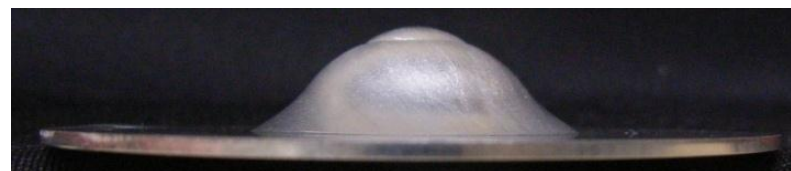
エリクセン値: 3.4 mm



エリクセン値: 2.5~4.5

市販Al合金圧延材 (1070合金)

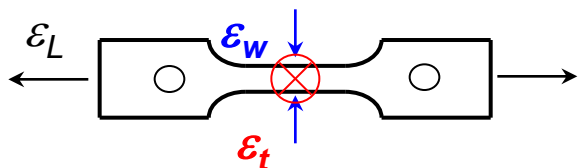
エリクセン値: 9.3 mm



エリクセン値: 8.0~12.0

20 mm

Lankford値 (r値) = 幅方向歪み(ϵ_w) / 厚み方向歪み (ϵ_t)



高いr値→プレス成形時に板が薄くなりにくい。
(高いr値 → 深絞り性に優れる)

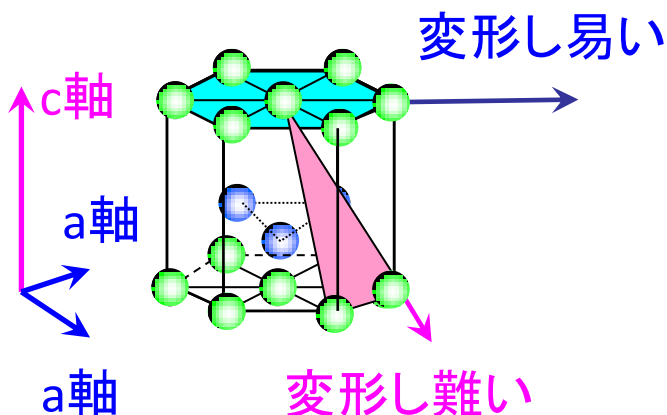
Table 各種金属のn値とr値

材料	n値	r値
ステンレス鋼(SUS304)	0.45	1.0
アルミニウム合金(A1100)	0.25	0.80
アルミニウム合金(A3004)	0.17	0.94
アルミニウム合金(A5052)	0.18	0.84
純チタン (JIS 1種)	0.15	1.38
マグネシウム合金(AZ31)	0.15	4.20

マグネシウム合金圧延材は薄くなりにくい材料

菅又ら: 塑性と加工41(2000)233.
砂田久吉: 演習・材料試験入門

マグネシウムの室温結晶塑性(左)と圧延集合組織の形成メカニズム(右)



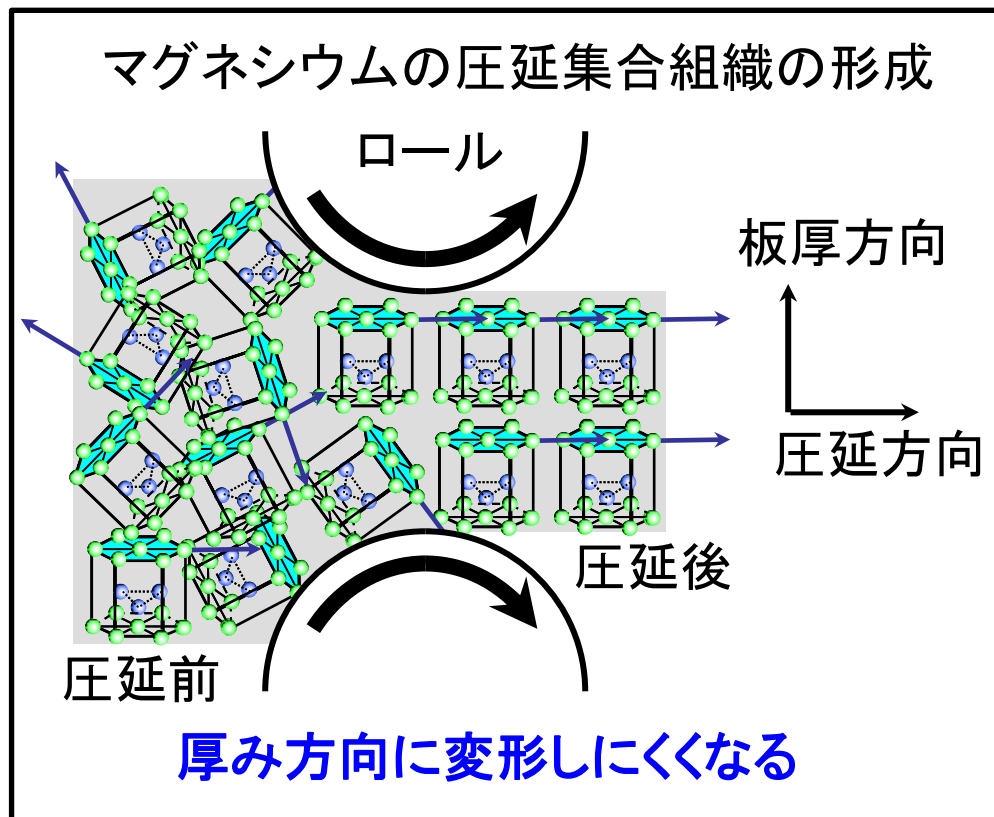
Mgの臨界分解せん断応力 (常温)

底面すべり

0.7 MPa

錐面すべり

8 MPa

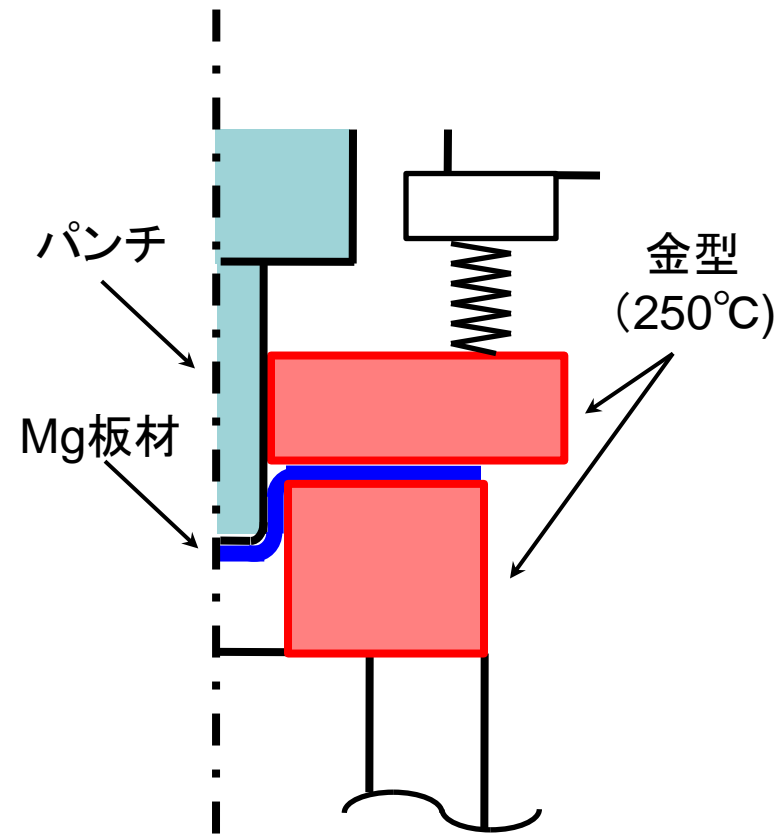
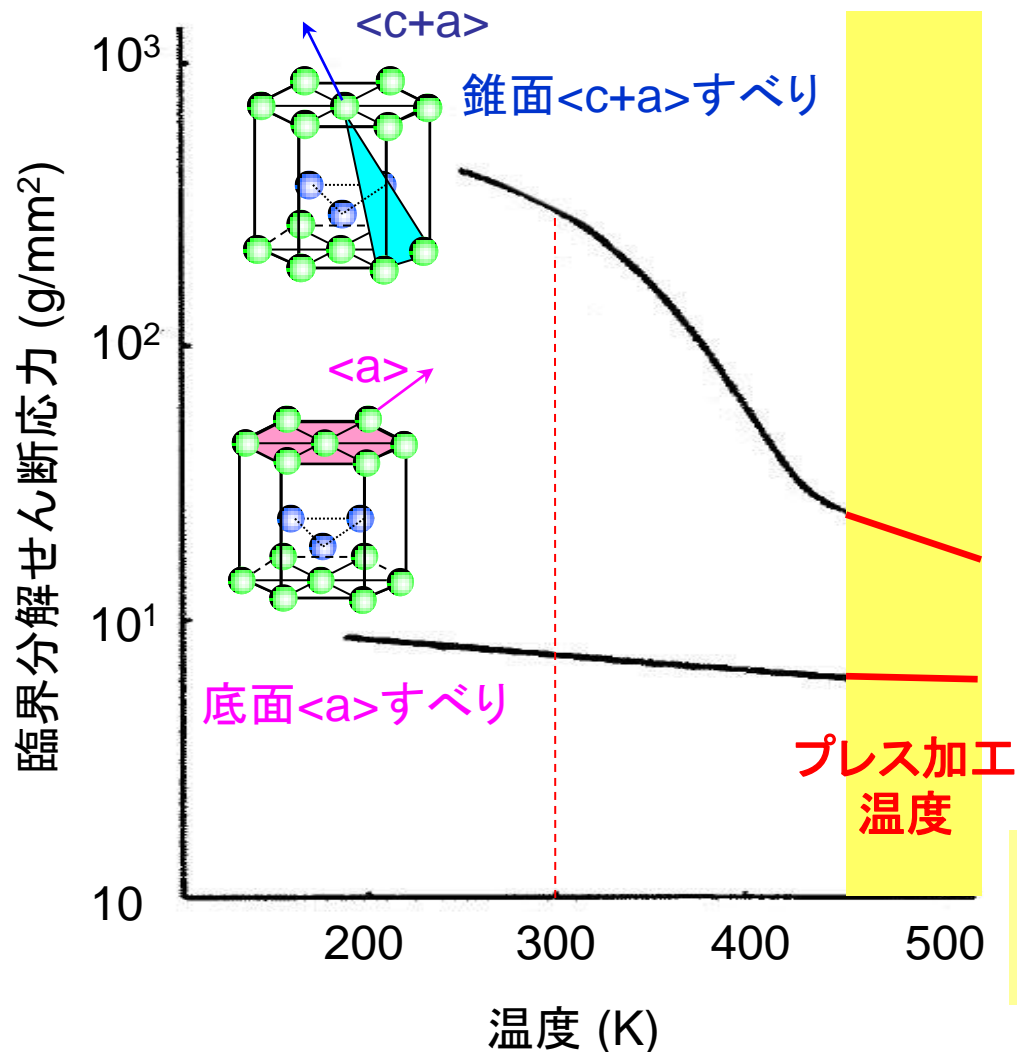


マグネシウム合金圧延材の板厚歪み促進のための手段

- ① $\langle c \rangle$ すべり($\langle c+a \rangle$ すべり)の活動を活性化
- ② 集合組織形成の抑制

マグネシウム合金圧延材の板厚歪み促進のための手段

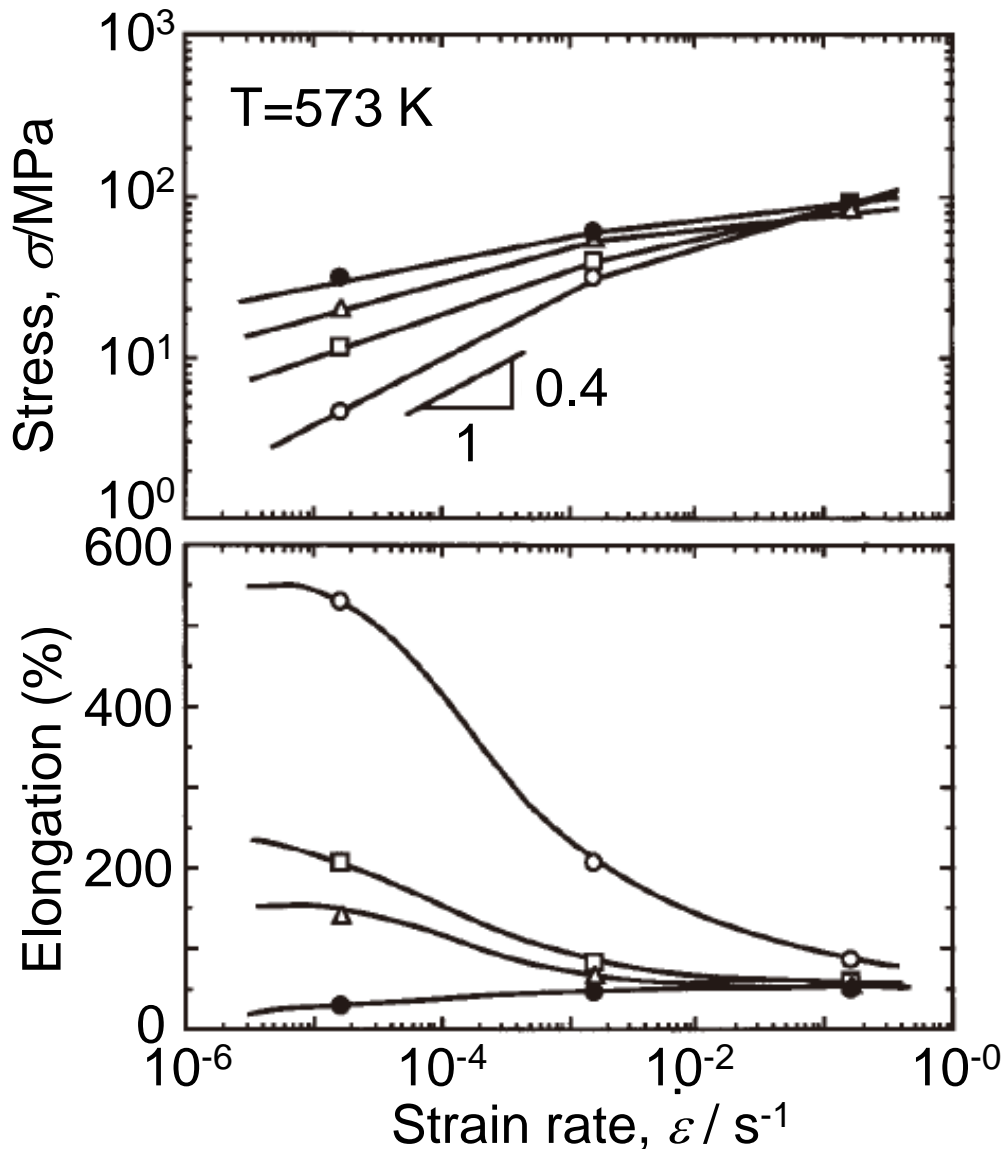
① $\langle c+a \rangle$すべりの活動促進



金型を250~350°Cに加熱した上で成形

AZ31合金の高温引張り試験結果

M.Mabuchi *et al.*, Mater. Trans. **44**(2003)490.

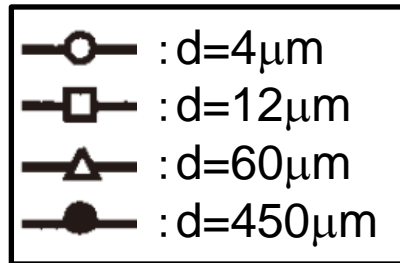


室温でのAZ31の延性
→15~20%

微細結晶粒 (<5 μm)
573K→200%以上の延性
($\dot{\epsilon}=10^{-3} \sim 10^{-2} s^{-1}$)



これまでのMg板材開発
→微細結晶粒付与
(温間圧延が主流)



Mg合金展伸材(圧延材)の適用例

→ いずれも温間プレス成形により作製

PC筐体



キーボード基板



- 問題点: 多段成形が困難(複雑形状付与が困難)
- 大型部材の作製が困難(熱膨張を考慮した金型設計困難)
- 金型設備への付加投資が必要

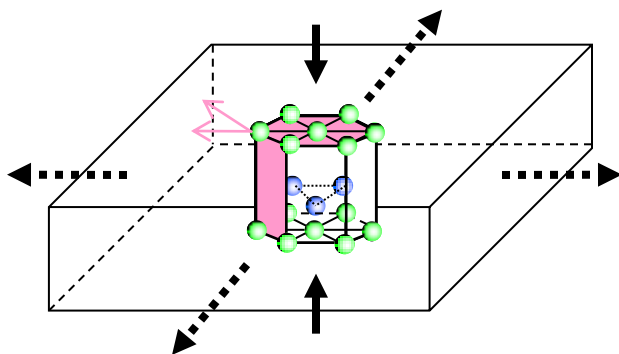


プレス成形体を大量生産するには冷間成形がベター

マグネシウム合金圧延材の板厚歪み促進のための手段

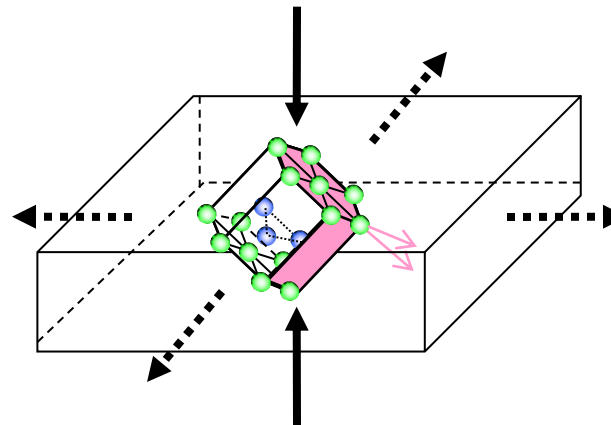
② 集合組織制御

集合組織制御無し



板幅歪み >> 板厚歪み

集合組織制御有り



板幅歪み ≈ 板厚歪み

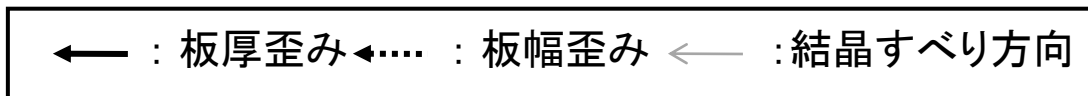
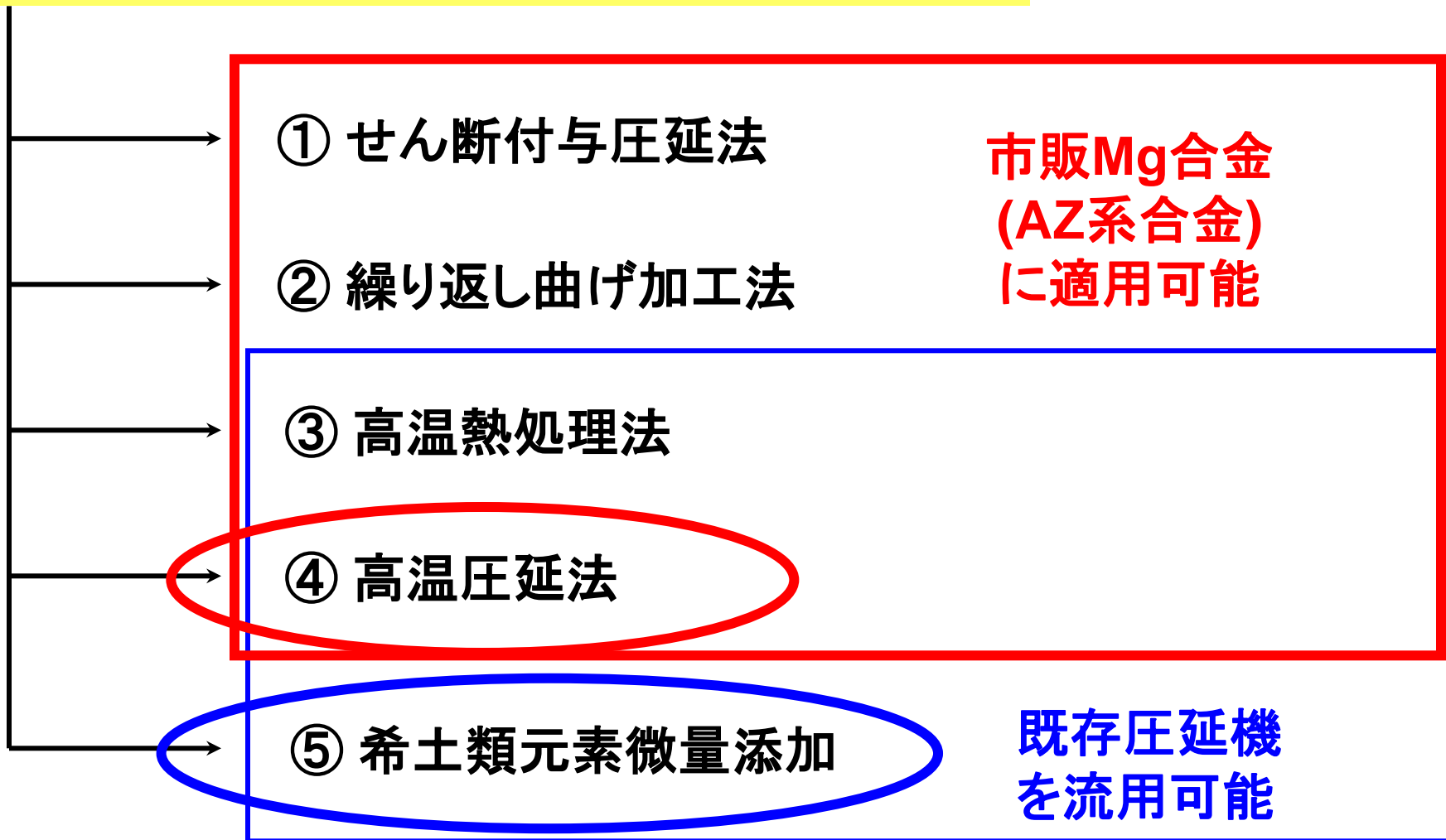


図 2軸引張り変形時の集合組織と成形性の関係

**底面<a>すべり & 柱面<a>すべりが厚み方向に寄与し易い、
集合組織を造りこめば、成形性は飛躍的に改善**

マグネシウム合金圧延材の集合組織制御法

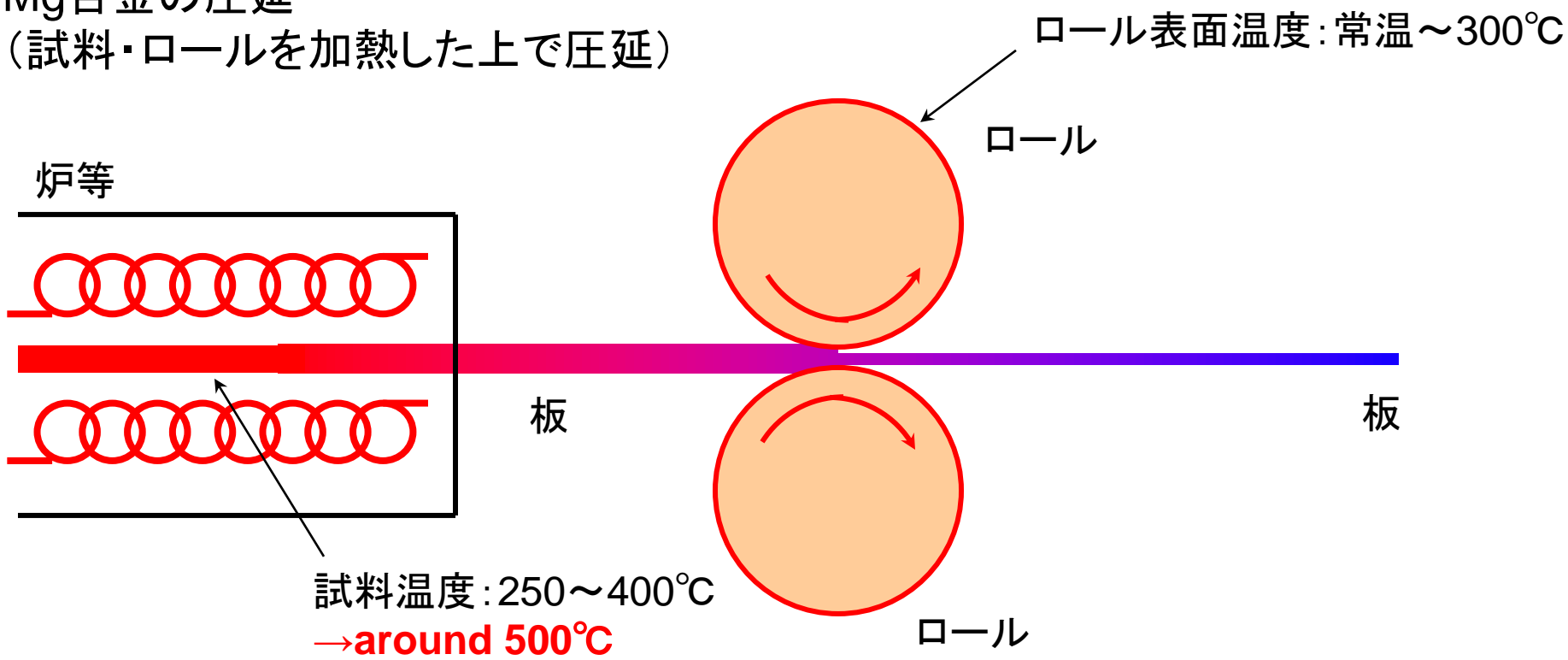


Mg合金常温成形性を改善するための新プロセス → 高温圧延法の適用

公知の圧延温度 250~400°C

従来の圧延温度よりも100°C高い温度で圧延 (AZ31固相線温度: 566°C)

Mg合金の圧延
(試料・ロールを加熱した上で圧延)

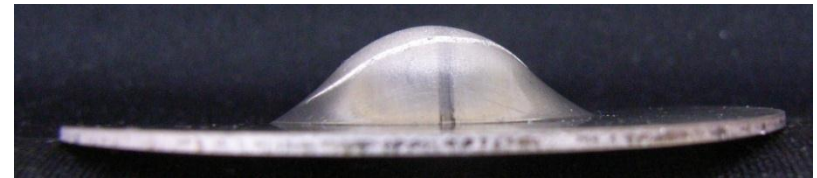
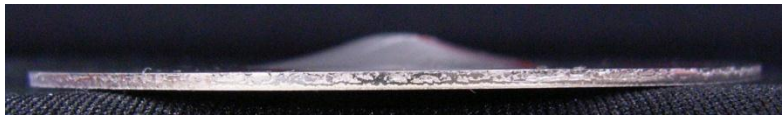


(京都大学大学院エネルギー科学研究科 馬淵守教授との共同開発)

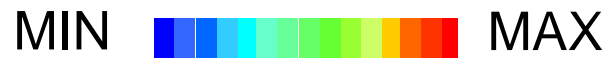
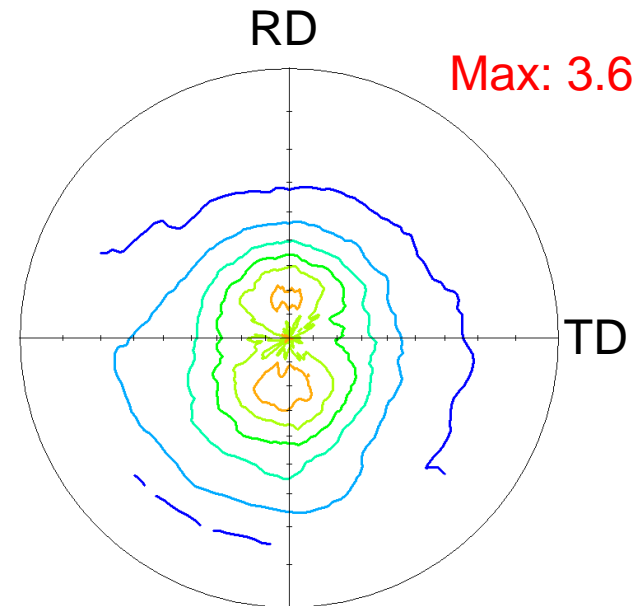
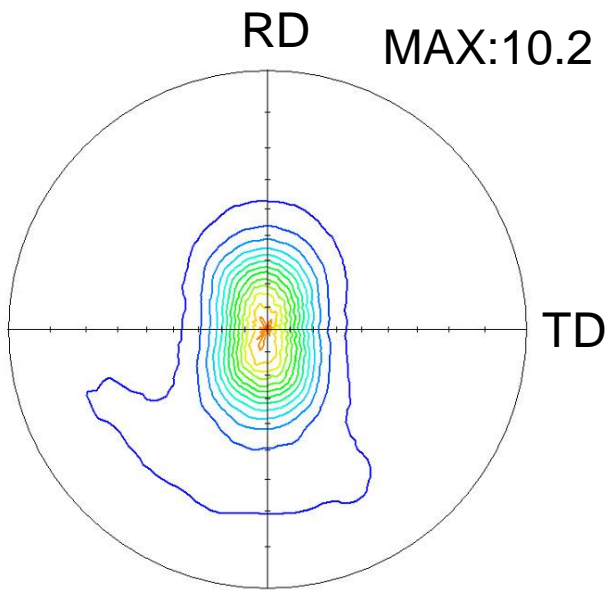
AZ31温間圧延材と高温圧延材の常温成形性及び底面集合組織

AZ31合金390°C圧延材 エリクセン値= 3.4

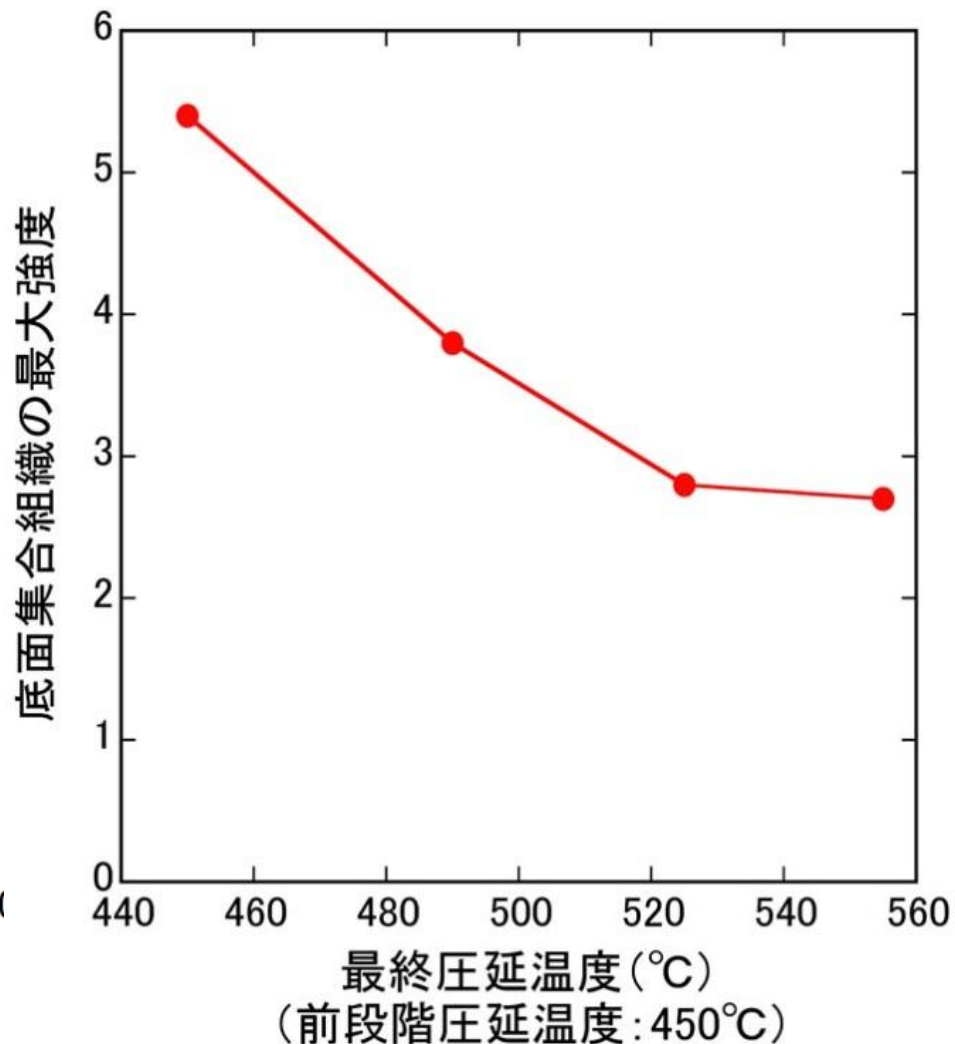
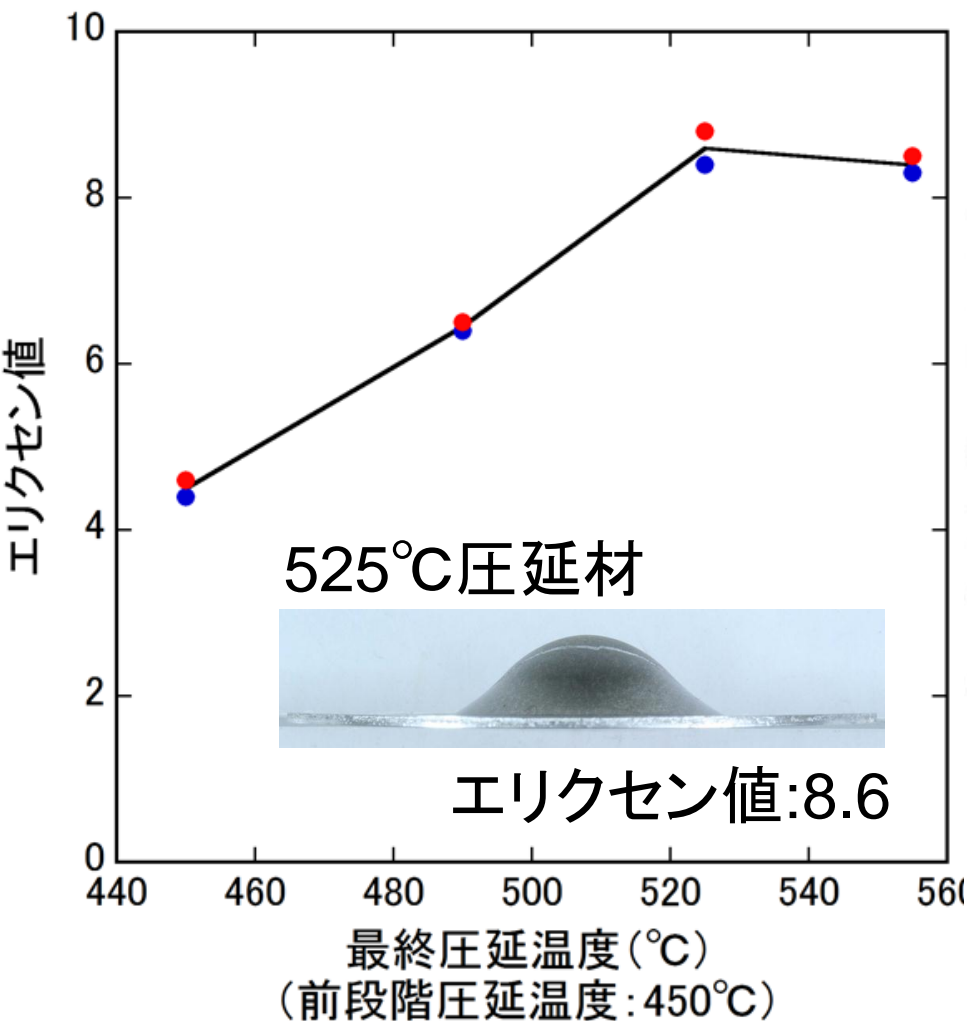
AZ31合金高温圧延材 エリクセン値= 8.8



Mg合金圧延材の底面集合組織



圧延温度上昇に伴う室温エリクセン値と底面集合組織強度の変化



X. Huang *et al.*: J. Alloy. Compd. **509** (2011) 7579.

異なる温度で圧延を行ったAZ31板材の室温引張り特性

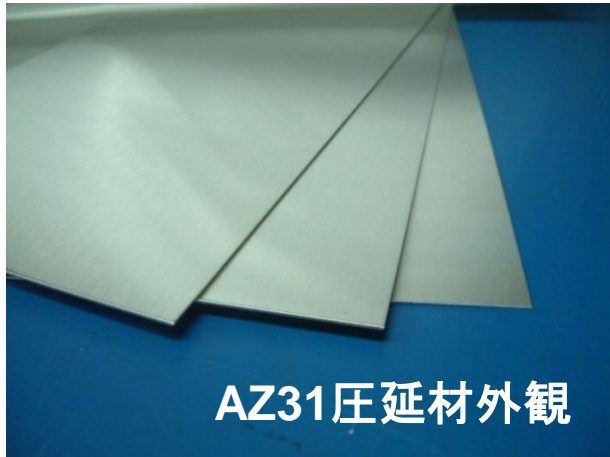
ロール 温度	引張り強度 (MPa)			降伏応力 (MPa)			破断伸び (%)			均一伸び (%)			r値			n値		
	RD	45°	TD	RD	45°	TD	RD	45°	TD	RD	45°	TD	RD	45°	TD	RD	45°	TD
723K	263	262	265	165	168	173	26	25	25	19	18	18	1.7	1.9	2.2	0.24	0.24	0.24
763K	258	259	262	151	155	161	27	27	26	20	20	19	1.4	1.5	1.7	0.27	0.27	0.25
798K	256	257	260	144	149	154	27	28	27	21	21	19	1.0	1.2	1.3	0.29	0.29	0.27
823K	256	257	260	144	148	154	28	28	27	22	21	19	1.0	1.1	1.2	0.30	0.29	0.27

723Kと798Kの伸びの差はわずか

r値の低下→板厚方向歪みの増加→室温成形性改善

X. Huang *et al.*: J. Alloy. Compd. **509** (2011) 7579.

日立金属(株)より幅30cm、厚み0.3~0.6mmのAZ31合金コイル材のサンプル出荷を開始



AZ31圧延材外観

室温円筒深絞り試験



500°C圧延品



250°C圧延品

LDR (blank径/ポンチ径)=1.7以上を達成
(ポンチ径: 40mm, blank径: 68mm)

室温エリクセン試験

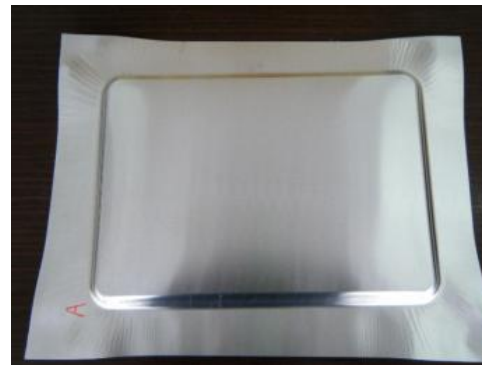
**500°C
圧延品**



**250°C
圧延品**



室温成形試験(B5ノート)



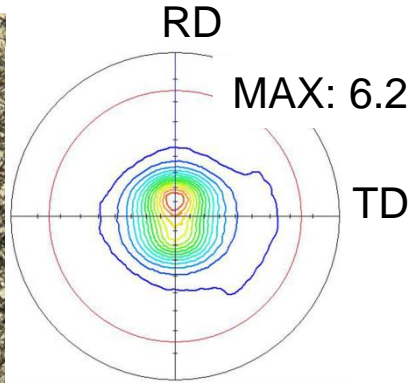
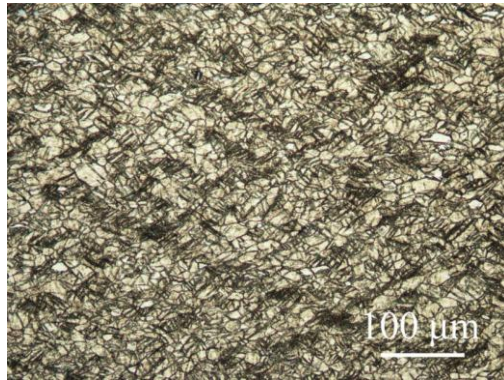
500°C圧延品



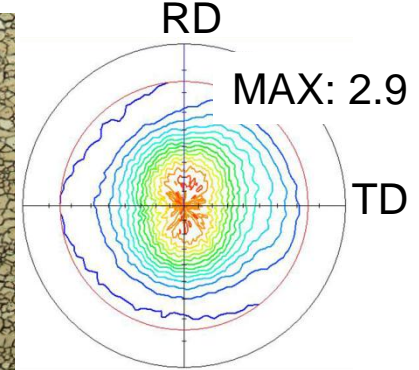
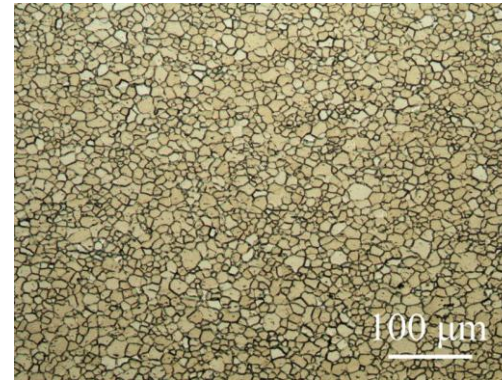
250°C圧延品

圧延材(焼鈍材)の組織と(0002)面集合組織

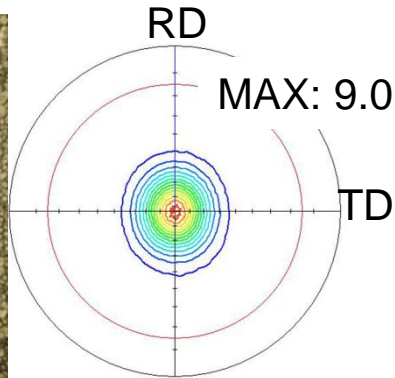
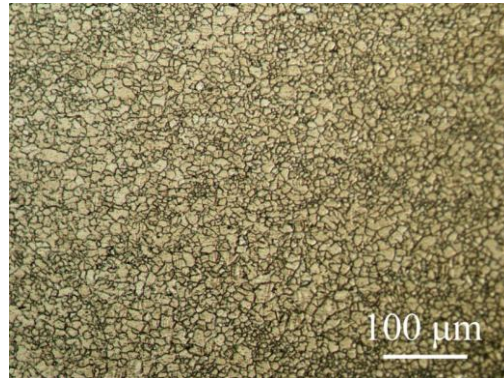
高温圧延材 (as-rolled)



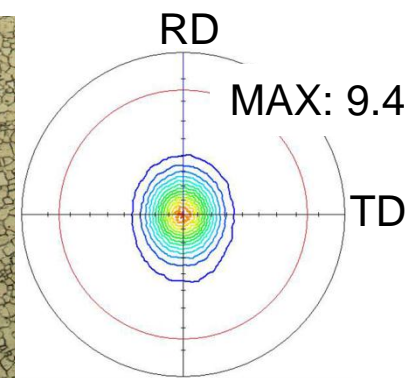
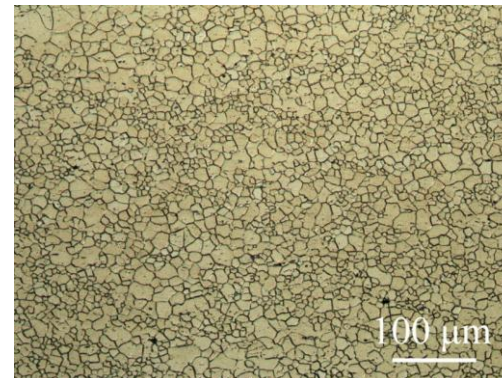
高温圧延材 (annealed)



比較材 (as-rolled)



比較材 (annealed)



高温圧延材→焼鈍に伴い結晶配向がランダム化

X. Huang *et al.*: J. Alloy. Compd. **509** (2011) 7579.

AZ31合金高温圧延材の焼鈍初期段階の再結晶挙動

HT前

HT後

450°C圧延材
(250°C2s)

底面配向を示す結晶粒が粒界近傍で生成

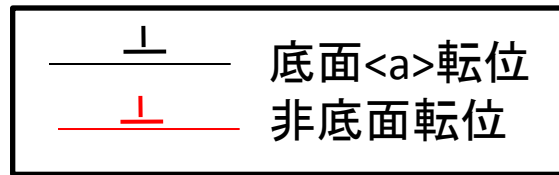
HT前

HT後

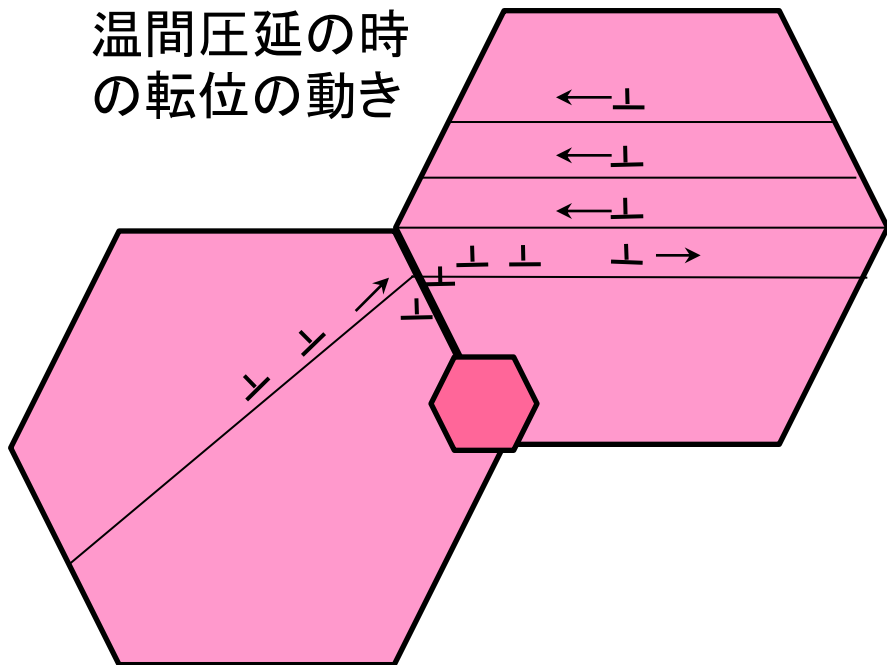
525°C圧延材
(300°C2s)

ランダムな方位を有する結晶粒が粒界近傍で生成

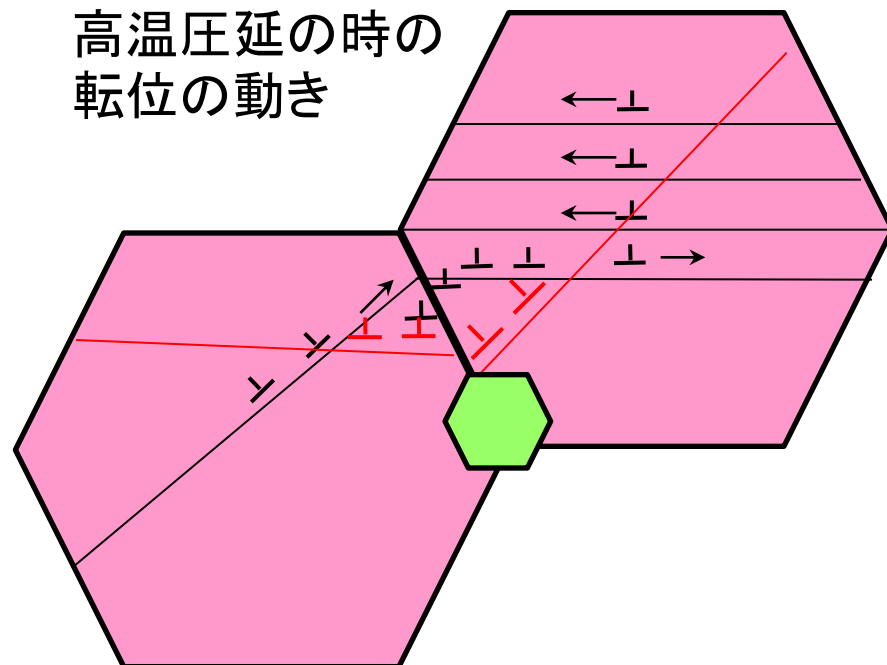
集合組織形成イメージ



温間圧延の時の転位の動き



高温圧延の時の転位の動き

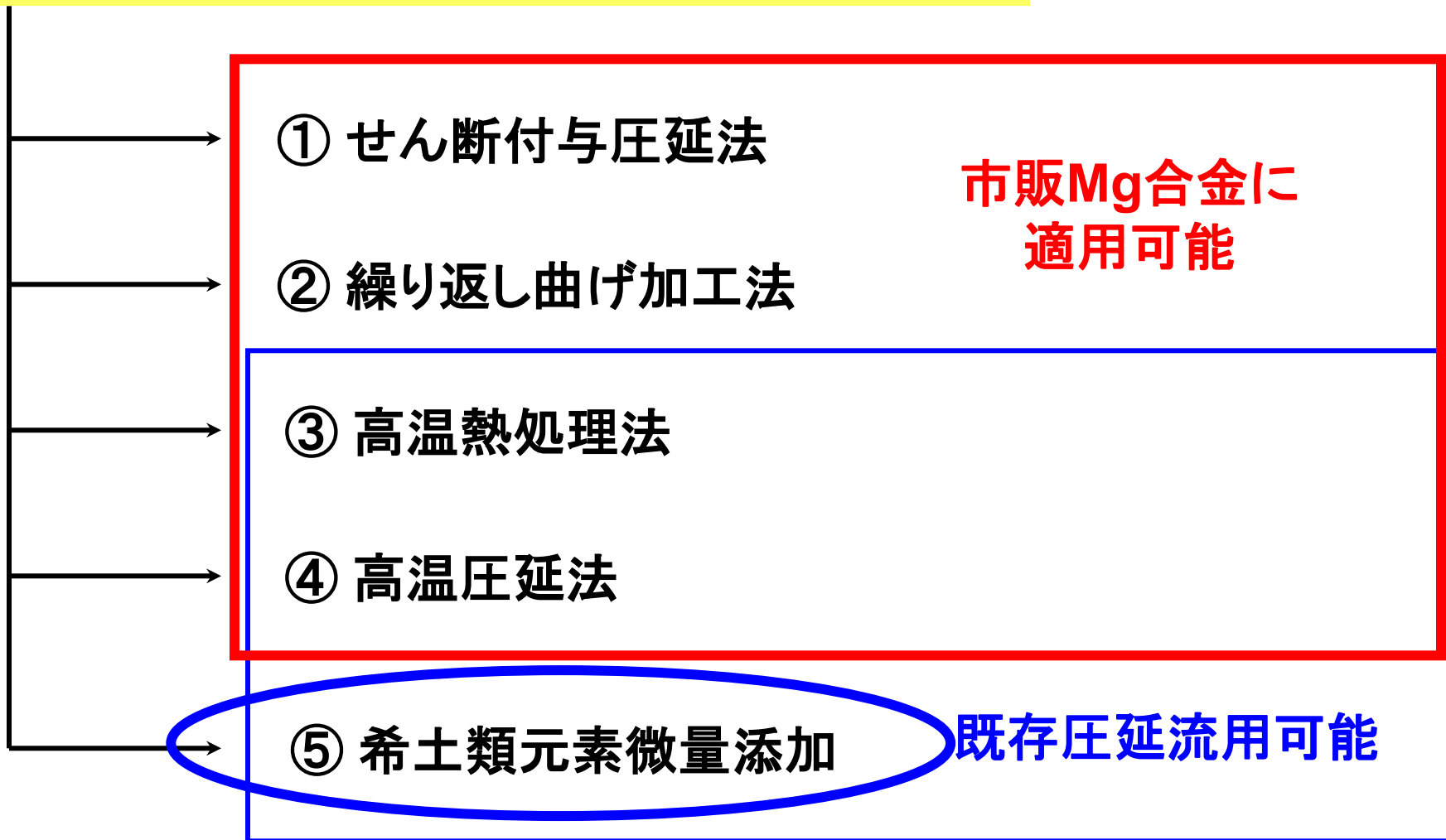


- ・結晶粒界に底面転位が高密度にpile-up
- ・母相と類似の方位を有する再結晶粒が粒界に生成

- ・試料を高温に加熱(非底面すべり系が活動)
- ・結晶粒界に非底面転位が高密度にpile-up
- ・母相とは異なる方位を有する再結晶粒が生成

高温圧延材の集合組織ランダム化は非底面転位の蓄積によるものと考えられる。

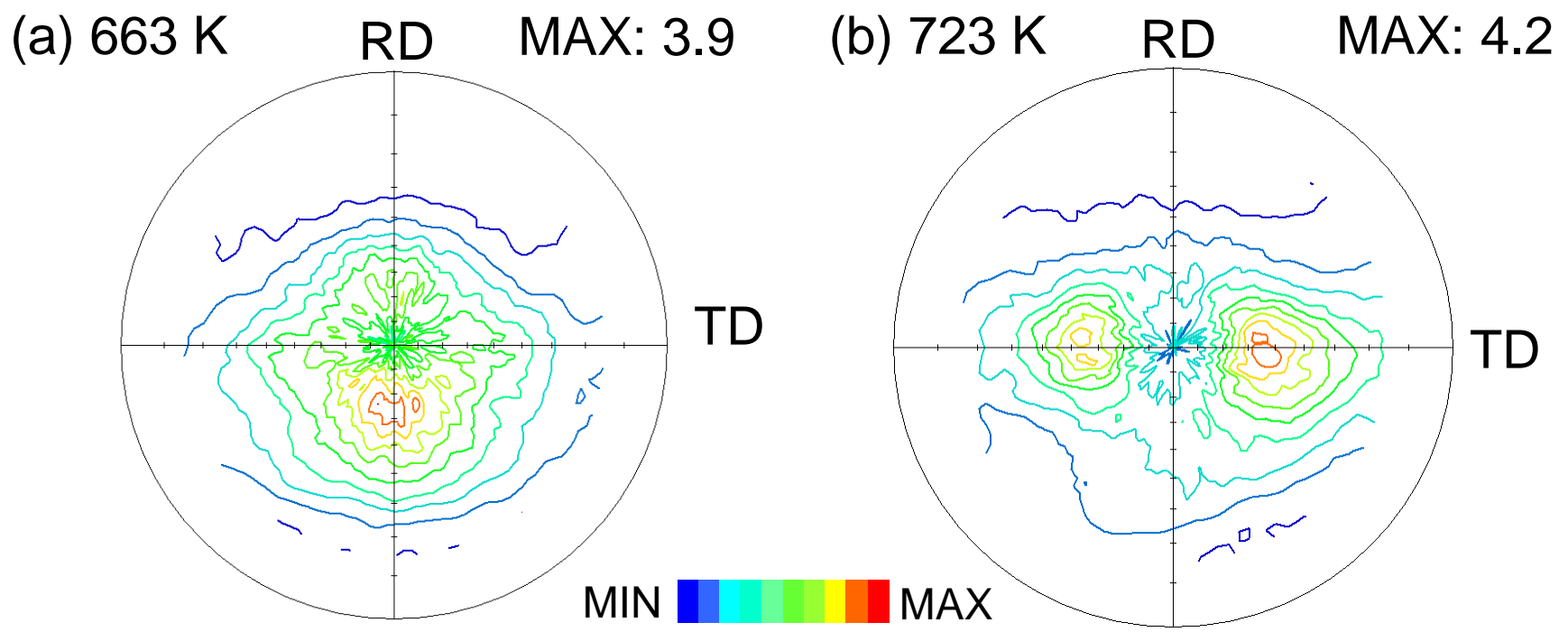
マグネシウム合金圧延材の集合組織制御法



⑤希土類元素微量添加による冷間成形性改善

Mg-Zn系合金への特定元素(Ce, Ca, Y etc...)→TD split textureの形成

熱処理後のMg-1.5wt%Zn-0.2wt%Ce合金 (0002)面集合組織

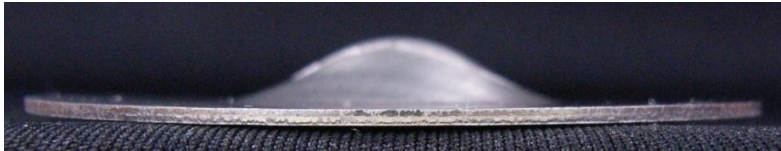


663 K圧延材: RD方向に約25° 傾いた位置に2つの極
 723 K圧延材: TD方向に約35° 傾いた位置に2つの極 (Zr, αTi)

Mg-1.5Zwt%-n-0.2wt%Ce合金のエリクセン試験 & コニカルカップ試験結果

663 K

IE=5.6



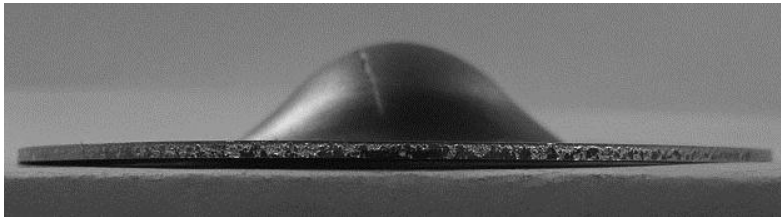
723 K

CCV=50.7



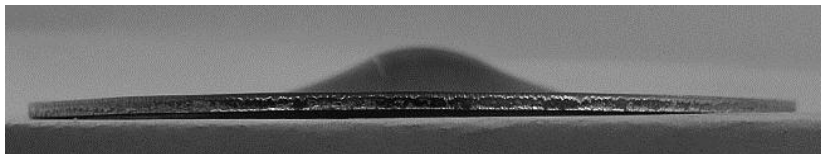
723 K

IE=9.0



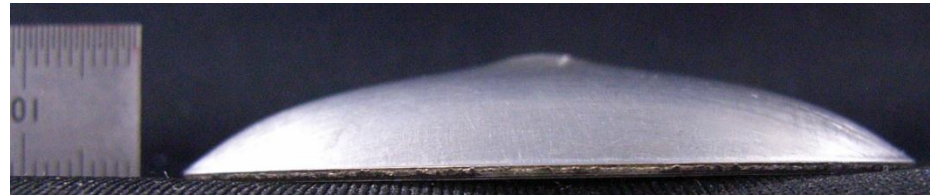
723 K (AZ31B-O)

IE=4.7



723 K (AZ31B-O)

CCV=57.3

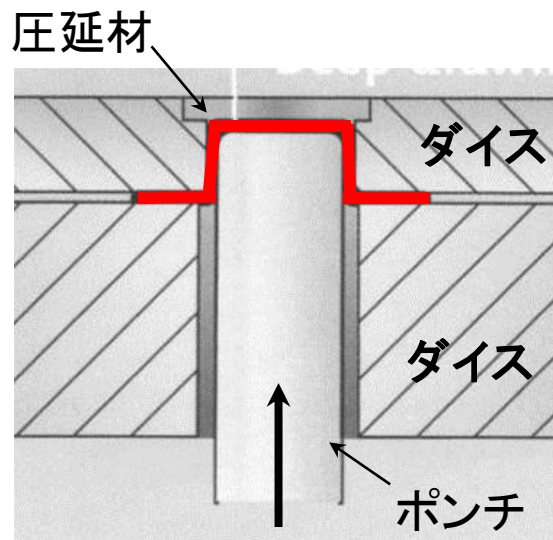


20 mm

Al alloy (3004-O) → IE = 9.2
(アルミニウムハンドブック)

Al alloy (3004-O) → CCV = 50.4
(アルミニウムハンドブック)

円筒深絞り成形試験

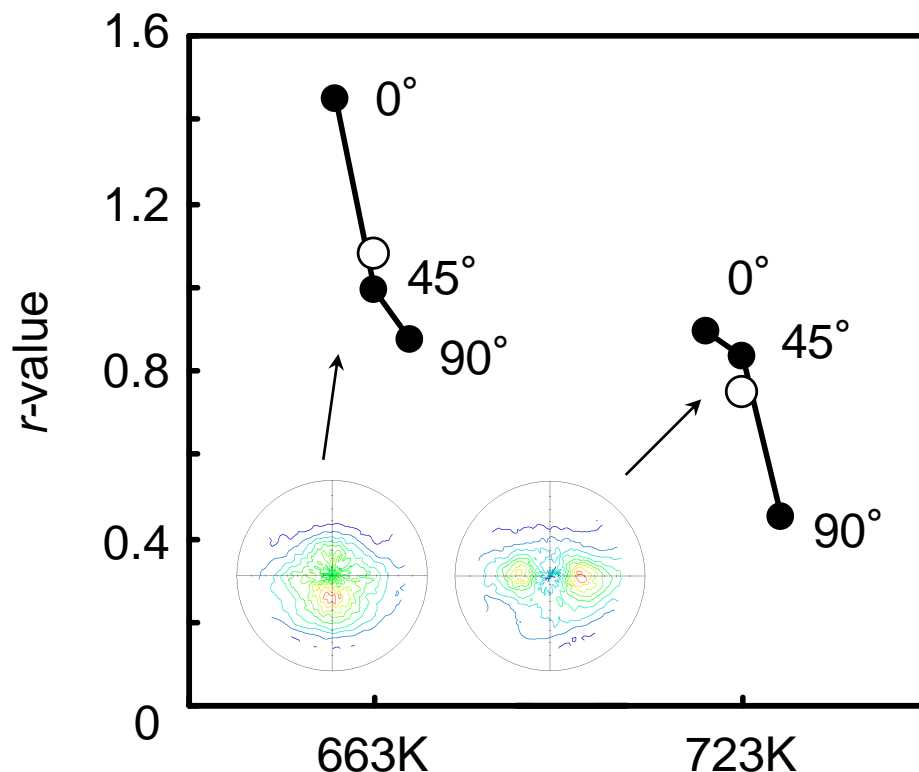


ブランク径: 59 mm
パンチ径: 33 mm
ブランク厚み: 1.0 mm

10 mm

限界深絞り比 (LDR=ブランク径÷パンチ径) : 1.8

参考: Mg合金(AZ31-O) → LDR= 1.5~1.7
Al合金 (5052-O) → LDR= 2.1
Al合金 (3004-O) → LDR= 2.2



● : *r*-value
○ : average *r*-value

r 値 = 幅方向歪み / 厚み方向歪み

Fig. *r* – values of the Mg-1.5Zn-0.2Ce alloys rolled at 663 K and 723 K and their average *r*- value.

723 K圧延材のr値は集合組織に連動して90度で著しく低い値を取る。

室温成形性改善の主な組織的因子 → TD-split textureの形成

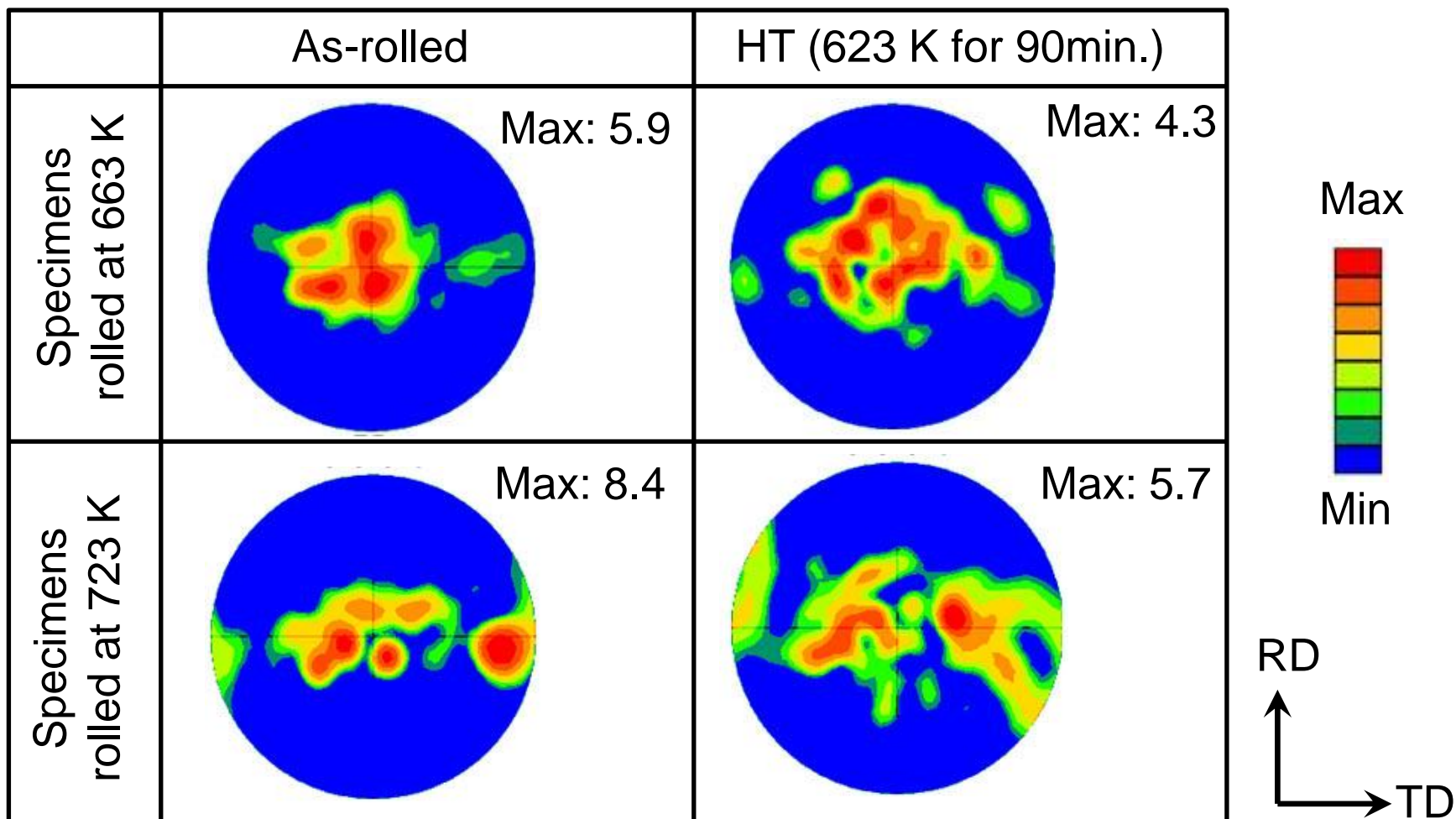
材料の機械的特性の比較

(機械的特性: 室温引張特性)

材料	引張方向	引張強度 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	破断伸び (%)
Mg-1.5Zn- 0.2Ce合金 (723K圧延)	RD	206	116	29
	45°	191	74	33
	TD	201	71	33
	平均	197	84	32
AZ31B合金 (723K圧延)	RD	299	187	25
	45°	241	157	22
	TD	241	167	20
	平均	256	167	22

課題: 強度と冷間成形性の同時アップ

Mg-1.5Zn-0.2Ce合金圧延材の焼鈍前後の(0002)面集合組織

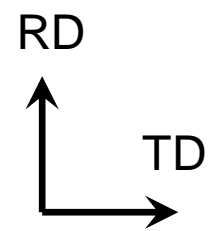
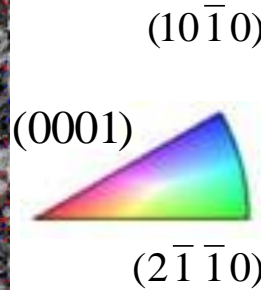
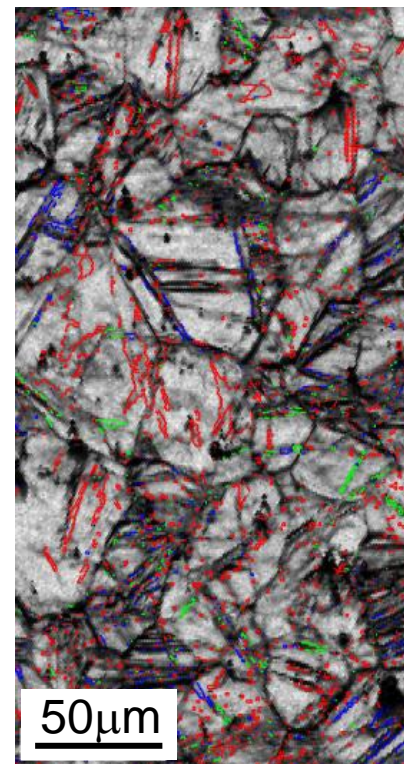
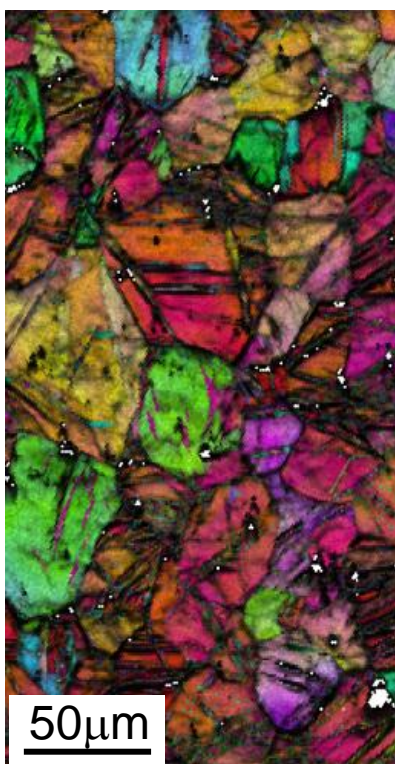
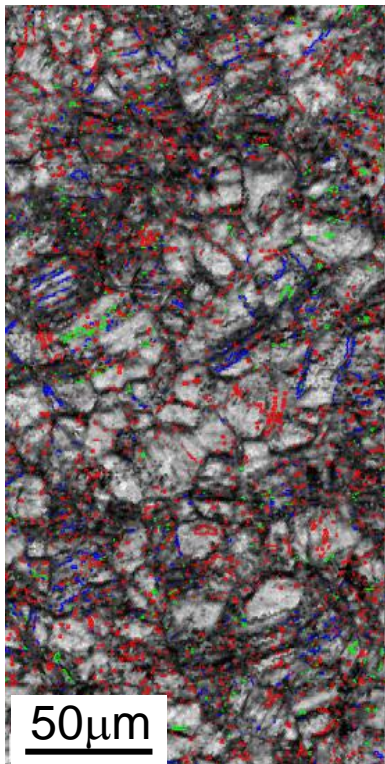
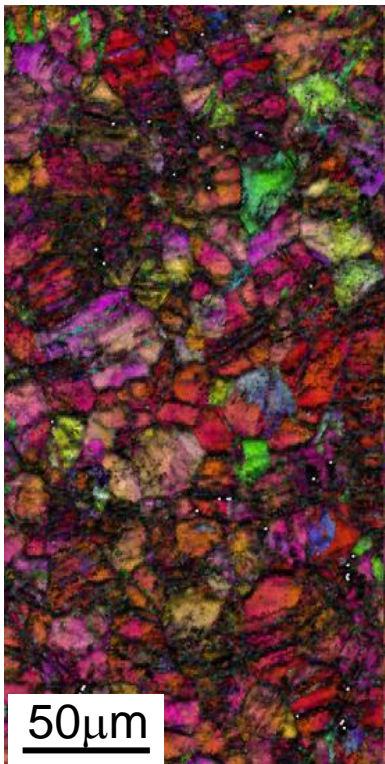


- ・TD-split textureを構成する組織は圧延中に形成される。
- ・TD-split textureは圧延後の焼鈍を経て顕在化する。

Mg-1.5Zn-0.2Ce合金as-rolled材の逆極点マップ及びImage qualityマップ

663 K圧延材

723K圧延材



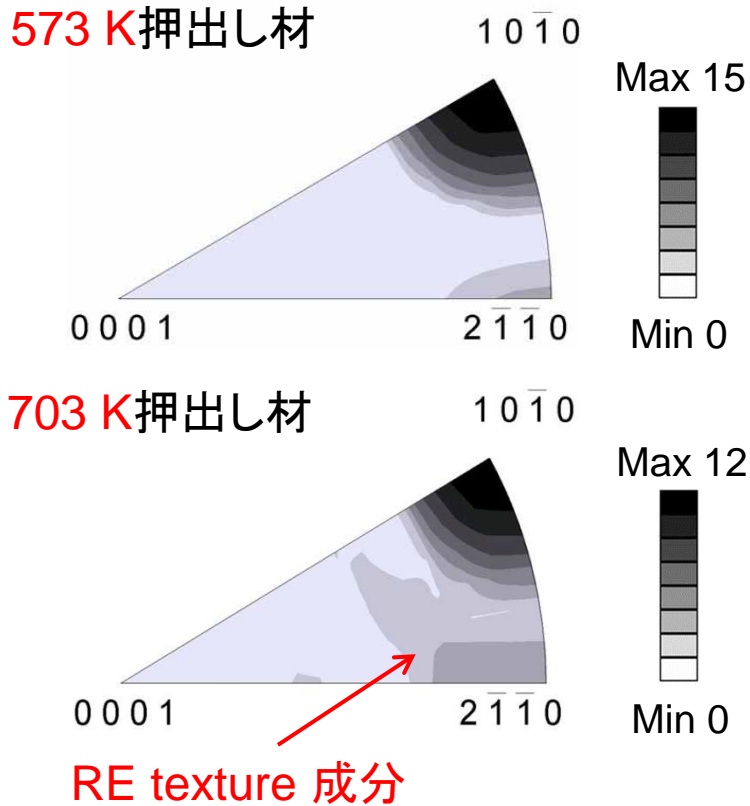
- {10-12} twin: 8.2%
- {10-11} twin: 1.3%
- {10-11}{10-12} twin: 2.2%

- {10-12} twin: 11.8%
- {10-11} twin: 1.6%
- {10-11}{10-12} twin: 2.7%

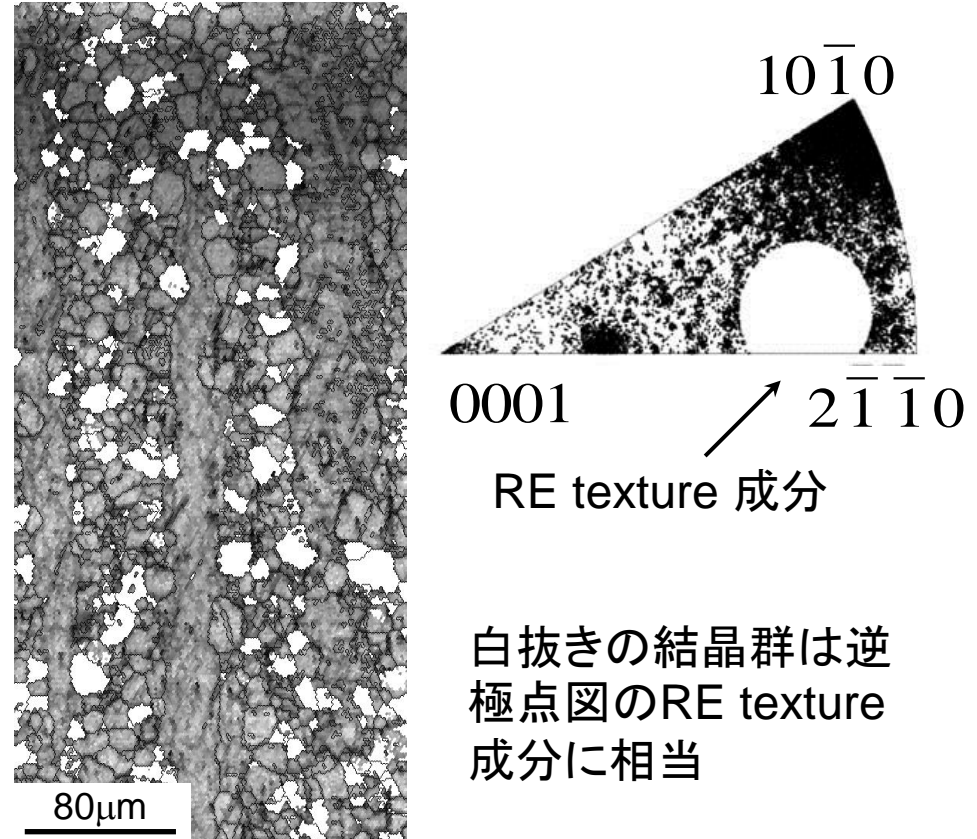
TD-split textureを構成する結晶群はすでに圧延中に形成

TD-split textureを構成する結晶群の生成メカニズム

Mg-1.5Zn-0.2Ce合金の逆極点図 (Ref: ED)



Mg-1.5Zn-0.2Ce合金押し出し材(703K)の IQマップと関連する逆極点図



・結晶粒界近傍における動的再結晶がRE-texture成分の起源

今後の課題

- 成形性 (IE=9.0) と強度 (Y.S \gg 100 MPa) の両立
- 塑性異方性の解消
- 圧延材を室温成形するための金型方案確立
- 高強度・高成形性・高腐食性・低コストの両立

想定される用途

- 放熱性、軽量性に優れた家電製品筐体
- デザイン性、軽量性に優れたスポーツ用品
- 環境に配慮した低燃費自動車