研究報告

構造用 Al-Zn-Mg 合金の応力腐食割れにおよぼす
冷間加工の影響について*

平松 剛毅**・宮木 美光**・辻 美紘**

Effects of cold working on stress corrosion cracking of structural Al-Zn-Mg alloys

UDC 669.715'5'721-12:620.194

HIRAMATSU Tsuyoshi**, MIYAGI Yoshimitsu** and

TSUJI Yoshihiro**

Experiments were conducted to investigate the effects of cold working on mechanical properties and stress corrosion resistance of structural Al-Zn-Mg alloys, and the relation between the stress corrosion cracking and shear cracks was discussed.

The results obtained were summarized as follows.

(1) Tensile strength, yield strength, and hardness of the high temperature aged material were higher than those of the low temperature aged one. The above values were increased with the increase of cold reduction ratio in the both materials. However, the rates of increase in these values by cold reduction were more remarkable in the low temperature aged material than in the high temperature aged one. Then, at the cold reduction ratio of 20%, these values of the low temperature aged material were higher than those of the high temperature aged one.

(2) Stress corrosion resistance in the short transverse direction was higher in the low temperature aged material than in the high temperature aged one. The resistance was decreased with the increase of cold reduction ratio in the both materials. However, the rate of decrease in the resistance by cold reduction was more remarkable in the low temperature aged material than in the high temperature aged one. Then, at the cold reduction ratio of 20%, the resistance of the low temperature aged material under higher applied stresses was lower than that of the high temperature aged one.

(3) The life of shear cracks was longer in the high temperature aged material than in the low temperature aged one.

(4) Shear cracks are supposed to be stress corrosion cracking due to the residual stress caused by shearing. The reasons for higher stress corrosion resistance of the low temperature aged material and higher shear crack resistance of the high temperature aged one would be as follows.

(a) The reduction ratio of cold working in the sheared part is about 20%.

(b) Assuming that the residual stress caused by shearing is equivalent to the yield strength of the sheared part, the stress of the low temperature aged material is higher than that of the high temperature aged one.

(c) In the low temperature aged material, stress corrosion resistance is higher but at cold reduction ratio of 20%, the resistance under higher applied stresses is lower. Accordingly, shear cracks are more likely to occur in the low temperature aged material than in the high temperature aged one.

(Received Oct. 6, 1969)

1. 緒 言

一般に高力アルミニウム合金厚肉材の厚さ方向(ST方向)の機械的性質, 耐応力腐食割れ性などの性質はメタル・フローの方向に平行方向(L方向)および直角方向

(LT方向)のそれに比して劣るので^{1)~5)}, ST方向に応力がかかるような構造材の使用においては, ST方向のそれらの性質を十分把握して設計, 使用しなくてはならない。ST方向の耐応力腐食割れ性については, 試験片の製作および応力の負荷がむづかしいため, 試験が困難

* 軽金属学会第36回大会にて発表

** 株式会社神戸製鋼所(下関市) Kobe Steel, Ltd. (Shimonoseki)

であり、文献が少ない。Gruhl ら⁶⁾は、シヤー切断割れはシヤー切断による残留応力に起因する応力腐食割れで、シヤー切断割れの寿命は耐力に相当する引張応力を負荷した板厚方向 (ST 方向) の応力腐食割れの寿命とほぼ一致し、ST 方向の耐応力腐食割れ性はシヤー切断割れ試験によつて、ある程度定量的に判定できるとしている。しかし著者ら⁷⁾は、Al-Zn-Mg 系合金の応力腐食割れ試験を種々の腐食雰囲気で行ない、低温時効材は高温時効材より耐応力腐食割れ性は優れているが、耐シヤー切断割れは劣ることを見だし、Gruhl らの考えと一致しない。たしかにシヤー切断割れはシヤー切断による残留応力に起因した応力腐食割れであるが、シヤー切断部はかなりの塑性変形を受けていることを考慮すると、耐応力腐食割れ性におよぼす冷間加工の影響が低温時効材と高温時効材とで異なるためではないかと考えられる。

Al-Zn-Mg 系合金の耐応力腐食割れ性におよぼす冷間加工の影響については、すでに 2, 3 の報告があり^{8)~10)}、耐応力腐食割れ性は冷間加工によつて劣化するが、その劣化の程度は高温時効材より低温時効材の方が著しい⁸⁾といわれる。

本報は、実用 Al-Zn-Mg 合金厚板の低温および高温時効材について、機械的性質および耐応力腐食割れ性におよぼす冷間加工の影響を調査し、さらに応力腐食割れとシヤー切断割れとの関係について考察したものである。

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Zr	Cu	Fe	Si
4.44	1.20	0.39	0.24	0.09	0.09	0.06	0.22	0.08

Fig. 1 Specimen for stress corrosion cracking test.

2. 試験方法

2.1 供試材

Table 1 に示す組成の厚さ 250 mm の半連続鋳塊を、片面につき 6 mm 面削して、厚さ 238 mm とし、これを 460°C で 4 hr 均質化処理したのち、熱間圧延で厚さ 25 mm として供試材とした。

2.2 熱処理・冷間加工

熱処理・冷間加工条件はつぎの通りである。

450°C で 1 hr 溶体化処理後、沸騰水中に焼入れ、さらに 5 日間の室温時効後、空気炉を用いて 70°C および 150°C で、それぞれ 24 hr 時効した。70°C で時効したものを低温時効材 (L. T. A.)、また 150°C で時効したものを高温時効材 (H. T. A) と呼ぶこととし、これらの時効材に冷間圧延で 0 ~ 20% の加工を加えたものについて、2.3 の試験をおこなった。

2.3 試験方法

試験項目はつぎの通りである。試験片は、いずれも熱処理および冷間加工による端部の残留応力などの不均部を避ける意味で、2.2 でえた板の周囲を 25 mm 切断除去し、中央から採取した。

2.3.1 引張試験

引張試験は圧延方向に平行な方向 (L 方向) より採取した平行部径 5 mm、平行部長さ 25 mm の小形引張試験片で行ない、引張強さ、耐力、弾性限および伸びを求めた。耐力および弾性限は引張試験片の中央に新興通信製 ストレイン・ゲージ S 102 を貼りつけて、S-S 曲線を描いて求め、また伸びは標点距離 20 mm について求めた。

2.3.2 応力腐食割れ試験

応力腐食割れ試験は、圧延方向に直角でかつ圧延面に平行な方向 (LT 方向) および ST 方向より、**Fig. 1** に示す試験片を採取しておこなった。応力負荷は前記 ストレイン・ゲージを貼りつけて、2.3.1 で求めた S-S 曲線を基準としておこなった。腐食雰囲気は、Al-Zn-Mg-Cu 系合金の耐応力腐食割れ性を迅速に判定できるといわれている 36 g/l CrO₃-30 g/l K₂Cr₂O₇-3 g/l NaCl 水溶液¹¹⁾である。予備試験した結果、その 100°C の液への浸漬は短時間で耐応力腐食割れ性を判定できることを確認したので、その状態に 0 ~ 120 min 浸漬し、割れの発生するまでの時間を求めた。

2.3.3 シヤー切断割れ試験

シヤー切断割れ試験は厚さの中央部から削り出した厚さ (ST 方向) 10 mm、幅 (LT 方向) 20 mm、長さ (L 方向) 60 mm の試験片でおこなった。L 方向に直角に長さ 15 mm に切断したものを、2.3.2 と同一の腐食雰囲気中に浸漬し、切断面で、割れが発生するまでの時間を求めた。

2.3.4 硬さ測定

マイクロ・ビツカース硬度計で冷間加工による硬さ変化およびシャー切断による硬さ変化を求めた。

3. 試験結果

3.1 機械的性質

冷間加工による機械的性質の変化を **Fig. 2** に示す。時効のままの状態では、高温時効材は低温時効材より引張強さ、耐力、弾性限および硬さが高く、伸びは同等であ

Fig. 2 Effects of cold working on mechanical properties.

L.T.A: Low temperature Aged Material

H.T.A: High temperature Aged Material

Fig. 3 Effects of cold working on stress corrosion resistance.

る。低温および高温時効材ともに冷間加工率が増すにつれて、引張強さ、耐力、弾性限および硬さは増加し、伸びは減少する。これらの性質の冷間加工による変化の割合は、高温時効材より低温時効材のほうが大きい。したがって冷間加工率が高くなると、低温時効材は高温時効材より引張強さ、耐力、弾性限および硬さが高くなり、

Fig. 4 Stress corrosion resistance under applied stresses equivalent to the respective yield strengths and elastic limits of materials.

Fig. 5 Stress corrosion resistance under constant applied stresses.

伸びは著しく低くなる。すなわち引張強さと硬さは冷間加工率約8%以上、耐力と弾性限は冷間加工率約15%以上で、それぞれ高温時効材より低温時効材のほうが高くなり、また伸びは冷間加工率約10%以上で、高温時効材より低温時効材のほうが著しく低くなっている。

3.2 耐力力腐食割れ性

L T方向の試験片では、0~20%の冷間加工を加えた低温および高温時効材のいずれも、それぞれの耐力に相当する応力を負荷して、腐食雰囲気中に120 min 浸漬しても、割れなかつた。したがって以下S T方向の試験片についての結果 (Fig. 3~5) を示す。Fig. 4 および Fig. 5 はそれぞれ Fig. 3を別の形でややくわしく表示したものである。

高温時効材では、負荷応力 σ と寿命 t の関係は、縦軸を σ 、横軸を $\log t$ で示すと、ほぼ直線となり、負荷応力が低いほど寿命が長い。またその場合、冷間加工率が増すにつれて、その直線関係は、わずかに寿命が短時間側にずれる傾向にあるが、著しいものではない。

一方、低温時効材では、冷間加工率3%以下の場合、その耐力に相当する応力を負荷して、腐食雰囲気中に120 min 浸漬しても、割れが生じなかつた。冷間加工率が5%となると、耐力に相当する負荷応力では、腐食雰囲気中に120 min 浸漬すると割れが生じたが、弾性限に相当する負荷応力では、割れは生じなかつた。この場合の弾性限は冷間加工しないものの耐力よりも高いので、耐力力

腐食割れ性が冷間加工率5%で劣化したとは必ずしもいえない。しかし冷間加工率が10%となると、冷間加工しないものの耐力に相当する応力よりも低い負荷応力で、割れが生じ、耐力力腐食割れ性は冷間加工によつて本質的に劣化しているといえる。さらに冷間加工率が増して20%となると、耐力力腐食割れ性は一層劣化する。冷間加工率が高い場合の σ と $\log t$ との関係は、高温時効材の場合の直線関係とは異なり、一部双曲線に似た形となり、負荷応力が低くなるにつれて寿命は著しく長くなる。

低温時効材と高温時効材を比較すると、冷間加工率が低い場合、低温時効材は高温時効材より耐力力腐食割れ性が優れている。しかし低温時効材では、冷間加工率が高くなると、耐力力腐食割れ性が著しく劣化することと $\sigma - \log t$ の関係より、約15 kg/mm² 以上の負荷応力の場合、冷間加工を20%受けた低温時効材は高温時効材より耐力力腐食割れ性が劣る。このように負荷応力が高い場合、冷間加工によつて高温時効材より低温時効材のほうが、耐力力腐食割れ性が劣化する臨界冷間加工率は、Fig. 4 および 5 より約15%と考えられる。

3.3 耐シャー切断割れ性

シャー切断割れ試験結果を Fig. 6 に示す。低温および高温時効材ともに、冷間加工率が増すにつれて、割れ寿命は短くなっているが、その寿命の減少の割合は高温時効材より低温時効材のほうが大きい。低温時効材と高温時効材とを比較すると、耐力力腐食割れ性の場合と異なり、冷間加工率0~20%のいずれの場合も、高温時効材より低温時効材のほうが割れ易い。

4. 考 察

4.1 冷間加工の耐力力腐食割れ性におよぼす影響

冷間加工を加えると残留応力が発生することが多く、また残留応力は耐力力腐食割れ性に影響をおよぼす^{12)~14)}。したがって耐力力腐食割れ性におよぼす冷間加工の影響を調べる場合、冷間加工と残留応力による影響とを、それぞれ区別する必要がある。試験片の大きさを素材に比べ小さくすると、残留応力は緩和されて小さくなる¹²⁾ことより、本試験では、残留応力による影響はほとんどなく、冷間加工の影響についてのみ試験しているといえる。

Zimmermann ら⁸⁾ は、Al-Zn-Mg 合金の耐力力腐食割れ性は冷間加工によつて劣化するが、その程度は高温時効材では小さく、低温時効材では著しいとしており、本試験の結果とほぼ一致している。また彼らは、低温時効材では、冷間加工率が1~2%と低い場合、冷間加工によつてすべり線が粒内にのみ生じ、粒界と粒内の電位差が小さくなるため、耐力力腐食割れ性はよくなるが、

Fig. 6 Results of shear cracking tests.

Photo. 1 Microstructure of stress corrosion crack of low temperature aged material.

冷間加工率がさらに増すと、その電位差が大きくなり、著しく劣化すると述べている。本試験でも低温時効材の冷間加工しないものは耐力に相当する荷重応力で割れが発生せず、また冷間加工率3および5%のものは、冷間加工しないものの耐力に相当する応力以上の荷重応力でも割れが生じていないことから、Zimmermannらと同じ結果が予想される。

Gruhl ら⁹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾は、荷重応力 σ と寿命 t との間に $t = K \exp(c \cdot \sigma)$ なる関係を見出している。ここで K および c は冷間加工⁹⁾¹⁵⁾、温度¹⁵⁾、腐食雰囲気¹⁶⁾などによって定まる定数である。冷間加工については、冷間加工率が増すにつれて、 K は小さく、また c は大きくなり、 $\log t = K' + C' \cdot \sigma$ で示される直線はすべて一点で交わるとしている⁹⁾ が、本試験ではその傾向は認められなかった。

応力腐食割れと転位組織については、主に荷重応力と荷重応力によって発生した転位組織との関係より論じられている^{17)~20)}。しかし冷間加工の応力腐食割れにおよぼす影響を考える場合、すでに導入されて存在している転位組織を考えなくてはならない。Zimmermannら⁸⁾は、上述のように、電気化学的に説明しようと試みているが、すべりが粒界に当たった所では応力集中を起しやすくそれが応力腐食割れに関係する¹⁷⁾¹⁹⁾²⁰⁾ことを考えると、冷間加工によつて十分発達した転位組織をもつものと、そうでないものに、同一の応力を負荷した場合の応力の集中の度合の差も考える必要があろう。GP ゾーンあるいは細かい中間相を有するものでは、冷間加工によつてすべりが少数の面で平行、かつ帯状に生ずるが、大きい中間相あるいは平衡相を有するものでは、冷間加工によつてすべりが少数の面に限定されず帯状でなく、不規則に生じるといわれている¹⁷⁾¹⁸⁾。また帯状のすべりが粒界に当たった所では、高い応力集中を起しやすい¹⁷⁾¹⁹⁾²⁰⁾ことから、本試験の耐力腐食割れ性が、高温時効材では冷間加工にほとんど影響されないが、低温時効材では著しく影響されるのはつぎのように考えられる。高温時効材では冷間加工によつてすべりが比較的均一に生じ、粒界

Photo. 2 Microstructure of shear cracks of high temperature aged material.

での応力集中の割合がほとんど変わらないが、低温時効材では冷間加工によつてすべりが帯状に生じ、その密度が冷間加工率が増すにつれて高くなり、したがって粒界での応力集中の割合が増すためと考えられよう。これらの点については今後さらに検討する予定である。

4.2 応力腐食割れとシャー切断割れとの関係

Gruhl ら⁶⁾は、シャー切断割れはシャー切断による残留応力に起因する応力腐食割れで、その残留応力はシャー切断前の耐力に相当する応力より大きいとしている。再結晶した板の場合、シャー切断割れの寿命はシャー切断前の耐力に相当した引張応力を負荷したS T方向の応力腐食割れの寿命よりわずかに短い。そして、それらの寿命の対数はほぼ直線となり、よく対応しているとしている。著者らも、シャー切断割れはシャー切断部の残留応力を機械的な方法で除去すると生じないことなどから、同様の考えをもっている。**Photo. 1** および **2** に示すように、割れの形態は応力腐食割れおよびシャー切断割れともに、すべて粒界割れで同じであつた。

著者らは、Al-Zn-Mg系合金の応力腐食割れ試験を種々の腐食雰囲気で行ない、低温あるいは高温時効の同一時効条件で時効した試料を比較すると、耐力腐食割れ性の優れているものは耐シャー切断割れ性も優れているが、低温時効材と高温時効材とを比較すると、耐力腐食割れ性は低温時効材のほうが優れているが、耐シャー切断割れ性は高温時効材のほうが優れていることをさきに報告した⁷⁾。また本試験結果でも同じ傾向がえられた。これは Gruhl らの考えと必ずしも一致しない。しかし Gruhl らも認めているように、シャー切断部はかなり加工硬化していることから、耐シャー切断割れ性については、シャー切断による加工された状態での耐力腐食割れ性と、その状態における残留応力とを結びつけて考える必要があろう。

Fig. 7 はシャー切断部の加工率を推定するため、シャー切断面下 0.2 mm の部分の硬さをシャー切断前の硬さに対比させたものである。低温および高温時効材ともに、冷間加工率が増すにつれて、シャー切断による硬さ

Fig. 7 Effects of cold working on hardness which are shown by full lines and hardnesses of sheared parts which were measured at 0.2 mm from sheared surface. The latter are shown by ranges with arrow heads.

の増加は少なくなり、冷間加工率20%の場合、ほとんど増加していない。これは冷間加工率が増すにつれて、硬く、かつもろくなるため、シヤー切断の場合の塑性変形量が少なくなること、および引張残留応力がその耐力に相当すると仮定されるなら、冷間加工率が増すにつれて耐力が高くなって、引張残留応力が高くなるため、みかけの硬さが低くなる²¹⁾²²⁾ことなどによると考えられる。冷間加工しないものについて、シヤー切断部の冷間加工率をこの硬さ測定結果から推察すると、低温および高温時効材ともに約20%と考えられる。

以上より、応力腐食割れとシヤー切断割れとの関係は **Fig. 8** により定性的につぎのように説明される。

① シヤー切断割れは、シヤー切断部と同じ冷間加工を受けたものの S T 方向に、シヤー切断によつて発生する残留応力に相当する応力を負荷した場合の応力腐食割れである。

② シヤー切断部は約20%の冷間加工を受けたものに相当する。

Fig. 8 Schematic relation between stress corrosion cracking and shear cracks, in which only the effects of cold working were considered.

A: Stress corrosion resistance of LTA

B: Stress corrosion resistance of HTA

C: Stress corrosion resistance of highly cold worked LTA

D: Stress corrosion resistance of highly cold worked HTA

③ シヤー切断によつて生ずる残留応力はシヤー切断部の耐力に相当する。

と仮定する。耐力力腐食割れ性は高温時効材 (B) より低温時効材 (A) のほうが優れているが、20%の冷間加工を加えると、高温時効材 (D) より低温時効材 (C) のほうが劣る。また **Fig. 2** で、冷間加工率20%の場合の耐力は高温時効材のそれ ($\sigma_{0.2}^B$) より低温時効材のそれ ($\sigma_{0.2}^A$) のほうが高いことから、シヤー切断部の残留応力は高温時効材より低温時効材のほうが高い。これらのことから、耐力力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材のほうが優れているが、耐シヤー切断割れ性は逆に高温時効材のほうが優れていることが説明される。

この考え方によると、シヤー切断割れの寿命は、冷間加工率20%の場合の耐力に相当した応力を負荷した応力腐食割れの寿命と一致する。しかし **Fig. 3** と **Fig. 6** を比較すると、シヤー切断割れの寿命は、低温および高温時効材ともに、高温時効材の冷間加工率20%の場合の耐力に相当した応力を負荷した応力腐食割れの寿命よりも長い。たしかにシヤー切断割れはシヤー切断によつて生じた残留応力に起因した応力腐食割れであるが、この場合、残留応力の方向とシヤー切断部の組織の方向との関係を考えなくてはならない。

シヤー切断による残留応力がシヤー切断方向に平行に発生するとすると、**Photo. 2** に示すように、シヤー切断した時、方向性の強い組織がかなり塑性変形を受けるために、シヤー切断部の組織は切断方向すなわち残留応力の方向に対して、完全に S T 方向でなく、かなり L 方向となっている。したがってシヤー切断割れは、L 方向の要因がかなり入った S T 方向の応力腐食割れと考えられる。すなわち **Fig. 9** に示すように、シヤー切断部の耐力力腐食割れ性は、単に高い冷間加工率が加った部分の耐力力腐食割れ性 (C) および (D) でなく、それらより寿命が長い (E) および (F) となると考えられる。これより、シヤー切断割れと応力腐食割れの関係がうまく説明される。

Fig. 9 Schematic relation between stress corrosion cracking and shear cracks, in which effects of cold working and structure were considered.

A, B, C, and D: same as in Fig. 8.

E: Stress corrosion resistance of sheared part of LTA

F: Stress corrosion resistance of sheared part of HTA

シヤー切断割れは、シヤー切断によつて発生する残留応力に相当する応力を、シヤー切断部と同じ冷間加工を受けた板材のS T方向に負荷した場合の応力腐食割れと考えられるが、その場合、さらにシヤー切断によるメタル・フローの変化も考えに入れなくてはならない。したがつて板材の耐応力腐食割れ性をシヤー切断割れ試験で判定する場合には、冷間加工の機械的性質および耐応力腐食割れ性におよぼす影響のほか、シヤー切断による残留応力の方向とメタル・フローの変化の関係を十分考慮しなくてはならない。

5. 総 括

実用 Al-Zn-Mg 合金厚板の低温および高温時効材について、機械的性質および耐応力腐食割れ性におよぼす冷間加工の影響を調べ、さらに応力腐食割れとシヤー切断割れとの関係について考察した。

(1) 高温時効材は低温時効材より引張強さ、耐力、弾性限および硬さが高いが、伸びはほとんど同一である。低温および高温時効材ともに、冷間加工により引張強さ、耐力、弾性限および硬さは高くなり、また伸びは低くなる。しかし冷間加工によるこれらの値の変化は高温時効材より低温時効材の方が大きく、冷間加工率20%の場合、低温時効材は高温時効材より引張強さ、耐力、弾性限および硬さが高くなり、伸びは著しく低くなる。

(2) S T方向の耐応力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材の方が優れている。低温および高温時効材ともに、冷間加工によつて耐応力腐食割れ性は劣化する。しかしその劣化の程度は、高温時効材ではわずかであるが、低温時効材では冷間加工率5%以上で著しくなる。冷間加工率20%の場合、高負荷応力の下での耐応力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材の方が劣る。

(3) 耐シヤー切断割れ性は低温時効材より高温時効材の方が優れている。

(4) シヤー切断割れはシヤー切断による残留応力に起因した応力腐食割れと考えられる。

耐応力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材のほうが優れているが、耐シヤー切断割れ性は高温時効材のほうが優れている理由はつぎのように考えられる。

① シヤー切断部は20%の冷間加工を受けた試料の応力腐食割れと類似の挙動を示す。

② シヤー切断による残留応力がシヤー切断部の耐力に相当すると仮定すれば、冷間加工率20%を加えた場合の耐力は高温時効材より低温時効材のほうが高いので、シヤー切断部の残留応力は高温時効材より低温時効材のほうが高い。

③ 耐応力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材のほうが優れているが、冷間加工率20%を加えると、高負荷応力の下での耐応力腐食割れ性は高温時効材より低温時効材のほうが劣る。したがつてシヤー切断割れは高温時効材より低温時効材のほうが起りやすい。

参 考 文 献

- 1) W. T. Edmunds et al.: J. Inst. Metals **83** (1954-55) 247
- 2) P. Brenner: Aluminium, **37** (1961) 430.
- 3) W. A. Baker et al.: J. Royal Aeronautical Soc., **70**, 8 (1966) 757
- 4) D. O. Sprowls et al: ALCOA Technical Paper No. 17 (1962)
- 5) 高橋, 小島: 軽金属, **18**, 10 (1968) 537
- 6) W. Gruhl et al.: Z. Metallkde, **58**, 10 (1967) 679.
- 7) 平松, 宮木, 辻, 長尾: 軽金属学会第36回大会にて発表
- 8) K. Die and R. Zimmermann: Z. Metallkde **48**, 5 (1957) 288
- 9) P. Brenner and W. Gruhl: Z. Metallkde, **52** (1969) 599
- 10) G. A. Hawkes: Brit. Corr. Journal, **1**, 5 (1966) 244
- 11) 軽金属協会編, アルミニウム・ハンドブック 朝倉書店, (1963) 296.
- 12) G. A. Hawkes: J. Inst. Metals **92** (1963-64) 419.
- 13) P. Brenner: Aluminium **42** 8 (1966) 485
- 14) W. Gruhl: Metall, **19** 3 (1965) 206
- 15) W. Gruhl: Z. Metallkde, **53**, 10 (1962) 670.
- 16) W. Gruhl: Metall **17** 3 (1963) 197.
- 17) H. A. Holl Corrosion **6** (1967) 173.
- 18) W. Gruhl and H. Cordier Aluminium **44** 7 (1968) 403
- 19) N. Ryum Acta Met. **16** (1968) 327.
- 20) N. Ryum et al., Z. Metallkde **58** 1 (1967) 28
- 21) 平, 材料試験, **11** 103 (1962) 227
- 22) 平, 吉岡, 材料試験, **11** 105 (1962) 386