一方向に凝固させた Al-CuAl₂ 共晶, Al-Si 共晶合金の組織について*

三浦 維四** 岩 出 章*** 太 田 守**

Ishi Miura, Akira Iwade and Mamoru Ôta: On the Microstructure of Unidirectionally Solidified Al-CuAl₂ Eutectic and Al-Si Eutectic Alloys. The authors and their co-workers have studied the relation between structures of composite alloys and their mechanical properties by use of the specimens prepared by foil metallurgy. In this paper, an attempt has been made to prepare special and controlled structures of the Al-CuAl₂ eutectic and Al-Si eutectic alloys by means of unidirectional solidification. The solidification rate is 0.5, 3.5 and 5.0 cm/hr in the air, and in the case of using water as cooling atmosphere, the rate of lowering the specimen into water is 0.3, 3 and 30 m/hr. As the vessels for melting the specimens, a cylindrical envelope made of titanium foil (20 μ thickness) and a sheath made of stainless steel sheet are employed.

The main results are as follows: (1) For Al-CuAl₂ eutectic alloys, a cellular structure is found in each specimen, and its solid model shows a lotus-root structure. (2) Unidirectional solidification into water also reveals a cellular structure, where the spacing between the aligned CuAl₂ platelets is very small (0.4~0.5 μ). (3) In the solidification of Al-Si eutectic alloys into water, the eutectic structure is very fine and its mean free path λ is 1.8~3.0 μ , while the value of λ in the modified structure by addition of sodium is 3.3 μ . Further, the value of λ in the specimen solidified in water after modification by sodium is 1.0 μ .

(Received February 24, 1966)

I. 緒 言

最近, 帯域溶融法の進歩とともに一方向凝固法が注目されるようになってきた。この方法を用いることによつて凝固機構の解明が進むとともに, 共晶合金にこの方法を応用することにより特殊な組織をもつ合金が得られることがわかつてきた。著者らは金属組織と機械的性質の関係について興味を持ち, いままで圧接技術(圧延による方法も含めて)を用いて, 各種の構造を持つ複合合金をつくつてその性質をしらべてきた^{(1)~(3)}。

この報告ではこの一連の研究をさらにおしすすめるために, 圧接法によらずに前述の一方向凝固法によつて特殊な組織を持つ合金をつくり出すことを試み, Al-CuAl₂ 共晶および Al-Si 共晶を選んで, この2系統の共晶合金について組織制御の研究を行なつたのでその結果を述べる。

現在までに, 一方向凝固法によつて行なわれた組織制御の研究はかなりの数にのぼつており, 対象としての合金系にも多くの種類があるが, Al-CuAl₂ 系および Al-Si 系についておおよそのことを述べるとつぎの通りである。Al-CuAl₂ 共晶合金については, Chadwick⁽⁴⁾, Kraft ら⁽⁵⁾ Hertzberg ら⁽¹¹⁾などの報告があり, 超高純度の材料を用いるとき, ア

** 東京医科歯科大学 医用器材研究所 (Tokyo Medical and Dental University, Institute for Medical Engineering, Tokyo)

*** 日軽アルミニウム株式会社 (Nikkol Aluminium Co., Tokyo)

* 1965年4月本会東京大会に発表; 金属組織と機械的性質の関係について(第5報)

(1) 三浦, 太田, 本間, 佐々木: 本誌, **30**(1966), 655.

(2) 三浦, 佐々木, 本間, 太田: 本誌, **30**(1966), 659.

(3) 三浦, 佐々木: 本誌, **30**(1966), 662.

(4) 三浦, 佐々木: 本誌, **30**(1966), No.12.

(5) 三浦, 本間: 本誌投稿中

(6) 三浦, 本間: 本誌投稿中

(7) 三浦, 本間: 本誌, **30**(1966), 1001.

(8) 三浦, 本間: 本誌, **30**(1966), No.12.

(9) G.A.Chadwick: J.Inst.Metals, **91**(1963), 169.

(10) R.W.Kraft et al: Trans. AIME, **221**(1961), 95.

(11) R.W.Hertzberg et al: Trans. AIME, **233**(1965), 342.

ルミニウムと CuAl_2 とが lamellar fault を含みながらもきれいに層状にならぶ組織が得られることが知られている。また Al-Si 共晶合金については著者らの講演発表後に Bell⁽¹²⁾らが、超高純度の試料を用いるときケイ素がアルミニウム・マトリクス中に整列することをのべ、また Gordon⁽¹³⁾はアルミニウム中のケイ素の分布係数について報告している。さらに、この一方向凝固法において注目されることは、Hertzberg⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾らが述べているように各種のウィスカーを含む合金がこの方法によつて製造されうることである。

この報告では、超高純度の試料を用いた場合に対比する意味で、工業的純度あるいは中程度の純度の材料を用いた場合に組織がどのように変化するかについてしらべた結果をのべる。また、凝固速度をかなり早くした場合にどのような影響があらわれるのかについてもあわせてしらべてみたので、その結果についてものべることにする。

II. 実験方法

用いた材料は、Al-CuAl₂ 系では公称品位 99.9% のアルミニウムおよび同じく 99.9% の銅で最初にアルミニウムをアルミナ・ライニングを施した黒鉛ルツボ中で溶解し、700°C に保つた後銅を添加し、これを金型中に鋳込んで試料とした。この合金の組成は化学分析の結果によると、Cu 32.90%, Fe 0.006%, Si 0.12%, Bi 0.005%, Pb 0.001%, As nil, Sb trace という結果であつた。Al-Si 系では公称品位 99.999% のアルミニウムおよび国際電気 K K より贈与をうけた電気抵抗 0.1 Ω -cm のケイ素 (99.999% 以上の純度が保証されている) を用い、前と同様にして試料を得た。この場合のケイ素含有量は化学分析結果によると 11.35% であつた。なお、Al-Si 系合金の場合には日本軽金属 K K 製の工業用シルミン (JIS 規格 AC 3 A-F, Si 10.0~13.0%, Cu < 0.2%, Fe < 0.8%), および過共晶合金、亜共晶合金の例として Al-18.26% Si, Al-10.95% Si 合金を用いてみた。

さて、これらの合金を横型の電気抵抗加熱炉内で十分にアルミナライニングを施した長さ 52 mm のポート中で溶解し、速度 0.5 cm/hr, 3.5 cm/hr, 30 cm/hr でポートを移動させることによつて一方向に凝固させた。その場合の炉の中心部の温度は Al-CuAl₂ 合金および Al-Si 合金のときそれぞれ 650°C および 680°C としたが、この場合、炉の温度分布から求めた 548°C (Al-CuAl₂ 共晶温度) および 577°C (Al-Si 共晶温度) の点における温度勾配は 40°C/cm であつた。この実験でのポートの移動速度は比較的小さいので、この温度勾配は試料の固液界面の温度勾配にかなり近いのではないかと考えられる。なお、この方法——つまり冷却雰囲気を実験室とするとときには凝固速度をこれ以上に大

きくすることはできないので、冷却雰囲気として水を用いることを考え、20 μ の厚さのチタン箔で径 10 mm の円筒

Fig. 1 Size of stainless steel sheath.

状の容器 (重量約 0.5 g), および Fig. 1 に示した寸法のステンレス鋼製の容器 (重量約 7.8 g) をつくり、タテ型電気炉中にこれを吊し、この中で融解を行ない、これを 30 cm/hr, 3 m/hr, 30 m/hr の速度で下においた水槽中 (水温 8°~11°C) に沈降させた。このときの容器は熱容量が一般のルツボよりきわめて小さいので、かなり急速な凝固が行なわれると考えられるが、便宜上前者をチタン封筒、後者をステンレス鋼シースと呼ぶことにする。さて、この場合の炉の中心部の温度は Al-CuAl₂ 系のとき 670°C, Al-Si 系のとき 730°C で、試料の最下端と水面との距離は 70 mm であつた。また、融解中におけるチタンおよびステンレス鋼製の容器と融体との間の反応は認められなかつた。

上記のようにして得られた試料について、その先端部 (凝固開始部)、中央部、終端部 (凝固終了部) の各部の横断面および縦断面について各組織をしらべた。そのときの腐食液は Al-CuAl₂ 系の場合 10% HNO₃ 水溶液、Al-Si 系の場合 10% NaOH 水溶液を用いた。

III. 結果

Photo. 1 の (a) は、Al-CuAl₂ 共晶合金を 3.5 cm/hr の速度で一方向に凝固させた試料の縦断面の先端周辺部である。比較的組織の粗い colony 組織の間を細かい共晶組織が埋めていることがわかる。凝固方向は写真の左から右へと凝固していったもので、以後の縦断面組織の写真はすべてそのようになつている。Photo. 1 (b) は試料縦断面の中心部で、colony 組織間の微細な共晶組織部分の CuAl_2 相は凝固方向にならび、いわゆる lamellar 組織となつている。Photo. 1 (c) はそのように凝固方向にならんだ CuAl_2 組織の部分を拡大したもので、これは縦断面中央中心部である。Photo. 1 (d) は 0.5 cm/hr の速度で凝固させた試料の終端中心部の横断面組織で 3.5 cm/hr の速度の場合も類似の組織が見られ、いわゆる degenerate 組織と似た感じを与える部分がみられるが、Photo. 1 (a) の写真と比べ合わせてみると、この試料の組織の立体図を想定することができる。

Photo. 2 (a) はステンレス鋼シースを用い 30 cm/hr の速度で水中に沈降させた試料の先端の横断面周辺部に見られた組織で、 CuAl_2 組織が点線状をなして人状になつている特徴ある組織なので、とくに示した。Photo. 2 (b) はそれを拡大したもので、Photo. 2 (c) も同様の位置に見られた特

(12) J. A. E. Bell et al: J. Inst. Metals, **93** (1964/65), 318.

(13) P. Gordon: Trans. AIME, **233** (1965), 435.

(14) R. W. Hertzberg: Trans. ASM, **57** (1964), 434; Trans. AIME, **227** (1963), 580; **233** (1965), 342.

微ある組織で、この場合には CuAl₂ が点線状をなして平行に走っているのが見られる。

リクスが明瞭なのに反して CuAl₂ 相が不明瞭になっている点が著しい特徴である。しかし、ほぼ凝固方向にこの組織

(a) (x250 x 4/5)

(b) (x250 x 4/5)

(c) (x1000 x 4/5)

(d) (x250 x 4/5)

Photo.1 Micro-structures of Al-CuAl₂ eutectic alloys.

- (a) Rate of solidification $R=3.5$ cm/hr, vertical section of the top the specimen (Direction of solidification : from left to right for all vertical section)
- (b) $R=3.5$ cm/hr, vertical section of the center of the specimen.
- (c) $R=3.5$ cm/hr, vertical section of the center of the specimen.
- (d) $R=0.5$ cm/hr, cross section of the end of the specimen.

(a) (x250 x 4/5)

(b) (x1000 x 4/5)

(c) (x250 x 4/5)

Photo.2 Micro-structures of Al-CuAl₂ eutectic alloys.

- (a) Rate of lowering the specimen melted in stainless steel sheath into water $R=30$ cm/hr, cross section of the top of the specimen.
- (b) the same as the above.
- (c) the same as the above.

Photo.3 (a) はチタン封筒中で 30 cm/hr の速度で水中に沈降させたもので、試料縦断面の中心部の組織である。この写真の白く見える部分は Photo.1 (a) で colony 組織としてあらわれた部分に相当するもので、アルミニウム・マト

リクスが明瞭なのに反して CuAl₂ 相が不明瞭になっている点が著しい特徴である。しかし、ほぼ凝固方向にこの組織が走っており、その相の間を黒い部分が埋めているが、これは共晶組織が急速凝固のために非常に微細な lamellar 組織となつたため全体が黒つぶく見えたもので、試料全体がいわゆる cellular 組織となつていることがよくわかる。Photo.3 (b) は同じ試料の終端周辺部の組織で、倍率を Photo.3 (a) より大きくしたもので、凝固方向に走っている lamellar 組織中の CuAl₂ 相が凝固方向にならんでいる様子が示されている。

Photo.4 (a) は Al-Si 共晶合金を 30 cm/hr の速度で凝固させた場合の先端中心部の縦断面組織で、ケイ素の整列は行なわれていない。0.5 cm/hr および 3.5 cm/hr の凝固速度のときも同様にケイ素相の整列は行なわれず、凝固速度がおそくなるにしたがつて当然、ケイ素相は非常に粗大化する。これをチタン封筒中で溶解し 30 cm/hr の速度で水中に沈降させた場合の組織が Photo.4 (b) である。この場合にもケイ素の整列は見られないが、組織が非常に微細化されていることが知られる。また Photo.4 (a) のように大気中でゆつくり凝固させた場合のケイ素相は板状つまり写真としてみると線状をなしていたが、この場合にはケイ素の形がかなり丸くなつてきていることがわかる。この組織はナトリウム添加によつて改良された Al-Si 共晶組織に類似している。Photo.4 (c) はナトリウム改良処理を行なつた試料をチタン封筒中で溶解後 30 m/

hr の速度で水中に沈降させたものの縦断面終端中心部の組織で、ケイ素相は完全に微細化されたことがよくわかる。このような微細化は工業用シルミンを用いた場合にも同様であることが確かめられた。さて、最近過共晶 Al-Si

合金の利用が問題となつていたので、Al-18.26% Si 合金について同様の処理を行なつてみた。この結果が Photo.4

のであるが、ケイ素の初晶の微細化が行なわれていることが知られる。しかし、この場合の初晶ケイ素の整列性は全く認められない。このときの初晶ケイ素の大きさはステンレス鋼シースのとき 0.005~0.03 mm, チタン封筒のとき 0.003~0.01 mm である。つぎに亜共晶合金として Al-10.95% Si 合金について、ナトリウム改良処理後チタン封筒を用いて 30 m/hr の速度で水中に沈降させた試料の先端中心部の組織を示したのが Photo.4 (d) である。この場合にはナトリウム添加によつて共晶組成がケイ素側にずれるので、アルミニウムの初晶の量が改良前より多くなるが、このアルミニウム初晶が凝固方向にかなりよく整列しているのが見られ、ケイ素が初晶として出るときと対照的であることが知られる。

IV. 考 察

最初に Al-CuAl₂ 共晶合金を大気中で比較

(a) ($\times 250 \times 4/5$)

(b) ($1000 \times 0 \times 4/5$)

Photo.3 Micro-structures of Al-CuAl₂ eutectic alloys.

- (a) Rate of lowering the specimen melted in cylindrical envelope made of titanium foil into water $R=30$ cm/hr, vertical section of the center of the specimen.
(b) R =the same as the above, vertical section of the end of the specimen.

(a) ($\times 250 \times 4/5$)

(b) ($\times 1000 \times 4/5$)

(c) ($\times 1000 \times 4/5$)

(d) ($\times 250 \times 4/5$)

(e) ($\times 250 \times 4/5$)

Photo.4 Micro-structures of Al-Si eutectic alloys.

- (a) $R=30$ cm/hr, (solidified in the air), the top of the specimen.
(b) Rate of lowering the specimen melted in cylindrical envelope made of titanium foil into water $R=30$ m/hr, the end of the specimen.
(c) R =the same as the above, the specimen was solidified after the modification by sodium addition.
(d) Rate of lowering the Al-18.26% Si alloy melted in stainless steel sheath into water $R=30$ m/hr, the end of the specimen.
(e) Rate of lowering the Al-10.95% Si alloy melted in cylindrical envelope made of titanium foil $R=30$ m/hr, vertical section of the top of the specimen.

(c)に示す組織で、これはステンレス鋼シース中で 30 m/hr の沈降速度で凝固を完了させた試料の終端中心部のも

のおそい凝固速度で凝固させた場合について述べる。一般に融体を一方から徐々に凝固させた場合、その中に含まれ

る不純物が分布係数 k の値にしたがつて濃度分布に差を生ずることはよく知られたことである。たとえば Pfann⁽¹⁵⁾ は帯域溶融法を扱った論文で“normal freezing”として凝固方向に対しての濃度分布の変化の式を示している。しかし、この場合には凝固方向のみでなく、その直角方向においても不純物つまり溶質原子の分布状態に差異が生ずることが最近わかってきた。Photo.1 の (a)~(d) の写真はこのような一方向凝固試料における直角方向での溶質原子の濃縮の状況を示している。つまり colony 組織と lamellar 組織とによつて cellular 状態をつくり出すことは溶質原子あるいは不純物の存在によつて規制されるものであると考えることができる。Fig.2 は 0.5 cm/hr の速度で一方向に

Fig.2 Solid model for unidirectionally solidified Al-CuAl₂ alloy (Rate of solidification $R=0.5$ cm/hr).

凝固させた場合の Al-CuAl₂ 共晶合金の組織を試料の縦断面および横断面の顕微鏡組織を基として画いたものである。一般に一方向凝固組織に影響をおよぼす因子としては凝固速度、固液界面の温度勾配および溶質原子の三つが考えられているが、この場合、つまり冷却雰囲気が大気の場合には 30 cm/hr の凝固速度では固液界面の温度勾配が小さすぎて厳密には一方向凝固になっていないが、0.5 cm/hr, 3.5 cm/hr のときは Fig.2 に示すように明らかに方向性が認められた。Fig.2 のモケイ図はこのような凝固処理を行なった試料ではレンコン(連根)状の組織が得られることを示しており、著者が溶質原子の濃度分布をコントロールした固溶体の強さについて得た結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾およびレンコンが力学的に非常に有効な構造だといわれることを考えるとき、材料開発の立場から非常に興味深く思われる。ことに colony 組織部には不純物が濃縮されており、一般に不純物の多い状態は強さも大きいことを考えるとなおさらである。Chalmers⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾ は cell 形成には帯域溶融の場合と同様に溶質原子の分布係数 k の値が利いてくることを考察しているが、Table 1 には不純物の種類、それらの分布係数

値および実際の化学分析値を示した。 k の値が比較的大きいのは銅中のケイ素、ヒ素、アルミニウム中のケイ素で、

Table 1 Distribution coefficient and chemical composition of impurities in Al-CuAl₂ eutectic alloy.

Impurities (Solute elements)	Distribution coefficient k	Wt pct (by chemical analysis)
As in Cu	0.14	nil
Sb in Cu	0.07	trace
Bi in Cu	~0	0.005
Pb in Cu	~0	0.001
Fe in Cu	1.36	0.006
Si in Cu	0.44	0.12
As in Al	?	nil
Sb in Al	~0	trace
Bi in Al	~0	0.005
Pb in Al	~0	0.001
Fe in Al	~0	0.006
Si in Al	0.12	0.12

1 以上の大きさをもつものは銅中の鉄である。cell 形成には G/R (G =固液界面の温度勾配, R =凝固速度) の値が重要な尺度と考えられているが、冷却雰囲気として水を用い、固液界面の温度勾配を大きくした場合にも Photo.3 に示すように cellular 組織が明瞭に見られる。このような組織は Sn-Zn 共晶合金についても得られている⁽¹⁷⁾。チタン封筒およびステンレス鋼シーすを用いて凝固を行なわせたとき、その顕微鏡組織およびマクロ組織から判断すると実験条件から当然予想されるように完全な一方向凝固とはいえないが、試料の内部はほぼ一方向に凝固しているものと考えてよいと思われる。Photo.3 に示した組織もこのような一方向凝固性を裏づけるものであるが、この場合には凝固速度が早いとき、colony 組織自身の巾、colony 組織と colony 組織間の距離および lamellar 組織内の CuAl₂ 相間の距離が空気中で行なつた場合より、かなり小さくなっていることが知られる。Table 2 はこの状況を示したもの

Table 2 Dimensions of the colony structure and the lamellar structure of unidirectionally solidified Al-CuAl₂ eutectic alloys.

The sorts of eutectic structures	Rate of solidification (in the air)		Rate of lowering the specimens into water
	0.5 cm/hr (μ)	3.5 cm/hr (μ)	30 m/hr (μ)
Width of colony structure	130~180	100~110	2~3
Space between colony structure	150~180	130~150	4~7
Space between CuAl ₂ lamella	—	3~6	0.4~0.5

で、水中での一方向凝固のときの colony 組織の巾は 2~3 μ , lamellar 組織内の CuAl₂ 相の間隔に至つては 0.4~0.5 μ である。いま colony 組織は不純物の存在のため発生すると考えられるので、純度の高い材料を用いて lamellar 組織のみでこのように極めて微細な組織の材料をつくつたら、その強度やクリープ性質に影響が見られるかも知れないことが想像される。

(15) W.G. Pfann: J. Metals, 4 (1952), 747.

(16) B. Chalmers: Principles of Solidification (1964), p. 157.

(17) 三浦, 岩出: 未発表.

つぎに、Al-Si 共晶合金について主に水中一方向凝固の場合について述べる。Al-Si 共晶合金は超高純度の素材を用いたとき、ケイ素が整列することが最近知られたが⁽¹²⁾、この実験で用いたような条件では整列は行なわれない。また、水中一方向凝固の場合にも共晶としてのケイ素の整列は行なわれない。しかし、初晶アルミニウムはかなりよく整列し、いわゆる樹枝状晶において凝固方向に直角方向への結晶の生長はかなり減少することが知られる。冷却雰囲気水を水として凝固させた場合に注目すべきことは整列化よりむしろ微細化であった。一般に凝固速度が大きいとき、組織が微細化されることはよく知られたことであるが、この実験で行なわれたように融解用容器としてチタン封筒を用いたときは凝固速度がきわめて大きいと考えられ、その組織はきわめて微細なものが得られた。Al-Si 共晶合金の組織の微細化には適量のナトリウムを加えることが有効なことはよく知られたことであるが、このようなナトリウム改良処理を行なつた標準組織⁽¹⁸⁾の微細化の程度を Edelson⁽¹⁹⁾にしたがつて mean free path λ の値として求めてみると、

$$\lambda = (1-f)/N_L$$

(ここに f = 粒子の体積割合, N_L = 単位長さ中に存在する粒子の数) 上式によつて λ の値を求めてみると、標準組織では $\lambda = 3.3 \mu$ であるが、30 m/hr の速度で水中に沈降させた組織のとき $\lambda = 1.8 \sim 3.0 \mu$ 、ナトリウム改良処理後に水中一方向凝固処理を行なつた Photo.4(c) の試料では $\lambda = 1.0 \mu$ であつた。このことは急速凝固処理とナトリウム改良処理との間には相加作用があることを示している。また λ の値が 1.0μ になつたことは、粒子分散硬化複合金としての性格を持ちうることを示し、Ansell⁽²⁰⁾らがクリーブ速度 K と mean free path λ との関係について求めた式、 $K = A \lambda \exp(B/\lambda)$ (ここに A および B は常数) から考えればクリーブ速度をかなり小さくしう可能性があることが考えられる。

また、このような微細化は Photo.4(d) にみられるように、初晶のケイ素についても見られ、チタン封筒を用いたときの初晶ケイ素の大きさは前述のように $3 \sim 10 \mu$ で、燐添加による初晶微細化と比較して有効な方法ではないかと考えられる。

V. 総 括

著者らおよびその共同研究者らは、材料開発の立場から金属組織と強度の関係について研究を行ない、圧接技術(圧延法も含めて)を用いて人工的な組織をもつ各種の複合体をつくつて、その機械的性質についてしらべてきたが、この報告においては一方向凝固法を用いて共晶組織を制御することによつて、特殊な組織をもつ材料をつくり出すこ

とができないかということを試みてみた。この報告で用いた共晶合金は Al-CuAl₂ 共晶合金および Al-Si 共晶合金の 2 種で、その純度は故意に工業用純度あるいは中程度の純度のものとした。これらの合金を一方向に凝固させるに当つて冷却雰囲気として大気の外に水を用いた。大気中凝固のときは凝固速度は 0.5, 3.5, 30 cm/hr であるが、30 cm/hr のときは完全な一方向凝固ではない。冷却雰囲気水を水とした場合(水中一方向凝固)の融解容器としては、20 μ の厚さのチタン箔でつくつた径 10 mm の円筒状の容器(チタン封筒)および Fig.1 に示した寸法のステンレス鋼製の容器(ステンレス鋼ケース)を用い、水中への沈降速度を 0.3, 3, 30 m/hr とした。チタン封筒を容器として用いた場合は熱容量が小さいので、固液界面の温度勾配ならびに凝固速度はきわめて大きいものと考えられる。

このようにして得られた試料の各部の顕微鏡組織を材料利用の立場から吟味してみた。得られた結果はつぎの通りである。

(1) Al-CuAl₂ 共晶合金においては、0.5~3.5 cm/hr の一方向凝固速度のとき、この研究で用いた試料純度および実験条件では cellular 組織が発生し、不純物の存在のため colony 組織の生成が見られる。この場合の立体組織はレンコン(蓮根)状であり、不純物が濃縮されたレンコンの実にあたる colony 組織と空洞部分にあたる lamellar 組織とにわかれる。このような組織はレンコンが力学的に有効な構造だといわれることを考えると材料利用の上からは興味深いことである。lamellar 組織中の CuAl₂ 小板は凝固方向にある程度整列されるがかなり不完全である。

(2) 冷却雰囲気として水を用いた場合でも、やはり cellular 組織がみられ、この cell は凝固方向にほぼならぶ。cell の区分は崩れた感じの colony 組織によつてなされ、この場合竹の節のように材料中に存在することになる。

(3) colony 組織の間、colony 組織間の距離および lamellar 組織における lamella 間距離は凝固速度に依存し、速度が大きいほど小さくなる。ことに、30 cm/hr の速度で水中一方向凝固した試料の lamella 間距離は $0.4 \sim 0.5 \mu$ で、このことは材料開発の立場からはきわめて興味深く考えられる。この場合には lamella の整列性や lamellar fault の存在は不純物によるところが大きいので、そのコントロールが重要と考えられる。

(4) Al-Si 共晶合金では一方向凝固によつて、このような条件のときにはケイ素の整列は行なわれないことが示された。しかし、水中一方向凝固のときには組織が非常に微細化され、この微細化はナトリウム改良処理と相加作用を持つようである。ナトリウム改良処理のみのときの粒子間の mean free path は 3.3μ であるが、30 m/hr の沈降速度のとき $1.8 \sim 3.0 \mu$ 、ナトリウム改良処理と併用したときのその値は 1.0μ で非常に微細化されることが示された。

(5) 過共晶 Al-Si 合金 (Si=18.26%) では水中一方向凝固で初晶ケイ素の微細化が行なわれることが示されたが、初晶ケイ素の整列は行なわれなかつた。しかし、亜共晶 Al-Si 合金 (Si=10.95%) のときには初晶アルミニウムが凝固方向にかなりよく整列することが認められた。

この研究は文部省科学研究費のうちの試験研究費の援助によつて行なわれたものであることを付記して感謝の意を表したい。

(18) 大日方、寺沢：軽合金顕微鏡組織集(丸善)(1944), p.18.

(19) B.I. Edelson: Trans. ASM, **55** (1962), 230.

(20) G.S. Ansell and J. Weertman: Trans. AIME, **215** (1959), 838.