

Al-Mg合金板の延性挙動とその自動車部材への適用

燃費向上や排ガス低減による環境保護、および走行性能の向上を目的とした自動車の軽量化のため、自動車各部材のアルミ化が進められている。

すでに、エンジンやブレーキ関係では鋳造またはダイカストによるアルミ化が多くの部品で達成されているが、それに比べ圧延板の適用はかなり遅れていた。その理由の一つとして、従来の冷延鋼板に比べ、プレス成形性が劣ることにある。ここでは、成形性の評価指標の一つである延性に関し、特に高強度・高延性が達成できるAl-Mg合金の延性挙動について記述するとともに、その自動車パネル材への適用について紹介する。

Al-Mg合金の引張特性のMg濃度依存性

C-1

Al-Mg系合金の室温引張特性におよぼすMg濃度の影響を第1図と第2図に示す¹⁾。ここでは、各材料とも3種の熱処理条件(焼鈍)のものである。いずれの焼鈍材もMg濃度が約5%から8%に増加するにつれて、引張強さ(σ_B)、耐力($\sigma_{0.2}$)および均一伸び(δ_u :引張り時の最大荷重までの伸び)は同時に増加する挙動が示される。

一方、局部伸び(δ_l :最大荷重から破断までの伸び)は、Mg濃度ではほとんど変化せず、約3%とほぼ一定の値となり、この均一伸びと局部伸びを合わせた全伸びは、Mg濃度の増加とともに高くなることになる。

以上のようにAl-Mg合金は、そのMg含有量の増加とともに、強度が上昇すると同時に、延性、特に均一伸びが向上するという挙動を示す。

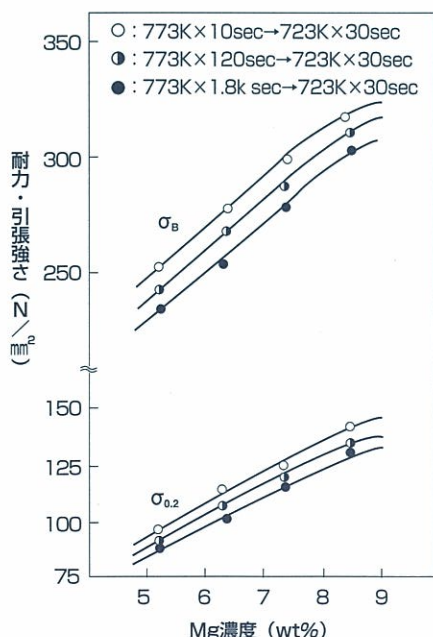
この変形過程を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した結果を写真1に示す。ここでは、結晶粒径の影響を考慮し、粒径がほぼ同じ(約50 μ m)であるAl-5%Mg合金とAl-8%Mg合金の5%引張変形を付与したものの組織を示すが、写真上、線状に見える転位の形態が異なっていることがわかる。

すなわち、Al-5%Mg合金では転位は一部セル状化しているが、Al-8%Mg合金ではこのセル組織が全く観察されず、転位が結晶粒内に均一にすべり変形し、分布している様子が認められる。

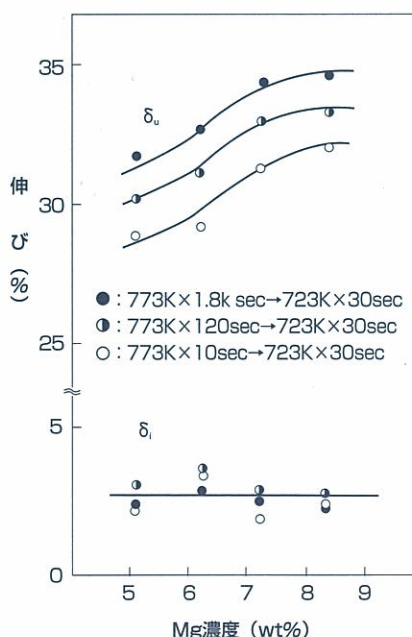
このようにMg濃度が高くなると変形中に生じる転位は、結晶粒内に均一に存在するようになり、転位を動かす応力が変形とともにより多く必要となることより、強度と延性の同時向上が起るものと考えられる。

以上の現象は、さらに詳しくは加工硬化指数n値(ひずみの増分に対する強度の増分の度合い)の大小で説明でき²⁾、またn値はひずみの増分に対する転位密度(転位の蓄積度)が増えると大きくなる。アルミニウムにおけるMgは固溶硬化(アルミニウム原子中にランダムに元素が固溶し、これが転位の動きを阻止し、強化

- 1) 柳川、大家、古賀、日野：神戸製鋼技報、Vol.42 No.1(1992) p.28
- 2) 柳川、大家：軽金属、Vol.41 (1991),No.2, p.119



第1図 Al-Mg合金の引張強度および耐力に及ぼすMg濃度の影響



第2図 Al-Mg合金の均一伸びおよび局部伸びに及ぼすMg濃度の影響

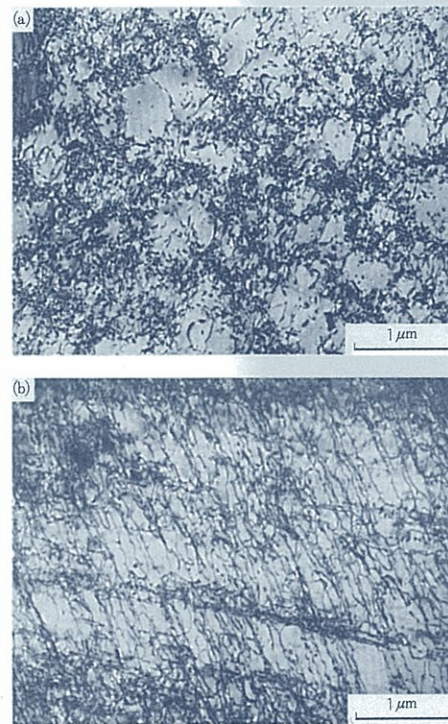
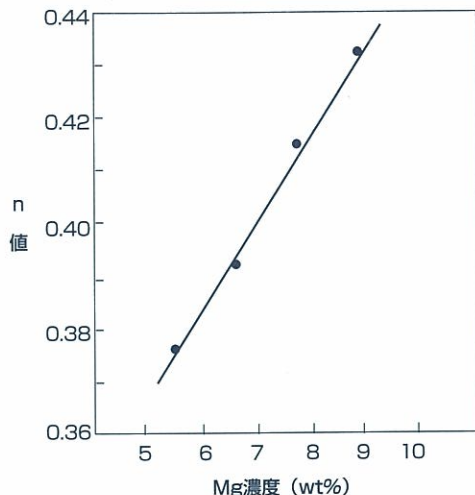


写真1 (a) Al-5%Mg合金、(b) Al-8%Mg合金を300kで5%引張変形したときのTEM観察による組織

3) 例えば、神尾：「アルミニウム新時代」工業調査会編（1993）



第3図 Al-Mg合金のMg濃度とn値との関係

に寄与する³⁾の効果をもたらす役目をする。Mgの含有量とこのn値の関係を第3図に示す。n値がMg濃度の増加とともに、ほぼ1次式の関係で増加することが認められる¹⁾。すなわち、Mg濃度が増加すればするほどn値は大きくなり、また変形中の転位密度も高くなり、先のTEM観察による組織の現象が説明できる。このようなn値と均一伸びや転位密度との関係などのさらに詳しい説明は、これまで引用してきた文献¹⁾²⁾や、参考書³⁾などを参考にされたい。

また一般にアルミニウムは室温以下の低温域においても強度、延性が同時に向上するが、これらの現象についても同様な転位の組織変化で起こることが確認されている¹⁾。

C-2

各種アルミニウム合金板の機械的性質とプレス成形性の比較

ここではまず、Al-Mg系合金板の機械的性質とプレス成形性を、他のアルミニウム合金および鋼板と比較する。

第1表に示す種々の組成を有するアルミニウム合金板(1mm厚)の機械的性質を鋼板と比較して第2表に示す⁴⁾。

A-1合金およびA-2合金は自動車パネルの内張りおよびアウトリー材などに用いられる、Mgを約4.5wt%含むアルミニウム合金である。A-3合金はJIS5052合金(Mg含有量は約2.5wt%)であり、キャンエンドをはじめ一般のプレス品用途に用いられている。A-4合金はAl-Mg-Si系の熱処理型合金であり、これも自動車パネル材として検討されている合金系である。A-5合金はカバー類などの比較的強度の要求されない自動車部品に用いられて

いる。

機械的性質のデータからアルミニウム合金中でもっとも強度、延性のバランスに優れる合金としてA-1、A-2のAl-Mg系合金があげられる。先に示したようにこれらは特に均一伸び、n値が高いのが特徴となっている。鋼板との比較をさらに分かりやすくするためその応力-ひずみ曲線を第4図⁴⁾に示す。アルミニウム合金板は軟鋼板と比較して均一伸びは高いが、最大荷重点を越えると急激に破断に至り、局部伸びは非常に小さい。このため結果として破断までの全伸びは小さくなっており、変形の局所化を生じた場合には、破断が生じやすいことが予想される。この点がアルミニウム合金板と軟鋼板との大きな差異である。これらの深絞り性(LDR; 限界絞り率)をn値およびr値(引

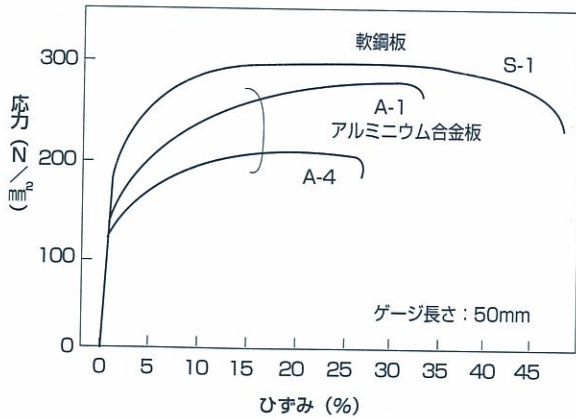
4) 森、日野、岩谷、宮原：神戸製鋼技報、Vol.42(1992), No.1, p.33

第1表 各種アルミニウム合金の化学成分 (wt%)

試験片		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A-1	Al-Mg	0.05	0.09	0.38	0.05	4.60	0.05	0.02	Re.
A-2		0.05	0.14	0.23	0.03	4.39	0.01	1.09	Re.
A-3		0.08	0.22	0.03	0.06	2.56	0.23	0.01	Re.
A-4	Al-Mg-Si	0.95	0.14	0.01	0.01	0.78	0.04	0.02	Re.
A-5	Al-Mg-Mn	0.13	0.58	0.12	1.02	0.57	0.01	0.02	Re.

第2表 各種アルミニウム合金の機械的性質

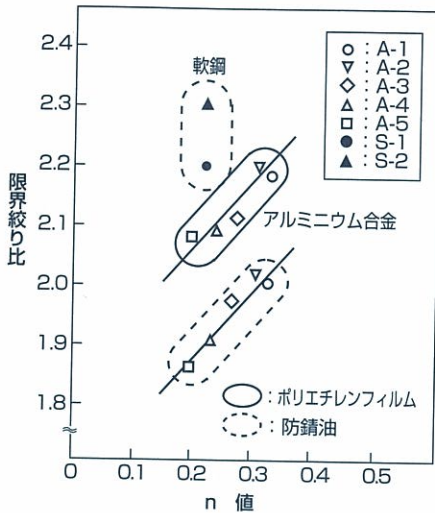
試験片	特性	引張強さ	耐力	全伸び%	均一伸び	局部伸び	n値	r値	
		N/mm ²	N/mm ²	GL50mm	%	%	(10/20%)	(20%)	
A-1	Al-Mg	T4	272	121	31.9	29.4	2.0	0.32	0.78
A-2		T6	287	139	30.2	27.1	3.1	0.31	0.79
A-3		O	207	97	25.9	23.2	2.7	0.26	0.64
A-4	Al-Mg-Si	T4	210	112	28.3	23.7	4.6	0.24	0.70
A-5	Al-Mg-Mn	O	201	56	29.0	23.9	5.1	0.20	0.70
S-1	軟鋼板	—	334	186	41.7	21.7	20.0	0.22	1.55
S-2		—	293	165	47.2	24.7	22.5	0.22	1.88



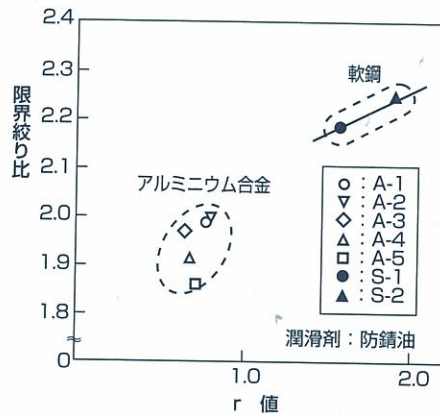
第4図 アルミニウム合金板および軟鋼板の応力-ひずみ曲線

張時の板幅ひずみと板厚ひずみの比)との関係と合わせ第5、6図⁴⁾に示す。アルミニウム合金板間の深絞り性では、Al-Mg系合金が最も良好な特性を示すが、同一成形条件下では鋼板よりは劣る。また、n値およびr値との相関については、全体的にはあまり認められない。

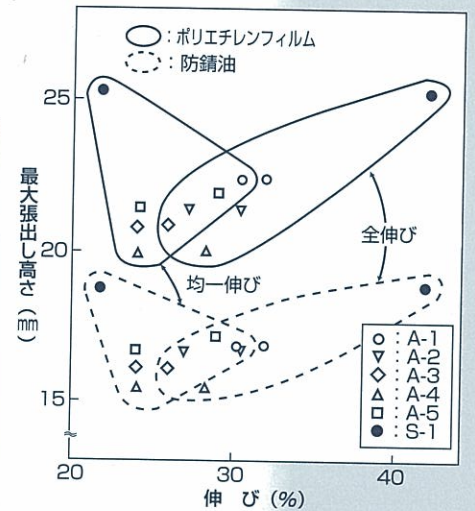
張出し性を第7図⁴⁾に示す。全体的にアルミニウム合金板は軟鋼板に比較して全伸びが低く、張出し高さが低い。ここでは、軟鋼板を含め張出し高さと全伸びとの相関が認められている。またアルミニウム合金の中ではAl-Mg系合金が最も良好な特性を示している。



第5図 深絞り性とn値との関係



第6図 深絞り性とr値との関係



第7図 張出し性と全伸びとの関係

Al-Mg系合金の自動車パネル材への適用

C-3

最後に、公表されている自動車パネル用Al-Mg系合金を例にとりながら、パネル用材料として適用する際の二、三の考え方を紹介する。

Al-Mg系合金はこれまで述べてきたように、強度と伸びのバランスが優れた合金として、自動車パネル用材料としての開発が進められてきた。その一例として、第3表⁵⁾に示される組成を有する合金(KS5030)が実用化された。その成形性の一例として各種の合金とともにその成形限界線図を第8図⁵⁾に示す。この図では、図中に示す直行するひずみ量(e_1 , e_2)を種々を与えたときの成形限

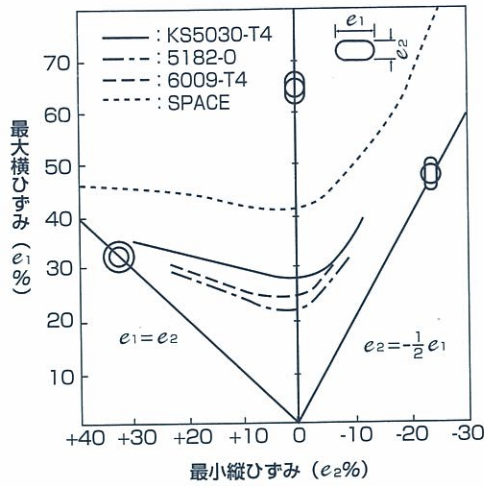
界を示すが、Mgを同等量(約4.5wt%)含む一般のJIS5182合金、あるいはAl-Mg-Si系の6009合金よりも高い成形性が示されている。この合金の基本組成はAl45%Mgに微量のCuを添加した合金であり、成形性を向上させるため、非熱処理合金にもかかわらず最終焼鈍を通常のパッチ焼鈍ではなく連続焼鈍炉(CAL)を用い、急速加熱-急速冷却することにより合金元素の固溶度を増し、固溶硬化の度合いを高くしている。

またこのことは自動車のプレス成形後に行われる塗装の焼き付け処理(170℃前後)において、

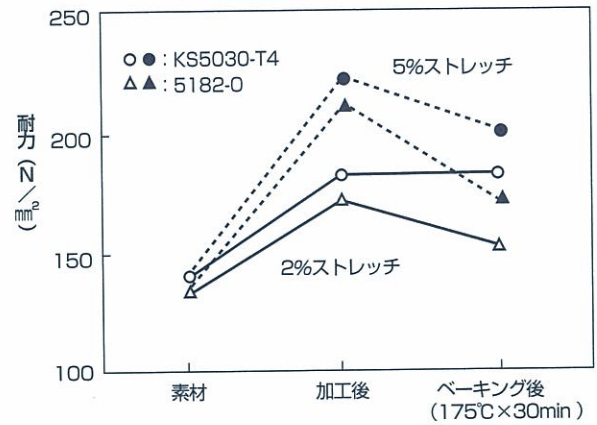
5) 古賀、日野: 神戸製鋼技報、Vol.40 (1990), No.1, p.77

第3表 自動車パネル用アルミニウム合金の組成

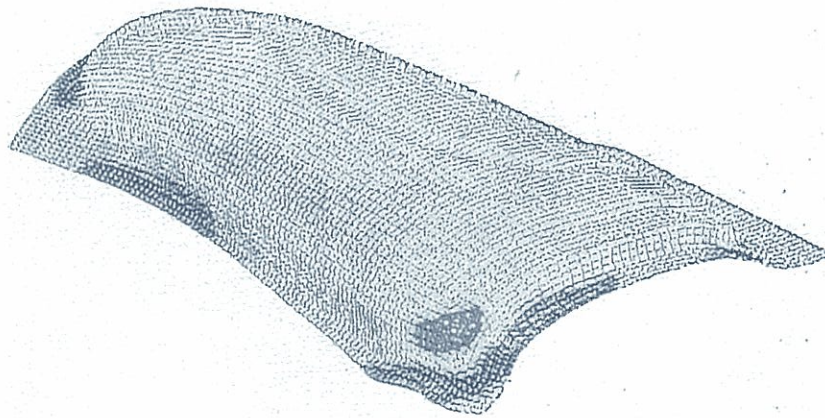
合金系		化学組成 wt%									備考
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
Al-Mg	KS5030	0.25	0.40	0.50	0.20	3.5~5.0	0.20	0.10	0.10	Re.	KSL
	5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—	Re.	—
	5182	0.20	0.35	0.15	0.2~0.5	4.5~5.0	0.10	0.25	0.10	Re.	—
Al-Cu	2036	0.50	0.50	2.2~3.0	0.1~0.4	0.3~0.6	0.10	0.25	0.15	Re.	Reynolds
Al-Mg-Si	6009	0.6~1.0	0.50	0.15~0.6	0.2~0.8	0.4~0.8	0.10	0.25	0.10	Re.	Alcoa
	6010	0.8~1.2	0.50	0.15~0.6	0.2~0.8	0.6~1.0	0.10	0.25	0.10	Re.	Alcoa



第8図 各種合金の成形限界線図



第9図 耐力に及ぼす加工硬化とベーキングの影響



第10図 FEM解析の一例

加工ひずみの回復による強度低下を抑える役目も果たしている。

第9図⁹⁾に素材、加工後および焼き付け塗装熱処理（ベーキング：175℃×30分）後の耐力の変化を示す。この合金が通常のJIS5182-O材よりも、ベーキング時の軟化が少なくなっている。この理由はCALによる急速加熱冷却により溶体化処理を施し、Mg、Cuの固溶度を増大させ、ベーキング時にAl-Cu-Mg系の析出物が析出する、いわゆる時効硬化することによるものである。

またこの固溶Cuは、100℃以上の加熱においても結晶粒界への析出が抑制されるため、応力腐食割れ（SCC）感受性が高温側へ移行し改善される効果も確認されている⁹⁾。

以上のような考え方でこのAl-Mg系合金は、乗用車のフェンダー、フードのアウトナーなどに実用化されている。Mgの含有量はこれまで述べてきたように多いほど延性が期待でき、より高いMg濃度を有する材料も開発されているが、実際には熱延割れ、SCCの課題により、その上限値は制限されている。

一方、熱処理合金であるAl-Mg-Si系（6000系）合金も、ベーキング時の析出硬化をさらに活用する目的、およびリサイクル性に優れる点で自動車用板材として用いられている。

以上、Al-Mg合金の自動車部材への適用を述べてきたが、今後もさらなる成形加工性の向上が課題であり、成分、製造方法および成形加工技術の開発が積極的になされている。その一つの手段としてコンピューターを活用した成形シミュレーション技術も盛んで、実際のプレスなどを行なうことなく、金型形状、材料選定などを成形シミュレーションにより評価することができる。

第10図に有限要素解析（FEM）の一例を示す。金型の試作などのリスクを回避して、最適の条件を研究した良い事例といえよう。

自動車用パネル材として多く用いられるAl-Mg系合金板材の延性挙動、機械的性質と成形性、さらに自動車用部材としての適用の考え方などについて紹介した。何かの参考にしていただければ幸いです。

今後も、自動車の軽量化を目的に、アルミニウムの活用が進んでいくものと思われるので、材料や腐食の特性評価、成形・加工性調査、コンピューター解析などの当社の専門技術をご活用いただければ望外の喜びである。

〔受託研究事業部 材料研究部 大家 正二郎〕