

加工性に優れた超軽量 Mg-Li 合金

報告者 大学院総合理工学研究科東大阪モノづくり専攻 教授 沖 幸男
共同研究者 大学院総合理工学研究科 研究支援者 平木勲男
大阪精工株式会社 取締役技術部長 森川 勉
株式会社ヤマニ 代表取締役 紙田雅一郎
大阪府立大学大学院 助教授 辻川正人

1. 背景

地球温暖化の主因のひとつである二酸化炭素ガスによる温室効果を低減するために、国内で 2 割を占める運輸移動関連での排出量低減も急務である。この分野での排出量低減は電力駆動によるエネルギー変換効率の向上と慣性質量の低減によって達成されるべきである。慣性質量の低減には高比強度材料の使用が最も効果的である。

金属としてのマグネシウムは鉄の 25%、アルミニウムの 65% の密度を持つ材料である。また、地殻構成元素としてクラーク数で第 5 の存在量をもち、人体にも必須の元素である。しかし、構造材料としてのマグネシウム合金の現状は、一般的な AZ31 合金の比強度（強度／密度 [103×MPa/kg/m³]）が 150 と A7075-T6 材の 200 に代表される高力アルミニウム合金に劣っている。比強度の向上を目指した材料開発が必須とされている。

同時に、結晶が稠密六方構造を持つことから、冷間加工による底面すべり以外のすべり系の活動が不十分であり、冷間加工性が鋼板やアルミニウム合金板にくらべ著しく劣る。温間での加工という制限は自動車等の比較的大型で大量生産製品の生産性を大きく阻害する。冷間加工性の向上を目指した材料開発もまた必須である。

さらに、マグネシウム合金の耐食性はイオン化傾向が大きく有効な犠牲陽極となる元素は無い。効果的な表面保護皮膜の開発がマグネシウム合金の一般化を大きく推進する。

これらの問題は、原子番号 3、密度 0.54 という最軽量金属元素で体心立方構造を持つリチウムを合金化し、その表面をアルミニウムでクラッドすることで解決可能と考えられる。この合金開発によってマグネシウム合金の最大限の利用が推進され、自動車等の軽量化を大きく促進し、高効率の運輸機器による二酸化炭素ガス排出量の低減につなげることができる。

2. 目的

摩擦攪拌接合(以下 FSW)は 1991 年イギリスの溶接研究所 TWI によって発明された材料を溶かさずに接合させる新しい固相接合法である。これは、高速回転しているプローブを、突き合わせた 2 枚の板の突き合わせ部表面に押し付け、摩擦熱で材料を軟化させ 2 枚の板

を混合し一体化するという方法である。固相接合であるので溶接割れや気孔の発生がなく、溶接変形が極めて小さいなどの長所が挙げられる。ジュラルミン系の 2024 や 7075 等、溶融溶接では良好な継ぎ手が得られない材料において現在研究がすすめられている。

Mg-Li 合金も低融点、高い蒸気圧を持つため溶融溶接が困難な材料である。よってこの材料において FSW を適用することを試みた。本実験では Mg-Li 合金の FSW に関して 2 つの実験を行った、

- 1) LA141 冷間圧延板の FSW の可能性を明らかにし、接合条件が継手の組織や機械的性質に及ぼす影響を検討する。
- 2) 材料の大型化を目的とし、FSW で接合した継手をさらに冷間圧延する。

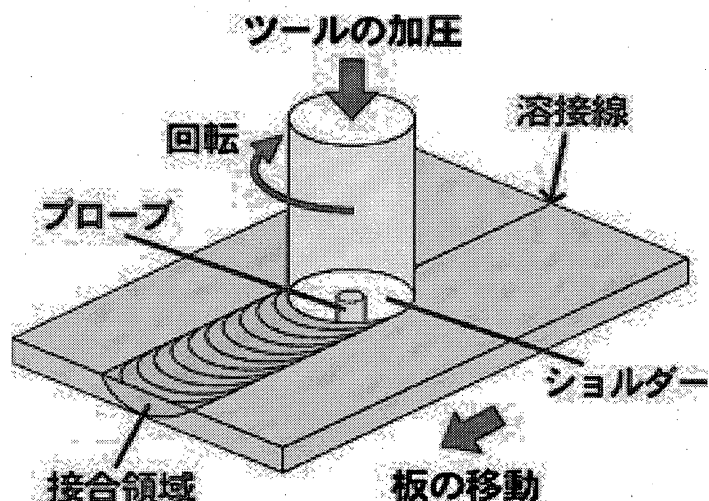


図 1. 摩擦攪拌接合 (FSW) の概念図

3. 研究組織

研究組織を模式的に図 2 に示した。近畿大学が中心となり、大阪府立大学、ヤマニが協力して MgLi 合金を作製する。大阪精工が中心となって線材の開発、用途開発を行う。

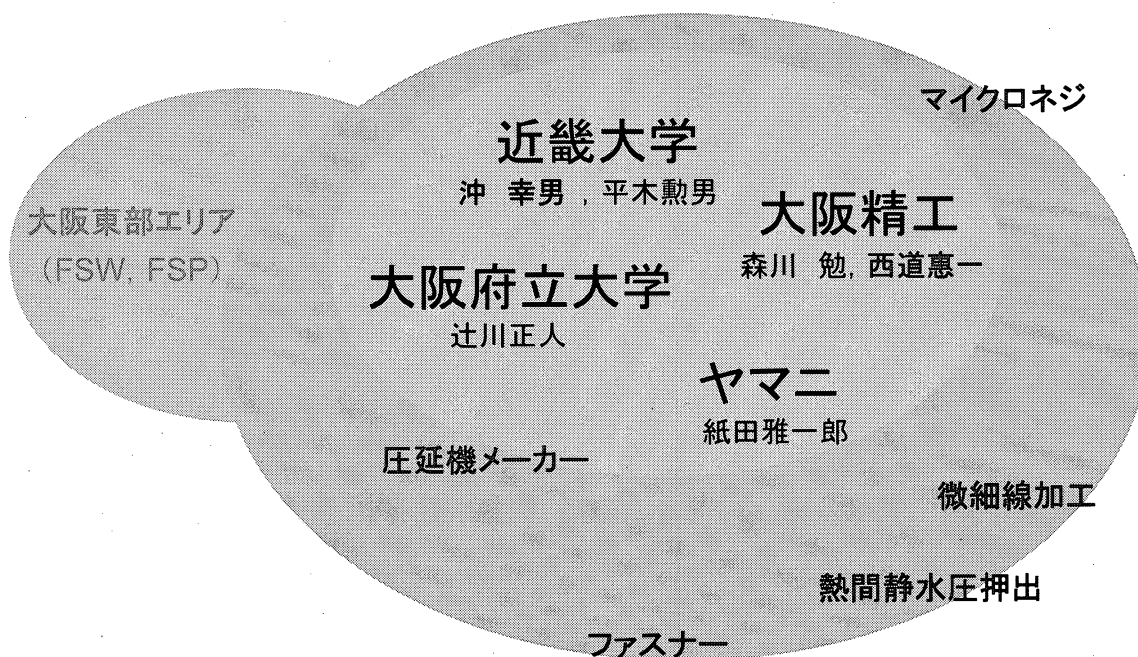


図 2. 研究組織

4. 研究方法

4-1. 摩擦攪拌接合

用いた供試材は LA141 材の 2 mm 圧延板である。この圧延板 2 枚を突き合わせ、高機能 FSW 装置で接合を行った。FSW はツール材質 SKD61、プローブ直径 3.5 mm、長さ 2 mm、ショルダー直径 13.5 mm、荷重 4.8 kN、傾斜角 3° で回転数と接合速度を何種類か変えて接合が可能な条件を探索した。

4-2. 断面マイクロ組織とビッカース硬さ試験

得られた継手を接合方向の垂直に断面で切り出し、断面組織を光学顕微鏡で観察した。エメリー紙研磨、バフ研磨後、ナイトール(硝酸 92 % - エタノール 8 %)にて腐食し、観察した。同じく断面のビッカース硬さ測定を行った。硬さは表面からの深さ 1 mm(断面中央)の硬さを測定した。試験力は 980.7 mN (Hv0.1)。保持時間 5 s であった。

4-3. 継手の静的引張り試験

継手の引張り特性を調べるために、静的引張り試験をおこなった。引張り試験は室温、大気中でインストロン引張り試験機を用いておこなった。試験片の形状は図 3. に示すような接合線が引張り軸に垂直になるように採取し、攪拌部そのものの強さを測定するような試験片を作製した。

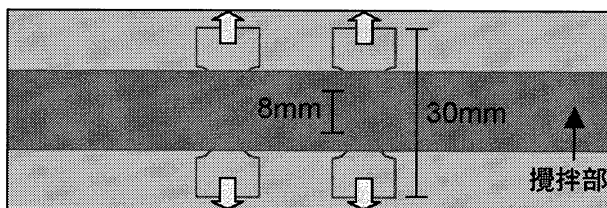


図 3. 引張り試験片の形状と採取位置

4-4. FSW 継手の冷間圧延

厚さ 2 mm の LA141 冷間圧延板 2 枚を突き合わせ、FSW で継手を作製した。FSW 条件は回転数 1500 rpm、接合速度 200 mm/min. でツール形状はショルダー直径 12 mm、プローブ直径 4 mm、長さ 1.9 mm で傾斜角は 3° であった。さらにこの突き合わせ継手を室温にて 0.5 mm まで冷間圧延を行った。接合線に対して垂直方向と平行方向の 2 方向の圧延を行った。この継手の圧延板に関して、光学顕微鏡による組織の観察、継手圧延板の断面硬さ試験、及び引張り試験を行った。

5. 研究成果

5-1. FSW 条件と接合状態

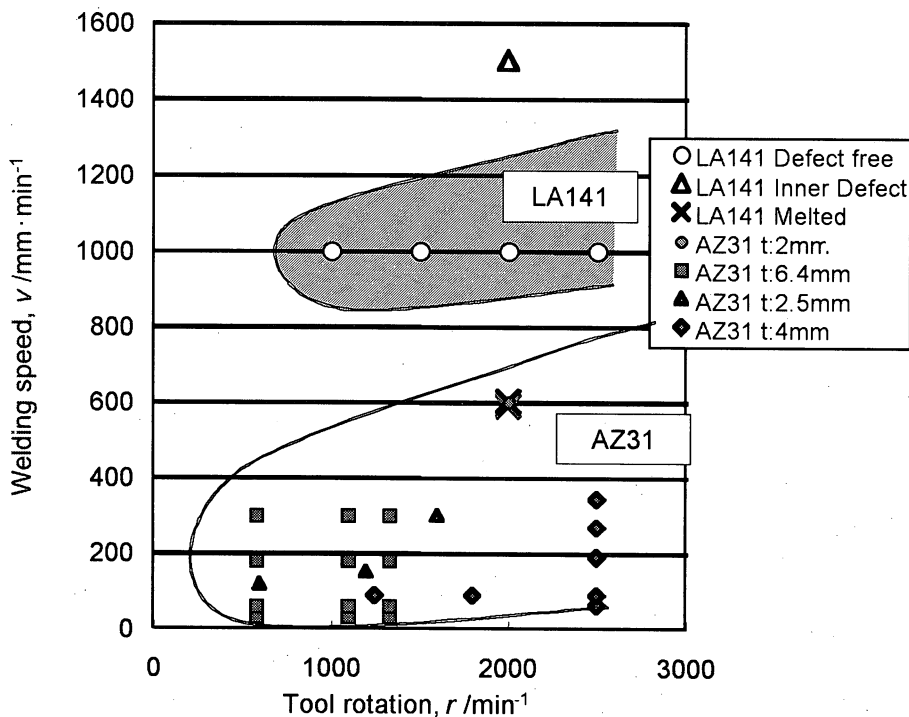
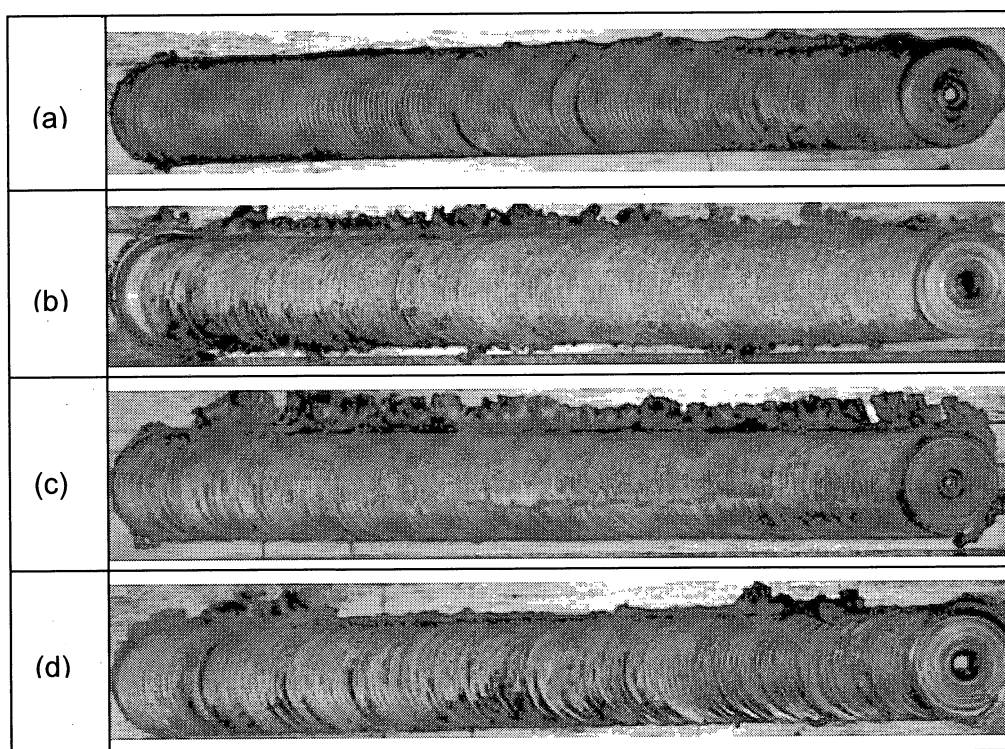


図 4. LA141 マグネシウム合金に対する FSW 適合条件

本実験で用いた FSW における接合状況を図 4. 示す。厚さ 2 mm の AZ31 で良好な継手を得られた 2000 rpm、600 mm/min. の条件を適用したところ、入熱が多すぎて板材が燃えてしまい接合できなかった。また 2000 rpm、1500 mm/min. の条件では接合は可能であったが、X 線透過試験によって欠陥が見られた。その他の条件においては X 線透過試験においても欠陥が見られることなく、良好な継手を得ることができた。AZ31 Mg 合金で良好な継手を得られる条件を図に示しているが、LA141 材で有効な FSW 条件は AZ31 の条件とは離れており、より低温の領域にあった。

図 5. に継手の外観写真を示す。本実験ではこれらの良好な継手に対して、組織観察、硬さ測定、引張り試験を行い、継手の機械的性質に及ぼす FSW 条件の影響について検討した。



(a) 1500rpm × 1000mm/min. (b) 2000rpm × 1000mm/min.
 (c) 2500rpm × 1000mm/min. (d) 2000rpm × 1500mm/min

10mm

図 5. FSW 継手の外観写真

5-2. ミクロ組織

継手の断面ミクロ組織の一例を図 6. に示す (FSW 条件 : 1500 rpm、1000 mm/min.). 母材は圧延方向に伸びた微細粒を示しており、攪拌部は摩擦熱と塑性流動の熱による動的再結晶で等軸粒となっていた。熱影響部 (HAZ) は圧延組織と等軸粒の混合組織となっていた。



図 6. 接合部断面の組織

5-3. 引張り特性

攪拌部の最大引張り強さは、表 1. に示したように、回転数 1000 rpm の場合を除いて母材よりも良好な値を示した。伸びは回転数が増えるにつれて低下した。

表 1. 接合条件と攪拌部の引張り特性との関係

	引張り強さ / MPa	耐力 / MPa	伸び (%)
母材	193	103	13.4
1000 rpm x 1000 mm/min	179	92	13.6
1500 rpm x 1000 mm/min	210	85	11.6
2000 rpm x 1000 mm/min	203	94	8.3
2500 rpm x 1000 mm/min	211	93	6.3

また図 7. にこれらの引張り特性と入熱量の関係を示す。ここで、入熱量は、式 1. で表されるようにツールと接合部材との摩擦による発熱量を表している。

$$Q = 4/3 \cdot \mu^2 \cdot PDR^3 \quad (1)$$

ここで;

• : 摩擦係数

P : 攪拌部の圧力 (N / m^3)

R : ツール回転数 (s^{-1})

D : ショルダ径 (m)

これは、回転ツールを移動させない場合であり、これを接合速度 V (mm/min.) で移動させる場合は単位長さ当たりの入熱量は Q/V となり、これは横軸の回転数を送り速度で除した値 R/V に比例していると考えられる。よって横軸の R/V を入熱量 (heat input factor) と記した。すべての条件において攪拌部は母材より 20% 程度硬くなっており、攪拌部の硬さは入熱量によらずほぼ一定であった。攪拌部の粒径は入熱量の上昇とともに大きくなる傾向にあった。

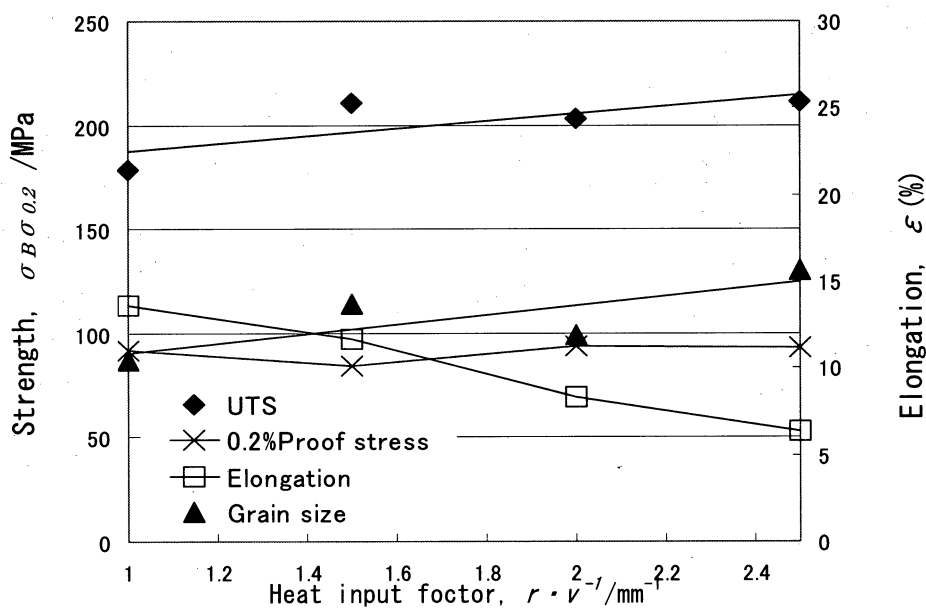


図 7. 接合部材の引張り特性と入熱量の関係

これらの引張り特性と入熱量の関係を図 7. 示す。最大引張り強さは回転数が 1000 rpm の時を除いて良好であった。回転数 1000 rpm では強度は母材よりも低くなっており、攪拌不足であったかと考えられる。伸びは入熱量が上がるにつれ減少しており、粒径の変化と比べると、粒が粗大化すると伸びは低下していることがわかった。

5-4. FSW 継手の冷間圧延と圧延部材の機械的性質

接合方向に平行 (L 方向) に圧延したものは、圧延の途中でクラックが発生した。これは接合部と母材部にわずかな厚さの差があるため、これらを同時に圧延する際、変形量に差が出てそこから歪みが生じ、クラック発生につながったと思われる。接合方向に垂直 (T 方向) に圧延したものは、0.5 mm まで明確なクラック等は発生することなく圧延することができた。

継手圧延板について、母材部と攪拌部からそれぞれ引張り試験片を採取し、室温にて静的引張り試験をおこなった。そのときの機械的性質を表 2. に示す。ビッカース硬さは母

材部と攪拌部ともに厚さ 2 mm FSW 継手に比べ硬さが上昇していた。また 2 mm のときと同様に母材より攪拌部の方が高い値を示していた。引張り強さは厚さ 2 mm のときとほとんど変化がなかったが、0.2 % 耐力は上昇していた。伸びも厚さ 2 mm と同程度であった。

表 2. 継手圧延材の機械的性質

	引張り強さ/MPa	耐力/MPa	伸び (%)	硬さ (Hv0.1)
母材	184	138	4.25	61
攪拌部	202	128	12.45	70

5-5. まとめ

以上の結果から FSW 実験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 厚さ 2 mm の Mg-Li 合金圧延板が FSW で健全な継手を得ることができるということが明らかになり、入熱量と組織・機械的性質の関係から、ある一定の入熱量で良好な伸び、引張り強さが得られた。
- 2) 接合の結果、攪拌部が母材よりも 20 % 程度硬さが上昇していることがわかった。
- 3) FSW した厚さ 2 mm の板材を 0.5 mm まで圧延することも可能であった。圧延板の組織は母材部、攪拌部とも圧延方向に粒が伸びた圧延組織となっており硬さは 2 mm の FSW の試料に比べ上昇していた。

6. 本研究費を用いた研究成果の発表

1. 辻川正人、高原裕典、沖幸男、鄭 盛旭、平田智丈、東健司, 摩擦攪拌におけるずれの許容度, 軽金属学会全国講演大会, 2005. 11. 12
2. 阿部由紀子、辻川正人、沖幸男、紙田雅一郎、平木勲男, 学術講演発表, Mg-Li 合金摩擦攪拌接合継手の冷間圧延, 日本鑄造工学会全国講演大会, 2005. 05. 28
3. 辻川正人、阿部由紀子、鄭 盛旭、沖幸男、東 健司, Mg-Li 合金の冷間圧延による強化と摩擦攪拌接合, 軽金属学会全国講演大会, 2005. 11. 12
4. 辻川正人、田中真帆、鄭 盛旭、沖幸男、東 健司, Mg-Y-Zn 系合金の摩擦攪拌による強靱化 軽金属学会全国講演大会, 2005. 11. 12 軽金属学会全国講演大会
5. 辻川正人、阿部由紀子、山内尚彦、上田順弘、沖幸男、紙田雅一郎, 冷間圧延 Mg-14mass%Li 合金への DLC コーティング, 軽金属学会全国講演大会, 2005. 11. 12
6. N. Yamauchi, N. Ueda, M. Tsujikawa, T. Sone, S. Oki, M. Kamita, DLC Coating on Mg-Li Alloy, The 5th Asian-European Int. Con. on Plasma Surface Engineering AEPSE2005, Tingdao, China, Sep. (2005)
7. S. W. Chung, M. Tsujikawa, M. Tanaka, S. Oki, K. Higashi Friction, Stir Processing and Mechanical Properties of Cast Mg-5.5wt%Y-4.3wt%Zn Alloy, Proc.

International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.217-226

8. S. Oki, M. Tsujikawa, SW. Chung, T. Hirata, K. Higashi, Influence of Welding Accuracy on Friction Stir Welded Joints, Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.189-194

9. M. Tsujikawa, Y. Abe, SW. Chung, S. Oki, K. Higashi, Friction stir welding of cold-worked Mg-Li alloy as the lightest structural material, Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.211-216.

10. 辻川正人, 沖 幸男, 東 健司, 合金成形体の改質方法及び合金成形体 特 願 2005-298280 号(2005, 10)

11. M. Tsujikawa, S W. Chung, M. Tanaka, Y. Takigawa, S. Oki, K. Higashi, High-Strengthening of Mg-5.5wt%Y-4.3wt%Zn Cast Alloy by Friction Stir Processing, Materials Transactions, 46(12), (2005), 3081-3084.

12. S. W. Chung , M. Tsujikawa, M. Tanaka, S. Oki, K. Higashi, Friction Stir Processing and Mechanical Properties of Cast Mg-5.5wt%Y-4.3wt%Zn Alloy, Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.217-226

13. S. Oki, M. Tsujikawa, SW. Chung, T. Hirata, K. Higashi, Influence of Welding Accuracy on Friction Stir Welded Joints, Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.189-194.

14. M. Tsujikawa, Y. Abe, SW. Chung, S. Oki, K. Higashi, Friction stir welding of cold-worked Mg-Li alloy as the lightest structural material, Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005 (Oct. 2005), Tokyo Japan, pp.211-216.

7. 今後の展開

板材、線材を多くの製造業者に供給するという事業化のために、H18 年度から H20 年度まで以下のスケジュールで開発を進める。

H18 年度

Mg-14%Li 合金へのアルミニウムクラッド法の開発。

H19 年度

アルミニウムクラッド法の確立。高強度最軽量マグネシウム合金の最適加工プロセスの確立。

H20 年度

高強度最軽量材料の加工性の向上に関する研究。