

論 文

給湯用被覆銅管の疲れき裂とその対策*

野世溪 精** 河野 浩三***
宮木 英生**** 金森 照夫*****
丹野 弘*****

Low Cycle Fatigue Cracking in "Prisol Tube"
Hot Water Supply Lines

by Tadashi Nosetani, Kozo Kawano,
Hideo Miyaki, Teruo Kanamori,
and Hiroshi Tanno

給湯用被覆銅管の疲れき裂とその対策*

野世溪 精** 河野浩三***
宮木英生**** 金森照夫*****
丹野 弘*****

Low Cycle Fatigue Cracking in "Prisol Tube" Hot Water Supply Lines

by Tadashi Nosedani, Kozo Kawano,
Hideo Miyaki, Teruo Kanamori,
and Hiroshi Tanno

Prisol Tubes, copper tubes insulated by polyethylene, have rapidly become the favorite choice for hot water supply line and heating installation in residences and buildings. Long-life, saving in installation time, thermal insulation, less installation space and flexibility are deciding factors for the present popularity of Prisol Tube. Particularly, Prisol Tube which lends itself to easy manipulation by hands and feet is standarized to be installed after plumbing other steel pipes for gas and/or water in many cases, thus crossing over these steel pipes. We have experienced leakage at the crossover point accompanied with small dent on the copper tube in Prisol hot water supply line with both bent-ends buried in concrete, whose span was about 6,000 mm tightly and straight restrained by clamps every 500 mm. The leakage is rare but tends to increase gradually. To cope with the situation, an experiment was conducted to reveal the cause and its countermeasures using model plumbing lines which simulated a typical example.

- (1) At the crossover point with dent whose depth was 1 to 2 mm on the copper tube, low cycle fatigue cracks due to the thermal expansion when passing hot water occurred under some tightly restrained conditions.
- (2) Number of heat cycles to leakage depended upon mainly the dent depth formed by the external force such as at stepping on Prisol Tube, in the second place did upon the span length between the clamps and standards of burying both ends in concrete.
- (3) It is fairly useful to cover the bent-ends with thick formed polyethylene sheet. Furthermore, a proper built-in method that Prisol Tube could slip at the interface between its outer-surface and concrete would make the line trouble-free. It was also verified that provisions, bending the span sinuously with a deflection of about 30 mm or the application of the anti-elevation jig at the crossover point, take up the concentration of expansion to the dent.

1. はじめに

給湯用の配管材料として、軟質の銅管外面に発泡ポリエチレンを被覆した管（以下、プリゾール管と呼ぶ）が多用されるようになってきた。これはプリゾール管の持つ優れた施工性に基づく工期短縮、長寿命及び断熱性によるところが大である。特に、施工性、すなわち、曲げ性・納まり性が良好なために、ガス用鉄配管や給水用鉄

* 伸銅技術研究会誌, 25 (1986), 64 に掲載

** 技術研究所応用研究部

*** 技術研究所開発室

**** 伸銅所加工品開発部

***** 伸銅所品質保証部

***** 東京ガス(株)営業開発部

配管を乗越し・交差して配管されることが多い。この交差部において、給湯に伴う繰返し伸縮に起因するとみられる銅管のき裂発生による漏洩事故が稀に発生することを経験した。この漏洩事故の発生件数は漸増傾向にあるため、代表的な事故例の配管状況を模して実験を行い、事故原因並びにその対策を追求した。

2. 代表的事例

Fig. 1 に事故例の配管状況を示した。銅管外径 15.88 mm、肉厚 1.02mm のプリゾール管 (**Fig. 2** 参照) がガス用鉄管 (SGP 20A) を乗越し・交差してころがし配管されていた。プリゾール管はこの交差部の右側約 4,000 mm、左側約 500 mm において 90° 曲げ加工 (半径 R = 約 100mm) され、かつ、コンクリートに直埋設されている。ころがし配管部は専用のサドルによって真直に固定されていた。

漏洩事故は使用開始後 1 年 3 か月目に発生した。その個所は交差部の略真上であり、長さ数 mm のき裂が肉眼で 3 ~ 4 か所観察された。き裂は管軸方向に対して、直角に発生しており、き裂を含む銅管の交差部下面には僅かな凹みを生じていた。き裂の破面は脆性破面を呈し、き裂は管内・外両面から発生しており、主に結晶粒内を貫通していた。以上の事故例から、き裂は通湯に伴う管の繰返し伸縮によって生じた疲れによるものであり、施工時に生じたとみられる僅かな凹みにひずみが集中し、疲れき裂発生に至ったものと考えられる。

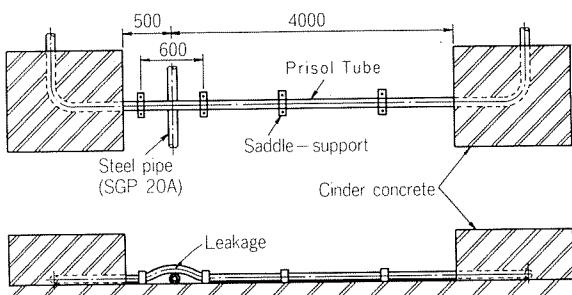


Fig. 1 Typical line accompanied with the leakage accident in Prisol tube.

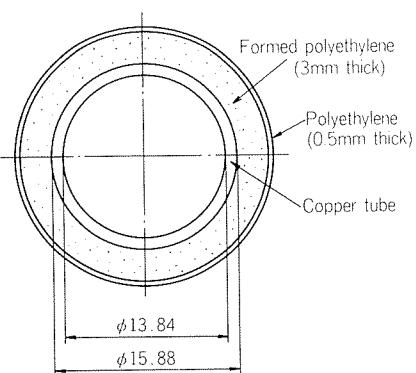


Fig. 2 Section of "Prisol Tube" used in the test.

3. 実験方法

3.1 供試プリゾール管

外径 15.88mm × 肉厚 1.02mm の JIS H3300 C1220 軟質銅管より構成されるプリゾール管を用い、**Fig. 3** に示す交差用治具によって、ガス管 20A 乗越し用の曲りを所定の位置に形成した。ついで、バイスを用いて、ガス管 20A を曲りの頂点真下に置いて所定量 (1 ~ 5 mm) 押付け、銅管に深さの異なる凹みを形成させた。

Fig. 4 にガス管 20A の押付量と銅管に生じた凹み深さの関係を示す。押付量 2 mm の時の凹みは、押付量のかなりの量が被覆材に吸収されたため、軽微 (深さ約 0.2 mm) であった。事故管の凹み深さは 1 ~ 2 mm が多いので、押付量を 3 ~ 5 mm とした。

3.2 供試プリゾール管配置と給湯試験条件

配置を **Fig. 5** に示す。A 及び B 系統は事故例の再現を意図したもので、B 系統のコンクリート埋設された曲り部にはクッション材 (30倍発泡ポリエチレン、厚さ 10 mm) を巻付けた。A 及び B 系統における 3 本のプリゾール管のガス管 20A 押付量はそれぞれ 3, 4 及び 5 mm である。固定サドルの間隔は約 500mm とした。C 系統は後述する対策案の実証を意図したもので、すべての供試管におけるガス管 20A 押付量を 5 mm とした。C 1 はループ、C 2 は振幅 60mm 程度の強蛇行、C 3 は振幅 30mm 程度の弱蛇行によって伸縮を分散しようとするもので

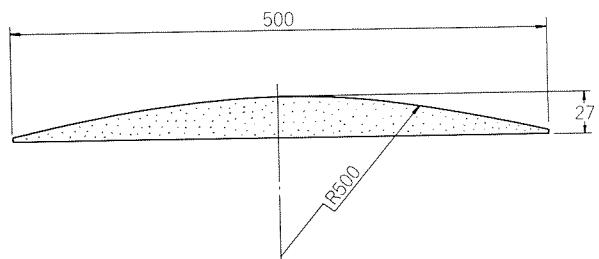


Fig. 3 Bend shape for crossing over SGP 20A.

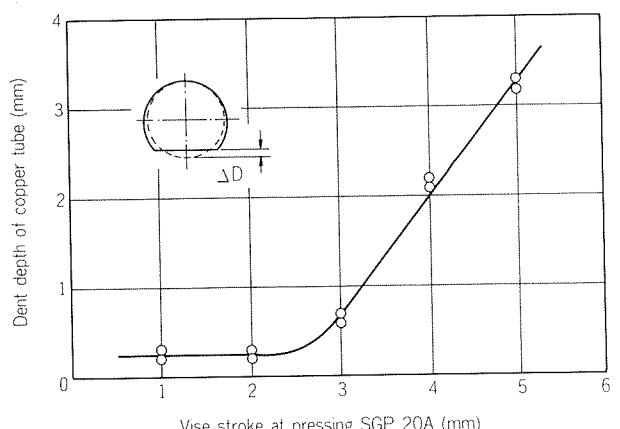


Fig. 4 Relation between vice stroke at pressing SGP 20A to Prisol Tube and dent depth on the copper tube.

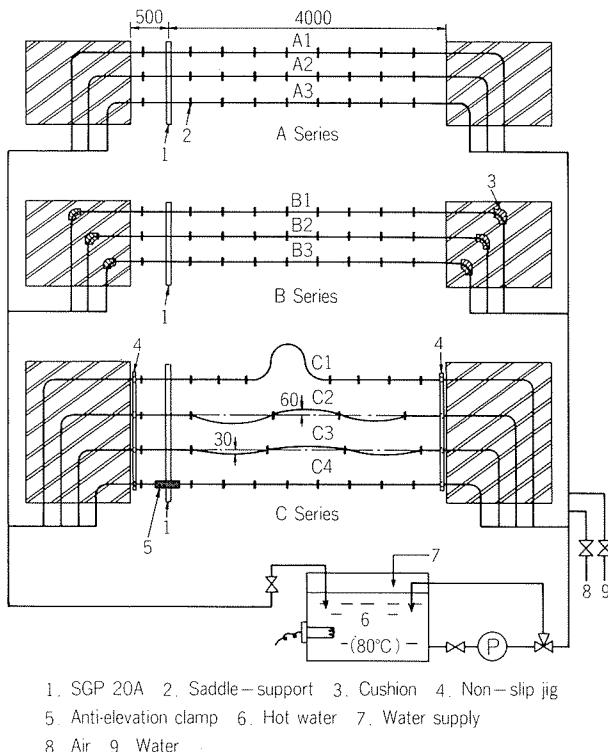


Fig. 5 Experimental set-up.

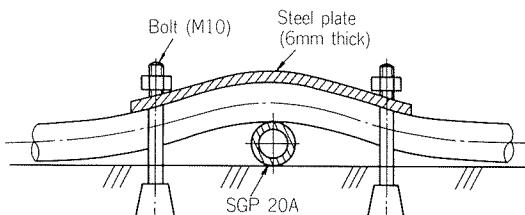


Fig. 6 Anti-elevation clamp.

ある。C4は交差部の浮上りを治具 (Fig. 6 参照) によって防止し、伸縮のひずみを交差部以外の個所に移動させようとするものである。なお、C系においては、ころがし配管の両端は治具によって完全に固定した。通湯サイクルは予備実験の結果、80°Cの温水4min、エアバージ30sec、水道水5min、エアバージ30sec、の計10minを1サイクルとした。この冷・温水の通水によって、銅管の温度は略定常値(冷・温水の温度)に達した。

3.3 ひずみゲージ貼付位置

ひずみゲージ(㈱共和電業製のKFC-5-C1-16)貼付位置は、銅管の交差部上・下、交差部両側の直管部上・下、長スパン側の直管部2か所上・下(固定サドルの中央)、コンクリート内埋設部の曲り部左・右とした。すなわち、各位置において被覆材を幅7mm×長さ15mm程度除去し、その部分の銅管に貼付けた。貼付けは曲げ加工後、仮固定してから行い、また、交差部の下側の貼付位置は凹みの中央とした。ひずみの測定方法は、ダミーゲージ法であり、ダミーゲージを各供試管出口のコンクリート埋設部出口にゴムホースで連結したプリズール管

に貼付けた。

4. 実験結果

4.1 交差部における供試管の浮上り高さ

供試管交差部は、通湯及び通水に応じて上下動を繰返した。これは、通湯に伴う管の伸縮が変形しやすい交差部に集中したためである。通湯時の浮上り高さの測定結果をTable 1に示す。

クッション材を巻付けなかったA系の浮上り高さは8~11mmと大きく、早期にき裂が発生することが予想された。B系の場合は前者に比べて浮上り高さが小さく、これは曲り部クッション材の影響によるものである。また、180サイクル前後から浮上り高さが2~4mmとサイクルの増加に伴って減少した。被覆材と銅管との間に滑りが生じていることが観察され、これが浮上り高さを減少させたものと考えられた。なお、B2及びB3においては、被覆材とコンクリートとの間にも滑りが生じていた。C系は、コンクリート埋設部にクッション材を巻付けなかったにもかかわらず、浮上り高さが2mm以下と小さかった。交差部に集中していた伸縮は、ループ、強蛇行または弱蛇行によって、緩和されたものと考えられる。

4.2 漏洩発生に至るまでのサイクル数

漏洩発生に至るまでのサイクル数をTable 1に併記した。そのサイクル数とガス管20Aの押付量の関係をFig. 7に示す。

A系においては両者に高い相関があり、押付量の大

Table 1 Amplitude of the crossover point at passing hot water and number of heat cycles to leakage.

Series	Vise stroke at pressing SGP 20A (mm)	Amplitude (mm)	Number of cycles to leakage
A1	3	8~10	949
A2	4	9~10	549
A3	5	9~11	288
B1	3	8~10 3~4 ⁽¹⁾	3336
B2	4	4~5 2~3 ⁽¹⁾	>18950
B3	5	4~5 2~3 ⁽¹⁾	>18950
C1	5	0.1~0.3	>10351
C2	5	0.4~0.5	
C3	5	1.5~1.8	
C4	5	0	

⁽¹⁾ After about 180 cycles

きいもの、すなわち、凹み深さの大きくなる A 1, A 2, A 3 の順にサイクル数が減少し、949, 549 及び 288 サイクルでそれぞれ漏洩した。従って、交差配管施工時には、凹みを形成しないよう留意することが大切である。

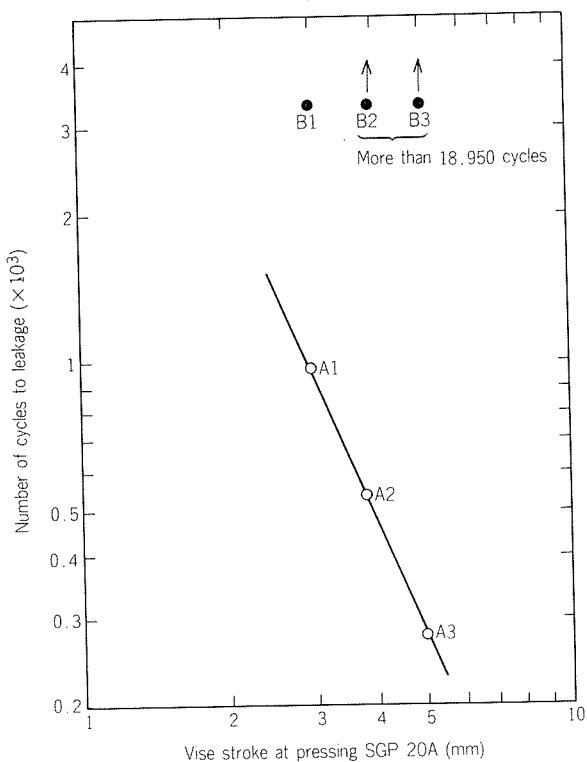


Fig. 7 Number of heat cycles to leakage in A and B series.

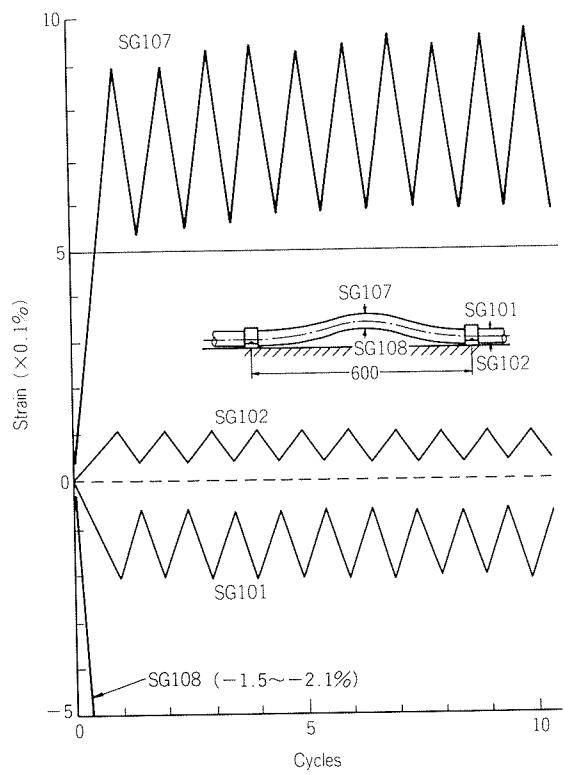


Fig. 8 Strains of A3 tube in the heat cycle test.

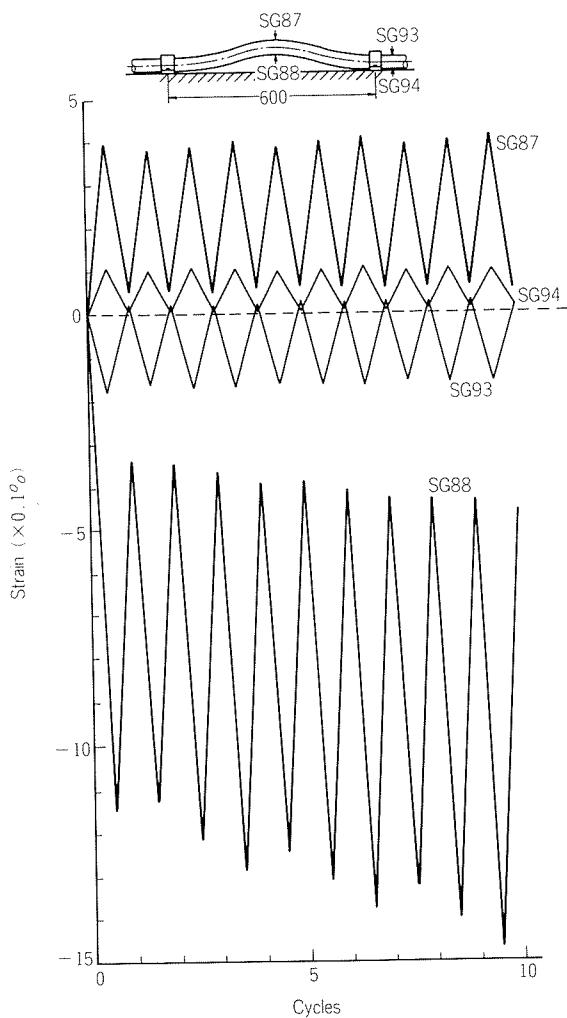


Fig. 9 Strains of A2 tube in the heat cycle test.

B 系統においては、凹み深さの最も小さい B 1 がおよそ 3,300 サイクルで漏洩しており、それより押付量の大きい B 2, B 3 は 19,000 サイクルをこえても漏洩しなかった。これについては次項で述べる。

4.3 ひずみ測定結果

(1) A 系統 (クッション材なしの場合)

A 系統の交差部及びその両側直管部におけるひずみの測定結果を A 3, A 2, A 1 の順に Fig. 8, 9 および 10 にそれぞれ示す。

A 3 交差部の初期ひずみはかなり大きく、第 2 サイクル以降はほぼ一定のひずみ振幅が繰返されていることがわかる。特に、凹み部のひずみ (SG108) は平均ひずみ $\varepsilon_m = -1.7\%$, ひずみ全振幅 $\Delta\varepsilon = 0.6\%$ と極めて大きかった。そして、288 サイクル目に凹みの側面より漏洩した。交差部上側のひずみ (SG107) は $\varepsilon_m = 0.75\%$, $\Delta\varepsilon = 0.35\%$, 直管部では上側 (SG101) が $\varepsilon_m = -0.1\%$, $\Delta\varepsilon = 0.13\%$, 下側 (SG102) で $\varepsilon_m = 0.1\%$, $\Delta\varepsilon = 0.67\%$, と比較的小さかった。

A 2 の凹み部においては、 $\varepsilon_m = -0.8\%$, $\Delta\varepsilon = 0.9\%$ (漏洩は 549 サイクル) で、A 3 におけるよりも小さかっ

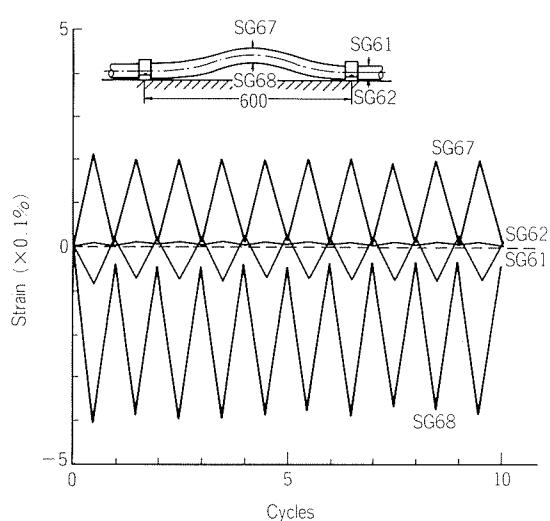


Fig. 10 Strains of Al tube in the heat cycle test.

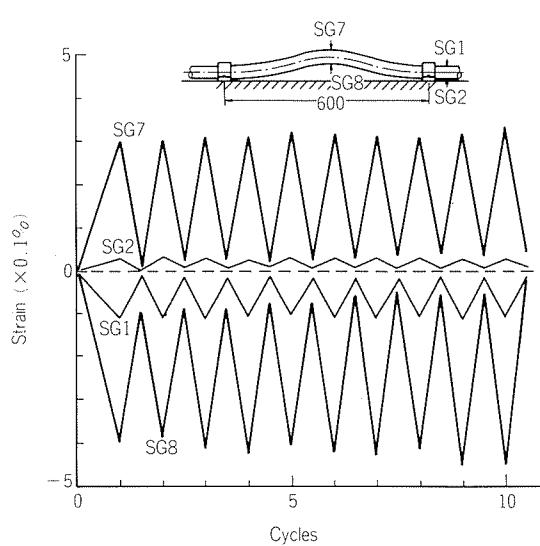


Fig. 11 Strains of B1 tube in the heat cycle test.

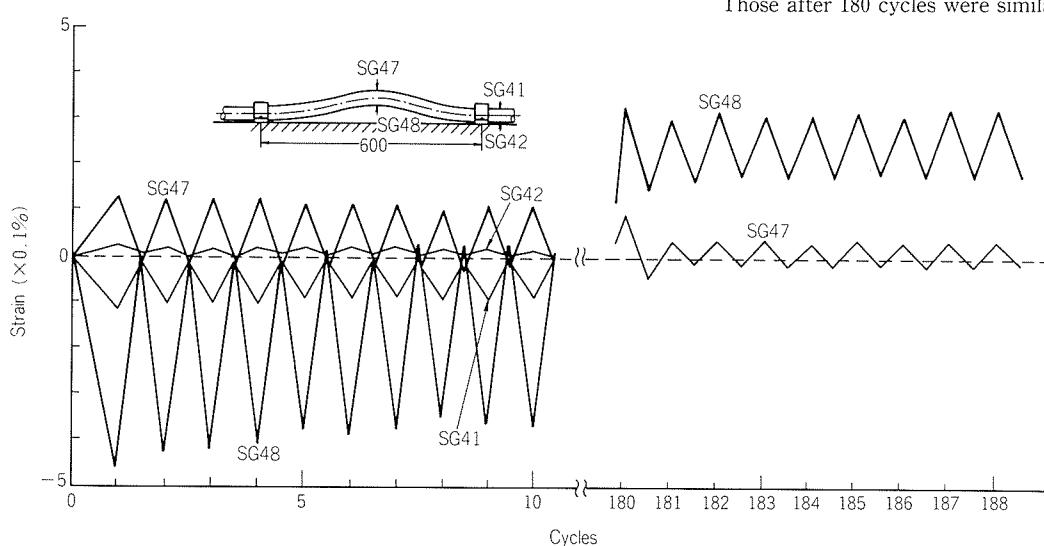


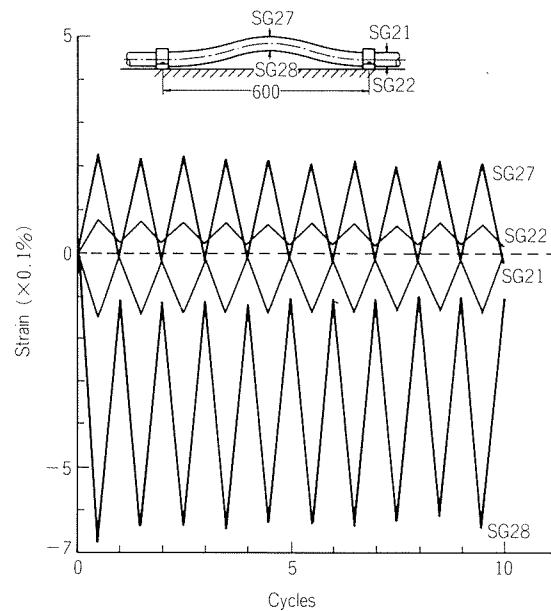
Fig. 13 Strains of B3 tube in the heat cycle test.

た。A 1 の凹み部においては、 $\varepsilon_m \approx -0.2\%$ 、 $\Delta\varepsilon \approx 0.4\sim0.5\%$ であり、片振り圧縮ひずみを生じていた（漏洩949サイクル）。なお、A 1 及び A 2 の直管部における測定結果は A 3 と同様であった。

(2) B 系統（クッション材ありの場合）

B 系統の交差部及びその両側直管部並びにコンクリート内曲り部におけるひずみの測定結果の一例を Fig. 11, 12, 13 および 14 にそれぞれ示す。

B 1 の各測定位置におけるひずみは Fig. 11 に示すようにほぼ一定値をもつが、B 2 及び B 3 ではサイクルの増加につれて $\Delta\varepsilon$ が小さくなつた。B 1 においては、被覆材とコンクリートとの間に滑りが観察されなかつたが、B 2, B 3 では滑りが生じていた。すなわち、B 2, B 3 は管全体がクッション材のために往復運動し、ひずみの局部集中を緩和しているものと考えられる。B 1 の交

Fig. 12 Strains of B2 tube in the heat cycle test.
Those after 180 cycles were similar to B3.

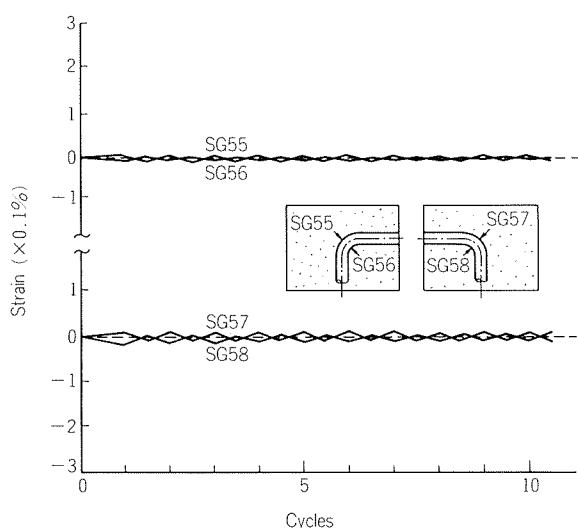


Fig. 14 Strains of B3 tube bends buried in concrete.

差部の $\Delta\varepsilon$ (SG8) はサイクルの増加につれて多少大きくなった ($\Delta\varepsilon_m$ も多少増加した) が、900サイクル前後から0.3%程度に安定した。このことからB1の場合はクッション材の巻付けによる効果は余りなかったものと推察される。一方、B2, B3の交差部では $\Delta\varepsilon \approx 0.4\%$ (SG48)であったものが、180サイクル以降は $\Delta\varepsilon \approx 0.1\%$ と低下した。このことは、前述の往復運動によってひずみの局部集中が緩和されること、並びにそれが生じるまでにある程度のサイクル数が必要なことを意味していよう。

なお、コンクリート埋設曲り部のひずみは、クッション材の有無(A, B系統とともに)にかかわらず、 $\varepsilon_m \approx 0$ 、 $\Delta\varepsilon \approx 0.05\%$ 以下と軽微であった (Fig. 14 例示)。

以上のことから、クッション材の巻付けは、管がコンクリートとの間で滑る場合(B2及びB3)により有効であるということが判明した。しかし、埋込長さがある程度長くなると、往復運動が発生しにくくなつて、クッション材の効果を期待できない場合がある(クッション材までの埋込長さは、B1が750mm, B2が500mm, B3が250mm長さである)。

(3) C系系統(対策案の場合)

C3の交差部ならびに蛇行の曲り部頂点におけるひずみの測定結果の一例を Fig. 15 に示す。

凹み部(SG43)は、 $\varepsilon_m \leq -0.03\%$ 、 $\Delta\varepsilon \approx 0.1\%$ と比較的小さい。C1, C2についても同様の値であり、A系系統ならびにB1で発生したような凹み部における局部的なひずみ集中はなかった。また、蛇行曲り部頂点のひずみは通湯時、曲り部の内側(SG39)で $\Delta\varepsilon \approx 0.1\%$ 、外側(SG38)では $\Delta\varepsilon \approx 0.05\%$ が負荷され、いずれも片振りである。C2の場合も同様であった。

以上のように、ループ、蛇行、浮上り防止治具(ひずみ測定せず)の効果は顕著であり、いずれの供試管も10,351サイクルまで繰返したが、漏洩を発生しなかった。特に、蛇行、浮上り防止治具の施工は実用面において有

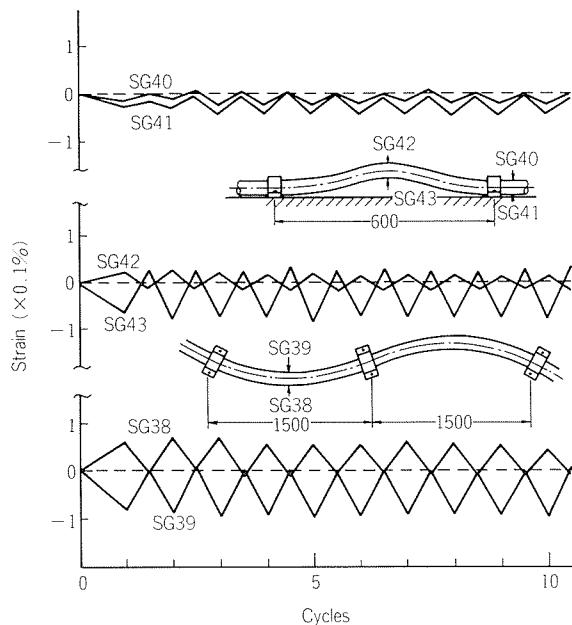


Fig. 15 Strains of C3 tube in the heat cycle test.

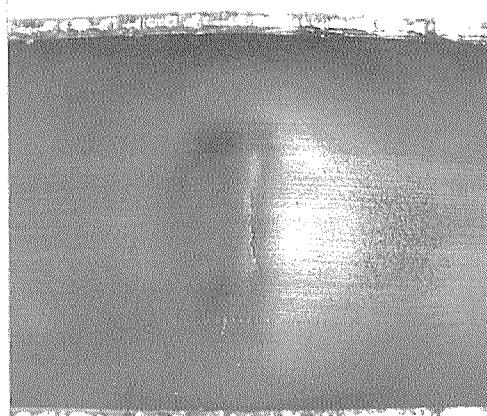
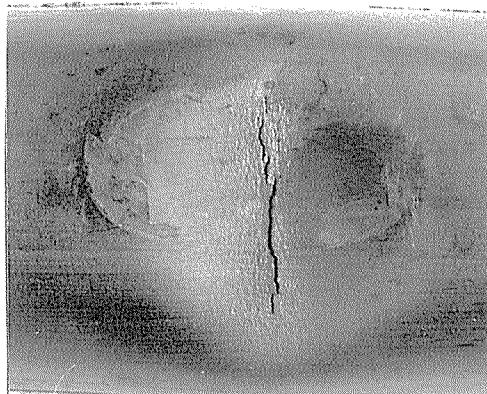


Fig. 16 Cracks at the crossover point of A2 tube.

効とみなされる。ループは現場での施工が難しいので、実用性には乏しい。

4.4 供試管のき裂面

交差部に生じたき裂の外観及び断面の一例を Fig. 16

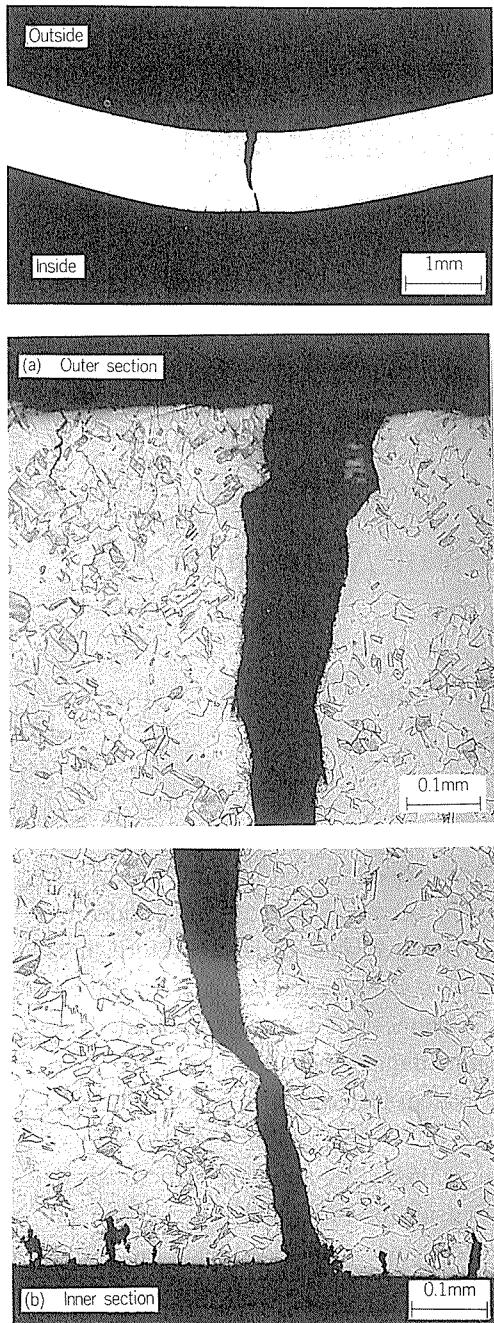


Fig. 17 Cross sections of the crack.

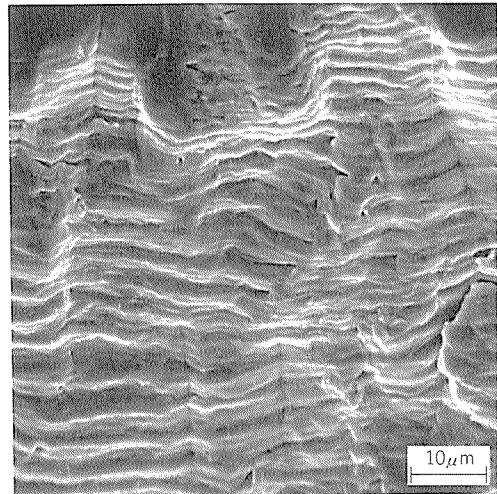


Fig. 18 SEM image of the fracture surface.

及び17に示す。き裂は凹みのほぼ中央においてそのコーナから発生し、管軸方向に対して直角に進展していた。この状況は事故管を再現するものである。Fig. 18はA 2の破面のSEM像を代表例として示す。き裂がサイクルに応じて進行したことを示すストライエーションが明瞭に認められた。以上のように、A系統において1,000サイクル以下でき裂が発生したのは、ひずみの大きな低サイクル疲れによるものであり、交差配管時に形成される凹み部にひずみが集中した結果である。

5. ま と め

- (1) 事故例を模したころがし交差配管部において、ブリゾール管は、拘束条件によっては、給湯に伴う繰返し伸縮に起因した低サイクル疲れによるき裂を発生した。
- (2) 漏洩に至るまでのサイクル数は、ころがし交差配管時に足踏み等によって形成される凹み深さに大きく依存するが、スパン両端の埋設施工要領や固定サドル間隔にも影響されることがわかった。
- (3) コンクリート埋設部の曲り部におけるクッション材の施工はき裂発生防止に有効であるが、更に被覆材がコンクリートとの界面で滑るように施工すれば一層効果的である。また、振幅30mm程度の蛇行配管や交差部浮上り防止治具を用いた施工は凹み部に対する伸縮の集中を緩和するため、実用的な対策である。

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS (Title No. P-391)

論 文

肋骨構造体の応力分布に及ぼす肋骨形状の影響* アルミニウム合金製溶接肋骨構造体の強度に及ぼす 肋骨形状の影響（第1報）

難波圭三** 佐野啓路**
竹島義雄**

Effect of Frame Size on Stress Distributions
of Frame Structures

Effect of Frame Size on Strength of Aluminium
Welded Frame Structures (Rep. 1)

by Keizo Nanba, Hiromichi Sano
and Yoshio Takeshima

住友軽金属工業株式会社技術研究所

論 文

肋骨構造体の応力分布に及ぼす肋骨形状の影響*

アルミニウム合金製溶接肋骨構造体の強度に及ぼす
肋骨形状の影響（第1報）

難波圭三** 佐野啓路**
竹島義雄**

Effect of Frame Size on Stress Distributions of Frame Structures

Effect of Frame Size on Strength of Aluminium
Welded Frame Structures (Rep. 1)

by Keizo Nanba, Hiromichi Sano
and Yoshio Takeshima

Overall section modulus of an aluminium welded frame structure composed of plural frames or frame units, where these are stiffeners with outside plating, has been considered to be decided by total of section modulus of each frame unit designed from the space and loads. Therefore, it is assumed that the overall section modulus dose not depend on the size of each frame unit. The objective of the present study is to investigate the effect of the frame unit size on the strength of frame structures under the condition that the overall section modulus is held constant.

The specimens were designed and fabricated by modeling bottom platings for a fishing boat using 5083-H32 6mm thick plates.

In this study, stress distributions of frame structures were examined by applying static loads to the stiffeners. Similar distributions were obtained at both outside platings and stiffeners in all specimens in spite of the different frame unit sizes. Therefore, it was concluded that the frame unit size had little effect on stress distributions of frame structures.

1. 緒 言

アルミニウム合金の板と骨部材からなる溶接肋骨構造体は、周知のように、構造物の中核を構成する重要な強度部材であり、漁船の縦肋骨構造を始めとして LNG 用タンク構造や水門などに見られる。

肋骨構造体の強度に関しては、例えば、軽構造船基準(案)¹⁾によると、個々の構造要素である板付き肋骨（以下、肋骨と称す）の断面係数は水圧とその心距から算定され、それらが集合して構成する肋骨構造体全体の断面

係数は、個々の肋骨の断面係数とその数の積となり、従って、全体の断面係数は肋骨形状にはよらないこととなる。

本研究は、このような観点に基づいて、外板、肋骨及び肋板から構成される構造体全体の断面係数を一定に保持した場合、肋骨形状とその数を変えて、構造全体の強度に及ぼす影響を検討したものである。

本報では、漁船に用いられる縦肋骨構造の船底外板をモデルとして、軽構造船基準(案)に基づいて製作した肋骨構造の供試体に静荷重を負荷し、各部における応力分布から肋骨形状の影響を検討した。

* 軽金属溶接, 24 (1986), 357に掲載

** 技術研究所応用研究部

2. 供試体形状の算定とその製作

2.1 供試体形状の算定

供試体形状の算定は、当社のアルミニウム合金製小型船舶設計施工ハンドブックにおける実用例を参考に漁船の仕様を設定し(附録、Table A 参照)軽構造船基準(案)・金属艇縦肋骨構造¹⁾に基づいて行った。

まず、船底平坦部に発生する最大船底衝撃水圧 P_0 を算定し、船底勾配に応じて補正した水圧 $P_1 = 0.65 \text{ kgf/cm}^2$ を得、それより船底外板の厚さ $t_0(\text{mm})$ は $t_0 \geq 9.9 \times \text{肋骨の心距 } S_f (\text{m})$ となる(附録、Table B 及び C 参照)。供試体形状は、外板、肋骨及び肋板とも 5083-H32 として、縦弾性係数 E 及び耐力 σ_r はそれぞれ 7,200 kgf/mm²、及び 13kgf/mm² を用いた。耐力は O 材の値を採用したが、これは供試体製作時の溶接施工による熱影響を考慮しているためである。

後述のように、検討しようとしている心距 $S_f = 0.3 \sim 0.6 \text{ m}$ の範囲では、

$$t_0 \geq 5.9(\text{mm}) \approx 6(\text{mm})$$

とした。

次に船底縦肋骨として必要な断面係数 Z_{df} は(1)式より求められる。

$$Z_{df} \geq 420P_1 \cdot S_f \cdot l^2 / \sigma_r \times 10^3(\text{mm}^3) \quad \dots \dots (1)$$

l: 肋板間の距離(ここでは肋板の心距 S_p とした), (m)。

ここで、供試体寸法は $1.3 \times 1.4 \text{ m}$ とし、その肋骨及び肋板の心距 (S_f 及び S_p) を Table 1 のように変えた。ただし、肋骨及び肋板の骨部材の板厚 t 及び T はいずれも外板と同一厚さの 6 mm とした。

(1)式と Table 1 から各々必要とする断面係数 Z_{df} を求めた後、骨部材高さ h を算出した。ただし、このとき外板における有効幅 b をその板厚 t_0 の $6 \text{ mm} \times 40$ の 240mm とした板付き肋骨として計算を行った^{1,3)}。ところが、 P_1 を前述の値に設定すると、肋骨及び肋板の心距が 0.3m のと

き $Z_{df} = 570 \text{ mm}^3$ となり、骨部材高さ $h < 10 \text{ mm}$ で低くなりすぎて隅肉溶接が不可能となる。そこで、 P_1 を 1.6 kgf/cm^2 と高くして計算した。その結果を、Table 2 に示す。骨部材高さ $h = 22 \sim 74.4 \text{ mm}$ の範囲となり、溶接施工上ほとんど問題がないと考えられ、Table 2 の数値を本実験で用いることとした。

引き続き、(2)式から、肋板として必要な断面係数 Z_{dp} について、同様な計算を行った。

$$Z_{dp} \geq 210P_1 \cdot S_p \cdot (B_c/2)^2 / \sigma_r \times 10^3(\text{mm}^3) \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 $P_1 = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $B_c/2 = 1.2 \text{ m}$ とした($B_c/2$ は前述の設定した漁船におけるキールとチャイン間距離)。

その結果を Table 2 に併記した。肋板としての骨部材高さは、 $H = 74.4 \sim 108 \text{ mm}$ の範囲となる。

なお、Table 2 には肋骨及び肋板構造全体の断面係数 Z_{dof} 及び Z_{dop} を示す。

2.2 供試体の製作

供試材料は、前述のとおり外板、肋骨及び肋板とも 5083-H32、板厚 6 mm である。その引張性質を Table 3 に示す。

供試体の製作に当って、その溶接施工はアルミニウム合金製船殻工作精度標準 LWS Q8101^{4~7)}などを参考に以下のとおりとした。溶接は MIG 半自動隅肉溶接を行い、電極ワイヤは A5356WY、外径 1.6mm である。肋骨、肋

Table 1 Dimensions of specimen.

		Outside-plating (m)		1.3×1.4		
Frame	$S_f(\text{m})$	0.3	0.4	0.6		
		Numbers	4	3	2	
Floor-plate	$S_p(\text{m})$	0.3	0.4	0.6		
		Numbers	4	3	2	

Table 2 Dimensions of designed frame structures.

S_p (m)	Frame					Floor-plate				
	Z_{df} (mm ³)	S_f (m)	Z_{df} (mm ³)	h (mm)	Number of stiffeners	Z_{dof} (mm ³)	Z_{dp} (mm ³)	H (mm)	Number of stiffeners	Z_{dop} (mm ³)
0.3	4650 S_f	0.3	1400	22.0	4	5600	11200	74.4	4	44800
		0.4	1860	26.7	3					
		0.6	2790	34.2	2					
0.4	8270 S_f	0.3	2480	31.9	4	9900	14900	86.7	3	
		0.4	3310	37.8	3					
		0.6	4960	47.5	2					
0.6	18600 S_f	0.3	5580	50.8	4	22400	22300	108	2	
		0.4	7440	59.5	3					
		0.6	11200	74.4	2					

Table 3 Tensile properties of base metal.

Yield strength, σ_r (kgf/mm ²)	Tensile strength, σ_B (kgf/mm ²)	Elongation, δ (%)
26.5	37	20

Table 4 Welding conditions.

Electrode wire (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cpm)
A5356-WY φ1.6	230~240	25	70~80

板の開先加工は行わず、かつ、骨部高さが低いため、スカロップや切り開け部を肋板には設けていない。ただし、肋骨は肋板を貫通させている。溶接条件はTable 4のとおりで、隅肉の脚長がおよそ6mmとなるように調整した。骨部材と外板との溶接は断続溶接であり、その溶接長及びピッチは、それぞれ75mm及び200mm程度を標準とした。

溶接施工の手順概略をFig. 1に示す。

製作した供試体はTable 2の内、H3、H4およびH6の3種類で、その詳細をTable 5に示した。ただし、肋板の骨部材の数は、後述の静荷重試験における荷重負荷方法から、いずれも2本とした。Table 5にはh/t、骨部材の断面二次モーメント及び(H/T)/(h/t)等も参考までに併記した。供試体の形状概略及び外観の一例をそれぞれFig. 2及びFig. 3に示す。本供試体は、肋骨、肋板形状が異なるものの、全体の断面係数は一定である。

3. 静荷重試験方法

供試体の静荷重試験は、Fig. 2に示したようにB_c/2に相当する間隔1,200mmで、肋板がその両端において単純支持され、肋骨あるいは肋板構造の骨部材中央部に局部荷重W_fあるいはW_pをそれぞれ負荷することによって行った。この点は2.1項で計算したような船底外板肋骨構造への負荷とは異なるが、肋骨構造としての強度の検討には適用できると考える。

肋骨においては、その骨部材が板で構成されており、

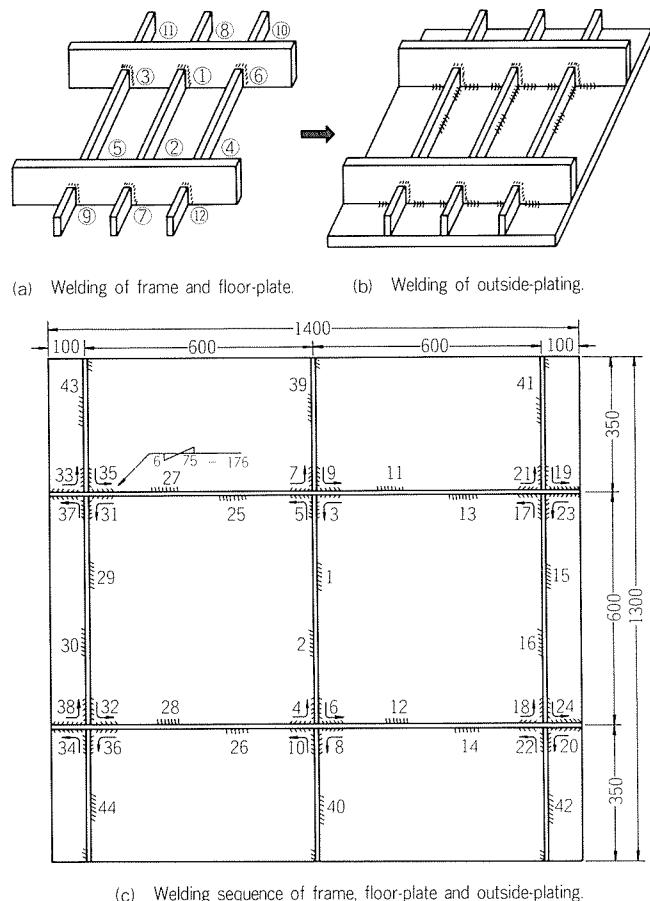


Fig. 1 Example of welding sequence (Specimen : H6).

かつ、その個数が3本以上になるものもあるため、骨部材それぞれに同じ荷重を負荷して、供試体全体としての試験を行うのは、精度上むづかしいと考えられる。そこで、Fig. 2に示したように中央の骨部材のみに荷重W_fを負荷して試験することとした。荷重W_fは各供試体にそれぞれ0から50kgf毎に負荷し、最高荷重はTable 5に示した断面係数Z_{df}によって算定される肋骨構造の骨部材最大曲げ応力が供試材の耐力σ_rに達する程度までとした。

次に肋板においては、Fig. 2に示した2本の骨部材のみにそれぞれ荷重W_pを同時に負荷した。荷重W_pは0から50kgf毎に負荷し、最高荷重は前述のとおりとした。

負荷時における供試体各部に生ずる応力は、ひずみの測定結果から(3)式を用いて算出した。

Table 5 Dimensions of specimens.

Specimen	Frame						Floor-plate						$\frac{H}{t}$ $\frac{h}{t}$		
	S _f (m)	h (mm)	h/t	th ³ /12 (mm ⁴)	Z _{df} (mm ³)	Number of stiffeners	Z _{dop} (mm ³)	S _p (m)	H (mm)	H/T	TH ³ /12 (mm ⁴)	Z _{dp} (mm ³)	Number of stiffeners	Z _{dop} (mm ³)	
H3	0.3	22.0	3.67	5320	1400	4	5600	0.3	74.4	12.4	206000	11200	(4) ⁽¹⁾		3.38
H4	0.4	37.8	6.3	27000	3310	3	9900	0.4	86.7	14.5	326000	14900	(3) ⁽¹⁾	44800	2.29
H6	0.6	74.4	12.4	206000	11200	2	22400	0.6	108	18.0	630000	22300	2		1.45

⁽¹⁾ Number of stiffeners in these specimens is 2.

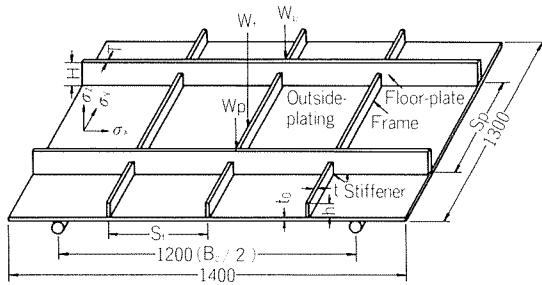


Fig. 2 Schematic representation of specimen and applied load positions.

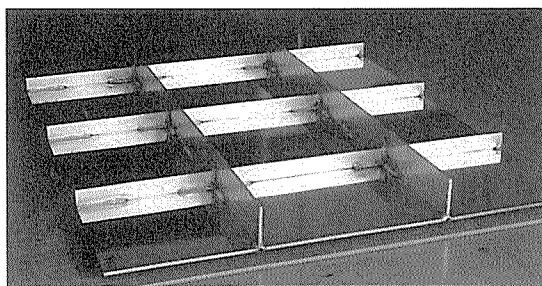


Fig. 3 Appearance of specimen (H4).

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y), (\text{kgf/mm}^2) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x), (\text{kgf/mm}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ここで、 $E : 7,240 \text{ kgf/mm}^2$ (実測値), $\nu : 0.33$ 。

ひずみゲージは、外板では共和電業社製90°2軸交叉型KFC-5-D16-23を用い、骨部材では同型KFC-2-D16-23を用いた。

ひずみ測定位置の一例をFig. 4に示す。外板においては骨部材側及びその反対側、骨部材においてはその両面にて、それぞれ荷重点直下(P)、外板と骨部材の接合部中央(C)その他(E)におけるひずみを測定した。なお、肋骨の心距方向をX軸、肋板の心距方向をY軸、骨部材の高さ方向をZ軸としている。ひずみからの応力の算出に際しては、荷重 W_f 及び W_p とその時生じたひずみの関係において直線性の有無を確認しつつ行ったことはいうまでもない。

静荷重試験状況をFig. 5に示す。

4. 実験結果

4.1 肋骨の応力分布

肋骨に荷重 W_f を負荷した場合、外板、肋骨及び肋板骨部材の応力分布は、供試体H3、H4及びH6において、ほとんど同様な傾向をもち、肋骨及び肋板形状の影響は認められなかった。また、いずれの供試体においても、最大の曲げ応力(圧縮)は、荷重点直下の肋骨骨部材縁部において認められた。

各部材における応力分布を以下に示すが、いずれも本

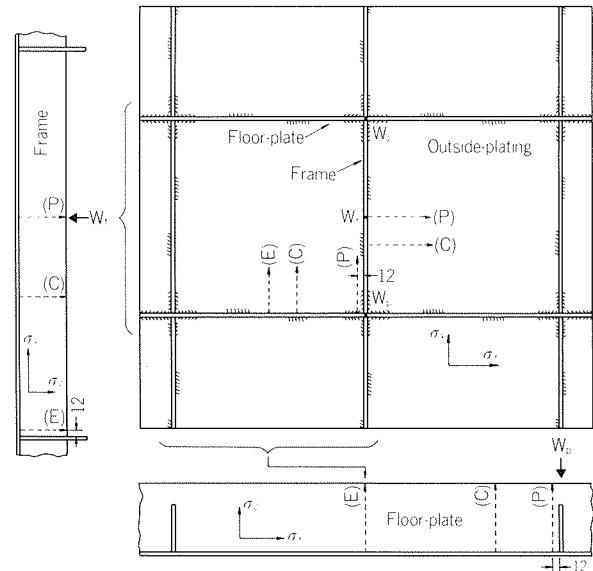
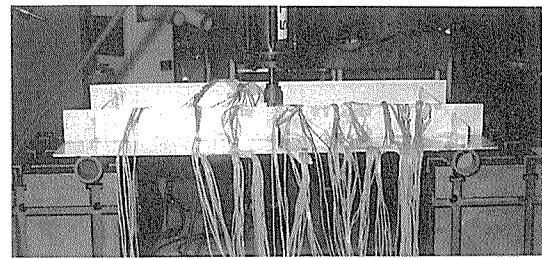
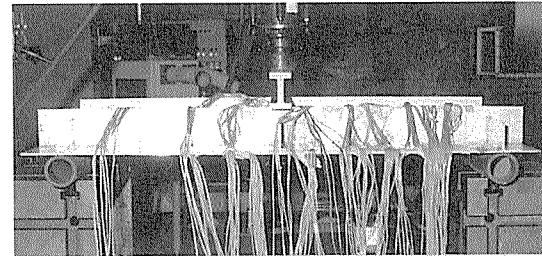


Fig. 4 Schematic representation of locations of applied static-loads and measuring stress (strain).



(a) On frame



(b) On floor-plate

Fig. 5 General view of static-load test.

供試体のような構造において通常認められるものであり、ほぼ予想どおりの結果である。

(1)外板における応力分布

骨部材と反対側の外板における荷重点直下(位置(P))での、肋骨の心距方向に沿った応力分布の例をFig. 6に示す。 σ_y が肋骨骨部材近傍で最も高く、それから離れるに従い漸減する。一方、その値は低いが σ_x も同様な分布を示している。これはFig. 2に示したような支持のもとで負荷したためであろう。荷重点から離れて、肋板との嵌合部に近づくに従い、 σ_y 、 σ_x とも低くなる。

肋板の心距方向に沿っては、本実験における測定位置の範囲では、 σ_y 、 σ_x ともほとんど認められなかった。

(2)肋骨骨部材における応力分布

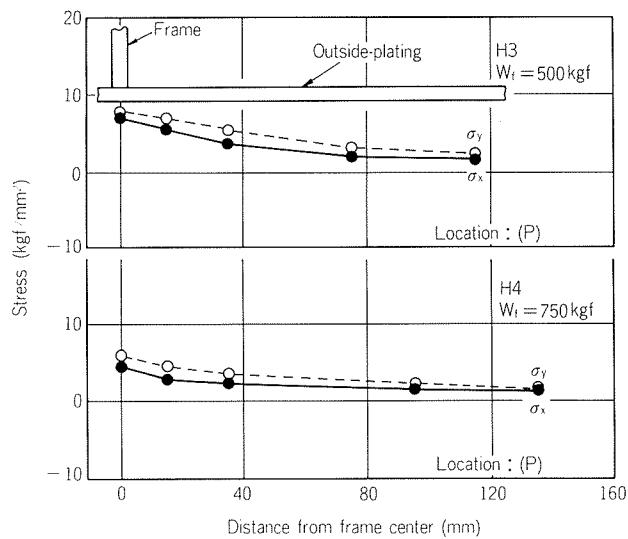


Fig. 6 Stress distribution on outside-plating, where static load is applied to frame.

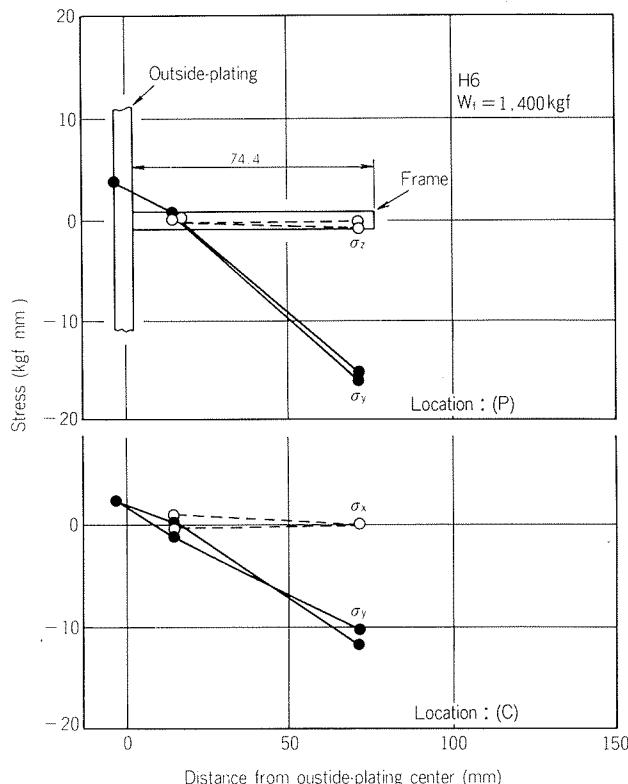


Fig. 7 Stress distribution on frame, where static load is applied to frame.

肋骨骨部材におけるその高さ方向に沿った応力分布の例をFig. 7に示す。 σ_y は外板で引張り、肋骨骨部材縁部では圧縮となる。これらの値は荷重点直下(位置(P))において最高で、それから離れるに従い位置(C)の場合のように低くなる。肋板との嵌合部では σ_y の分布の正負がFig. 7の場合と逆になり、外板で圧縮、肋骨骨部材縁部で引張りとなるが、その値は低い。 σ_z はほとんど生じていない。

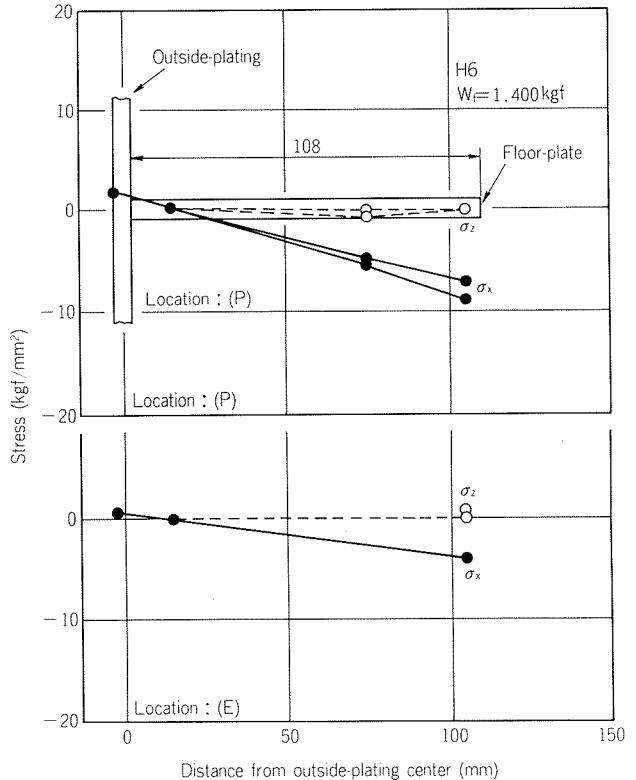


Fig. 8 Stress distribution on floor-plate, where static load is applied to frame.

(3) 肋板骨部材における応力分布

肋板骨部材におけるその高さ方向に沿った応力分布の例をFig. 8に示す。 σ_x は外板で引張り、肋板骨部材縁部で圧縮となる。これらの値は肋骨との嵌合部(位置(P))において最高となり、それから離れるに従い低くなる(位置(E))。ただし、 σ_z はほとんど生じていない。

4.2 肋板の応力分布

肋板においても、各々の供試体各部材における応力分布はほとんど同様な傾向を示し、やはり肋骨、肋板形状の影響は認められず、又最大の曲げ応力(圧縮)は荷重点直下の肋板骨部材縁部において認められた。応力分布を以下に示す。

(1) 外板における応力分布

骨部材と反対側の外板における肋骨の心距方向に沿った応力分布では、(P)及び(C)いずれの位置でも、1~2 kgf/mm²の σ_x が認められ、 σ_y はほとんど生じなかった。

肋板の心距方向に沿った荷重点直下(位置(P))での応力分布の例をFig. 9に示す。 σ_x のみが認められ、 σ_y はほとんど生じていない。この点がFig. 6の場合と少し異なる。なお、 σ_x は荷重点から離れるに従い低くなる。

(2) 肋板骨部材における応力分布

肋板骨部材におけるその高さ方向に沿った応力分布の例をFig. 10に示す。この傾向は4.1(2)項に示した肋骨の場合とほとんど同様で、 σ_x が外板で引張り、肋板骨部材縁部で圧縮となる。これらの値は、荷重点直下(位置(P))

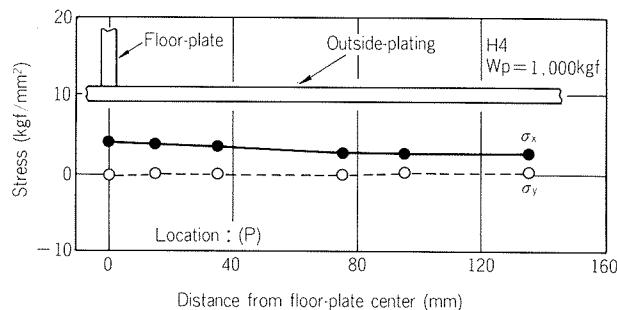


Fig. 9 Stress distribution on outside-plating, where static load is applied to floor-plate.

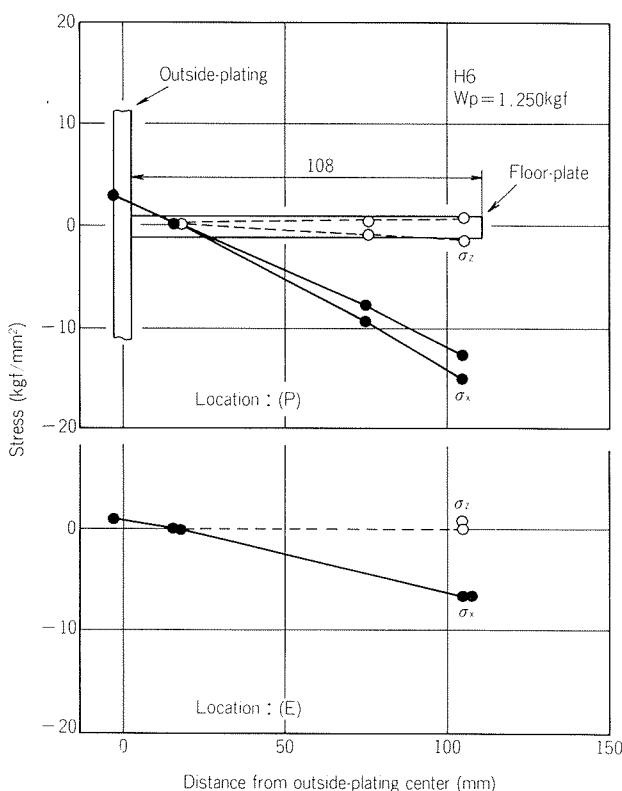


Fig. 10 Stress distribution on floor-plate, where static load is applied to floor-plate.

で最高となり、それから離れるに従い低くなる(位置(E))。 σ_z はほとんど生じていない。

なお、肋骨骨部材においては、 σ_y 、 σ_z ともほとんど生じていなかった。

以上のように、供試体各部材における応力分布には、肋骨、肋板形状の影響は認められなかった。ただし、以下の点について少し付記しておく。

まず、本供試体製作時の溶接による影響、例えば溶接熱による各部材の変質や溶接残留応力については、本実験の測定位置に関する限り、不明であった。すなわち、負荷において、荷重一ひずみ間の直線性が失われた位置は前述の最大曲げ応力が認められた荷重点直下の骨部材縁部であって、別の供試体において求めた、溶接熱影響部(硬度測定による)や溶接残留応力の比較的高い位置

とは異なっていた。

次に、断続溶接の溶接有無による影響と考えられる点については、供試体H4やH6の一部の部材において認められ、骨部材と外板の溶接がなされていない部分では、両者が一体化して応力分担していない傾向がわずかに認められた。

以上の2点については今後、検討を行って別の機会に報告したい。

5. 結 言

本研究は外板、肋骨及び肋板から構成される肋骨構造全体の断面係数を一定に保持した場合、肋骨形状とその数を変えて、構造全体の強度に及ぼす影響を検討したものである。

本報では、5083-H32、板厚6 mmを用いて断面係数一定のもとで肋骨形状の算定を行って製作した肋骨構造の供試体に静荷重を負荷し、各部における応力分布から肋骨形状の影響を検討した。

得られた結果は以下のとおりである。

(1) 製作した3種類の供試体における外板、肋骨、肋板骨部材の応力分布は、以下のようにいずれも同様な傾向を示し、肋骨形状による影響は認められなかった。

(2) 肋骨に静荷重を負荷した場合、外板において、 σ_y (肋板の心距方向の応力)、 σ_x (肋骨の心距方向の応力)とも、肋骨の心距方向に沿って引張り、肋骨骨部材において σ_y が外板から縁部へ引張りから圧縮、肋板骨部材において σ_x が外板から縁部へ引張りから圧縮となる。

(3) 肋板に静荷重を負荷した場合、外板において σ_x が肋板の心距方向に沿って引張り、肋板骨部材において σ_x が外板から縁部へ引張りから圧縮となる。

(4) その他の部分では、応力の分布はほとんど認められない。

次報では、本報において算定した肋骨形状から計算される最大曲げ応力と、実測した応力分布から得られた最大曲げ応力との関係を、肋骨形状を介して検討した結果について報告する。

文 献

- 1) アルミニウム合金船委員会：アルミニウム合金製漁船、(1983), 60.
- 2) 住友軽金属工業(株)技術研究所編：アルミニウム合金製小型船舶設計施工ハンドブック改定版、(1984), 163。(底曳網漁船の例である)
- 3) 例えば、林毅編：軽構造の理論とその応用(上)，日本科学技術連盟、(1966), 367.
- 4) アルミニウム合金製船殻工作標準、LWS W8101-1981.
- 5) アルミニウム合金製船殻工作精度標準、LWS Q8101-1981.

- 6) 日本海事協会：鋼船規則（1979）
 7) 丹羽誠一：アルミニウム合金製小型船の設計。

附録. 水圧 P_1 及び船底外板厚さ t_0 の算定

供試体形状を算定するに当り参考にした漁船の仕様をTable Aに示す。本仕様は当社の施工ハンドブック²⁾に掲載されている実用例に類似したものである。

軽構造船基準に基づいて船底外板に発生する水圧 P_1 を算出するとTable Bのようになる。既ち、 $P_1=0.65\text{kgf/cm}^2$ 。

次に船底外板の厚さ t_0 を算出するとTable Cのようになる。既ち、 $t_0 \geq 9.9S_f(\text{mm})$ 。

但し供試材料は5083-H32として、縦弾性係数Eおよび耐力 σ_r をTable Cに示した値を用いた。

Table A Specification of referred fishing boat.

Designed speed, V (knot)	Full load displacement, W (ton)	Maximum breadth between both chines, Bcm (m)	Length, L (m)	Acceleration of slamming, A_F (g)	Average rise of floor, β (deg)
10	7.7	2.4	13.8	3	15

Table B Water pressure of slamming, P_1 .

Maximum water pressure of slamming, $P_0 (\text{kgf/cm}^2)$ $P_0 = \frac{V^2}{1000} + (1 + 1 \times A_F) \frac{W}{L \times Bcm}$	1.03
Water pressure of slamming, $P_1 (\text{kgf/cm}^2)$ $P_1 = K P_0 = 0.63 \times 1.03$ K : Coefficient by rise of floor $V/W^{1/6} = 7.14 < 10$ $K = \left(\frac{5}{\beta - 5} \right)^{2/3} = 0.63$	0.65

Table C Thickness of bottom-plating, t_0 .

$t_0 = S_f \sqrt{\frac{\sigma_r}{E}} \cdot (169 + 31.6 \sqrt{227\varepsilon - 71.4}), (\text{mm})$ $\varepsilon = 0.012P_1 \cdot \frac{E}{\sigma_r^2}$ E : Modulus of elasticity, 7200kgf/mm^2 σ_r : Yield strength, 13kgf/mm^2 S_f : Frame space (m)	$9.9 \times S_f$ $S_f = 0.3 \sim 0.6$ $t_0 \geq 5.9\text{mm}$
--	---

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS (Title No. R-315)

技術資料

スポーツカー「New RX-7」のフロントフードのアルミ化*

宗 藤 修 義** 西 村 嘉 彦***

Development of Aluminium Engine-Hood for
New RX-7 Sport Car

by Nobuyoshi Munetoh and Yoshihiko Nishimura

住友軽金属工業株式会社技術研究所

スポーツカー「New RX-7」のフロントフードのアルミ化*

宗 藤 修 義** 西 村 嘉 彦***

Development of Aluminium Engine-Hood for New RX-7 Sport Car

by Nobuyoshi Munetoh and Yoshihiko Nishimura

Weight reduction has always been one of the most important concerns of automobile designers. An especially attractive way to save weight without reducing vehicle size lies in direct substitution of a lighter for a heavier materials.

Recently MAZDA introduced "30-30" aluminium alloy which is SLM original alloy GZ45-T4 to the front hood of New RX-7, first in Japan as a mass production model. This successful application is mainly based on the development of an optimum alloy for the front hood and the appropriation in the current manufacturing line for mass production.

A weight reduction of about 9 kg has been achieved by means of the aluminium alloy used in the front hood.

1. はじめに

自動車の安全性、耐久性に関する要求はますます高くなり、さらに、ユーザーの高級化志向による装備品の増加もあって、車体の軽量化に対して厳しい環境となっている。重量増加は燃費、走行性能に大きく影響し、特に「走り」の良さを極限まで追求するスポーツカーにおいて、軽量化は最重要テーマである。そこで今回、開発したスポーツカー「New RX-7(図1参照)」には種々のアルミニウム合金製部品が採用され、大幅な重量軽減が達成された。中でも、日本車において初めて採用されたアルミニウム合金製フロントフードは10kg近い軽量化をもたらした反面、その研究開発から、量産開始に至るまでに多くの問題を生じたが、それらは次の二つに大別できる。

一つは、過酷な条件下で使用される自動車のフロントフードとして、強度、耐食性、成形性、溶接性を有するアルミニウム合金の開発であり、もう一つは鋼板を使用している現在の製造ラインの中で、アルミニウム合金製フロントフードを混流生産するための工程、設備、加工条件の設定であった。

マツダ㈱と住友軽金属工業㈱による自動車用フロントフードへのアルミニウム合金の採用に関する基礎的な研究開発は、昭和53年から57年に至る5年間にわたって行われ、材料及び加工技術上の問題点の確認と基本的な対応技術を開発した。また、対象車種と開発スケジュール設定後の量産化技術開発は昭和58年後半から60年前半にかけて実施した。

本報では、国内で初めて量産車に採用されたアルミニウム合金製フロントフードの開発過程で生じた問題点と

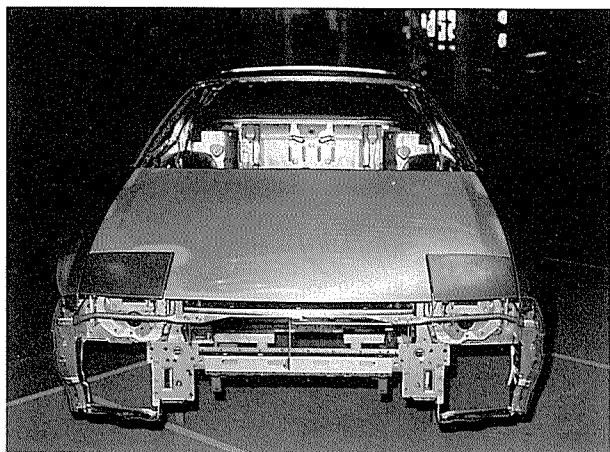


図1 アルミニウム合金GZ45-T4フロントフードを採用したスポーツカー「New RX-7」のホワイトボディ

* 日経ニューマテリアル(1986, 4-7), 63に掲載

** マツダ㈱第3生産技術部

*** 技術研究所開発室

その対応策について紹介する。

2. フロントフード用アルミニウム合金

自動車のフロントフードに用いる材料は、強度、耐食性等の基本特性が要求されるのはもちろん、プレス成形、接合、塗装などの2次加工性も不可欠である。むしろ、材料面でいえば、2次加工性が実用化の大きな鍵を握っているといえる。現在の鋼板製フロントフード製造ラインの設備、機械を最大限に活用し得る技術の開発と製品仕様を満足する条件を確立することが最大の課題であった。

2.1 「30-30」合金 GZ-45の特長

従来、欧米において開発・実用化された多くの自動車パネル用アルミニウム合金（表1参照）は強度的には冷延鋼板並みの水準に達しているが、成形性を左右する最重要因子である伸びに関してはいずれも25%程度であり、商品化に際しての大きな障害になっていた。

今回、スポーツカー「New RX-7」のフロントフードに採用された「30-30」合金GZ45^{1,3)}は、自動車製造会社の要請である製品性能及び生産技術上の問題点に対応して住友軽金属工業㈱が開発したものである。

GZ45合金の主な化学成分は、Al-4.5Mg-1.45Zn-0.2Cu-0.18Feであり、冷延鋼板並みの引張強さ30kgf/mm²と優れた成形性（伸び30%）を兼ね備えている。強度とプレス成形性の向上に重点を置いてMg, Zn, Cuなどの主要元素の添加量を選定し、さらにMn, Cr, Vなどの微量添加は再結晶粒の微細化や塗装焼付処理工程における強度低下防止に有効である。

同合金は熱処理型であり、短時間加熱においてもかなり広範囲な温度域で溶体化処理が可能であり、良好な機械的性質を得ることができる。さらに、焼入れ性が優れているため、溶体化処理温度から水冷のような急速冷却を行う必要はなく、空冷程度の冷却速度によっても十分

表1 ボディパネル用アルミニウム合金の主要化学成分と機械的性質

材質	化学成分(%)					機械的性質		
	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	耐力(kgf/mm ²)	引張強さ(kgf/mm ²)	伸び(%)
2002-T4	0.4	2.0		0.75	—	18.3	33.7	26
2036-T4	—	2.6	0.25	0.45	—	19.9	34.7	24
X2037-T4	—	1.8	0.25	0.55	—	17.3	31.6	25
5182-0	—	—	0.35	4.5	—	13.3	28.1	26
5182-SSF	—	—	—	—	—	12.8	27.5	24
6009-T4	0.8	0.35	0.5	0.6	—	12.8	23.5	25
6010-T4	1.0	0.35	0.5	0.8	—	17.3	29.6	24
GZ45-T4	0.09	0.38	微量	4.5	1.46	15.5	30	30
1010鋼板						18	32	42

に焼きが入る。焼入れ後約2週間ではほぼ常温時効は終了し、安定したT4材が得られる。一方、自動車フロントフード用材料の表面は塗装後の製品表面の方向性をなくするため、一般にマット圧延が施され現状の冷延鋼板では、表面粗さR_{max}が5~10μmの範囲で管理されている。アルミニウム合金に対しても、フェンダなど鋼板製の他の部品と外観仕上り状態を同一にするため同じような表面粗さに仕上げた。これは、従来のアルミニウム合金板の表面粗さR_{max}0.5~2.0μmに対し1オーダー近く粗くなっている。

2.2 プレス成形性

フロントフードは、一般にアウターパネルとインナーパネルによって構成される。アウターパネルは緩やかな張出しによって全体形状に形成され、さらに端部はインナーパネルと接合するために、ダウンフランジ、ヘミング加工が施される。インナーパネルは強度特性を向上させるため、張出し、絞り、伸びフランジ加工によって、複雑な断面形状に形成される。アウターパネルのヘミング加工やインナーパネルの加工は難かしく、材料には優れた成形性が要求される。プレス成形性は引張試験から得られる伸び、n値、r値、エリクセン値や限界絞り比、液圧バルジ試験、成形限界曲線などによって総合的に評価される。表2にGZ45-T4合金の成形性指標を、表3にバルジ試験結果をそれぞれ示す。

アウターパネルのヘミング加工性も重要な課題である。欧米のアルミニウム合金製フロントフード車の多くは、アウター、インナー両パネルの接合をダウンフランジ段階で行っている。それに対し、今回はフロントフード開閉時の安全性や端部の防錆の点から、ヘミングによる接合を採用した。

ヘミング試験は表4に示す加工条件²⁾で行った。結果を図2に示す。フラットヘム、ロープドヘムいずれの場合も、ダウンフランジ工程のコーナーRが加工性に大きく影響している。これらの結果から、商品開発の段階で採用したヘミング形状を図3に示す。

また、プレス成形におけるもう一つの課題である鋼板とアルミニウム合金板のプレス金型の共通化についても、ある程度の目安がついた。

表2 GZ45-T4合金の成形性指標(板厚1mm)

材質	n値	r値	耳率(%)	エリクセン値(mm)	限界絞り比(LDR)
GZ45-T4	0.29	0.71	1.5	9.8	2.14

表3 GZ45-T4合金の液圧バルジ試験結果(板厚1mm)

材質	バルジ高さ(mm)		
	円バルジ(Φ100)	楕円バルジ(94×60)	楕円バルジ(94×40)
GZ45-T4	29.8	20.5	15.6

表4 加工工程と加工条件

加工名称	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程
	絞り	トリム	ダウントランジ	プレヘム	ファイナルヘム
加工形状					
加工条件	しづくさえ力4t (フード周長4mとしてもしわくさえ力50ton強に相当)		コーナーRは0, 1, 2, 2.4mmとする。工具表面粗さR _{max} 0.2 μm, クリアランス0%, 加工速度300mm/sec, 無潤滑		フラット及びロープドヘム, インナーパネル相当のスペーサ板厚は1.0mmとする

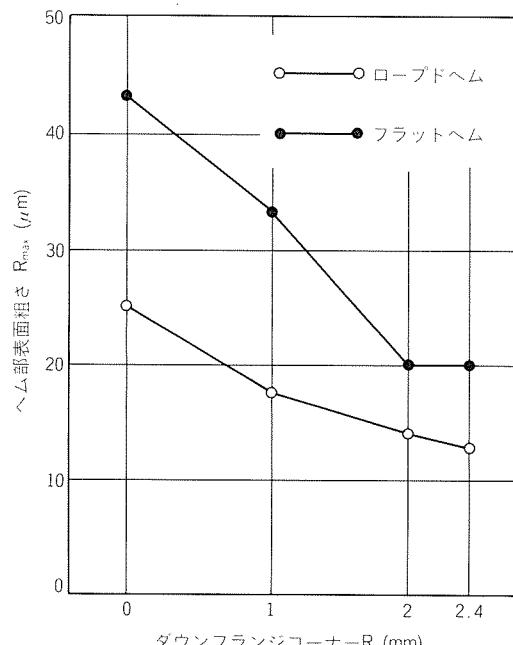


図2 ダウントランジコーナーRとヘム部表面粗さの関係

2.3 接合

フロントフードを製造する際、アウター、インナーの両パネル、インナーパネルとスティフナ、ヒンジ類の取付けなどには種々の接合方法が用いられる。

鋼板の場合、抵抗スポット溶接を主体に溶融溶接や接着剤が使用されている。GZ45-T4合金は抵抗スポット溶接性、溶融溶接性ともに良好であるが、鋼板に比べるとかなり難かしい。まず、表面に強固な酸化皮膜が存在するので、そのままでは接融抵抗が大きく不均一なため、継手強度にばらつきが生じやすくなる。さらに、電極へのアルミニウムのピックアップが発生しやすくなり、それを取除く回数が多くなる。そのため、前処理をしないと、連続打点数はせいぜい200~300点である。熱伝導度、

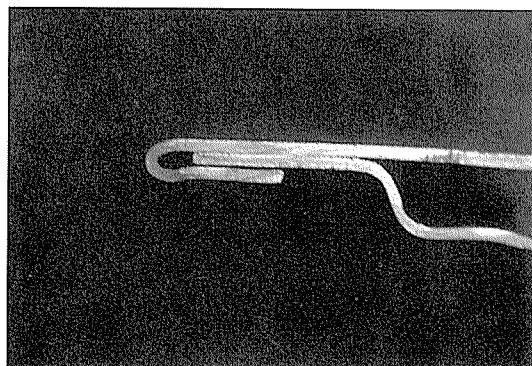


図3 ヘミング接合状況

電気伝導度も大きいため、大電流、短時間通電による熱集中が必要になる。加えて、線膨張係数、体積収縮率が大きく、ひずみが発生しやすい。

以上の結果として、抵抗スポット溶接による圧痕も大きくなるため、外観が重視されるアウターパネルへの適用については特に疑問視されていた。この抵抗スポット溶接については詳細な実験を行ったが、量産設備や生産性の点から最終的な結論は商品化開発の段階まで持ち越された。

2.4 塗装

塗装に関する技術開発も重要な課題であった。外観仕上り状態や二次密着性などの塗膜特性を鋼板並みにする必要がある。アルミニウムの場合適正な塗装条件を選定しさえすれば鋼板の場合と同等の優れた塗膜特性が得られるが、今回は現行の鋼板用塗装ラインを最大限に活用するという課題が設定されていたため、特に下地化成処理に関しては詳細な実験を行った。

現行のりん酸亜鉛液で化成処理した場合、アルミニウム合金には化成皮膜がほとんど形成されないため、塗装後に錆腐食が発生する(図4参照)。そこで、現行処理液にふっ化物を添加するか、または化成処理液をクロメ

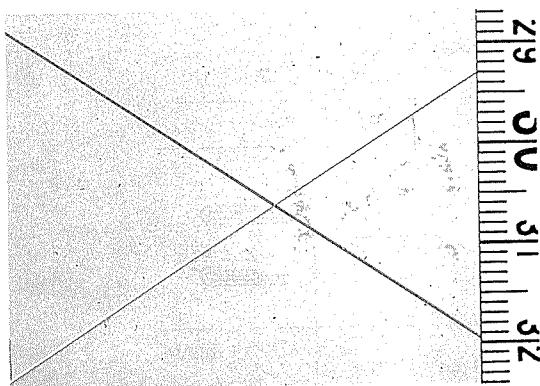


図4 りん酸亜鉛化成処理材の糸錆発生状況

一ト系に変更するのがよい。また、アルミニウム合金は、素材そのものの耐食性が鋼板に比べて著しく優れているため、塗装上の欠陥がなければ特に問題はない。ただし、鋼板などの異種金属との電食には十分注意し、接觸箇所には電気的絶縁物を介在させるなどの配慮が必要になる。

以上のような二次成形性の詳細な検討に加え、試作品で、曲げ剛性、振り鋼性、耐デント性などの強度試験も行った。現行の鋼板に対して同等の強度特性を得るには、アウター、インナー両パネルとも板厚1mmが必要であることも明らかになった。

3. 商品化開発

GZ45-T4合金製の試作フロントフードの基礎評価が完了すると、次に商品化のための品質表が必要になる。

表5 アルミニウム合金フロントフードの品質表の一部

張り剛性 ねじり剛性	ストッパー 座屈強度 当たり面精度 (kg/mm); (kg/mm)	外板歪み アウターとインナーのスキ (kg/mm); (mm); (μm)	充填材点数 位置 (n)	充填材塗布量 サンディング仕上げあらさ (g); (s)	ヘムシラー塗布量 (g)	溶接強度 (kgf)	外周スキ 溶接点数・位置 ヒンジ取り付け面精度 溶接精度 ストライカーポジション精度 (mm)	ボンネット ASSY	型精度プレス加工条件					
									ドロー型表面精度 フランジ型外周精度 (μm)	フランジR ポンチのメッシュ厚 (mm)	ポンチボンチR ポンチ加圧力 (mm)	しづかえ圧力 (mm)	ポンチ加圧力 (mm)	潤滑油
● ○		●						アウター断面形状 (mm)			● ○			
			●					アウター表面歪み (μm)	●		○ ○ ○			
			○	●				アウター表面キズ (μm)		●				
						●		フランジ面外周スキ (mm)	●					
						○		フランジ曲げR (mm)	●	●				
								溶接表面の油・水 ヘム面の波打ち (μm)				●		
			●					ストライカーレイン沿面 (mm)						
							●	ヒンジ取り付け面精度 (mm)						
○ ●		○			○			インナー断面形状 (mm)			● : 大きく影響			
		●						ストッパー当たり面精度 (mm)			○ : かなり影響			

多く、研究段階でこれらの要因と水準をすべて網羅して評価することは困難なためである。例えば、成形された曲面形状の部品を抵抗スポット溶接する場合、電極と被溶接物を常に垂直にセットできるとは限らず、ある範囲の傾きを生じてしまう。また、アルミニウム合金板の製造工程から、溶接工程までの間には多くの工程を経るために、被溶接物の表面状態を均一に保つことも困難である。これらが影響し合って溶接強度が劣化し、さらに電極表面にピックアップが生成するため、溶接強度が規格下限に低下するまでの連続打点数に影響する。そこで、量産時に起こり得る要因を考慮した上で多くの溶接強度試験を行い、工程、設備仕様と溶接条件を設定した。試験時の溶接打点数は約13,400点である。

図5からわかるように、電極と被溶接物の相対角度 θ が7.5°以上になると溶接強度が低下し、 $\theta=10^\circ$ を越えると溶接部に割れが発生する。そこで、当初はポータブルガンを使用した手作業を設定したが、溶接強度の保証からロボットによる自動溶接工程に変更した。図6及び7に溶接状況を示す。

3.2 表面仕上げ

アルミニウム合金製フロントフードを量産する場合、溶接性だけでなく、表面仕上げ性も見逃せない。

品質の高いカラードボディを得るために、塗装条件のコントロールも重要であるが、塗装前の車体外板の表面状態（粗さ、ひずみ）が塗装性を左右するからである。しかも、アルミニウム合金は鋼板に比べて、板の表面に傷が付きやすく、外板仕上げが難かしい。

アルミニウム合金製フロントフードの商品化開発においても、当然それらに対する予防策を実施したが、外板

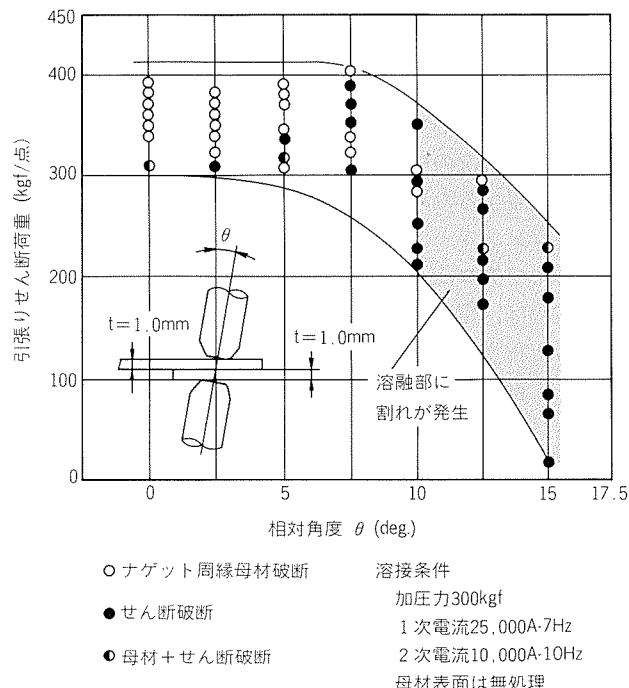


図5 電極角度と溶接強度の関係

表面の仕上げ粗さに関する問題解決は量産開始直前まで手間取った。

傷の防止策については、加工経験が豊富な厨房器製造会社などからノウハウを取り入れ、フロントフード製造ラインに反映させた。型具、治具の構造、材質、表面処理などの改善は当然であるが、鋼板と異なって、アルミニウム合金は異物との摺動によって傷が生じるため、特にパネルの搬送システムに多くの改良を加えた。

しかし、これらの対策を実施しても微小のすり傷は皆無にならないし、プレス加工時の異物かみ込みによる凸凹状のピンブルも発生する。これらの表面仕上げにも多くの問題があった。というのも厨房器などの小型製品は、定置式バフで表面仕上げが可能であるのに対し、フロントフードは大きく、かつ塗装前のパネルは剛性が低い。そのため作業台にセットし、作業者がサンダーを使用して仕上げを行わざるをえないからである。

サンディングを行うことにより生じた鋼板と異なる現象の大きなものとして、「仕上げ粗さ」と「形状変位量」が挙げられる。図8に仕上げ粗さを、図9に形状変位量をそれぞれ示す。鋼板と同一の加工条件では、いずれも品質基準を満足しない。そこで、溶接強度試験と同様に、要因と水準を組合せた実験を行い、その寄与率を求め、ツールの選定と作業方法の設定をすることにより、品質基準を達成した。

これらの実験・解析は、主として製造部門、検査部門が担当した。なぜなら、仕上げ品質に影響を及ぼす要因

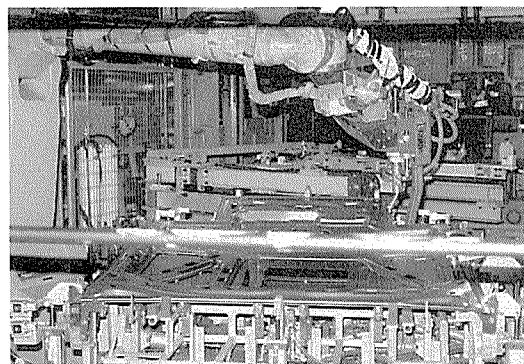


図6 インナーパネルの溶接ロボット

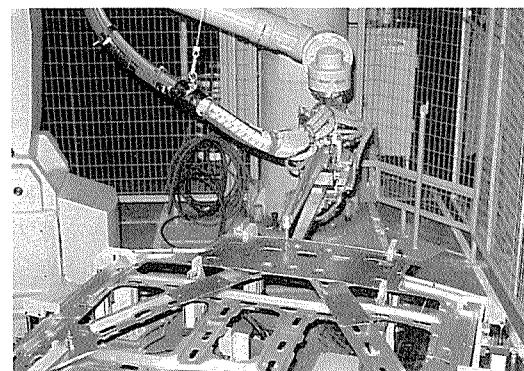


図7 フロントフードの組立工程

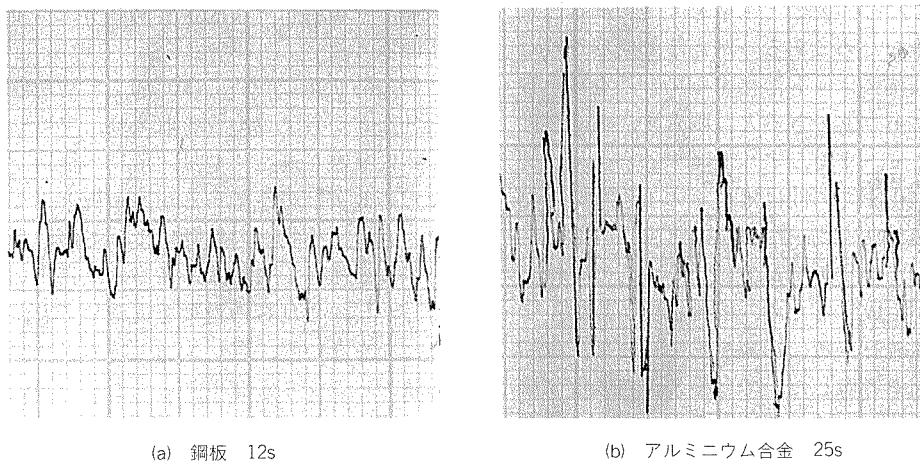


図8 仕上げ粗さの比較

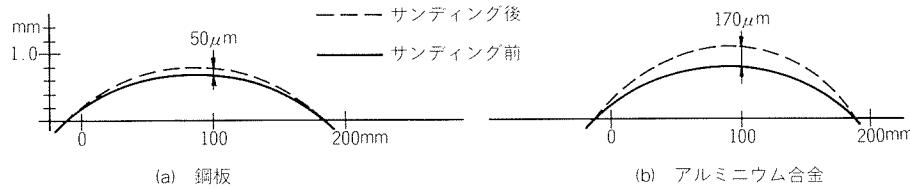


図9 サンディングによる形状変位量(残留ひずみ量)(加工条件は図8と同じ)

表6 粗さ・変位量に影響を及ぼす要因

要 因		粗さ(s)	変位量(μm)
部品の剛性 (kgf/mm)			
ツール	回転数 (rpm)		
	ディスク粒度 (#)	○	○
	ディスク角度 θ (deg)	○	○
作業方法	加圧力 (kgf/cm ²)		
	繰返し回数 (n)		
送り速度 (mm/sec)	○		

が、作業者のスキル、ツールの整備状態などの製造技術に深く関連しているためである。その結果、仕上げ粗さは研磨するディスクの粒度や角度、送り速度に左右され、変位置はディスクの回転数とディスクの角度に影響することがわかった。結果を表6に示す。

3.3 設備、工具の共用化

溶接法、表面仕上げ性などの問題を解決すると、商品化を進める上で最大のネックとなるのは、如何にして従来の鋼板用製造ラインに乗せてアルミニウム合金製フロントフードを製造するかに掛ってくる。2種類のフロントフードを生産する理由の一つは、車の仕向け地、装備仕様により車の重量差が大きくなるため、それらを総合的にバランスをとるためである。そこで、設備投資、工場スペース、作業能率などの面から工程、設備の共用化を行い、工程間ストックを最小にして、2種類のフロン

トフードを任意に作り分けることのできる製造ラインの新設が必要になる。

しかし、アルミニウム合金と鋼板では、材料特性が異なるため、従来では設備の共用化は困難とされていた。例えば、プレス成形時のスプリングバック量に差があるため、同一の型具から同一精度のアルミニウム合金と鋼板の成形品を得ることは難しい。また、アルミニウム合金は非磁性のため、磁性を利用して従来の生産設備、ラインコントロールシステムなども使用できない。このような状況の中で、2種類のフロントフードの混流生産を実現するために新しい製造ラインを開発した。図10にフロントフードの製造工程の概要を示す。

この中でアルミニウム合金を採用したために要した特殊な工程は、電食防止のためにヒンジ部品をカチオン電着する工程と、糸錆防止のためアルミニウム合金フロントフード部品をクロメート処理する2工程である。

さらに、プレス型具を共用化するのもポイントである。表7にプレス型具の共用化レベルを示す。

アルミニウム合金と鋼板の材料特性値の差を吸収するため、開発途中において一部製品形状と構造の変更を行ったが、成形条件のコントロールなどにより、同一精度のプレス成形品を得ることができた。図11及び12のように、アルミニウム合金としては、非常に成形度の高いレベルにある。

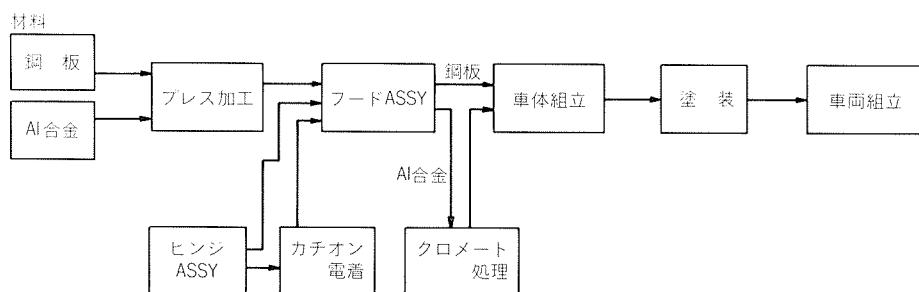


図10 アルミニウム合金フロントフードの製造工程概略図

表7 アルミニウム合金板と鋼板の型具共用化

アウター		インナー	
鋼板 (t=0.8mm)	Al合金 (t=1.0mm)	鋼板 (t=0.6mm)	Al合金 (t=1.0mm)
ドローイング	←共用	ドローイング	←共用
トリミング	←共用	トリム& ピアシング	←共用
フランジング	⁽¹⁾ ←共用	ピアス& リストライキング	←共用 リストライキング (追加工程)

(1) ポンチのみは専用

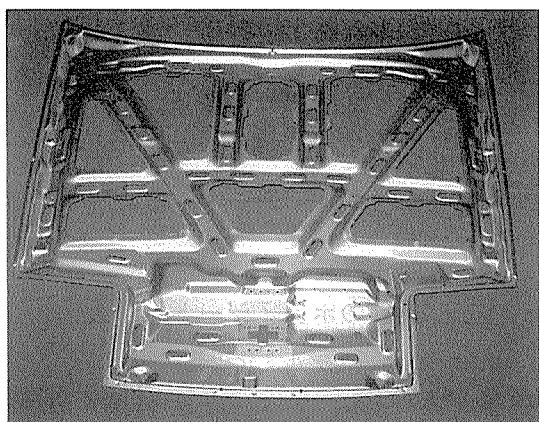


図11 アルミニウム合金製のインナーパネル

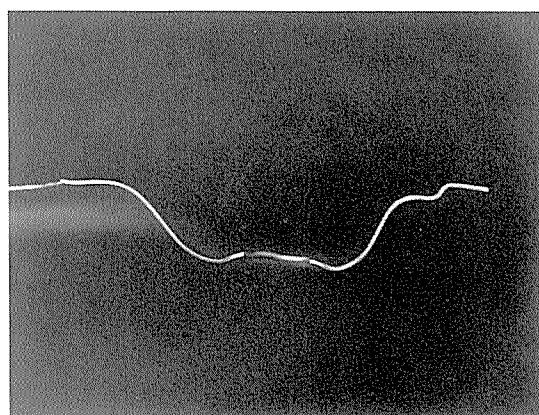


図12 インナーパネルの断面

4. おわりに

スポーツカー「New RX-7」にはエンジンフード、ラジエータ、シャシー足周り関連部品などに110kgのアルミニウム合金が使用されている。これは車体総重量の9.5%であり、国産車平均の3.7%の2.5倍強になる。また、米国車1986年型車平均62.5kgに比べても2倍近い使用量である。特に、エンジンフードについてはアルミニウム合金GZ45-T4を使用することにより、従来の鋼板製品に比べて約50%，10kg近い軽量化を達成することができた。

現在、軽量化代替材として特にボディパネルへのプラスチックの適用も積極的に展開されており、その技術革新は目を見張るものがある。しかしながら、現有量産設備の利用や資源の再利用の面から考えた場合、アルミニウム合金の採用による軽量化も将来性が非常に高いといえる。

参考文献

- 宇野照生、馬場義雄：住友軽金属技報、21(1980), 32.
- 齊藤莞爾：住友軽金属技報、21(1980), 148.
- 宇野照生、吉田英雄：住友軽金属技報、27(1986), 198.

技術資料

自動車ボディシート用アルミニウム合金の最近の動向*

宇野照生** 吉田英雄***

Recent Development in Auto Body Sheet
Aluminium Alloys

by Teruo Uno and Hideo Yoshida

住友軽金属工業株式会社技術研究所

自動車ボディシート用アルミニウム合金の最近の動向*

宇野照生** 吉田英雄***

Recent Development in Auto Body Sheet Aluminium Alloys

by Teruo Uno and Hideo Yoshida

Recently, many aluminium alloys for auto body sheet were developed and applied to practical use. Although these alloys exhibits comparable strength to low carbon steel, the formability of these alloys is not always adequate.

Sumitomo Light Metals developed new alloy GZ45 for auto body sheet which exhibited similar strength to low carbon steel and excellent formability. New alloy GZ45 was successfully applied to practical use for the first time in Japan.

This paper describes recent alloy development in auto body sheet and properties of new alloy GZ45.

1. はじめに

自動車の軽量化は燃費節減、走行性能の向上等の観点から自動車工業における重要な技術課題である。けれども、排気ガス規制、安全性や耐久性の向上、騒音対策、ユーザーの高級化志向等にみられるように重量を増加させる要因も多い。このような背景から、自動車の軽量化の一つの方策としてアルミニウム合金の採用が注目されており、ボディパネル、バンパ、トリム、ラジエータ等の熱交換器、エンジン部品等のアルミ化が進められている。

ボディパネルをアルミ化するには、強度と成形性に優れたアルミニウム合金板の開発とそれに伴うプレス成形、接合、表面処理等の加工技術の確立が必要であるが、米国では1970年以降、精力的に研究開発が行われ、フード、ドア、ロードフロア等にアルミニウム合金製のものが実用化された。

わが国においてもボディパネルのアルミ化はアルミニウム圧延業界にとって最大の関心事であり、昨年度には当社開発の新合金GZ45によるアルミニウム合金製フードが某社の量産車に初めて採用された。

本報では、自動車ボディシート用アルミニウム合金の開発動向と当社新合金GZ45の特性をとりまとめた。

2. 最近のボディシート用合金

2.1 ボディパネル・アルミ化の経緯

海外におけるボディパネルのアルミ化の歴史は古く、British Leyland社では1930年代のRoberフード、ドア、トランクリッドに5154合金が使用された。また1970年以後、Rober2000/3500には2117合金が使用された。

Daimler-Benz社では、1955年型Benz 300SLのボディの大部分がアルミ化され、さらに、1963年以降のBenz 600にはアルミニウム合金製トランクリッドが採用された。また、Citröen社では1950年代からCitröen DSのフードにPechiney社A-U2G合金が使用された。

以上のように、ボディパネルのアルミ化については、1930年代より断続的に採用されていたが、本格的な検討は米国で省エネルギーを目的としたエネルギー法の制定を機に開始された。1970年以降、多数のボディシート用アルミニウム合金^{1~9)}が開発されると共にプレス成形、接合、表面処理等の加工技術が確立され、多数の量産車にアルミニウム合金製ボディパネルが装着された。**表1**は1985年型米国乗用車への採用例を示す。

2.2 合金の種類

表2は自動車ボディシート用合金として提案されてい

* 軽金属学会第4回金属成形セミナー（昭和61年9月、於・湯河原）で一部発表

** 技術研究所金属材料研究部 工学博士

*** 技術研究所金属材料研究部

る主要な合金の化学成分規格を示す。これらの合金は大別してAl-Mg系の非熱処理型合金とAl-Cu系及びAl-Mg-Si系の熱処理型合金に分類され、2036-T4²⁾, 2117-T4, 5182-O²⁾, 6009-T4⁴⁾, 6010-T4⁴⁾等の使用実績が最も多く報告されている。

上記の合金の開発経過をみると、ボディシート用合金として本格的に開発されたのは、Reynolds社による2036-T4及び5182-Oである。2036-T4は5182-Oより強度は高いが、成形性に劣る。5182-Oはプレス成形時にAl-Mg系合金焼鈍板に特有なS.S.マークが生じるため、それが発生せず、かつ強度の高い2036-T4をアウターパネルに、5182-Oはインナーパネルに採用された。その後、5182合金の製造法の改良によりS.S.マークの発生を防止した5182-SSFが開発され¹⁰⁾、アウターパネルに使用された実績がある。

2036合金や5182合金よりさらに成形性に優れた合金としてAl-高Mg系合金X5085-O¹¹⁾が開発された。この合金は既存のボディシート用アルミニウム合金とくらべて

表1 1985年型米国乗用車アルミニウム合金製
ボディパネル採用例

部品名称	車種名稱
フード	Oldsmobile 88 Toronado
	Oldsmobile 98 Cutlass
	Mercury Station Wagons
ロードフロア	Buick Station Wagons
	Chevrolet Blazer
	Oldsmobile Station Wagons
	Pontiac Some Station Wagons
	Ford LTD S. W.
	Ford Mustang
	Mercury Capri
	Mercury Marquis S. W.

最も伸びが高く(伸び30%), 成形性に優れた合金であり、フードインナーパネルに採用された実績がある。しかし、この合金はMg量が高いため熱間加工性が悪く、工業的生産が難しく、現在では生産されていない。

2036合金や5182合金は、プレス成形後の塗装焼付処理により強度がやや低下する問題がある。そのため、塗装焼付処理時の加熱を積極的に利用して時効硬化させ、強度の向上を計った合金が開発されている。Al-Cu系合金では、Pechiney社による2002合金⁵⁾やReynolds社による2038合金⁷⁾がその代表例であり、いずれもAl-Cu-Mg系合金にSiが添加されている。

これに対しALCOA社では、塗装焼付処理により著しく強度が向上するAl-Mg-Si系合金6009及び6010を開発⁴⁾している。これらの合金は、2036合金や5182合金より強度や成形性が優れており、アウターパネルに2036合金に代って6010合金を、インナーパネルに6009合金を推奨している。これらの高強度合金使用によりボディパネルの板厚減少が可能となるばかりでなく、アウター及びインナーパネル共に同じAl-Mg-Si系合金であるためスクラップ価格が高く、アルミニウム合金採用による経済性を高めることが可能とされている。

ALCAN社では、6009, 6010系合金の諸特性に及ぼす添加元素(Cu, Mg, Fe, Si)の影響を検討し、6111合金⁶⁾を開発した。この合金は、6010合金に近い強度と優れた成形性、特に曲げ性を有している。

Alusuisse社でも、Al-Mg-Si系ボディシート用合金AC120⁸⁾を開発している。この合金により試作したスポーツ車のボディ重量は、全鋼製ボディの場合の303kgに対して161kgとなり、47%の重量軽減が可能なことが報じられている¹¹⁾。

また、ALCOA社では、最近CW51と称する新合金¹²⁾を開発し、この合金は6009合金よりも伸びが高く、成形

表2 自動車ボディシート用合金の化学成分規格

合金系	合金	化 学 成 分 (%)								
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al-Cu系	2002	0.35-0.8	0.30	1.5-2.5	0.20	0.50-1.0	0.20	0.20	0.20	Rem.
	2036	0.50	0.50	2.2-3.0	0.10-0.40	0.30-0.6	0.10	0.25	0.15	Rem.
	2037	0.50	0.50	1.4-2.2	0.10-0.40	0.30-0.8	0.10	0.25	0.15	Rem.
	2038	0.50-1.3	0.6	0.8-1.8	0.10-0.40	0.40-1.0	0.20	0.50	0.15	Rem.
	2117	0.8	0.7	2.2-3.0	0.20	0.20-0.5	0.10	0.25	-	Rem.
Al-Mg系	5182	0.20	0.35	0.15	0.20-0.50	4.0-5.0	0.10	0.25	0.10	Rem.
	X5020	0.30	0.70	1.3-1.9	0.10-0.50	2.4-3.2	0.20	0.20	0.10	Rem.
	X5085	0.30	0.40	0.15	0.20	5.8-6.8	0.20	0.20	0.10	Rem.
Al-Mg-Si系	6009	0.6-1.0	0.50	0.15-0.6	0.20-0.8	0.40-0.8	0.10	0.25	0.10	Rem.
	6010	0.8-1.2	0.50	0.15-0.6	0.20-0.8	0.6-1.0	0.10	0.25	0.10	Rem.
	6111	0.7-1.1	0.40	0.50-0.9	0.15-0.45	0.5-1.0	0.10	0.15	0.10	Rem.
	AC120*	1.25	0.25	0.07	0.07	0.40	0.20	0.01	0.02	Rem.
	CW51	0.50-0.8	0.40	0.7-1.1	0.10	0.25-0.50	0.10	0.25	0.10	Rem.

* 実績値

性に優れている。

2.3 合金の諸性能

ボディシート用アルミニウム合金の機械的性質を自動車用鋼板と比較して表3に示す。これらの合金は鋼板とほぼ同じ強度を有しているが、伸びが著しく低い。

ボディパネルの製造工程には、プレス成形、塗装焼付処理等の材料の機械的性質に影響を及ぼす加工が含まれている。従って、ボディパネルとしての強度に上記の工程がどのような影響を及ぼすかを理解する必要がある。

図1⁴⁾及び図2⁴⁾は6009合金と6010合金の耐力に及ぼす加工度と時効の影響をそれぞれ示す。図3⁶⁾は6111合金と6010合金の耐力に及ぼす加工度と塗装焼付温度の影響を示す。これらの合金は、適度な塗装焼付処理により著しく強度が向上する。そのため、ボディパネルの板厚減少、剛性や耐デント性の向上等が可能となる利点を有しているが、鋼板製ボディパネルと同等のパネル強度を得るには鋼板の場合より30~50%程度の板厚増加が必要である。

表3 自動車ボディシート用合金の機械的性質

合金と質別	引張強さ (kgf/mm ²)	耐力 (kgf/mm ²)	伸び (%)
2002-T4	33.7	18.3	26
2036-T4	34.7	19.9	24
2037-T4	31.6	17.3	25
2117-T4	28	18.2	25
5182-O	28.1	13.3	26
5182-SSF	27.5	12.8	24
X5020-T4	35	21	25
X5085-O	30	15	30
6009-T4	23.5	12.8	25
6010-T4	29.6	17.3	24
6111-T4	29.6	16.2	27.5
AC120-T4	24	13	28.1
CW51-T4	25	12.5	28
1010鋼板	32	18	42

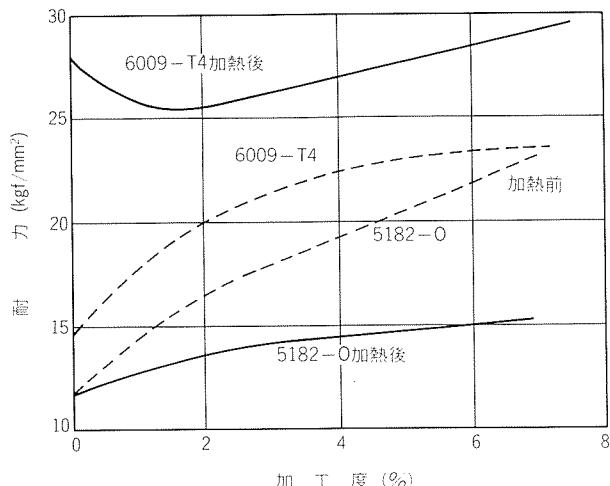


図1 6009-T4と5182-Oの耐力に及ぼす加工度と加熱(204°C × 0.5hr)の影響

とされている。

ボディパネルへのアルミニウム合金の適用に際しては成形性が最大の問題となる。その成形性は伸び、エリクセン値、n値、r値等の成形特性値や成形限界曲線を鋼板のそれと比較することにより推定が可能となる。表4はボディシート用アルミニウム合金の成形特性値を鋼板と比較して示す。アルミニウム合金は伸び、エリクセン値等が鋼板より低く、成形性はかなり劣る。従って、アルミニウム合金は成形の比較的容易なボディパネルへの適用は可能であるが、ドアインナーパネルのようなかなりの成形性を必要とする部品に対しては、現行の鋼板用プレス型で成形することは難しい。そのため、アルミニウム合金に適した型設計とか、成形加工面での工夫が必要とされる。例えば、金型のコーナ部肩半径を大きくすること、ビードを狭くすること、ブランク形状の適正化、しわ押え力減少等である。

アウターパネルとインナーパネルはヘム加工で接合さ

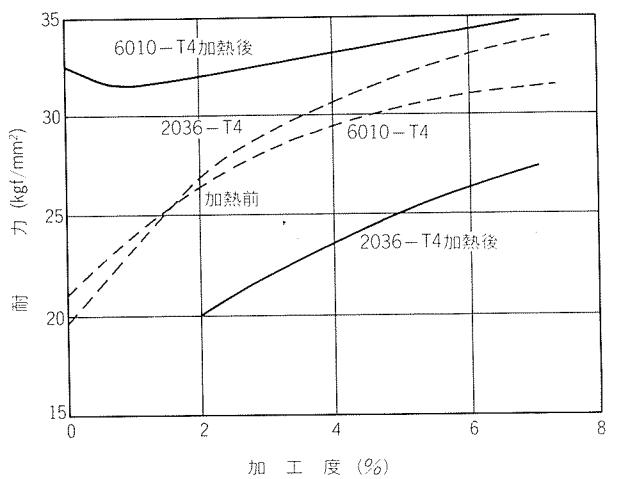


図2 6010-T4と2036-T4の耐力におよぼす加工度と加熱(204°C × 0.5hr)の影響

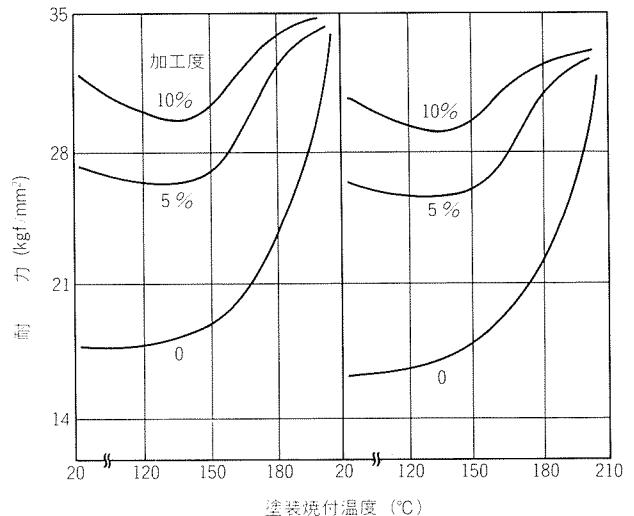


図3 6111合金と6010合金の耐力に及ぼす加工度と塗装焼付温度の影響

表4 自動車ボディシート用合金の成形特性

(t: 板厚)

材質	全伸び(%)	均一伸び(%)	n値	r値	エリクセン値(mm)	180°ヘム性(ダウンフランジ半径)	S.S.マーク
2002-T4	26	20	0.25	0.63	9.6	1t	無
2036-T4	24	20	0.23	0.75	9.1	1t	"
2037-T4	25	20	0.24	0.70	9.4	1t	"
2117-T4	25	20	0.25	0.59	8.8	1t	"
5182-O	26	19	0.33	0.80	9.9	1/2t	有
5182-SSF	24	19	0.31	0.67	9.7	1/2t	無
X5020-T4	24	20	0.25	0.65	—	1t	有
X5085-O	30	20	0.30	0.66	—	1t	有
6009-T4	25	20	0.23	0.70	9.7	1/2t	無
6010-T4	24	19	0.22	0.70	9.1	1t	"
6111-T4	27.5	—	—	—	8.38	0.3-0.4t	"
AC120-T4	28.1	24.6	0.26	0.7	—	—	"
1010鋼板	42	20	0.23	1.39	11.9	0t	"



図4 ALCOA社とAudi社の共同開発によるアルミニウム合金製自動車ボディ

れるが、アルミニウム合金はヘム加工性が劣るため、鋼板のようなフラットヘム加工は難しく、この対策としてアルミニウム合金に適したロープドヘムが推奨されている。

また、アルミニウム合金は縦弾性係数が小さいため、スプリングバックが大きく、形状凍結性が劣るため、この面での配慮が必要である。

以上のように、ボディシート用アルミニウム合金は鋼板に比べて成形性はかなり劣るが、アルミニウム合金に適した加工条件を選定することによりボディパネルのアルミ化は可能となる。

2.4 次世代の軽量自動車ボディ

ボディパネルのアルミ化をさらに促進するには、アルミニウム合金の特徴を最大限に生かした軽量自動車ボディの加工技術開発が必要とされる。

ALCOA社とAudi社はAudi 5000をベースに次世代の全アルミニウム合金製軽量自動車ボディを開発した^{12,13)}。図4に外観を示す。このボディは6009合金より製作されているが、成形加工の難しい部分にはALCOA社の新合金CW51が使用されている。接合方法はスポット溶接に

代って、新規に開発されたリベット接合法が使用されている¹²⁾。ボディ重量は鋼板製より46.8%軽量となり(131kgの重量減)、燃費節減や走行性能の向上が期待される。また、アルミ化に伴うプレミアムコストは25,000kmの走行で回収可能とされている。

同車のボディの強度は、塗装焼付処理により強度が著しく向上する6009合金の採用により鋼製ボディより高い。図5¹³⁾はフードの耐デント性試験結果を示す。このボディを実用化するには技術課題も多く残されているが、今後の動向が注目される。

3. 当社のボディシート用合金

3.1 合金開発

前章で述べたように、多数のボディシート用アルミニウム合金が開発され実用に供されているが、これらの合金のプレス成形性は十分でなく、さらに成形性に優れた合金の開発が望まれている。プレス成形性を支配する重要な因子は伸びであり、伸びの高い合金は一般にプレス成形性が良好であるが、表3に示したように既存のボデ

シート用アルミニウム合金の伸びはあまり高くない。図6は既存のボディシート用合金を含めてアルミニウム合金の引張強さと伸びの関係を示す。引張強さが増加すると共に伸びの低下は避けられず、中强度の高延性合金は開発されていない。そこで、鋼板なみの引張強さ(30 kgf/mm²)と優れた伸び(30%)を有する自動車ボディシート用Al-Mg-Zn-Cu系アルミニウム合金GZ45を開

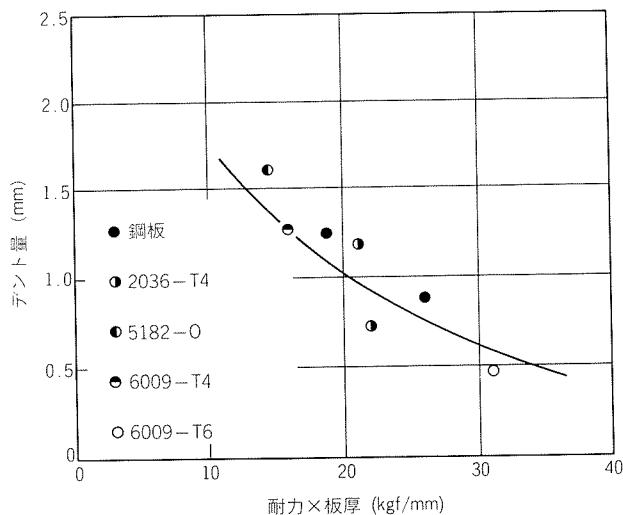


図5 アルミニウム合金製フードの耐デント性比較

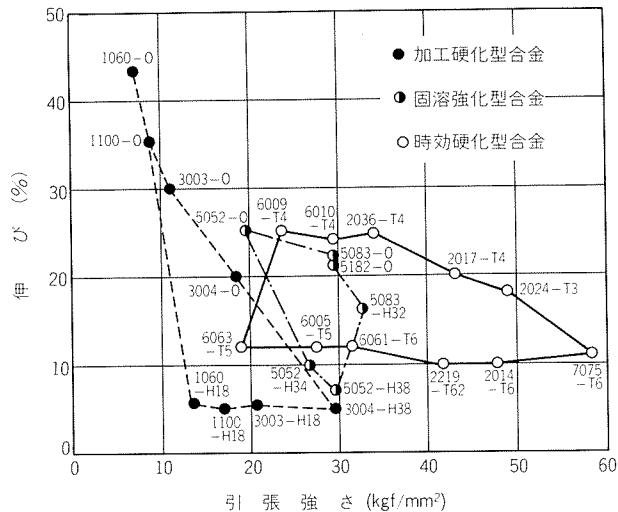


図6 強化機構別に分類した展伸加工用アルミニウム合金の強度と伸びの関係

発した^{14,15)}。また、表5は当社のボディシート用合金の特徴を、表6はその化学成分を示す。

GZ45, CV15及びGV10の各合金は質別T4で使用する熱処理型合金であるが、GZ45合金はMg添加による固溶強化とZnやCu添加による時効硬化の併用による複合強化合金である。GZ45合金は既存合金より伸びが高く、成形性が優れた特徴がある。CV15及びGV10合金は塗装焼付処理によって著しく強度が向上する特徴がある。282S合金は5182合金相当のAl-Mg系合金であるが、特別な調質方法によりAl-Mg合金焼鈍板をプレス成形する際に生じるS.S.マークの発生を防止している。

3.2 機械的性質

表7は当社のボディシート用合金の機械的性質を示す。GZ45は鋼板なみの強度(引張強さ30kgf/mm²)と他の合金よりかなり高い伸び(30%)を有し、機械的性質の異方性もほとんどない。

図7は同様に最大10%まで引張変形した場合の強度を示す。加工により強度、とくに耐力が各合金共に著しく向上する。

図8はそれを175°C × 1 hr加熱した場合の強度を示す。GZ45合金や282S合金は加熱により図7の場合より耐力は低下するが、CV15合金やGV10合金の耐力は著しく向上する。GZ45合金の耐力が加熱により低下するのは、この合金は固溶強化と時効硬化の複合強化により所定の

表5 当社ボディシート用合金の種類と特徴

合金	合 金 系	質別	特 徴
GZ45	Al-Mg-Zn-Cu系	T4	伸びが大きく成形性良好
CV15	Al-Cu-Mg-Si系	T4	塗装焼付処理により著しく強度向上
282S	Al-Mg-Mn系	H110	5182合金相当、S.S.マークなし
GV10	Al-Mg-Si-Cu系	T4	塗装焼付処理により著しく強度向上

表6 当社ボディシート用合金板の化学成分

合 金	化 学 成 分 (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
GZ45	0.07	0.16	0.22	—	4.4	—	1.46	—	Rem.
CV15	0.53	0.20	1.95	—	0.48	—	—	—	Rem.
282S	0.09	0.17	—	0.22	4.6	—	—	—	Rem.
GV10	0.50	0.20	0.60	—	1.1	—	—	—	Rem.

表7 当社ボディシート用合金板の機械的性質(板厚1 mm)

合金と質別	圧延 方 向			直角 方 向			45° 方 向		
	耐 力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	耐 力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)	耐 力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)
GZ45-T4	31	15	30	31	15	30	31	15	31
CV15-T4	31.5	16	25	31	16	25	31	15.5	28
282S-H110 ⁽¹⁾	29	14	24	28	14	26	28	13.5	27
GV10-T4	24	13	25	23.5	13	26	23.5	13	27

⁽¹⁾ S.S.マーク発生防止処理テンパー

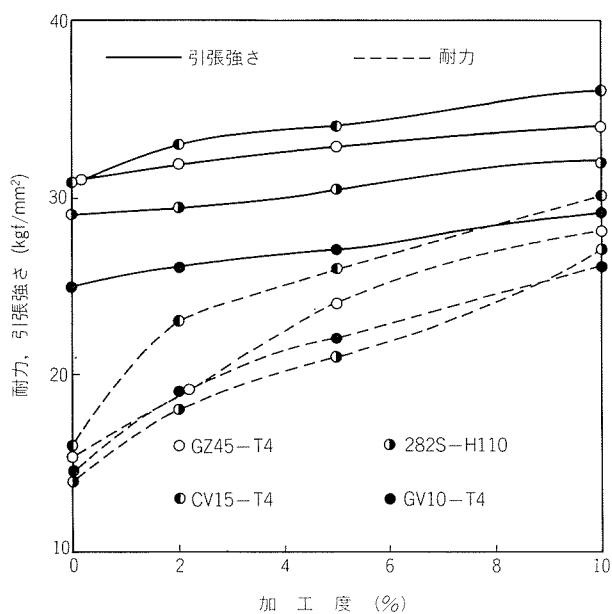


図7 当社ボディシート用合金板の強度に及ぼす加工度の影響

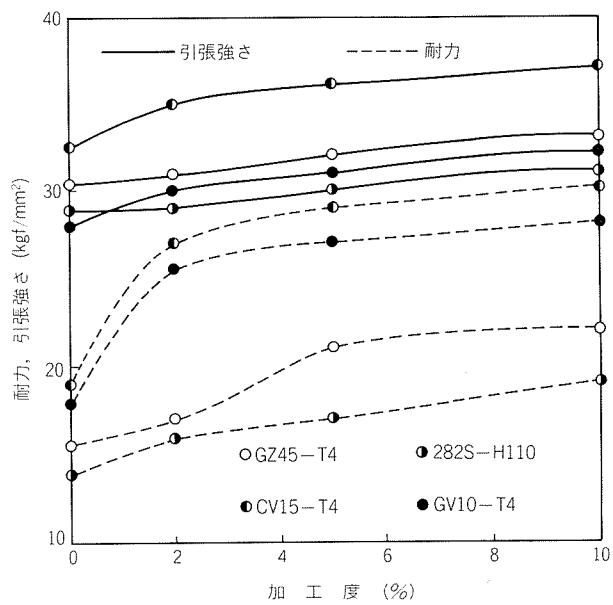


図8 当社ボディシート用合金板の強度に及ぼす引張加工度と時効(175°C × 1 hr)の影響

表8 当社ボディシート用合金板の成形特性(板厚1 mm)

材質	全伸び (%)	均一伸び (%)	n 値	r 値	エリクセン値 (mm)	L.D.R.	180°曲げ半径 (t : 板厚)
GZ45-T4	30	22	0.29	0.68	9.8	2.14	1/2t
CV15-T4	26	20	0.25	0.70	9.2	2.14	1/2t
282S-H110	24	20	0.27	0.76	9.3	2.14	1/2t
GV10-T4	25	20	0.25	0.70	9.4	2.14	1/2t
1010鋼板	42	23	0.23	1.50	11.0	2.20	0 t

表9 当社ボディシート用合金板のバルジ試験結果

合 金	バ ル ジ 高 さ (mm)	
	円(100mmφ)	楕円(94×40mm)
GZ45-T4	30.0	15.0
CV15-T4	28.6	14.0
282S-H110	28.8	13.8
GV10-T4	28.8	13.8
1010鋼板	36.0	19.0

強度を得ており、しかも時効硬化性が小さいため加工後の加熱により軟化したものと考えられる。

3.3 成形性

表8はGZ45-T4板の成形特性値を他のボディシート用合金と比較して示す。伸び、エリクセン値等は鋼板よりかなり低いが他の合金よりは高い。

表9は同様にバルジ試験結果を示す。等2軸方向の変形経路を生じる円バルジと平面ひずみに近い変形経路を生じる楕円バルジでは、GZ45合金のバルジ値が最も大きい。さらに、詳細に成形性を評価するため、成形限界曲線を図9に示す。バルジ試験結果と同様、アルミニウム合金の内ではGZ45合金が最も成形性に優れている。

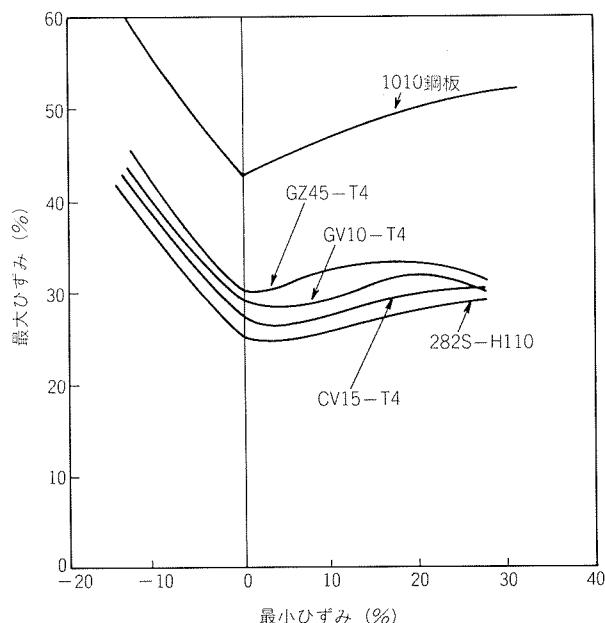
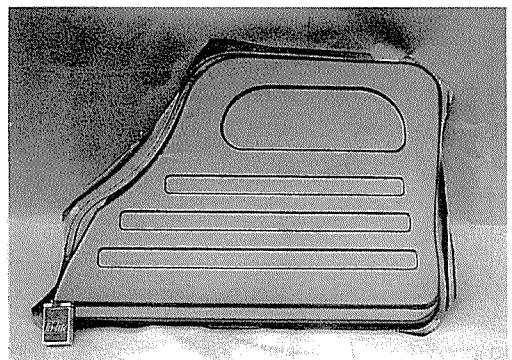


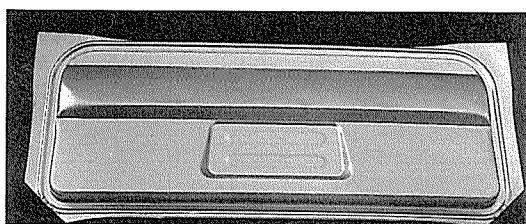
図9 当社ボディシート用合金板の成形限界曲線

上記のような基礎試験により概略の成形性を評価することは可能であるが、GZ45合金によりボディパネルがどの程度成形可能かを確認するため、鋼板用プレス型を使

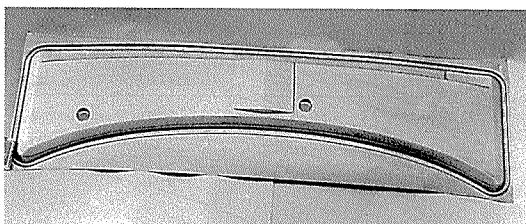
用してフードアウター、フードインナー、ドAINナー、テールゲートアウター、ベンチレーター等のプレス試験を行った。図10は成形したパネルの外観の1例を示す。フードアウター、テールゲートアウター、ベンチレーター等のパネルは成形可能であった。ドAINナーのように、かなりの成形性を要求されるパネルについても、プレス型を若干修正することにより成形可能と考えられた。



(a) ドAINナー



(b) テールゲートアウター



(c) ベンチレーター

図10 各種ボディパネルのプレス後の外観

3.4 ヘム加工性

一般にボディシート用アルミニウム合金は、ヘム加工性が悪く、鋼板と同じフラットヘムの採用は難しい。表10に試験方法¹⁶⁾を、図11にGZ45-T4板のヘム加工後の面粗度とダウンフランジ工程でのコーナRの関係¹⁷⁾をそれぞれ示す。コーナRが増加するに従って面粗度は小さくなり、フラットヘム加工が可能となることが確認された。

3.5 パネルの強度試験

GZ45合金により試作したフードの耐デント試験を行った。試験は直径30mmの鋼球を6m/secの速度でフードに落下させ、図12にデント量とアウターパネルの板厚との関係を示す。鋼板（板厚0.7mm）と同レベルの耐デント性を得るには板厚1mmが必要であり、鋼板に比べ

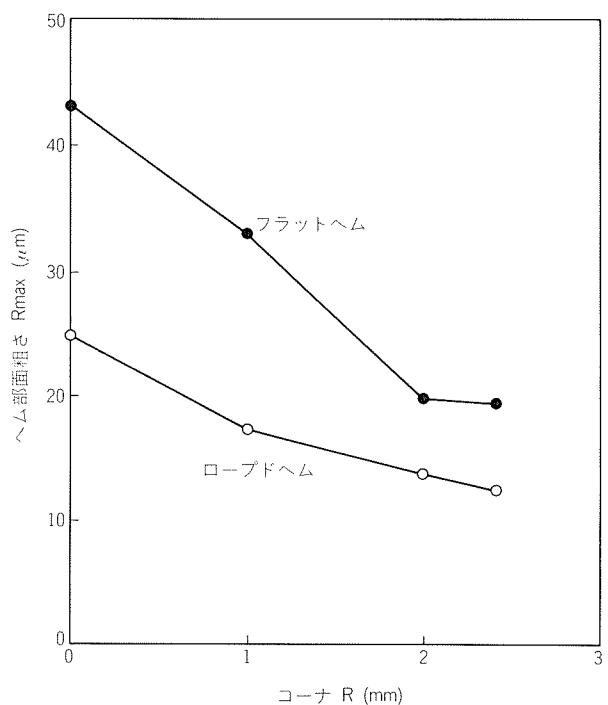


図11 GZ45-T4板のヘム加工後の面粗さとダウンフランジコーナRの関係

表10 ヘム加工性の試験方法

加工順序	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程
加工名称	絞り	トリム	ダウンフランジ	プレヘム	ファイナルヘム
加工形状	 幅 150mm 板厚 1.2mm	 幅 145mm	 幅 119.76mm R	 R7.2	 フラットヘム ロープヘム R2.82
加工条件	しづえ力 4ton (フード周長 4m) としてもしづえ力 50ton 強に (相当)		コーナーRは 0, 1, 2, 2.4mm とする。 工具表面粗さ Rmax 0.2μ, クリアランス 0%, 加工速度 300mm/sec, 無潤滑		フラット及びロープヘム, インナーパネル相当のスペーサー板厚は 1.0mm とする。

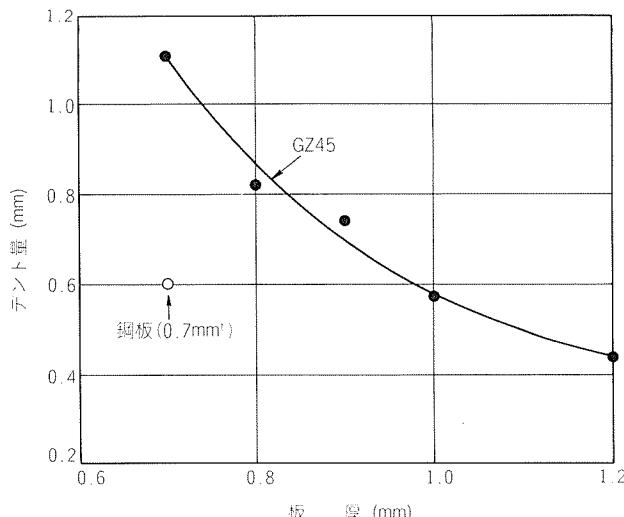


図12 GZ45合金製フードの耐デント性試験結果

表11 GZ45の耐食性

合 金	一般耐食性 ⁽¹¹⁾	重量減小率 (%)	耐力減小率 (%)
GZ45-T4	B-C	0.7	2.0
CV15-T4	C	1.0	3.0
282S-H110	A-B	0.35	1.0
GV10-T4	A-B	0.5	1.5

(11) A: 腐食なし B: わずかな孔食 C: 著しい孔食

て50%近い板厚増加となる。

張り剛性試験については詳細を省略するが、鋼板の場合より板厚を約50%増加させることにより鋼板製フードと同レベルの強度が得られた。

3.6 耐食性

ボディシート用アルミニウム合金はAl-Cu-Mg系、Al-Mg系及びAl-Mg-Si系合金に分類できるが、耐食性にやや劣るとされているAl-Cu-Mg系合金でも、耐食性は良好であり、電食に注意すれば実用上問題はない。

表11はGZ45合金と他のボディシート用合金をASTM B117に準じて1,000hr塩水噴霧試験した場合の耐食性を示す。GZ45合金の耐食性はAl-Cu-Mg系のCV15合金とAl-Mg-Si系のGV10合金の中間であり、実用上問題ない。

以上のように、新合金GZ45は優れた性能を有しており、自動車製造会社の評価も高く、昨年度に国内で初めて量産車フードに採用された⁽¹⁷⁾。図13はそのフードの外観を示す。

4. おわりに

自動車ボディシート用アルミニウム合金の開発動向と当社新合金GZ45の諸特性について述べた。自動車ボディパネルのアルミ化技術は国内外で確立され、量産車にアルミニウム合金製ボディパネルが数多く採用されてい

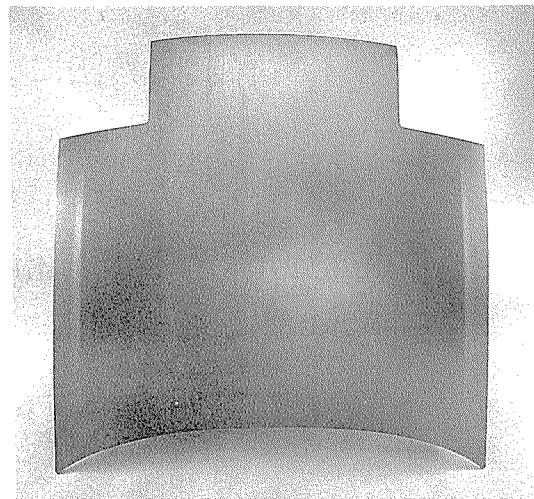


図13 GZ45合金製フードの外観

るが、ボディシート用アルミニウム合金の性能、特に成形性は鋼板に比べてかなり劣るのが現状である。今後さらに成形性に優れた合金の開発が望まれる。

文 献

- 1) Aluminium Association Document T9 "Data on Aluminium Alloy Properties and Characteristics for Automotive Applications," First Edition, May, 1974.
- 2) G. S. Hsu and D. S. Thompson : Sheet Metal Ind., 51 (1974), 772.
- 3) W. A. Anderson, R. D. Blackburn and B. S. Shabel, "Development of Aluminium Alloys for Body Sheet," SAE Paper No. 740077 (1974).
- 4) J. W. Evancho and J. G. Kaufman, "New 6XXX-Series Alloy for Auto Body Sheet," SAE Paper No. 770307 (1977).
- 5) R. Deshamps, R. Developy and J. Peyraud : J. of Metals, September (1976), 15.
- 6) P. E. Fortin, M. J. Bull and D. M. Moore, "An Optimized Aluminium Alloy (X6111) for Auto Body Sheet Applications," SAE Paper No. 830096 (1983).
- 7) H. E. Oliver : Engineering and Technical Service Reynolds Aluminium, May 28, (1981).
- 8) Alusuisse社資料, "A New 6XXX Series Aluminium Car Body Sheet Alloy," (1984).
- 9) 軽金属協会編, "自動車のアルミ化技術ガイド, 材料編" (1980).
- 10) D. S. Thompson, "A Highly Formable Aluminium Alloy 5182-SSF," SAE Paper No. 770203 (1977).
- 11) H. E. Burst et al : "The All-Aluminium Auto Body-A Study Based on the Porsche 928," SAE Paper No. 830094 (1983).
- 12) Editor : Light Metal Age, December (1985), 16.
- 13) ALCOA社資料, "Aluminium Body Structures Technology for Next Decade".
- 14) T. Uno, Y. Baba, T. Amitani and S. Terai : "New 5XXX Series Aluminium Alloy for Auto Body Sheet," SAE Paper No. 800348 (1980).
- 15) 宇野照生, 馬場義雄:住友軽金属技報, 21 (1980), 32.
- 16) 斎藤莞爾:住友軽金属技報, 21 (1980), 148.
- 17) 宗藤修義, 西村嘉彦:日経ニューマテリアル, April 7 (1986), 63.

技術資料

有限要素法による磁場解析技術の応用*

林 典 史** 河瀬 順 洋***

Application of The Finite Element Method for Magnetic Field Analysis

by Norifumi Hayashi and Yoshihiro Kawase

住友軽金属工業株式会社技術研究所

有限要素法による磁場解析技術の応用*

林 典 史** 河瀬 順洋***

Application of The Finite Element Method for Magnetic Field Analysis

by Norifumi Hayashi and Yoshihiro Kawase

The finite element method applied to magnetic field analysis is useful to find the best condition of power apparatus and design electrical parts. This paper deals with the brief explanation of this analysis and application of some apparatus, such as the electromagnetic stirrer, the induction heater, the electromagnetic cooker, the eddy current probe coil, and the magnetic wave shield materials.

1. はじめに

有限要素法は構造解析の分野で開発された数値解析手法であるが¹⁾、流体や熱の解析²⁾にも適用されている。また、最近では電磁場解析への応用も盛んで³⁾、電気機器の最適設計⁴⁾や測定困難な物理量のシミュレーション⁵⁾に欠くことができない手法となっている。

この手法は、これまで大学や電気機器業界などの専門分野において用いられていたが、自動データ作成プログラムの開発⁶⁾などにより、一般にも容易に使用できるようになりつつある。

当社においても、磁場を利用する設備として、溶湯の電磁攪拌装置、鋳塊の誘導加熱炉、渦流センサー等があり、これらの装置の最適運転条件や新装置開発の検討に役立っている。本報では、この磁場解析手法の概要について述べると共に、解析例を文献を含めて紹介する。

2. 有限要素法による磁場解析

2.1 磁場解析の基礎方程式

磁場の理論解析は、(1)、(2)式のマクスウェルの電磁方程式と、これより導かれる(3)、(4)式の関係式⁷⁾及び媒質によって定まる(5)、(6)、(7)式に基づいて行われる。

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \dots(1)$$

* 昭和61年電気関係学会東海支部連合大会（昭和61年10月8日、於・三重大学）で一部発表

** 技術研究所プロセス研究部

*** 岐阜大学工学部電気工学科

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \dots(2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad \dots(3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \quad \dots(4)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \dots(5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad \dots(6)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad \dots(7)$$

ここで

\mathbf{H} : 磁界の強さ (A/m), \mathbf{J} : 電流密度 (A/m²),

\mathbf{D} : 電束密度 (C/m²), \mathbf{E} : 電界の強さ (V/m),

\mathbf{B} : 磁束密度 (T), σ : 導電率 (S/m),

μ : 透磁率 (H/m), ϵ : 誘電率 (F/m), t : 時間(sec)

磁界では常に磁束の発散が零であり、回転が零でないでの、(8)式の関係となるベクトルポテンシャル A が定義できる。この A は $\operatorname{div} A = 0$ とすることにより一義的に定まる⁷⁾。

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad \dots(8)$$

渦電流場の電流密度 \mathbf{J} は、強制電流密度 \mathbf{J}_0 と渦電流密度 \mathbf{J}_e の和であり、 \mathbf{J}_0 は定数、 \mathbf{J}_e は(5)式の関係から(9)式で与えられる。

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E}_e \quad \dots(9)$$

ここで、 \mathbf{E}_e は(2)、(8)式より導かれる(10)式の関係をもつ。

$$\operatorname{rot} \mathbf{E}_e = -\frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{A}) \quad \dots(10)$$

従って、電位 ϕ が定義でき、 \mathbf{E}_e は(11)式で表わせる。

$$\mathbf{E}_e = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } \phi \quad \dots\dots(11)$$

これを(9)式に代入すれば \mathbf{J}_e が得られ、与えられる \mathbf{J}_0 と(6), (8)式を(1)式に代入して(12)式が得られる。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \text{grad } \phi \quad \dots\dots(12)$$

実際の解析にあたっては、三次元では渦電流を考慮することが容易でなく、また、多大な計算時間を必要とするため、解析対象としては、二次元及び擬似三次元で行われるのが通常である。磁束分布が z 軸に一様な xy 二次元場、 θ 方向に一様な軸対称三次元場では、ベクトルポテンシャル \mathbf{A} はそれぞれ z 方向成分のみ、あるいは、 θ 方向成分のみで表わされる。このため、 $\text{grad } \phi$ は導体内で一定になるので、(12)式は次のように表わせる⁸⁾。

xy 二次元場

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_y \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_x \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \\ &= -J_{z0} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma C_z \end{aligned} \quad \dots\dots(13)$$

軸対称三次元場

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{\nu_z}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\nu_r}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \right\} \\ &= -J_{\theta0} + \sigma \frac{\partial A_\theta}{\partial t} + \frac{\sigma}{r} C_\theta \end{aligned} \quad \dots\dots(14)$$

ここで

$$C_z = C_z(t) = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad C_\theta = C_\theta(t) = \frac{\partial \phi}{\partial \theta}$$

また、 $\nu_x, \nu_y, \nu_z, \nu_r$ は各方向の磁気抵抗を表わす。

2.2 有限要素法概要

前項(13), (14)式のような理論解析は複雑で、制限事項も多くなり、適用範囲が狭くなる。しかし、変分原理を用いて微分方程式を積分型に直せば、数値計算が容易に行える。変分原理はエネルギー原理ともいわれ、ポテンシャルがエネルギー最小になるように分布するという法則に基づいている。従って、エネルギーを $\chi(A)$ で表すと、(13), (14)式に対するエネルギー式は(15), (16)式となり、エネルギー極小値を求める条件式は(17)式となる^{8,9)}。

$$\begin{aligned} \chi(A_z) &= \frac{1}{2} \iint_s \left\{ \nu_y \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \nu_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \\ &\quad - \iint_s J_{z0} A_z dx dy + \frac{j\omega\sigma}{2} \iint_s A_z^2 dx dy \\ &\quad - \sigma \iint_s C_z dx dy \end{aligned} \quad \dots\dots(15)$$

$$\begin{aligned} \chi(A_\theta) &= 2\pi \iint_s \frac{1}{2} \left[\frac{\nu_z}{r} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \right)^2 + \frac{\nu_r}{r} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \right)^2 \right] \\ &\quad dr dz - 2\pi \iint_s r J_{\theta0} A_\theta dr dz + 2\pi \frac{j\omega\sigma}{2} \iint_s r A_\theta^2 dr dz \end{aligned}$$

$$A_\theta^2 dr dz - 2\pi\sigma \iint_s r \frac{C_\theta}{r} A_\theta dr dz \quad \dots\dots(16)$$

ここで S は領域を示す。

$$\frac{\partial \chi(A)}{\partial A} = 0 \quad \dots\dots(17)$$

有限要素法は、図1に示すように解析対象を有限個の分割片、すなわち、要素に区切り、その各々の要素のエネルギーに関する方程式を連立して解く方法である。解析は(8)式のベクトルポテンシャル \mathbf{A} を未知数とする場合が多いが、このとき、 \mathbf{A} は要素の内部及び境界上で連続であり、一階偏微分したものが少なくとも定常項をもつという条件のもとに、多項式に近似される。一次三角形要素を用いた二次元解析の場合には、要素 e 内の任意の点 $P(x, y)$ のポテンシャル $A^{(e)}$ は項数が3の(18)式のように表わされる。

$$A^{(e)} = \alpha_{1e} + \alpha_{2e}x + \alpha_{3e}y \quad \dots\dots(18)$$

$\alpha_{1e}, \alpha_{2e}, \alpha_{3e}$ は要素ごとに異なる係数で、(19)式のように要素 e の頂点となっている節点 $1e, 2e, 3e$ の座標及びポテンシャルで示される。

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{1e} \\ \alpha_{2e} \\ \alpha_{3e} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1e} & y_{1e} \\ 1 & x_{2e} & y_{2e} \\ 1 & x_{3e} & y_{3e} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} A_{1e} \\ A_{2e} \\ A_{3e} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(19)$$

従って、(18)式を(15)式に代入し、各要素ごとの(17)式左辺を計算すると(20)式が得られる⁹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{ie}} &= \sum_{j=1}^3 \frac{1}{4\Delta^{(e)}} (\nu_y c_{ie} \cdot c_{je} + \nu_x d_{ie} \cdot d_{je}) \cdot A_{je} \\ &\quad - \frac{J_0 \Delta^{(e)}}{3} \end{aligned} \quad \dots\dots(20)$$

$$\text{ここで, } c_{ie} = y_{je} - y_{ke}$$

$$d_{ie} = x_{ke} - x_{je}$$

ie, je, ke は循環する添字である。例えば、 ie

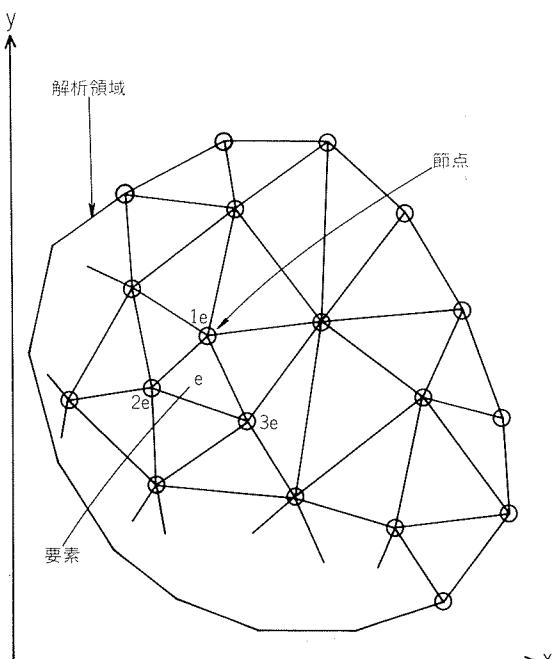


図1 要素と節点

$= 2$ のとき、 $je = 3$, $ke = 1$ を表わすものとする。

また、 $\Delta^{(e)}$ は要素 e の面積である。

これらを全要素について計算し、これを(17)式を書替えた(21), (22)式に代入することにより、各節点のポテンシャル値 A が求まる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial \chi / \partial A_1 \\ \vdots \\ \partial \chi / \partial A_i \\ \vdots \\ \partial \chi / \partial A_{nt} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \right\} \quad \dots \dots (21)$$

ここで、 nt は総節点数を表わす。また、エネルギー χ は各要素のエネルギー $\chi^{(e)}$ の和であるから

$$\frac{\partial \chi}{\partial A_i} = \frac{\partial \chi^{(1)}}{\partial A_i} + \dots + \frac{\partial \chi^{(ne)}}{\partial A_i} \quad \dots \dots (22)$$

ただし、 ne は総要素数を表わす

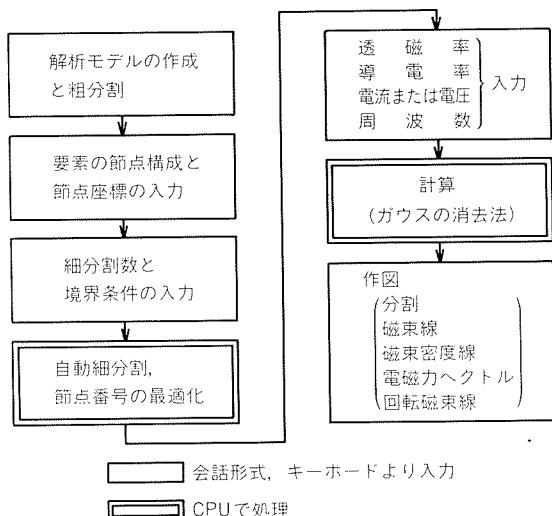


図2 解析手順のフロー

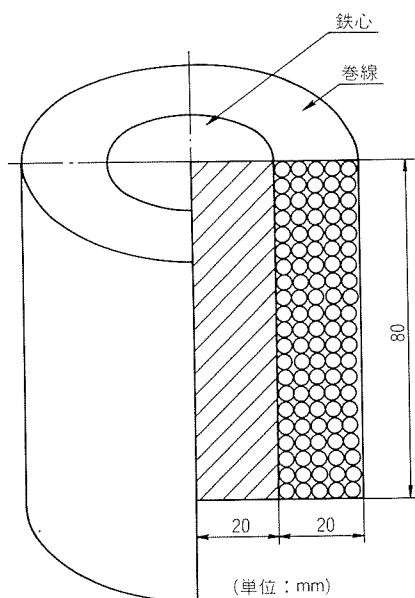


図3 解析対象

磁束密度 B や渦電流密度 J_e は、求められたポテンシャル値を(8), (9), (11)式に代入することにより得られる。

要素はできるだけ細かく区切るほど高い解析精度が得られるが、計算量が増加するのでメモリ容量の大きなコンピュータが必要となる。しかし、有限要素法では差分法と異なり、精度の必要な領域のみを細分割することができるので、極力最小限の要素数にすることが可能である。

2.3 解析の手順

中田らの開発したプログラム^{6,9)}を使用した場合の解析手順を図2に示す。この手順について、図3のような鉄心と巻線の解析例を用いて以下に述べる。

この例は軸対象であるため1/4のみの解析でよく、座標上に解析モデルを図4のように作成する。これらの形状を入力するために、図4を図5のような三角形、または四角形要素に粗分割する。粗分割に際しては精度を良くするため、各線分の長さがなるべく等しくなるように

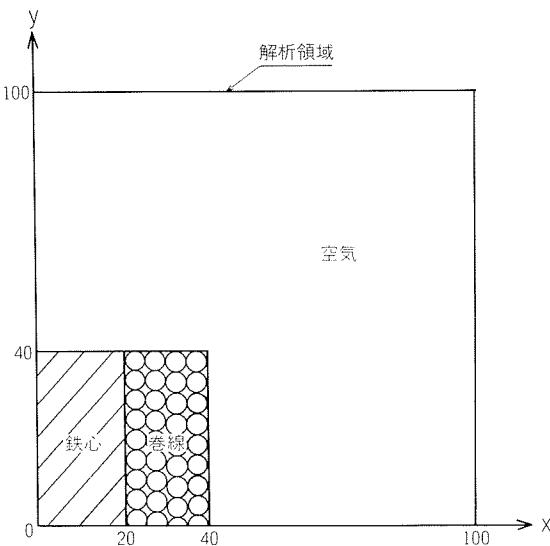


図4 解析モデル

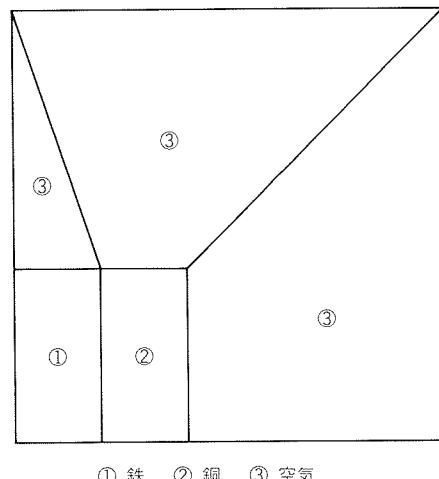


図5 粗分割図

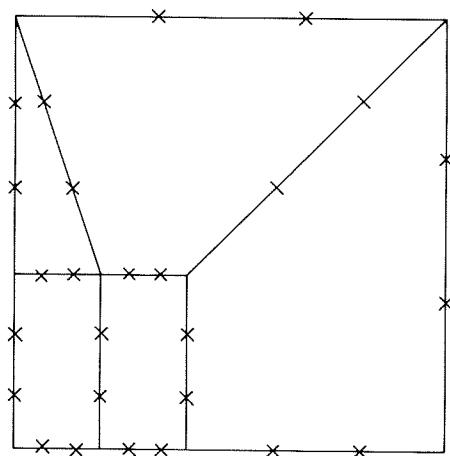


図 6 粗分割方法

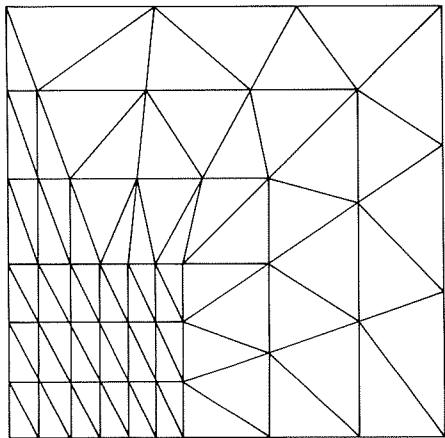


図 7 細分割図

分割する必要がある。また、その場合には材料別に番号付けを行い、後述する透磁率や導電率の入力時に使用する。

この粗分割図をもとに、有限要素法の計算に用いる細分割図の作成を行う。細分割は、図 6 のように要素を取り囲むラインの分割数を入力するだけによく、その後は自動的に要素細分割が行われ、同時に節点番号付けの最適化が行われる。このとき、各ラインの自然境界、固定境界⁹⁾などの境界条件別も入力する。図 7 に自動細分割後の分割図を示す。

次に、材料毎の透磁率、導電率、電流、周波数などの数値を対話形式で入力する。

そして、連立方程式の計算はガウスの消去法で行われる。これらの最終的な計算結果は、必要に応じて作図することができ、視覚による評価が行える。

3. 解析例

3.1 溶湯の電磁攪拌

アルミニウム合金溶解用反射炉に用いられる電磁攪拌

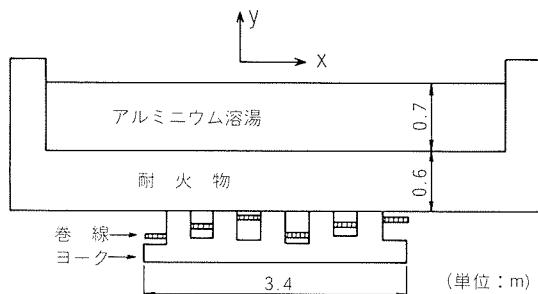
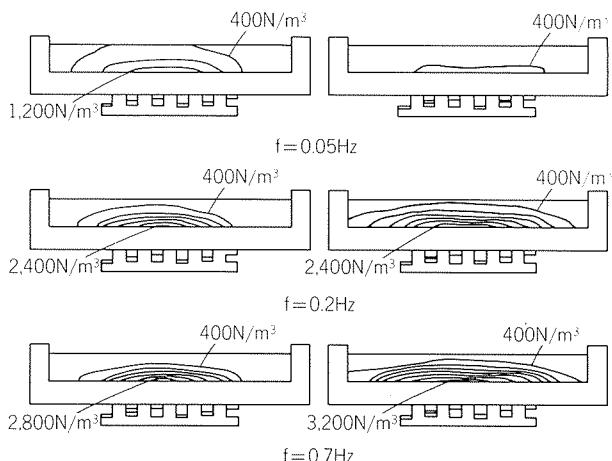


図 8 電磁攪拌モデル

図 9 定常分の等電磁力線(電磁力線間=400N/m³)

装置は、省エネ並びに省力化を目的としている¹⁰⁾。溶湯の挙動を推定し、最適な印加周波数を求めるために電磁力の解析を行った。図 8 に解析モデルを示す。電磁力は、(23)式で求められ、 x , y の各方向成分及び定常分、交番分電磁力を分離できる。

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \quad \dots\dots(23)$$

図 9 に周波数を 0.05, 0.2 並びに 0.7 (Hz) とした時の、 x 方向及び y 方向の定常分電磁力 F_{xDC} , F_{yDC} の分布を示す。周波数が高くなるほど炉底部で大きな力が得られるが、水平(x)方向の攪拌の及ぶ範囲は狭くなり、垂直(y)方向のそれは逆に広くなることがわかる。図 10 には定常、交番分の電磁力の総和 $\sum F_{xDC}$, $\sum F_{yDC}$, $\sum F_{xAC}$, $\sum F_{yAC}$ の電磁力を示す。図 10 からわかるように、 x 方向の電磁力は定常、交番分がほぼ同等で、溶湯は移動、停止を繰返し、水平方向の攪拌力が最大となるのは周波数が 0.1 ~ 0.2 (Hz) の場合である。また、 y 方向の電磁力は、周波数が高くなるほど交番分が大きくなり、上下の波打ち現象が強まることがわかる。

3.2 誘導加熱

3.2.1 卷線形状の渦電流損失に及ぼす影響¹¹⁾

誘導加熱においては、渦電流による反作用磁界のため、導体表面と内部はもちろんのこと、導体表面でも場所に

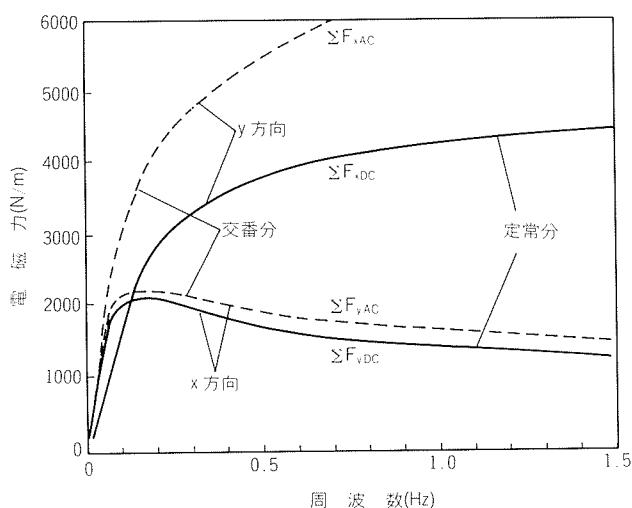


図10 周波数による定常分及び交番分電磁力

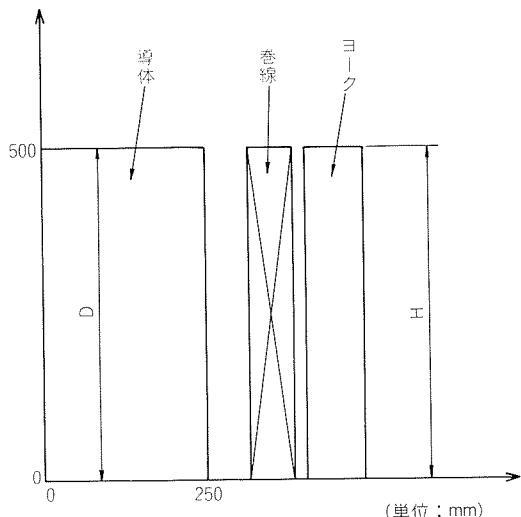


図11 導体加熱モデル

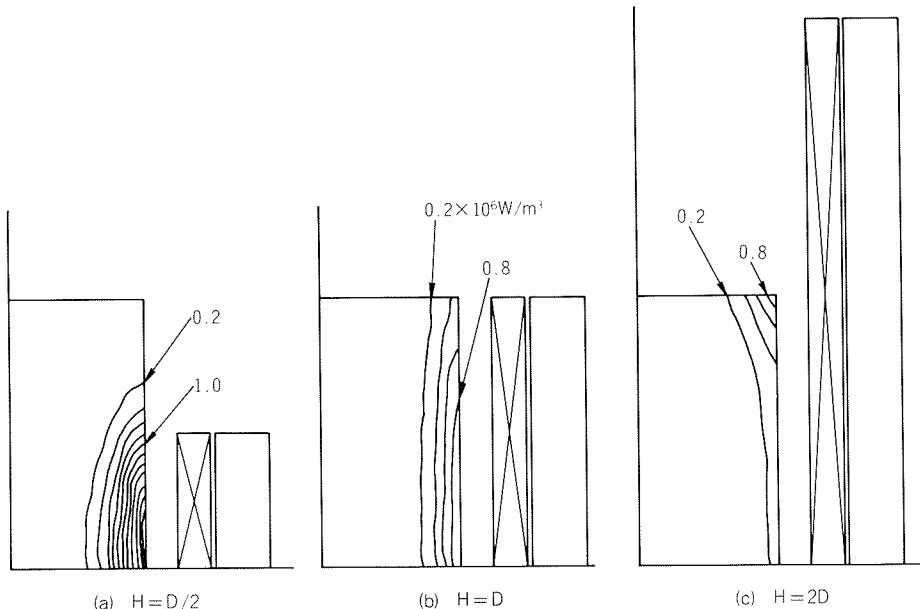


図12 等渦電流損密度線図

よって発熱状態が異なっている。従って、渦電流損分布に及ぼす諸因子の影響を明確にしておかなければならぬ。そこで、ここでは巻線形状の及ぼす影響を定量的に明らかにした。解析は図11のモデル（ビレットの誘導加熱に相当する）について、周波数を60Hz、ヨークの比透磁率を1,000とし、二次元x-y座標で行った。得られた等渦電流損密度線を図12に示す。このとき、渦電流損 W_e は(24)式より求めた。

$$W_e = \sum_{i=1}^n \frac{J_{ei}^2}{\sigma_i} \cdot \Delta_i \quad \dots \dots (24)$$

ここで、 n ：全要素数

J_{ei} ：要素*i*の渦電流密度

σ_i ：要素*i*の導電率

Δ_i ：要素*i*の面積

巻線高さによって渦電流損分布は大きく変り、導体を

一様に加熱する場合には、巻線高さ H を導体高さ D に近い値にすればよく、また端部を特に加熱する場合には H を大きくすればよいことがわかる。

3.2.2 電磁調理器の最適設計¹²⁾

電磁調理器の発生渦電流損を大きくするために、その磁路構成、励磁周波数、発熱体である金属板の厚み及び材質の検討を行った。このうちの材質の影響例について述べる。

励磁周波数が一定の場合に、渦電流損を大きくする方法として、磁束量を多くし、しかも発熱体の導電率も高くするように、発熱体として鋼板に銅板を貼る方法がある。図13に、貼合せ発熱体と電磁調理器の断面を示す。励磁周波数を60Hz、鋼板の厚さを1mmとして銅板の厚みを変え、解析して得られた貼合せ発熱体の厚さと発热量の関係を図14に示す。図中の実線は銅板部の発热量 W_{Cu}

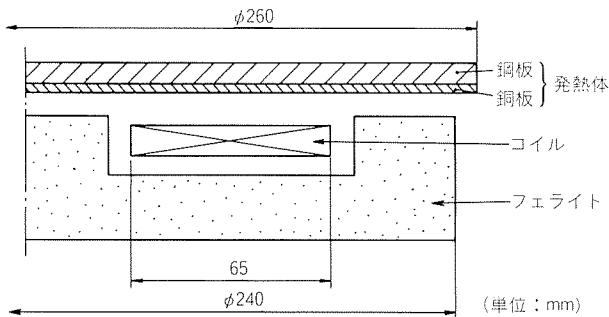


図13 電磁調理器断面

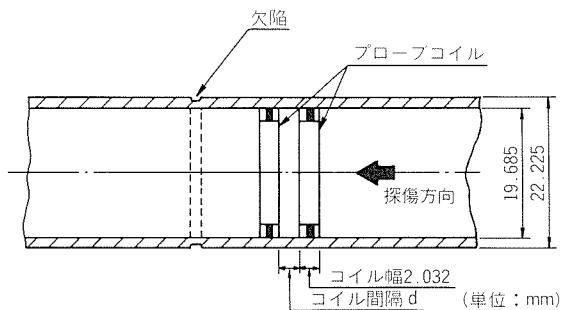


図15 湧流探傷モデル

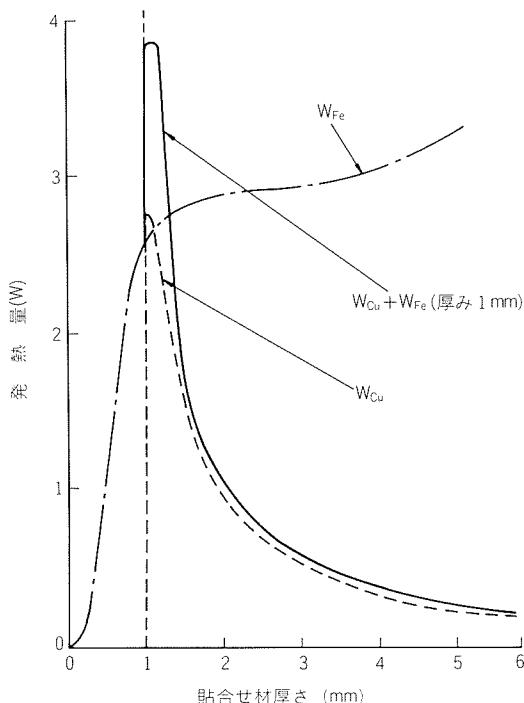


図14 貼合せ材厚さによる発熱量

と鋼板部の発熱量 W_{Fe} の和を、また、点線は銅板部のみの発熱量 W_{Cu} を示す。参考までに、発熱体が鋼板のみで厚みを変化させた場合を一点鎖線で示す。図より0.1mm程度の銅板を貼ることにより発熱量が急増するが、これ以上厚くすると逆に減少することがわかる。なお、高周波励磁の場合には、銅板が磁気シールドとして作用するため、発熱体に磁束が通らず、発熱量を増加させる効果はない。

3.3 湧流探傷用プローブの設計¹³⁾

Ida らは、発電所における復水器の定期検査などに使用されている湧流探傷用プローブの設計法を検討するため、探傷時の信号波形を解析により求めている。使用されたプローブは、コイル巻幅2.032mmの自己比較型で、人工欠陥は幅1.016mm、深さ0.381mmの全外周減肉欠陥である。これらを図15に示す。また、探傷周波数は100 kHzである。コイル間隔 d を変えた場合の解析結果を信号波形、すなわち、インピーダンス軌跡として表わし、実測結果と比較したものを図16に示す。インピーダンス軌跡は、欠陥に対してコイルを移動させたときに、探傷器

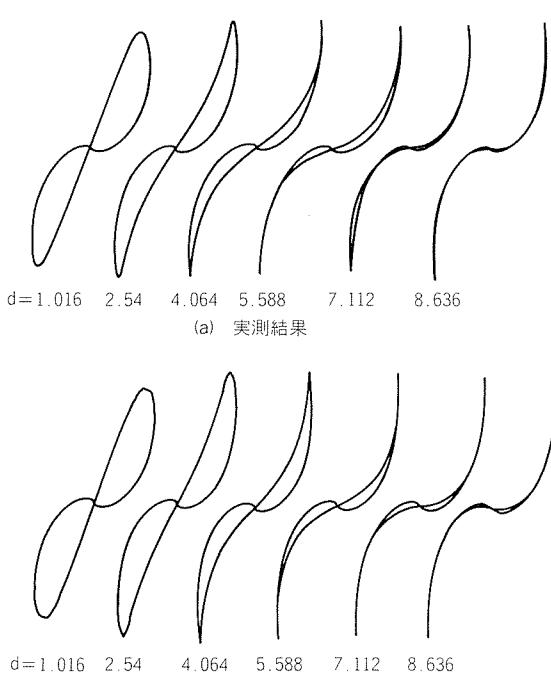


図16 インピーダンス軌跡

ディスプレイ上に表われるリサージュ图形のことで、縦軸は二つのコイルの検出電圧差、横軸は時間差を示している。検出電圧は定電流の場合、(25)式のインピーダンスを計算することにより求まる。

$$Z = \frac{j\omega 2\pi N_s}{I} \sum_{j=1}^N r_{ci} \cdot A_{ci} \cdot \Delta_i \quad \dots \dots (25)$$

ここで、 ω ：角周波数

N_s ：巻線密度

N ：コイル断面内の要素数

I ：コイル電流

r_{ci} ：中心から i 要素までの距離

A_{ci} ： i 要素のベクトルポテンシャル

Δ_i ： i 要素の断面積

両者はよく一致しており、プローブ設計の指針となることがわかる。

3.4 磁気シールド効果¹⁴⁾

磁気シールド効果を調べるため、図17に示すような電流の流れている導体とシールド材の場合について、電流

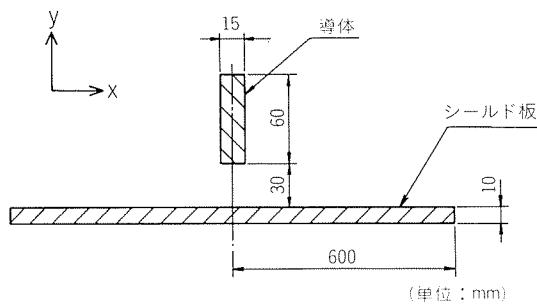


図17 シールド効果解析モデル

の周波数 f 及びシールド材の比透磁率 μ_s による磁束の浸透状況を解析した。その結果を図18に示す。導体の電流周波数が低いほど、また、シールド材の比透磁率が低いほど、いずれも磁束が浸透し、シールド効果が薄れることがわかる。

4. ま と め

有限要素法による磁場解析例について述べた。解析要素数は通常3,000程度で済むが、この場合の計算時間は、当社ミニコン(データゼネラルMV4000)では約2minである。2,000要素程度の解析であれば、PC9801等のパソコンで十分可能であり、解析モデルの検討から図形処理まで1hr以内で行える。また、三次元での解析は、諸々の問題点¹⁵⁾により未だ一般化されていないが、簡易法として二次元及び軸対称三次元で近似する方法¹⁶⁾などが開発されている。

有限要素法による磁場解析の用途は、電磁波シールド材、薄鋼板誘導加熱装置、電磁場铸造法の検討など多岐に渡ってきており、今後は、装置検討の迅速化、実験期間の短縮化が計られるものと考えられる。

文 献

- 1) 濑口靖幸、北川浩、森喜保、井上達雄：通信教育有限要素法講座、日刊工業新聞社(1983)。
- 2) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門、培風館(1983)。
- 3) 中田高義：電気学会雑誌、103(1983), 295.
- 4) 高林博文：住友特殊金属技報、7(1984), 11.
- 5) シミュレーション技術研究会編：シミュレーション技術(III)、コロナ社(1981), 65.
- 6) 中田高義、高橋則雄、河瀬順洋、清水宗徳：昭和54年電気四学会中国支部連合大会前刷(1984), 54.
- 7) 電気学会編：電磁気学、電気学会(1972), 232.
- 8) 中田高義、高橋則雄、河瀬順洋、他4名：日新電気技報、26-4(1981), 94.
- 9) 中田高義、高橋則雄：電気工学の有限要素法、森北出版(1982), 10.
- 10) 林典史、丸山晋、上原敏彦、正木克明他：本誌、26(1985), 31.
- 11) 中田高義、河瀬順洋、船越浩昌、馬場英一：昭和54年電気四学会中国支部連合大会前刷(1984).
- 12) 中田高義、高橋則雄、河瀬順洋、高杉賢美：日本応用磁気学会誌、15(1982), 169.
- 13) N. Ida, R. Palanisamy, W. Lord : Mat. Eva., 41(1983), 1389.
- 14) 中田高義、河瀬順洋、松岡三芳、森安正司：昭和55年電気学会全国大会前刷(1985), 881.
- 15) 中村史朗、岩本雅民：電気学会雑誌、104(1984), 27.
- 16) 中田高義、高橋則雄、高林博文、河瀬順洋：昭和55年電気学会全国大会前刷(1985), 754.

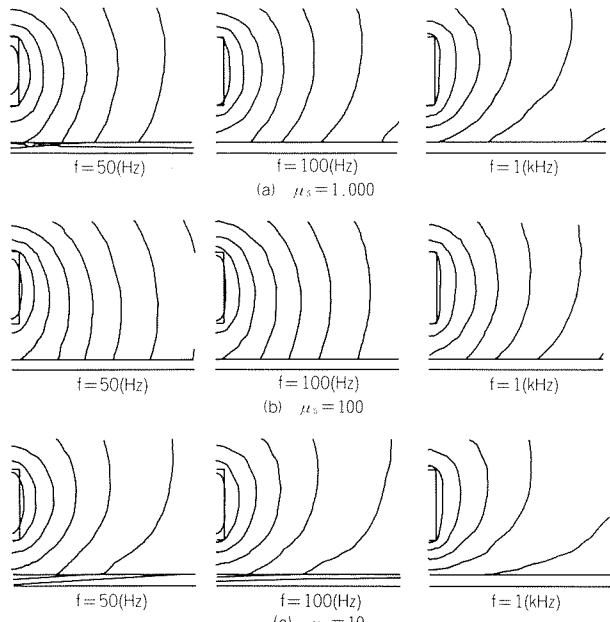


図18 磁束線図

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS (Title No. R-318)

技術資料

わが国の金属リチウム市場の現状と将来

渡辺吉章* 豊嶋雅康*
伊藤勝久*

Present and Future Market of Lithium Metal in Japan

by Yoshiaki Watanabe, Masayasu Toyoshima
and Katsuhisa Ito

住友軽金属工業株式会社技術研究所

わが国の金属リチウム市場の現状と将来

渡辺吉章* 豊嶋雅康*
伊藤勝久*

Present and Future Market of Lithium Metal in Japan

by Yoshiaki Watanabe, Masayasu Toyoshima
and Katsuhisa Ito

At present, lithium chemicals are widely used in many industries, such as ceramics, glass, air conditioning and lubricating grease. Lithium metal is used in the synthetic rubber and primary battery industries. Although the consumption of lithium metal is still relatively small, it is said that the lithium demand will increase very rapidly once lithium secondary battery and fusion reactor are realized in future.

On the other hand, lithium metal has played a very important role in the development of aluminium alloys especially after the oil crisis in the late 1973. The addition of 3 wt.% lithium to aluminium can increase the elastic modulus and reduce the density of the aluminium alloy in 10% concurrently, thus offering fuel savings of the aircraft.

In order to use these alloys for commercial applications, however, more efforts have to be made for the reduction of manufacturing cost and the achievement of optimum ductility and toughness.

From these points of view, we have developed the new process of producing a high purity aluminium-lithium master alloy by molten salt electrolysis.

This paper reviews the present and future state of lithium metal market in Japan, and also describes our recent development in the master alloy production.

1. はじめに

リチウムは金属リチウムとしての用途の外に、炭酸化物、水酸化物、臭化物や塩化物などの化合物として多くの分野に使用されている。

金属リチウムは合成ゴム触媒とリチウム一次電池が主用途であるため、化合物と比較して消費量が少なく、我が国の場合年間30~40ton程度である。リチウム一次電池は、全金属中で最も軽く、かつ、電気化学的になりリチウムの特性を利用した高エネルギー密度新型電池として十数年前に我が国で実用化され、今後の着実な需要の伸びが予想される。また、金属リチウムを添加元素としたAl-Li合金は、低比重・高剛性が特徴であり、航空機の新素材として実用化が急がれている。この外に、化石燃料に代る次世代のエネルギー源として核融合炉の研究開発が進められているが、核融合反応実現のためには、リチウムは欠くことのできない物質である。

一方、我が国は金属リチウムの全量を輸入に依存しており、上記の需要を満たすためには、資源の確保並びに高品質なりリチウムの安定生産が必要となる。

以上の見地から、当社では新素材としてのAl-Li合金の研究開発のみでなく、添加元素である金属リチウムをAl-Li母合金として製造する電解プロセスの開発も併せて進めている¹⁾。本報では、金属リチウムの歴史、特性及び資源問題と、我が国におけるリチウム（金属リチウム及びリチウム化合物）市場の動向を紹介すると共に、当社におけるリチウム製造技術の開発状況について述べる。

2. リチウム^{*1}とは

2.1 歴史^{2~6)}

リチウムは、1817年にスウェーデンのJ.A.Arfwedsonにより発見され、数グラムの金属リチウムが得られたの

* 1 Lithium という名称は、「石」を意味するギリシャ語のLithos に由来する。

は、1855年のBunsenとMatthiessenらによる塩化リチウムの溶融塩電解によってであった。

その当時の用途は余りなかったが、第一次世界大戦の後半、ドイツにおいてリチウムを少量添加したAl-Zn合金(Scleron)と軸受用鉛合金(B-metal)が製造され、工業的にリチウムが用いられ始めたようである。第二次世界大戦中には、炭酸ガス吸収剤や高級グリースの原料として水酸化リチウムが本格的に使用されるようになった。我が国におけるリチウムの需要もその頃から始まり、主な用途は溶接フラックスとしての塩化リチウムであって、ドイツからの輸入のほかに、一部は国産化されたようである。

米国で大量生産が行われるようになったのは1950年代からであり、核融合反応に不可欠な⁶Liを得るために、米国原子力委員会(U.S. Atomic Energy Commission)が大量の水酸化リチウムを購入したことによって発している。

その後、技術革新の進行と共に、リチウムの需要分野と使用量が徐々に拡大して現在に到っている。近年では、再び金属リチウムが脚光を浴び、電池、核融合炉及びAl-Li合金等が積極的に開発されている。

2.2 特 性

表1に金属リチウムの物理的性質を、表2に化学反応性を示す。

リチウムは、周期律表では第3番目に位置し、最も原子量の小さい、最も軽く、軟らかで融解しやすい銀白色の金属である。イオン化傾向が最も大きく、電気化学的には最も単な金属である。また、液体で存在する温度

表1 金属リチウムの物理的性質

原 子 番 号	3
質 量	6.941
同 位 元 素	⁶ Li 存在比: 7.5%, 質量: 6.015 ⁷ Li 存在比: 92.5%, 質量: 7.061
密 度 d ^c (g/cm ³)	d ²⁰ =0.534 d ⁴⁰⁰ =0.490 d ¹⁰⁰⁰ =0.441 (単体中、最も軽い金属である。)
原 子 半 径 (Å)	1.23
イ オ ン 半 径 (Å)	0.60
融 点 (°C)	179 (760mmHg)
沸 点 (°C)	1317 (760mmHg)
融 解 潜 热 (cal/g)	103.2
蒸 發 潜 热 (cal/g)	4680
色	銀白色
硬 度 (Moh's)	0.6
炎 色 反 応	深赤色
比 热 (cal/°C·g)	0.941 (at 20°C)
比 抵 抗 (Ω cm)	9.35×10 ⁻⁶ (at 0 °C)
蒸 气 压 (mmHg)	0.49(at 702°C) 2.82(at 802°C) 12.1(at 902°C)
イオン化ボテンシャル (kcal/g·atom)	124.3
標準単極電位 (V)	-3.045 (at 25°C)
中性子吸收断面積 (Barns)	71 (⁶ Li=950, ⁷ Li=0.033)

表2 金属リチウムの化学反応性

対 象	化 学 反 応 性
水	●激しく反応して、水素を発生するが、ナトリウムと比較すると穏やかである。 ●発熱反応であるが、リチウムの燃焼は生じない。 $\text{Li} + \text{H}_2\text{O} = \text{LiOH} + 1/2\text{H}_2, \quad \Delta H = -52,900\text{cal}$
酸 素	●100°C以下の乾いた酸素とは反応しない。 ●高温においては、反応して酸化リチウム(Li ₂ O)となる。 ●過酸化物(Li ₂ O ₂)は、他のアルカリ金属に比べ生成し難い。
窒 素	●他のアルカリ金属と異なり、容易に反応する(酸素より反応性に富む)。3 Li + 1/2N ₂ = Li ₃ N(黒色) (リチウムに対しては、不活性ガスとしては使用できない) ●融点(Li ₃ N: 845°C)以上では、鉄鋼材料に対して極めて強い腐食性を有す。
水 素	●500~800°Cで反応して、水素化リチウム(LiH)を生成する。 (水素化リチウムは、有機化学における有力な水素化剤である。)
ハロゲン (ガス)	●フッ素とは容易に反応する。 ●塩素とは、加熱しないと反応が進まない。
炭 素	●高温において炭化物を形成する。(>800°C, Li ₂ C ₂) ●加水分解で、アセチレンを発生する。
アンモニア	●反応してリチウムアミドが生成される。(LiNH ₂)
炭 酸 ガ ス	●反応して酸化リチウム(Li ₂ O), 炭素と共に炭酸リチウム(Li ₂ CO ₃)が生成される。 $4 \text{Li} + 2 \text{CO}_2 = \text{Li}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{C}$ (リチウム火災に、炭酸ガス消火器は使用できない。)
無 機 酸	●反応する。
アルコール	●反応して水素を発生する。 $\text{Li} + \text{ROH} \rightarrow \text{LiOR} + 1/2\text{H}_2$
有機化合物	●パラフィン系とは反応しない。 ●種々の反応系がある。

表3 代表的なリチウム含有鉱石⁷⁾

鉱石名	一般性質
Spodumene (60%) ⁽¹⁾ (リシア輝石) 化 学 式 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	Li_2O 8.0% Al_2O_3 27.4% SiO_2 64.6% 比重 (3.15-3.20) 色(白色, 灰色, ピンク, 黄, 緑), 单斜晶系, ベグマタイト鉱床
Amblygonite (1.3%) ⁽¹⁾ (鈍角石) (アンブリゴナイト) 化 学 式 $\text{LiAl}(\text{F},\text{OH})(\text{PO}_4)_3$	Li_2O (10.1%), Al_2O_3 (34.4%) F (12.9%), P_2O_5 (47.9%) 比重 2.98-3.15 (3.0-3.1) 色(白, 淡緑, 灰), 三斜晶系, ベグマタイト鉱床
Lepidolite (22%) ⁽¹⁾ (リシア雲母) 化 学 式 $\text{K}_2(\text{Li},\text{Al})_{5-6}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_4$	Li_2O (4.09%) 比重 (2.8-3.0) 色(無色, 桃色), ベグマタイト鉱床のみ産出する。三斜晶系 片麻岩中にも産出する。
Petalite (13%) ⁽¹⁾ (葉長石) 化 学 式 $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$	Li_2O -4.9%, SiO_2 -78.4% Al_2O_3 -16.7% 比重 2.42(2.39-2.46) 色(白, 灰, 赤, 緑色), ガラス光沢劈開性あり, 单斜晶系, ベグマタイト鉱床

(1) ()の%は自由世界のリチウム資源消費量中に占めるリチウム鉱物の利用比率を示す。

領域が極めて広い。

一方、リチウムはアルカリ金属に属するにもかかわらず、以下に述べるように他の同族金属に見られない特異的な性質や、マグネシウムなどのアルカリ土類金属に類似した特徴をもつ。

- (1) アルカリ金属中で、唯一、窒素と反応する。
- (2) 常温で水と反応するが、他のアルカリ金属より穏やかである。
- (3) マグネシウムと同様に炭化物を形成する。
- (4) 原子半径、イオン半径が小さく、マグネシウムと同程度である。
- (5) 化合物の水への溶解度は、マグネシウムに類似している。

以上は、主として常温での反応性を述べたが、溶融状態の金属リチウムは極めて活性であり、水とは爆発的に反応し、また、多くの金属や耐火物を激しく侵すので十分な注意が必要である。

その外、リチウム元素の特徴として、中性子の吸収断面積が大きく、遅い中性子の放射を受けるとトリチウム(三重水素)を発生する。

3. 資 源

リチウムは地殻中に広く分布しており、含リチウム鉱石としては約140種が発見されている。表3に代表的な鉱石を示す。

また、内陸性塩湖のカン水(brine)、海水及び温泉中にも微量ながら含まれている。リチウムは、クラーク数からみれば第27位で亜鉛や鉛よりも上位であるが地殻上

表4 リチウム資源推定量(自由世界)⁸⁾

(1) 鉱石(金属リチウム換算、1,000ton)

国名	推定量
米 国	3,157.3
ザイ ー ル	2,340.0
カ ナ ダ	268.4
オーストラリア	174.5
ジンバブエ	113.5
ブ ラ ジ ル	17.5
欧 州	11.3
ナ ミ ビ ア	11.5
アルゼンチン	0.5
計	6,094.5

(2) カン水(金属リチウム換算、1,000ton)

内陸性塩湖名(国名)	推定量
Salar de Atacama (チリ)	4,290 (1400ppm ⁽¹⁾)
Great Salt Lake (米国)	260 (40ppm)
Silver Peak (米国)	118 (200ppm)
Searles Lake (米国)	24 (50ppm)
計	4,692

(1) カン水中のLi濃度

に偏在せず、現在の工業的なリチウム採取の対象になっているのは、米国ノースカロライナ州に分布するベグマタイト鉱床中のスピジュメン(リシア輝石)と、リチウムが濃縮されているチリと米国ネバダ州のシルバーピークのカン水である。

表4には、自由世界のリチウム資源推定量を鉱石とカン水に区分して示した。ソ連邦や中国の共産圏にも、大量に存在するようであるが、確かな数値は発表されてい

ない(チベットの塩湖に世界の埋蔵量の半分に相当する資源が発見された、ともいわれている⁹⁾)。

なお、我が国においては、第二次世界大戦中に福岡県の長垂鉱山などで僅かに採鉱されたようであるが¹⁰⁾、現在では全量を輸入に依存している。

4. 製造方法

4.1 リチウム化成品(金属及び化合物)の製造工程

図1に、現行の工業的な製造工程を示す。

リチウム資源としては、鉱石とカン水が用いられ、前者の場合の抽出方法としては硫酸法と石灰法があるが、現在の主流は図示した硫酸法である。

抽出の最終製品は炭酸リチウムであり、それ自体が代表的なりチウム製品であるが、水酸化リチウム、塩化リチウム、臭化リチウム及びフッ化リチウムなどの原料でもある。

金属リチウムは、炭酸リチウムや、場合によっては水酸化リチウムを塩酸処理した無水塩化リチウムを原料とし、これを電解して得られる。

水素化リチウムや、ノルマルブチルリチウムに代表される有機リチウムは、金属リチウムが原料である。

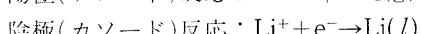
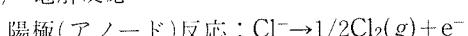
4.2 金属リチウムの製造方法

金属リチウムの工業的生産方法は塩化リチウムを原料とする溶融塩化物電解であり、原理的にはBunsenらが溶融塩化リチウムの電解により初めて金属リチウムを得た方法に基づいている。その後、操業温度を下げて電流効率を向上させるため、塩化カリウムを付加した二元系の電解浴が使用されて現在に到っている。

電解の具体的な詳細は明らかでないが、現在までに公表された実施例を表5に、電解槽構造例を図2にそれぞれ示す。

電解反応と諸元をまとめると次のようになる。

(1) 電解反応



$$\text{理論分解電圧}^{14)} : E_{th}^0 = 3.684 \text{ V (450°C)}$$

(2) 電解浴及び浴温

塩化リチウムと塩化カリウムの共融組成(45% LiCl - 55% KCl、融点: 352°C)であって、浴温は420~460°Cである。

(3) 電極材料

陽極: 黒鉛、陰極: 鋼

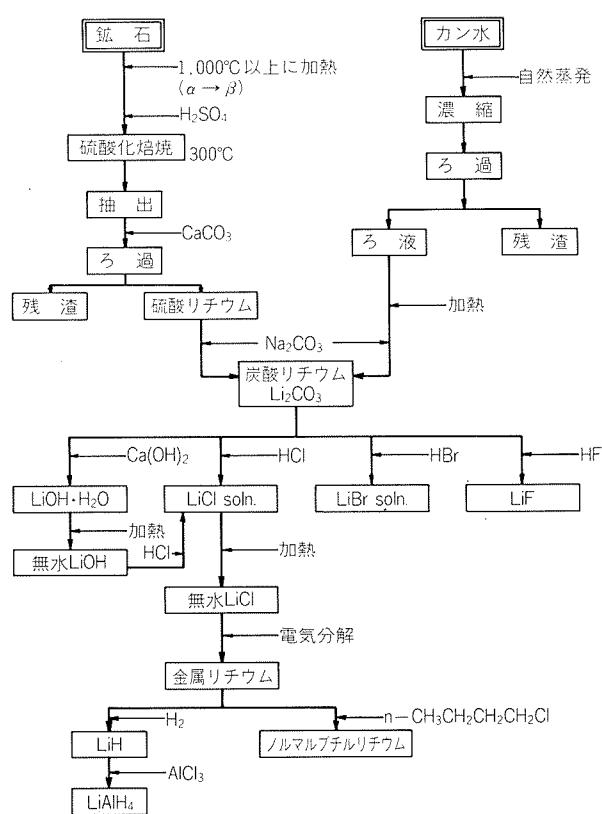


図1 製造工程概略

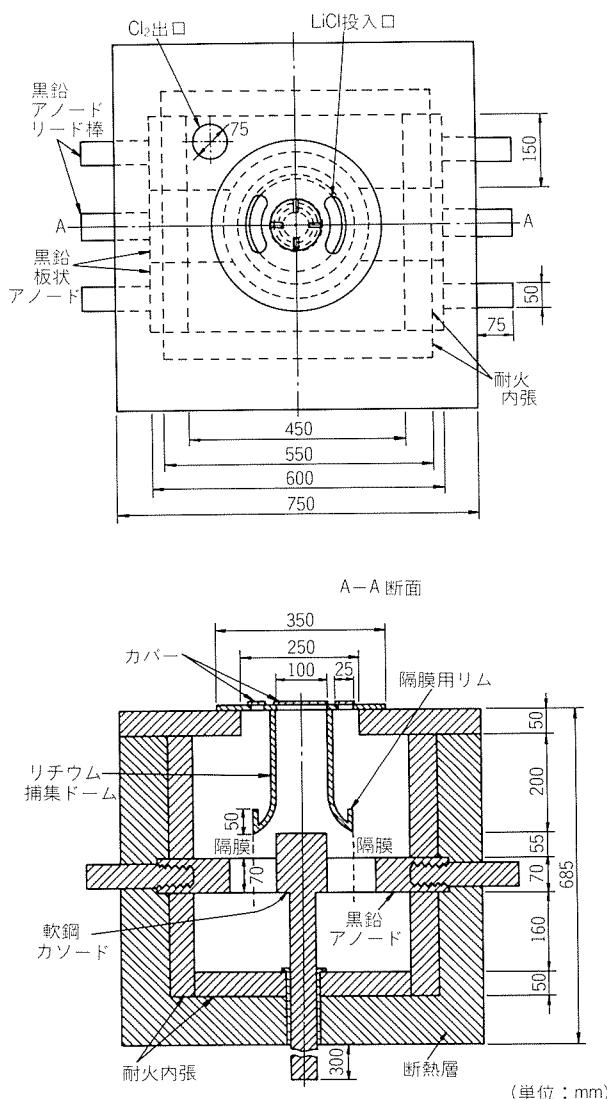


図2 Degussa社のリチウム電解槽¹¹⁾

(4) 電解諸元

1) 電流密度

陽極: 0.6~1.4A/cm², 陰極: 0.4~2.1A/cm²

2) 槽電圧: 6~7V

3) 電流効率: 70~90%

4) 直流電力原単位: 30~40 Kwh/kg·Li

表5 電解実施例

製造会社(国名)		Degussa ¹¹⁾ (ドイツ)	不詳 ¹¹⁾ (米国)	Olin Mathieson ¹²⁾ (米国)	Foote Mineral Co. ¹³⁾ (米国)	
実用時期		1945	1960	1960	1970	
規模		プラント	プラント	試験炉	プラント	
製槽	原 料		LiCl			
	形 状 (mm)	正方形型 450×450×485H	矩形型 2440×1830×1520H	円筒型 Φ660×760H	箱 型 不 詳	
	内 張 り	耐火レンガ			な し	
	隔 膜	金 網	な し	SUS 316 網	な し	
	浴 量 (kg)	100		315		
	寿 命	槽 (月)				
		隔 膜 (月)				
	浴組成 (LiCl-KCl)	52-48		44~50-56~50		
	浴 温 (℃)	420	410	450	440	
	電 流 (A)	850	8600	1420	10500	
電解条件	電 密	アノード(A/cm ²) カソード(A/cm ²)	1.4 2.1		0.6 0.4	
		極間距離 (mm)		38~89		
	電 極	材 料 ア ノ ー ド	Graphite			
		配 置	Side Entering		Bottom Entering	Top Entering
		形 状(mm)		Φ200×1830	Φ150×300	Φ165×1016
		材 料 カ ソ ー ド	Steel			
		配 置	Bottom Entering		Top Entering	Bottom Entering
		形 状(mm)	Φ100×125		Φ270×300	Φ229
成績	電 壓 (V)	8~9	6~6.5	6.8	6.1	
	電流効率 (%)	85~90	77	74	73	
	生産量 (kg/day/炉)	4~5	41	6.5	54	
	アノード寿命 (月)					
	原電力	DC電力 (kwh/kg)	40	34	36	
		付加A.C. (kwh/kg)	100	外部バーナ	42	
		計 (kwh/kg)	140		32	
	單位	原材料LiCl (kg/kg·Li)	7.3		6.2	
		その 他			6.2	
製品	メタル	純 度 (%)	97	99.6~99.9		
		主要不純物	Na=1.4% K=1.3%			
	ガス	Cl ₂	Cl ₂	Cl ₂	Cl ₂	

5) 塩化リチウム原単位: 6~7 kg/kg·Li

5. 我が国の供給と需要

5.1 供給

自由世界で、天然原料からリチウム製品を生産しているのは、米国のLithium Corp. of America, Foote Mineral Co.の2社と、後者とチリ政府との合弁会社であるSoc. Chileana de Ltda.の計3社である。各社の生産能力を炭酸リチウム換算で表6に示す。

自由世界での金属リチウム製造会社は米国の上記2社以外に、英国のLithium Corp. of Europeと西ドイツのMetallgesellschaft AG.の子会社Chemetall社があげら

表6 リチウムの生産能力⁶⁾

製造会社	工場所在地	生産能力 (炭酸リチウム換算, ton/年)
Lithium Corp. of America ⁽¹⁾	Bessemer City, North Carolina, U.S.A.	16,000
Foote Mineral Co. ⁽²⁾	Kings Mountain, North Carolina, U.S.A.	8,000
	Silver Peak, Nevada, U.S.A.	7,000
Soc. Chileana de Ltda.	Atacama, Chile	6,000

(1) F.M.C. Corp. の子会社

(2) Newmont Mining Corp. の子会社

表7 リチウム製品製造会社

製造会社	製造品目
本荘ケミカル(株)	臭化リチウム、塩化リチウム、水素化リチウム、ノルマルブチルリチウム
日本化学工業(株)	臭化リチウム、塩化リチウム
旭硝子(株)	臭化リチウム
三共化成工業(株)	ノルマルブチルリチウム
旭東金属工業(株)	金属リチウム箔
本城金属(株)	金属リチウム箔
三井金属鉱業(株)	金属リチウム箔

表8 リチウム製品の輸入通関実績¹⁵⁾ (単位: ton)

品目	年次(暦年)				
	1981	1982	1983	1984	1985
炭酸リチウム	3,229	3,189	3,626	3,773	4,430
水酸化リチウム	631	670	766	858	797
臭化リチウム ⁽¹⁾	103	116	133	137	159
塩化リチウム	7.8	8.5	5.8	10.6	15.4
水素化リチウム	—	0.8	0.8	2.6	4.8
金属リチウム	29.7	35	30	32	42

(1) 臭化カリウムを含み、臭化リチウムは1ton未満と推定される。

れるが、前者は Lithium Corp. of America の子会社である。また、フランスのPechiney社では、子会社のMetal Speciaux 社が Al-Li 合金用に試験生産中ともいわれている。

一方、資源をもたない我が国では、金属リチウムとりチウム化合物の原料でもある炭酸リチウムや水酸化リチウムの全量を輸入に依存しており、化合物の製造及び金属リチウムの加工のみを行っている。その主要会社と製品目を表7に示す。

表8には、過去5年間の主要なリチウム製品の輸入通関実績を示すが、1985年は史上最高を記録している。この内、代表品目である炭酸リチウムの輸入ソースを表9(a)に、金属リチウムを表9(b)に示す。いずれの場合も米国2社の寡占状況が如実に示されている。

また、リチウム製品の国内市況価格は表10に示すように、比較的安定していたが、1986年4月時点で大幅に低下した。これは1985年来からの円の高騰に起因するものである。

表9 リチウム製品の主要輸入ソース

(a) 炭酸リチウム (単位: ton)

順位	年次(暦年)					
	1983		1984		1985	
米国	%	米国	%	米国	%	
1	3,155	87.0	3,438	91.1	3,184	71.9
2	266	7.3	306	8.1	921	20.8
3	205	5.7	20	—	273	6.2
4	英 国		西 ドイツ		西 ドイツ	
	70	—	10	—	52	—
合計	3,626	100	3,773	100	4,430	100

(b) 金属リチウム (単位: ton)

順位	年次(暦年)					
	1983		1984		1985	
米国	%	米国	%	米国	%	
1	24.2	79.9	24.5	75.6	26.8	63.8
2	西 ドイツ		西 ドイツ		西 ドイツ	
	5.8	19.1	7.6	23.5	9.9	23.6
3	中 国		中 国		英 国	
	0.3	0.8	0.3	0.9	5.3	12.6
4	英 国					
	0.07	0.2				
合計	30.3	100	32.4	100	42.0	100

または、



の原子核反応を利用してリチウムから生成しなくてはならない。従って、核融合炉が実用化された場合には、ブランケットとして50,000~70,000ton のリチウムが必要であると予測されている⁷⁾。しかしながら、(2)または(3)式によるトリチウム源として酸化リチウムやAl-Li合金、Li-Pb合金も検討されており、必ずしも純金属リチウムのみが使用されるとは限らないようである。

(2) 大容量リチウム二次電池

石油危機以降、米国では電気自動車や負荷調整電源として、大容量のリチウム二次電池の開発が進められた。これが実用化された場合、年間30,000ton の金属リチウムが必要になると試算されている⁷⁾。我が国の電池業界においては、小型民生用のリチウム二次電池の研究が活発であり、近い将来の実用化が期待されている。

(3) Al-Li合金

アルミニウムに約3wt.%のリチウムを添加すると、従来のアルミニウム合金と比べて約10%の低比重化と弾性係数の向上が認められるので、軽量化による燃費節減を図る航空機の構造材料として期待されている。欧米においては、ALCAN、ALCOA及びPechineyの各社が既に工業生産化を表明している。

6. 当社における研究開発

上述のように、1990年代の航空機用材料として実用化

表12 日本のリチウム製品需要推移¹⁴⁾
(単位: ton)

品目	年次(曆年)				
	1981	1982	1983	1984	1985
炭酸リチウム	1,100	1,100	1,600	1,700	2,350
臭化リチウム	1,700	1,700	1,700	1,800	2,000
水酸化リチウム ⁽¹⁾	631	670	766	858	797
塩化リチウム	190	200	200	210	200
金属リチウム ⁽¹⁾	29.7	35	30	32	42

(1) 輸入通関実績

が急がれているAl-Li合金も、現状では製造面、特性面、更には価格の点から多くの解決すべき課題が残されている。

添加元素である金属リチウムは高価であるばかりでなく、高活性なので添加時のロスが大きく、保管を含めて溶解・鋳造には特別の配慮が必要である。また、アルミニウム合金へのリチウム添加量が高くなるほど軽量化と高剛性化が図れるが、同等に靭性が低下するので、その対策が必要となる。以上のことから、合金価格に占める原材料費や設備費比率が高くなり、スクラップの回収や大量生産を前提にした場合でも、現状の試算価格は従来の航空機用アルミニウム合金の2~3倍になるとみなされている。我が国の場合は、前述のように金属リチウムを全量輸入しているために、より高価なものとなろう。

しかしながら、軽量化が特に厳しく追求される航空機材料としてAl-Li合金を実用化する意義は大きい。そこで、当社においては展伸材製造技術の研究だけでなく、合金の特性向上と価格低減を目的として、添加元素であるリチウムを保存並びに取扱いが容易なAl-Li母合金の形で製造する技術開発を同時に進めている。

これは、「ナトリウム、カリウム及びカルシウムを含まない高純度アルミニリチウム母合金の電解製造技術に関する応用研究」として、通産省の重要技術研究開発費補助金を受け、昭和60年度より2か年計画で着手した。この製造方法によれば、未精製の不純原料塩を使用しても、ナトリウム等を含まない高純度の母合金が電解工程のみによって得られ、靭性の向上に効果がある高純度のリチウム¹⁶⁾を低価格で供給することが可能になる。

表14は、特許¹¹⁾記載の開発技術による成果を示した。これから明らかなようにナトリウムやカリウム等の不純物含有量が極めて少ない母合金が得られている。

表14 Al-Li母合金の化学分析
(wt.%)

合 金	化 学 成 分			
	Li	Na	K	Ca
Al-10%Li	10.1	0.0004	0.0005	0.0001
Al-20%Li	19.3	0.0001	0.0006	0.0004
	19.3	0.0001	0.0005	0.0001
	19.5	0.0002	0.0006	0.0001

表13 日本におけるリチウム製品の消費分野推定(1980年)⁷⁾

(単位: ton)

品目	分野	ガラス	LiBr用	LiCl用	冷凍機	除湿機	窯業	グリース	電池	触媒
炭酸リチウム Li ₂ CO ₃		500	900	200			200			
臭化リチウム LiBr			—		1,800					
水酸化リチウム LiOH							600	10		
塩化リチウム LiCl				—	200					
金属リチウム Li								2.5	17.5	

表10 国内市況価格 (単位:円/kg)

品 目	時 期		
	1984.4月	1985.4月	1986.4月
炭酸リチウム ⁽¹⁾ 99%	1,050~1,100	1,100~1,150	880~930
水酸化リチウム ⁽¹⁾ 55%	1,430~1,530	1,480~1,580	1,200~1,300
臭化リチウム ⁽¹⁾ 55%	710~760	710~760	655~705
塩化リチウム ⁽¹⁾	1,670~1,720	1,670~1,720	1,480~1,530
金属リチウム ⁽²⁾ 99.9%	32,000	32,000	26,000

(1) ton ロット (2) 100kg ロット

5.2 需 要

5.2.1 現 状

リチウム製品は、表11に示すように極めて多岐にわたって使用されているが、表12の需要推移にみられるように、主要製品は炭酸リチウムと臭化リチウムであり、水酸化リチウム、塩化リチウムがこれに次いでいる。金属リチウムは少量ではあるが、着実な伸びを示している。

それらの需要内訳を1980年を例にとって表13に示す。炭酸リチウムはそのままで窯業やガラスに用いられるほか、臭化リチウムや塩化リチウムの原料となっている。

一方、米国では、アルミニウム製錬の生産性の向上や、フッ化物の放散量の減少を図る目的で、炭酸リチウムが電解浴に添加されている場合が多い。我が国では電力単価が欧米と比べて高いため、早くから電力原単位の低減に努め、かつ、環境対策が十分に実施されているので、添加効果が大きくなく、一部を除いて採用されていない。

臭化リチウムは、高濃度水溶液が水蒸気に対する効果的な吸収剤として作用するため、全量が吸収式冷凍機に用いられている。水酸化リチウムは、一部がアルカリ乾電池に用いられるほか、脂肪酸や高級オイルに添加され、グリースへの需要が伸びている。塩化リチウムは、現在ではアルミニウム溶接用フラックスとしての需要は減少し、強い吸湿性を利用して除湿機に用いられている。

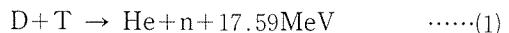
金属リチウムの用途としては、現在では、合成ゴム(SBR)触媒であるノルマルブチルリチウムとりチウム電池用箔材にほぼ二分され、両者ともに今後の需要増加が見込まれている。

5.2.2 金属リチウム需要の将来

金属リチウムの将来の用途として下記の分野があげられているが、いずれもその需要が極めて大量になるものと予測されている。

(1) 核融合炉

核融合炉は、次世代のクリーンなエネルギー源として、各国で研究開発が進められている。最も有望な核融合炉はD-T反応によるものであり、ジューテリウム(二重水素:D)とトリチウム(三重水素:T)の反応によってエネルギーを発生させる。



この内、トリチウムは天然には存在せず、

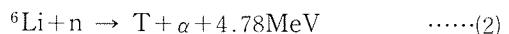


表11 品目別用途

品 目	化 学 式	主 た る 用 途
ベタライド(鉱石) 炭酸リチウム	$\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$ Li_2CO_3	陶磁器、ガラス、珪藻 化成品の出発原料
水酸化リチウム	$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$	アルミニウムの電解製錬、陶磁器、ガラス、珪藻、医薬用、フラックス 化成品の出発原料
塩化リチウム	LiOH anhyd. LiCl anhyd. LiCl soln. (40%) LiOCl LiBr LiF $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Li}$ LiAlH_4 LiBH_4 LiAlO_2 Li_2SiO_3 LiI LiNbO_3 Li_2TaO_3 LiH Li_2O Li	グリース、アルカリ電池の電解液、石鹼 炭酸ガス吸収剤 軽金属溶接用フラックス、金属リチウムの原料 除湿用、医薬用 漂白剤、ブル消毒剤 吸収式空調設備の吸収剤、窯業用、光学材料 溶接用フラックス、ロケット燃料、中性子遮蔽材 合成ゴム用触媒 還元剤、重合触媒 還元剤、重合触媒 ニューセラミックス 塗料 固体電解質 ニューセラミックス(光通信変調素子用、表面波フィルタ) ニューセラミックス(光通信変調素子用、表面波フィルタ、電子時計の振動子) 還元剤、重合触媒、水素発生剤(モノシラン用触媒) 陶磁器、ガラス、炭酸ガス吸収剤 ノルマルブチルリチウム用原料(合成ゴム触媒用) リチウム一次電池 銅の脱酸剤、合金添加元素、水素化リチウムの原料

7. おわりに

金属リチウムは、現状では用途が限られて、その需要量は比較的少ないが、将来はリチウム二次電池、核融合炉用ブランケット材など莫大な市場が予測されている。

そこで、我が国における需要見通しを紹介すると共に、最近、航空機用新素材として脚光を浴びているAl-Li合金の実用化に対する課題も述べた。

当社においては、Al-Li合金展伸材の製造技術の開発研究を進めているが、その添加元素であるリチウムの純度は性能に重要な影響を及ぼす。そこで、ナトリウムやカリウムの少ないAl-Li母合金の電解製造技術を開発したので、その一端を紹介した。各位のご参考になれば幸甚である。

参考文献

- 1) 田部善一、伊藤勝久、渡辺吉章：特開昭60-110891；USP No. 4,521,284 (本誌, 27 (1986), 125参照).
- 2) Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, System-Nr 20, Lithium Ergänzungsband, Verlag Chemie, (1960), 134.
- 3) H. Osborg : Trans. Electrochem. Soc., **66** (1934), 91.
- 4) Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Ed., Vol 14, John Wiley and Sons, Inc., (1981), 448.
- 5) I. A. Kunasz : Foote Prints, **43** (1980), 23.
- 6) 小林正夫：日本鉱業会誌, **100** (1984), 115.
- 7) 通商産業省通商政策局国際経済部編：希少金属と先端技術，日刊工業社，(1982), 134.
- 8) S. Buckley : Ind. Minerals, Feb. (1983), 25.
- 9) 朝日新聞(山形版), 昭和57年5月20日号
- 10) 小島朗延：レアメタル，地人書館，(1957), 66.
- 11) C.L. Mantell : Electrochemical Engineering, McGraw-Hill, New York, (1960), 420.
- 12) G.T. Motock : Electrochem. Tech., **1** (1963), 122.
- 13) R.G. Verdieck : TMS Paper, A70-26.
- 14) W.J. Hamer, M.S. Malmberg and B. Rubin : J. Electrochem. Soc., **103** (1956), 8.
- 15) 工業レアメタル, No. 90, アルム出版社, (1986), 83.
- 16) 例えば, E.A. Starke, Jr., T.H. Sanders, Jr. and LG. Palmer : J. Metals, **33-8** (1981), 24.