

耐熱性導電用アルミニウム合金の研究

Some Studies on the Conductive Aluminium Alloys with Heat Resistance

川西 六郎* 三宅 保彦*
Rokurō Kawanishi Yasuhiko Miyake

内 容 梗 概

耐熱性導電用アルミニウム合金を開発するために若干の研究を行った結果、

- (1) ジルコニウムの微量添加はアルミニウムの耐熱性を著しく向上させる。
 - (2) 試作した Al-Si-Zr 合金は強度は大きい、耐熱性、導電率ともあまりよくない。
 - (3) 別に試作した Al-Fe-Zr 合金は 200°C までは完全に常温の強度を保ち、その他の性質も優秀なものがある。
- ことがわかった。

1. 緒 言

金属材料の性能は使用される分野に応じて諸特性をもつことはいせつなことであるが、基本的には耐食性、耐熱性および機械的強さの良好なことも必要なことである。

最近、導電用材料についても耐熱性の良好な性能をもつ材料が特に要望され、銅関係においては、銅-銀系⁽¹⁾⁽²⁾、銅-クロム系⁽³⁾合金が研究され、早くより実用化されているが、アルミニウム関係においてはコンダール (Cond-Al) 合金 (Al-Mg₂Si-Fe 系合金)⁽⁴⁾ がアメリカにおいて発表されているにすぎず、いまだに満足する性能をもつ耐熱性導電用合金は多く開発されていない状況である。

一方、電気機器の大形高速化への発展による軽量な耐熱性導電用材料の要求、また超高压送電線の急激な電流容量の増大に伴い、耐熱性アルミニウム合金の開発は大きな命題となっている。

アルミニウムの耐熱性を向上させること、すなわち、再結晶温度を上昇させる方法に、アルミニウムに 10~15% の Al₂O₃ を添加する方法があり、これにより耐熱性がきわめて良好になる SAP (Sintered Aluminium Powder)⁽⁵⁾ が発表されている。この合金は粉末冶金法の技術を応用して製造するもので、小形部品の製造には適しているが、電線材料のように長尺物を製造するには、焼結機構の点から、製造速度、および線引きの点、また Al₂O₃ が混入しているために、電気抵抗が高いという問題があり、直接に導電用材料として使用するにはまだ多くの問題がある。

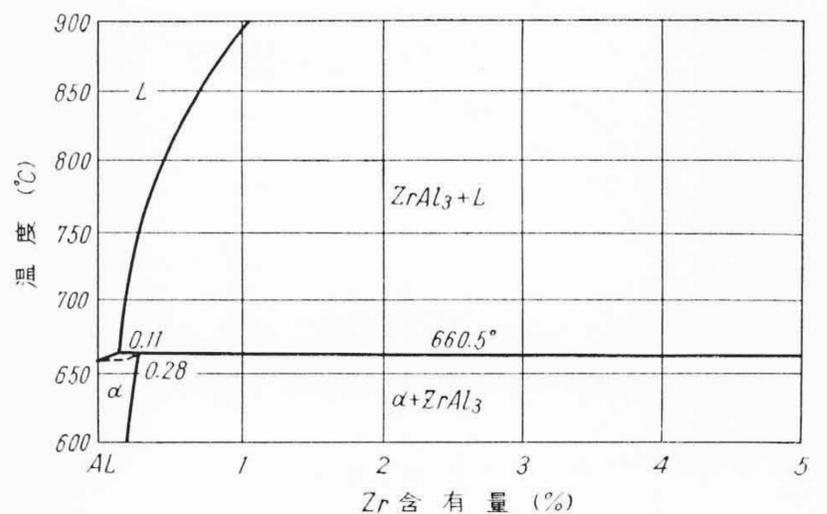
また、添加金属の効果については数多くの研究が発表されているが、これらの実験結果から、再結晶温度を上昇させ、しかも電気抵抗に悪影響を与えない添加金属はジルコニウムがきわめて効果的であると考えられている⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。そこでアルミニウムに対するジルコニウム添加の影響につき再検討をし、さらに電気用アルミニウム中に含まれている不純物のケイ素、鉄が Al-Zr 系合金に及ぼす効果につき研究し、Al-Zr 系合金は耐熱性導電用アルミニウム合金として、良好な性能を有することを確認した。

耐熱性材料としてはもちろん、高温時において使用しても、その性能が常温時の性能に比較して劣化しないことがたいせつであるが、本報告はジルコニウムを添加することにより再結晶温度を高めることができる、Al-Zr 系合金の一般的特性を従来使用されている電気用アルミニウム、アルドライ合金と比較した結果につき報告する。

2. 添加金属としてのジルコニウムの効果

第1図は Al-Zr 系平衡状態図⁽¹²⁾ のアルミニウム側を示したもの

* 日立電線株式会社電線工場



第1図 Al-Zr 平衡状態図

第1表 アルミニウムに対するジルコニウムの固溶度

温 度 (°C)	ジルコニウム量 (%)
660.5	0.28
640	0.23
600	0.15
550	0.084
500	0.050

第2表 供試材の分析値

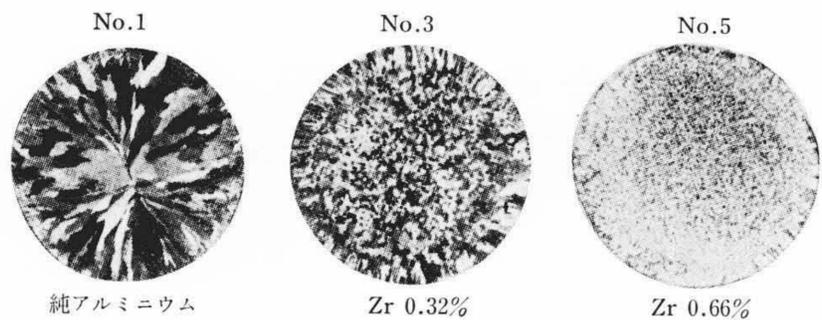
試 番	化 学 分 析 値			
	Zr	Fe	Si	Al
1	—	0.04	0.02	R
2	0.20	0.05	0.03	R
3	0.32	0.04	0.03	R
4	0.51	0.04	0.04	R
5	0.66	0.05	0.06	R

である。この図からわかるようにアルミニウム側において包晶反応 (包晶点: 0.11% Zr) を行うことがわかる。Al-Zr 合金の鑄造組織が微細化されるのは、Al-Ti 系合金⁽¹²⁾ と同様に包晶反応により金属間化合物 Zr-Al₃ が結晶核となるためである。

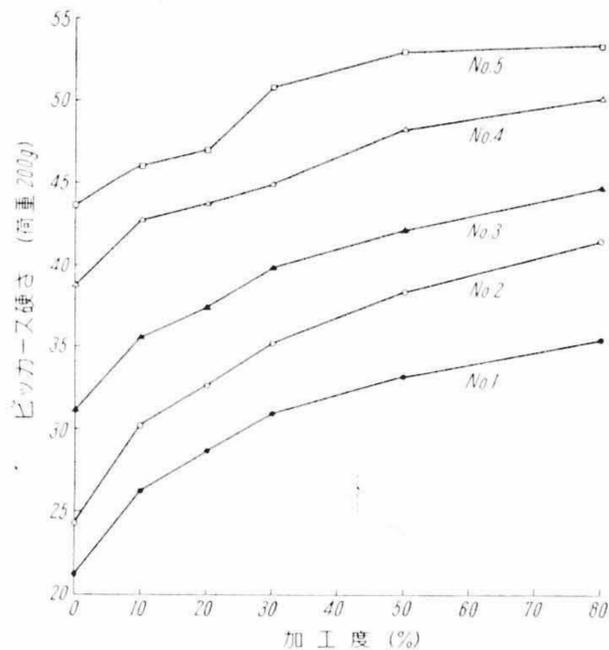
第1表はアルミニウムに対するジルコニウムの固溶度を示したもので⁽¹²⁾、包晶反応温度で最大 0.28% Zr を固溶し、温度の低下につれて固溶度は次第に減少し常温においては、ほとんど固溶しないものと推定される。

2.1 供試材および実験方法

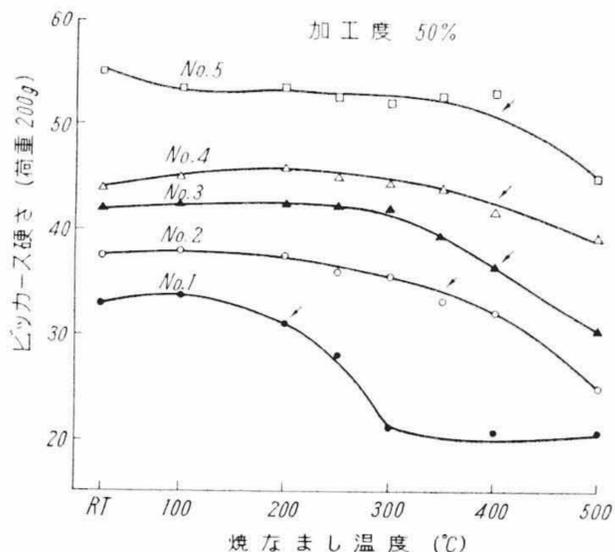
供試材は 99.99% Al にジルコニウムを 0~0.7% の範囲に 4 種類添加した、10×50×150 mm の鑄塊を溶製し、この鑄塊を 500°C×2h の均熱処理後 5 mm 厚さに熱間圧延を行い、その後溶体化処理 (550°C×4h) して水焼入れしたものをそれぞれ圧延率 10, 20, 30, 50 およ



第 2 図 Al-Zr 合金のマクロ組織



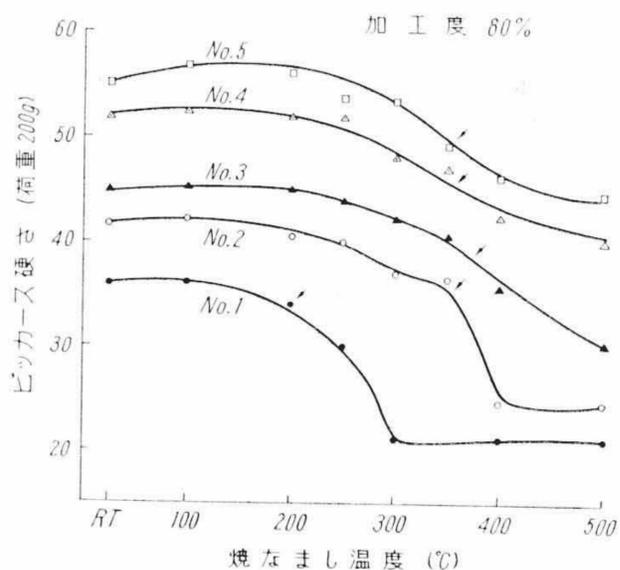
第 3 図 硬さに及ぼす加工度の影響



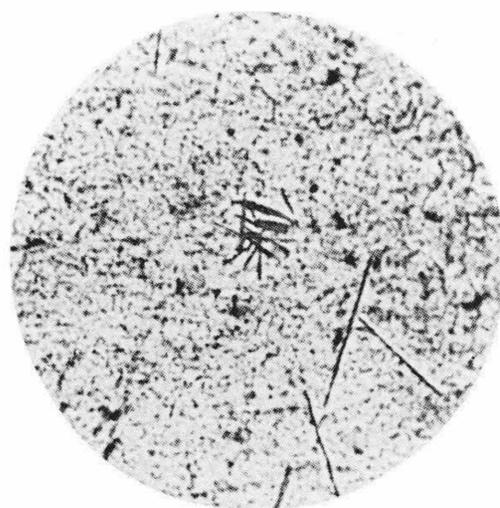
第 4 図 焼なまし温度による硬さの変化

第 3 表 Al-Zr 合金の再結晶開始温度 (50% 圧延材)

試 番	再結晶開始温度 (°C)
1	~200
2	~350
3	~400
4	~400
5	~400



第 5 図 焼なまし温度による硬さの変化



第 6 図 Al-Zr 合金の顕微鏡組織 (铸造のまま) (×100)

られる温度であって、この再結晶開始温度を測定した。

第 4, 5 図は冷間加工度がそれぞれ 50 および 80% の場合の軟化曲線を示す。図中矢印は再結晶開始点を示す。

第 3 表は軟化曲線および X 線写真より求めた再結晶開始温度をまとめたものである。これらの結果より、ジルコニウムの添加はアルミニウムの再結晶温度を向上させるのに非常に効果的な添加金属であることがわかる。またその添加量は 0.3~0.5% 程度がよく、それ以上添加しても再結晶温度を上げるのに有効ではなく、加工度が大きく (80% 加工) になると軟化点はジルコニウム含有量の多い物は低温側に移行する傾向がある。これはジルコニウム含有量の増加につれて晶出する金属間化合物の量が増加するからである。

第 6 図は試番 No. 5 の顕微鏡組織を示したものであるが、この図に認められるとおり、金属間化合物 $ZrAl_3$ の形は角形をなしており、加工によるひずみ分布状態を考慮するとこの $ZrAl_3$ の金属間化合物の周辺にひずみが集中されることが考えられる。このために金属間化合物 $ZrAl_3$ の量の多いもの、すなわちジルコニウム含有量の多いものは加熱した場合に $ZrAl_3$ 周辺に集中された過度のひずみのために、比較的化合物の少ない合金より軟化点が低温側に移行するものと考えられる。

(3) 導電率

第 7 図は 50% 冷間圧延した試料を各温度で 1 時間焼なました

び 80% で冷間加工を行った。これら各加工度の試料を 100~500°C の種々な温度で 1 時間加熱後再結晶の様子を調べた。再結晶温度の測定は加熱後の試料の微小硬度計 (荷重 200 g) による硬さ測定により、また一部は X 線背面反射法により決定した。

第 2 表は供試材の化学分析値を示す。

第 2 図は試番 No. 1, 3 および 5 の鋳造材のマクロ組織を示したもので、ジルコニウム量の増加につれて結晶粒が微細化していることがわかる。

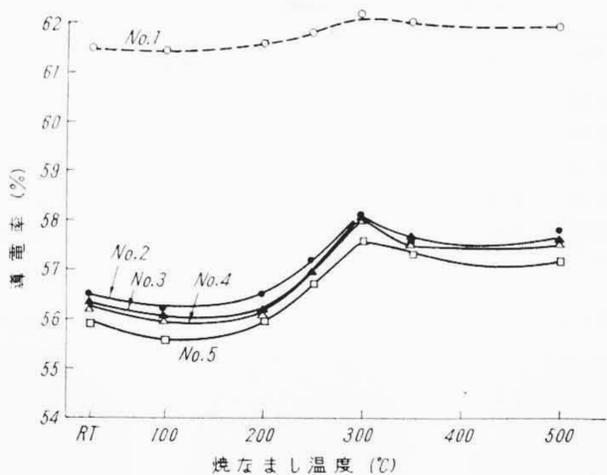
2.2 実験結果

(1) 加工硬化能

第 3 図は加工硬化曲線を示したものである。この図からわかるように、ジルコニウムの添加により硬さは増加するが、Al-Zr 合金の加工硬化能はジルコニウムの添加量に関係なく、アルミニウムとほとんど同じである。

(2) 再結晶温度

再結晶温度とは硬さ測定による軟化曲線において硬さが急激に軟化を開始する温度、また X 線写真により再結晶スポットの認め



第7図 焼なまし温度による導電率の変化

場合の導電率の変化を示す。ジルコニウムの添加による電気抵抗の変化はきわめて少ないことがわかる。たとえば第7図の試番No.5 (Zr: 0.66%) においても導電率は約56%の値を示している。すなわちAl-Zr合金は導電用材料としても良好な性能をもっていることがわかる。

3. Al-Zr合金に及ぼす不純物の影響

アルミニウムに対するジルコニウムの添加は、前述の実験結果よりわかるように、鑄造組織を微細化し、耐熱性を向上させ、また、導電率もあまり低下させないことがわかった。すなわちジルコニウムは耐熱性導電用アルミニウム合金の添加元素として効果的なものである。しかし、一般にアルミニウム地金中に含まれているおもな不純物は、ケイ素および鉄であり、これらの不純物がAl-Zr合金の諸性能にどのような影響を与えるかを検討した。

3.1 ケイ素の影響

上述のとおりジルコニウムをアルミニウムに少量添加すると、金属間化合物 $ZrAl_3$ が微細に、しかも均一に析出して、耐熱性を著しく向上させるのであるが、Al-Zr合金中にケイ素が含まれていると、金属間化合物 $ZrAl_3$ の微細でしかも均一な析出が阻止され、ジルコニウムの効果が減殺されるといわれている⁽¹³⁾。

しかし、ケイ素はアルミニウムの加工硬化能を大きくする元素であり⁽¹⁴⁾、またアルミニウムへの添加元素としては、比較的導電率を低下させない元素でもあるので⁽¹⁵⁾、これらの点をも含み、Al-Zr合金に及ぼすケイ素の効果について検討した。

3.1.1 供試材および実験方法

供試材は電気用アルミニウムを溶解して、ケイ素、ジルコニウムはそれぞれ母合金を用いて添加して45mmφ×220mmの鑄塊を溶製した。

第4表に鑄塊の分析値を示す。比較のため、電気用アルミニウムについても同様な実験を行ったので併記する。上記の鑄塊を500°Cで2時間均熱処理、熱間鍛造により15mmφの丸棒とし、550°Cで4時間溶体化処理、水冷し、5mmφまで冷間圧延、ついで3.2mmφまで冷間伸線した各組成のものを100~500°Cの種々な温度で1時間焼なまして水冷し、引張り試験および導電率の測定を行った。

3.1.2 実験結果

(1) 引張り強さおよび伸び

第8図(a), (b)に常温および100~500°Cの各温度で1時間焼なました場合の焼なまし温度に対するこれらの性質の変化を示す。

第8図(a), (b)からわかるように、引張り強さはケイ素量の増加とともに増加している。

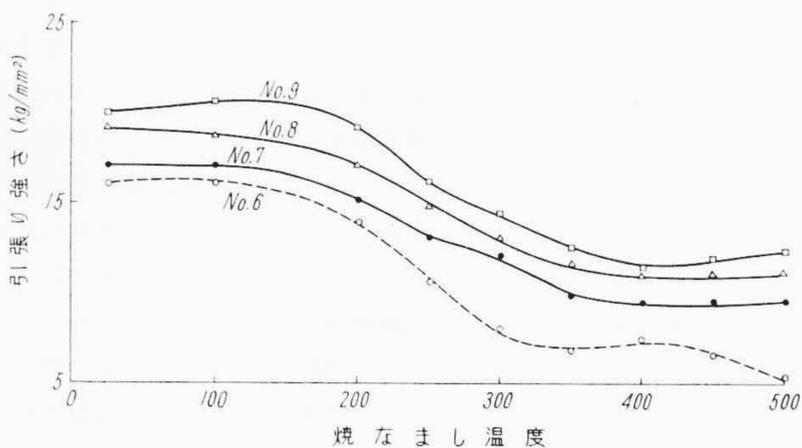
200°Cにおいて、どの試料もかなり軟化しており、その軟化傾

第4表 化学分析値

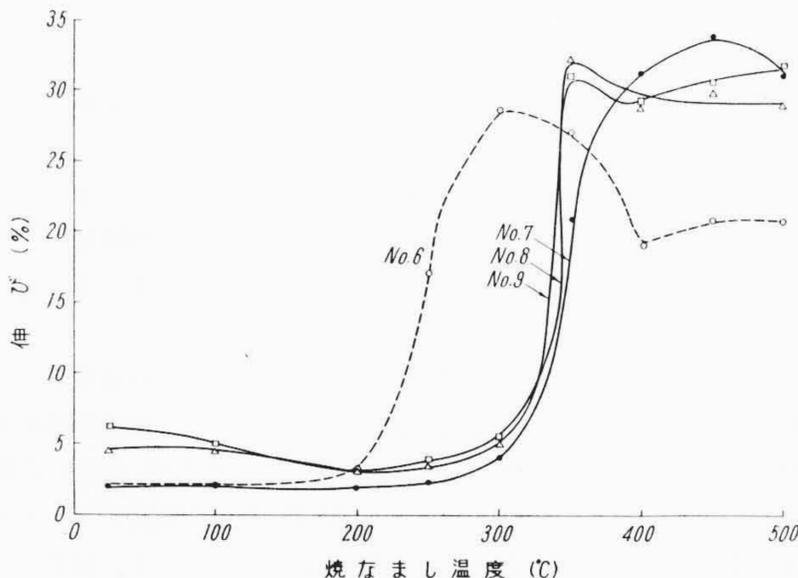
試番	元素	Fe (%)	Si (%)	Zr (%)
6		0.20	0.09	—
7		0.21	0.26	0.20
8		0.21	0.49	0.28
9		0.21	0.69	0.26

第5表 Al-Si-Zr合金の軟化恒数

試番	k (min ⁻¹) × 100
No. 6	1.53
No. 7	1.15
No. 8	1.08
No. 9	0.99



第8図(a) 焼なまし温度に対する引張り強さの変化



第8図(b) 焼なまし温度に対する伸びの変化

向はいずれもほぼ同様で、耐熱性はあまりよくない。しかし電気用アルミニウムよりも軟化温度はやや高いようである。このような軟化傾向を数値的には握するには、次式で示されるような軟化恒数を用いると便利である。これは軟化の割合を表わすものでこの恒数が小さいほど軟化しにくいことを表わすものである。

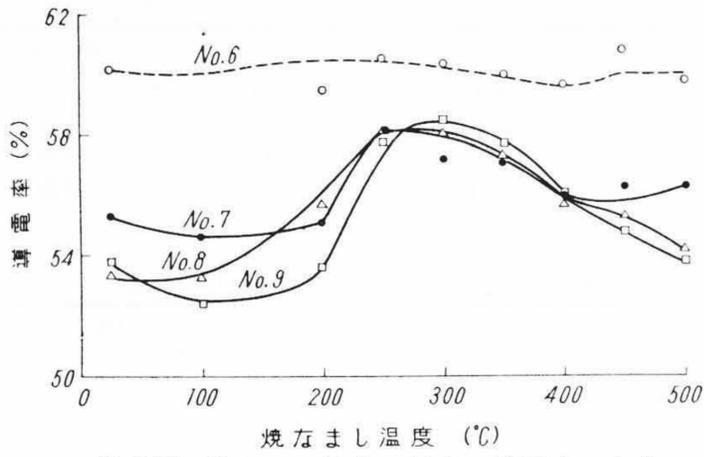
$$k = \frac{1}{t \log_e \frac{1}{1-x}}$$

k : 軟化恒数 (min⁻¹)
 t : 焼なまし時間 (min)

$1-x$: 引張り強さの減少した割合

第5表にだいたい半軟化温度である250°Cにおける軟化恒数を示す。第5表にみられるとおりケイ素が存在すると、Al-Zr合金の耐熱性は著しく阻害され、ほとんど電気用アルミニウムに近い値になってしまうことがわかる。

前節においてAl-Zr合金は非常に耐熱性がよいことがわかったのであるが、これにケイ素が添加された場合に、その耐熱性は非常に低下してきた。すなわち、アルミニウムにジルコニウムを添



第9図 焼なまし温度に対する導電率の変化

加した場合に、耐熱性が向上するのは、強制固溶されたジルコニウムが適当な析出処理によって $ZrAl_3$ となって微細に、しかも均一に析出するためであるが、ケイ素が存在すると、ジルコニウムを Zr_5Si_3 として析出させ、強制固溶するジルコニウムの量を減少させる。しかし、それでもジルコニウムは相当量固溶するからそれ相当の効果は残っているが、析出処理をすると固溶されたジルコニウムは、ケイ素と結合して Zr_5Si_3 として析出し、 $ZrAl_3$ としての析出量は減少するために、耐熱性が著しく害されるといわれている⁽¹³⁾。本実験結果においても、Al-Zr合金にケイ素が共存すると耐熱性がなくなるのは、溶体化処理によって強制固溶されるジルコニウムが十分固溶されず、また、あとの焼なまし処理の場合にも $ZrAl_3$ が微細に析出しないために耐熱性がそこなわれたものと思われる。

(2) 導電率

第9図に各温度で1時間焼なました場合の焼なまし温度に対する導電率の変化を示す。

この図からわかるように、250~300°Cでほぼ完全に回復し、それ以上温度が高くなると、ケイ素、その他の元素の再固溶のためかえって導電率は低下する。この傾向はケイ素含有量の多いものほど著しい。

なお、Al-Zr合金と、Al-Zr-Si合金の冷間加工材の導電率を比較すると後者は約3%程度低い値を示している。これは溶体化処理による固溶量がAl-Zr-Si合金に多いためであるが、加熱した場合の導電率の回復を比較してみるとAl-Zr合金に比較して、ケイ素が共存しているAl-Zr-Si合金の回復がかなり大きい結果を示しており、しかも回復の開始しだす温度はAl-Zr-Si合金のほうが低温側にずれている。このような結果から考えて、Al-Zr合金にケイ素が存在すると、耐熱性がなくなるのは、 Zr_5Si_3 形成による $ZrAl_3$ の均一微細な析出阻害、および析出速度を早める効果によるものではないかと考えられる。

3.2 鉄の影響

鉄もアルミニウム地金中に通常含まれているおもな不純物元素の一つであるが、ジルコニウムがアルミニウムの耐熱性を向上させる効果、すなわち、 $ZrAl_3$ の微細でしかも均一な析出現象を阻害するようなことは比較的少なく⁽¹⁰⁾、引張り強さ、硬さを上昇させることはもちろん、耐クリープ性をも向上させる⁽⁴⁾ことがわかっているので、耐熱性導電用アルミニウム合金としてきわめて有望な添加元素であると考え、その影響を検討する意味で諸性質を調べた。

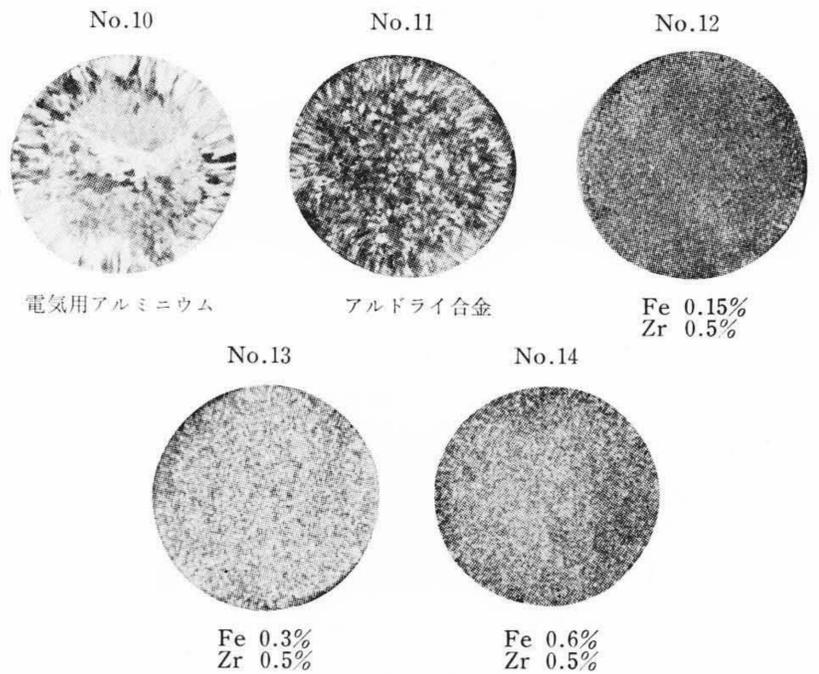
3.2.1 供試材および実験方法

供試材は電気用アルミニウムを溶解し、これに鉄、ジルコニウムを、それぞれ母合金を用いて添加し、45 mmφ×220 mmの鋳塊を溶製した。

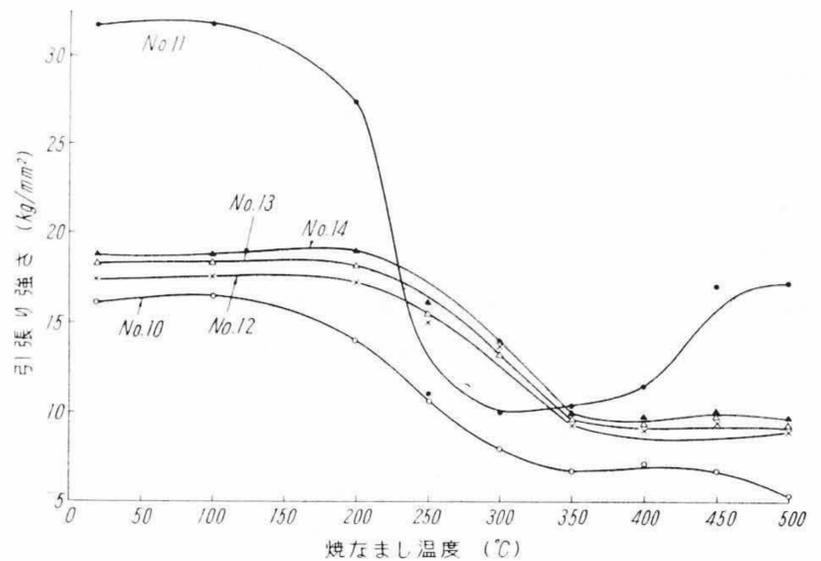
第6表にこの鋳塊の分析値を示す。なお、電気用アルミニウム、アルドライ合金についても比較のため併記する。

第6表 化学分析値

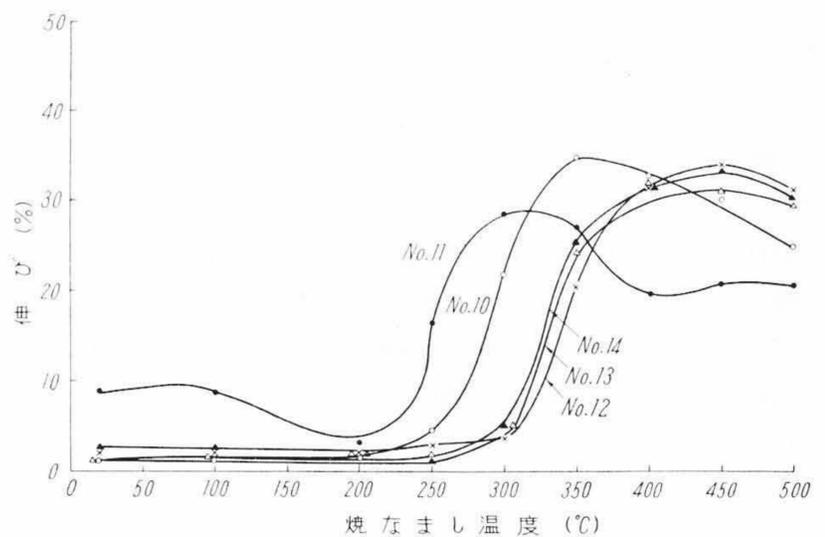
試番	Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zr	名称
10	0.09	0.20	0.004	0.003	tr	tr	—	純アルミニウム
11	0.69	0.18	0.004	0.003	tr	0.43	—	アルドライ
12	0.10	0.21	0.004	0.003	tr	tr	0.51	耐熱アルミニウム
13	0.11	0.40	0.004	0.003	tr	tr	0.48	耐熱アルミニウム
14	0.11	0.61	0.004	0.003	tr	tr	0.48	耐熱アルミニウム



第10図 アルミニウム、アルドライ合金および耐熱アルミニウム合金のマクロ組織



第11図(a) 焼なまし温度に対する引張り強さの変化



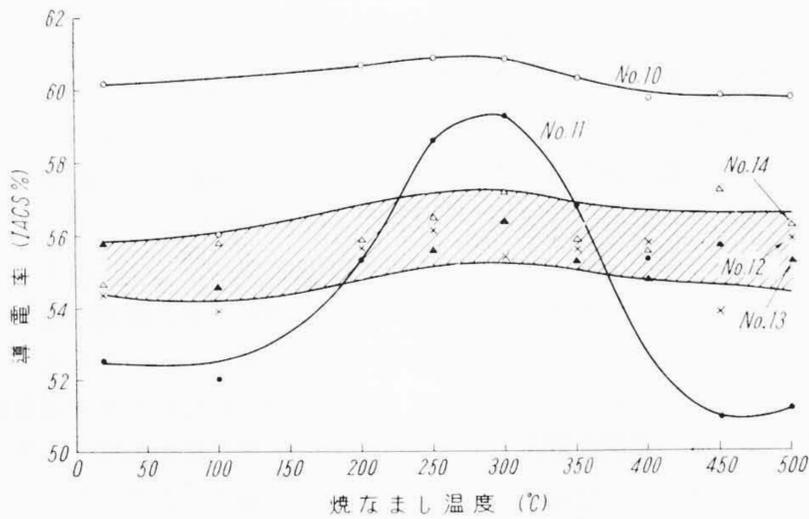
第11図(b) 焼なまし温度に対する伸びの変化

第10図は鋳造材のマクロ組織を示す。ジルコニウムを添加した試料は結晶粒が著しく微細化していることがわかる。

供試材は鋳塊を500°Cで2時間均熱処理して熱間鍛造により15 mmφの丸棒とし550°Cで4時間溶体化処理後水冷し、5 mmφに

第7表 Al-Fe-Zr 合金の軟化恒数

試 番	$k (\text{min}^{-1}) \times 100$
No. 10	1.53
No. 11	3.91
No. 12	0.73
No. 13	0.75
No. 14	0.69



第12図 焼なまし温度に対する導電率の変化

冷間圧延して 3.2 mmφ まで冷間伸線したものである。ただし、アルドライ合金は 450°C で 2 時間均熱処理して鍛造、520°C から水焼入れし、150°C で 1 時間焼もどしたものである。

供試材は 100~500°C までの種々な温度で 1 時間焼なまししてただちに水冷し、引張り試験、および導電率の測定を行った。

3.2.2 実験結果

(1) 引張り強さおよび伸び

第11図(a), (b)に各温度で 1 時間焼なました場合の引張り強さおよび伸びの変化を示す。

第11図(a)からわかるとおり、純アルミニウム(No. 10)は 200°C において引張り強さがすでに低下しているにもかかわらず、耐熱アルミニウム合金(No. 12, 13, 14)は 200°C では完全に常温の強さを保っており、軟化傾向は鉄の含有量に関係なく全く同様である。

アルドライ合金(No. 11)も 200°C で軟化をはじめ、250°C では完全に軟化している。

第7表はこれらの軟化特性を前節にあげた軟化恒数を用いて表示したものである。この表から、耐熱アルミニウム合金(No. 12, 13, 14)は電気用アルミニウム(No. 10)、アルドライ合金(No. 11)、Al-Si-Zr 合金(第5表参照)に比較して耐熱性が非常に良好であることがわかる。

なおアルドライ合金(No. 11)が 450°C, 500°C でかえって硬化しているのは、焼なまし処理後水冷しているため、水焼き入れと同様な結果となり、常温で時効硬化したものと思われる。これは Al-Mg₂Si 擬二元素状態図の溶解度曲線からもうなずける⁽¹⁶⁾。

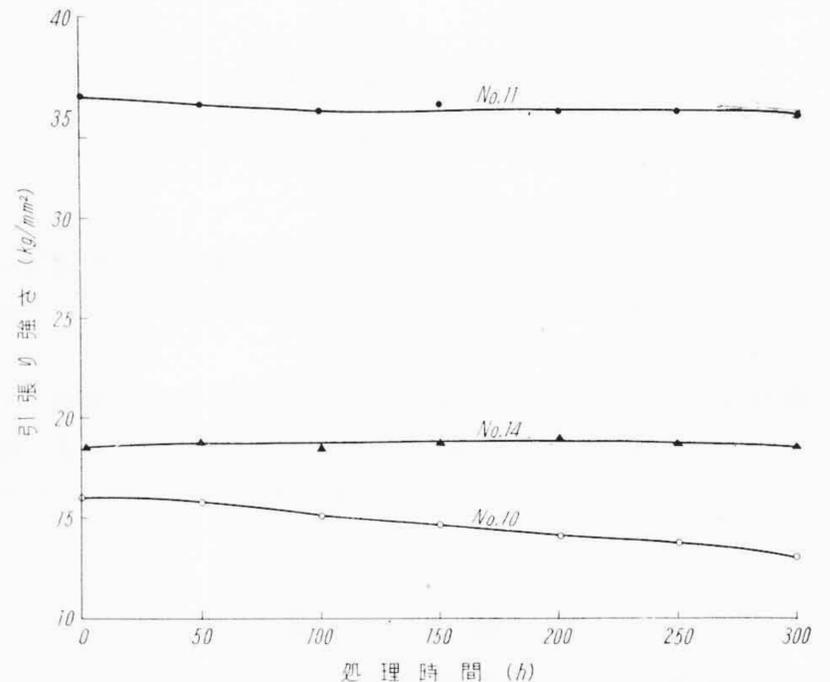
(2) 導電率

第12図に各温度で 1 時間焼なました場合の導電率の変化を示す。この図でわかるとおり、300°C で導電率はほとんど回復し、350°C 以上になるとケイ素、ジルコニウム、その他の元素の再固溶によると思われる導電率の低下が認められる。この現象はアルドライ合金(No. 11)において特に著しい。

以上の結果からわかるように、鉄は Al-Zr 合金の耐熱性を阻害することがないことがわかったため、Al-Fe-Zr 合金について各種性能につき測定を行った。

第8表 耐熱アルミニウム合金の一般的性能

性 能	耐熱アルミニウム合金 (No. 14)	電気用アルミニウム (No. 10)	アルドライ合金 (No. 11)
引張り強さ(kg/mm ²)	18.6	16.0	36.0
伸 び (%)	3.6	1.2	8.5
表面硬さ (Hv)	49.6 (47.7~51.6)	44.8 (42.8~47.4)	88.9 (86.8~90.4)
疲れ限界(kg/mm ²)	6.2	5.8	8.9
熱膨張係数 (/°C)	22.4×10 ⁻⁶	23.0×10 ⁻⁶	23.0×10 ⁻⁶
比 重 (g/cm ³)	2.7	2.7	2.7



第13図 長時間加熱による引張り強さの変化

4. 耐熱性導電用アルミニウム合金の諸性能

Al-Fe-Zr 合金は良好な性能を有していることが判明したので、これらの諸特性を電気用アルミニウム(No. 10)、アルドライ合金(No. 11)、耐熱性アルミニウム(No. 14)につき測定し比較検討した。

4.1 試験項目および試験方法

(1) 高温(100°C)長時間加熱による機械的強さの変化

100°C±2°Cの恒温槽中で最大 300 時間加熱して、引張り試験を行った。

(2) 熱膨張係数

常温から 200°C までの熱膨張曲線を本多、佐藤式ダイヤトメータで測定し、その結果より熱膨張係数を算出した。

(3) 比 重

比重を浸漬法により測定した結果から次式により計算した。

$$\text{比重} = \frac{\text{空気中における重量}}{(\text{空気中における重量}) - (\text{エチルアルコール中における重量}) \times \text{エチルアルコールの比重}}$$

(4) 表面強さ

3.2 mmφ の線材のまま、微小硬さ計(荷重 200 g)で 50 点測定した。

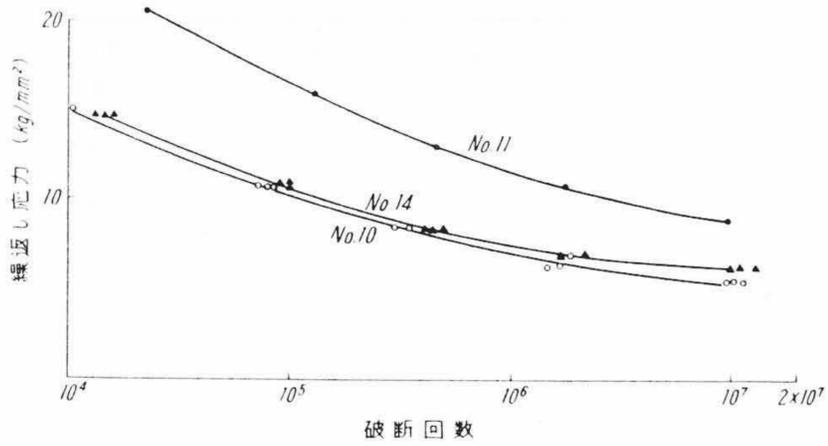
(5) 疲れ試験

シュベニング式回転曲げ疲れ試験機で 3.2 mmφ の線材について試験を行った。

4.2 試験結果

第8表は上記各試験結果を総括したものである。

第13図に長時間加熱試験における、焼なまし時間と引張り強さの関係を図示する。この図によると、電気用アルミニウム(No. 10)とアルドライ合金(No. 11)は時間の経過とともに機械的強さは低下しているが、耐熱アルミニウム合金(No. 14)は最初の値をそのまま保持している。この耐熱アルミニウム合金は架空送電線として使用した場合、通電による温度上昇は約 60°C 程度であるから、この発熱



第14図 繰返し応力に対する破断回数の変化

による軟化の心配はない。

耐熱アルミニウム合金(No. 14)の表面強さは(第8表参照)電気用アルミニウム(No. 10)に比較してかなり硬いので架線時などの表面傷は少なくなる。

第14図に疲れ試験結果を示す。これからわかるとおり、耐熱アルミニウム合金(No. 14)の疲れ強さはアルドライ合金(No. 11)より低い値を示しているが、電気用アルミニウム(No. 10)に比較してやや高いことがわかる。

5. 結 言

以上、耐熱アルミニウム合金の研究として、ジルコニウムがアルミニウムの耐熱性を向上させる効果につき再検討を行い、この結果を基礎にして通常アルミニウム中に含有される不純物、鉄およびケイ素の存在がAl-Zr合金の耐熱性に及ぼす影響につき実験を行った。得られた結果を総括すると下記のとおりである。

- (1) Al-Zr合金：ジルコニウムの添加により、加工硬化能は増加しないが、耐熱性を著しく向上させる。しかも、本実験の範囲ではジルコニウム含有量が約0.3~0.5%の場合がもっとも効果的であり、ジルコニウム含有量がこれ以上になると、加工度が大きい場合かえって耐熱性が悪くなる。
- (2) Al-Zr合金に及ぼすケイ素の影響：ケイ素の添加量が増加するにつれて引張り強さは増加するが、上記のAl-Zr合金の耐熱性は著しくそこなわれる。これはケイ素の共存により、ZrAl₃の

微細でしかも均一な析出が阻害されるためであろうと思われる。
 (3) Al-Zr合金に及ぼす鉄の影響：鉄の添加によって引張り強さは増加するが、上記のケイ素の場合のように、Al-Zr合金の耐熱性を著しくそこなうようなことはなく、導電率も電気用アルミニウムの90%以上の値を示し、耐熱性導電用アルミニウム合金として良好な性能をもっており、そのおもな特性は次のとおりである。

- (a) 100°Cで300時間加熱して引張り試験を行った結果、耐熱アルミニウム合金は軟化しないが、電気用アルミニウムおよびアルドライ合金は軟化する。
- (b) 耐熱アルミニウム合金の表面硬さは電気用アルミニウムよりもかなり高く、架線などの表面傷もつきにくくなる。
- (c) 疲れ強さはアルドライ合金がもっとも強いが、耐熱アルミニウム合金は電気用アルミニウムより強い。
- (d) 耐熱アルミニウム合金の熱膨脹係数は電気用アルミニウム、アルドライ合金のそれよりやや小さい。また比重は電気用アルミニウム、アルドライ合金のそれと同じくらいである。

本稿を終るにあたり、終始、ご指導ご激励いただいた日立電線株式会社電線工場研究部長、久本博士、第二研究課長山本博士、第二研究課山路博士、ならびに本実験に熱心にご協力くださった大泉、瀬谷、大島、大越の諸氏に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 山路：日立評論別冊(15)27(1956)
- (2) 山路：日立評論40,(4),543(1958)
- (3) 飯塚, 栗本, 山路：日立評論別冊(11),105(1955)
- (4) R. H. Harrington: Metal Progr., 63,(5),90(1953)
- (5) R. Irrmann: Aluminium, No.4,250(1957)
- (6) R. H. Harrington: Trans. ASM., 41,443(1949)
- (7) 久笠：日本金属学会誌20,269(1958)
- (8) 三島：軽金属19,17(1956)
- (9) 柳沢：軽金属20,68(1956)
- (10) 山田：軽金属38,41(1959)
- (11) 寺井, 馬場：軽金属40,24(1960)
- (12) W. L. Fink: Metals Handbook 1168(1948)
- (13) 山田：軽金属44,16(1960)
- (14) 五弓：日本金属学会誌7,7(1943)
- (15) 小久保：アルミニウムの性質および用途73(1938)
- (16) W. L. Fink: Metals Handbook 1246(1948)

日立評論 別冊第45号

ポンプ特集号目次

昭和37年2月 発行済

- 最近の低揚程ポンプの動向
- 最近の高圧ポンプの動向
- 九州電力株式会社納諸塚揚水発電所用ポンプのモデル実験
- 九州電力株式会社諸塚揚水発電所用ポンプの吐出し弁閉鎖速度の決定について
- 九州電力株式会社納諸塚揚水発電所用56,500kWポンプの現地試験
- アラブ連合共和国エルメックスポンプ場納2,300mm斜形軸流ポンプ設備

- 揚水発電所用ポンプ水車
- 揚水発電所用ポンプ起動時のサージタンクの水位変化
- ポンプの吸水槽について
- 家庭用ジェットポンプ
- 管路による粒群の水力輸送に関する研究と応用
- 岩手県電力局逆川納ポンプの自動運転
- ポンプの制御方式
- 最近のポンプ用三相誘導電動機の動向

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座東京71824番

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座東京20018番