Al 合金溶接部の凝固に関する研究(第1報)*

—高純度 Al 薄板に関する実験的検討—

太田省三郎**, 浅井 公屋**, 大谷 真一**

Study on Solidification of Aluminum Alloy Weld Metal (Report 1)*

—Experiments on High Pure Al Thin Plate—

by Shozaburo Ohta**, Kimioku Asai** and Shinichi Ohya**

At present, it is very difficult to make clear solidification processing of weld metal, because it includes various problems which are difficult to solve theoretically and experimentally.

This experiments, as a fundamental stage to make clear the solidification processing, were performed on high pure Al, in which solidification processing is comparatively simple, by TIG arc spot welding, which needs no filler metal. Measurement of temperature was carefully carried out by very slender thermocouple, and also dynamic observation of solid-liquid interface in whole solidification processing was performed by high speed camera.

The experimental results were analyzed from the following points such as behavior of solid-liquid interface, solidification rate, temperature distribution, cooling rate, temperature gradient, undercooling, and the relation between points mentioned above and welding conditions.

As the analyzed results, it was found that the transitional measurements were considerably different from calculated values based on theory of heat conduction, because it was based on mean value in solidification processing.

1. 緒 言

Al の溶接金属に発生する欠陥の中で重要なものに凝固割れやブローホールなどがある。これらの欠陥はいずれも凝固過程において発生するといわれている。したがってこれらの欠陥の発生原因を解明し、それらの防止法を根本的に確立するに当たってその凝固過程の全容を究明する必要がある。

鑄造金属の凝固過程に関する研究は古くから注目され数多く行われているが、溶接金属の凝固過程は前者に比較して関係する因子が多く複雑であり、とくに冷却速度（したがって凝固速度）が格段に速いこと（極端な非平衡凝固）が特徴である。したがって平衡状態図をもとに推論することはもともと筋違いであり、実際に困難なことでもあり、また過渡的な極めて速い現象を実験的に解明することも大きな困難を伴うことである。近年重要ないくつかの研究^{1,2)} が発表されているが未だ不明あるいは不明確な点が多数残されているのは上記の理由によるものと考えられる。

一般に凝固過程を解明するには凝固の進行状況、凝固速度、温度分布、冷却速度、固液界面の温度勾配、過冷度、さらに溶質の挙動に関するデータも必要であり、これらの相互関係を明らかにし、凝固条件（溶接条件）によりそれらがどのように変化するかを検討しなければならない。溶接金属の凝固過程については種々の仮定のもとで伝熱論的計算を行って大体の傾向について検討されているが²⁾、実測データは溶融池の平均温度、凝固速度について一部みられるのみで極めて少ない。

本報告は溶接金属の凝固過程を究明する基礎的段階として、溶接用材料には凝固過程の比較的単純な高純度 Al を用い、溶接方法としては溶加材を用いない TIG アークスポット溶接法を適用し、極細の熱電対を用いて精密な温度測定を行うと同時に、高速度カメラによる全凝固過程の動的観察を行い、両データを重ね合わせて解析し、以下に示す項目について実測データを示し検討を加えた。

すなわち凝固過程における凝固前面の挙動、凝固速度、温度分布、冷却速度、温度勾配、過冷度そしてこれらと溶接条件との関係である。またこれまでに伝熱論的計算がなされているものについては実測データとの比較検討

*原稿受付 昭和57年11月11日（昭和54年度秋季全国大会にて発表）

**正 員 武蔵工業大学 Member, Musashi Institute of Technology

も行った。

2. 実験方法および供試材料

供試材は Table 1 に示す組成をもつ 99.99 % 高純度 Al の薄板 ($t=1$) で、これを直径 60 mm の円形にプレスで打ち抜いて試験片とした。溶接はアーク電流 50 A、アーク電圧 20 V (DCRP) の条件で TIG アークスポット溶接を上記円板の中央に行った。なお溶接入熱を変化させるためアークタイムを 5~15 秒の範囲で 5 段階変化させた。

Table 1 Chemical compositions of material used.

MATERIAL	CHEMICAL COMPOSITION (%)							PLATE THICKNESS (mm)
	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	
99.99 % Al	0.002	0.003	0.003	—	—	—	—	1.0

温度測定には素線径 $\phi 0.15$ mm の CA 熱電対を使用し、板表面からの高速度撮影による凝固過程の解析と温度測定による冷却曲線の解析とを対応させることを考慮して熱接点を試験片裏面側から所定の位置 (試験片円板の中心を通る直線上で溶融池内に 4~5 個所、外側に 2~1 個所の計 6 個所) にあけられた穴をガイドにして試験片表面近くまでそう入し、周囲をかしめて固定した。また溶接中熱接点が移動するのを防止するため、Fig. 1 (a), (b) に示す耐火性、断熱性の支持ブロックを試験片下部に装着した。このような処置により溶接部を通常の溶接状態に保ち、かつ熱接点を定位置に保持して温度測定することができた。なお高速度カメラによる凝固過程の撮影は 150 mm の望遠レンズを使用し、撮影倍率約 0.5 倍 (フィルム画面での寸法の実物寸法に対する割合)、1000 コマ/秒の条件で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱冷却曲線の検討

本実験により得られた加熱冷却曲線の 1 例を Fig. 2 に示す。冷却過程において凝固潜熱発生に伴う冷却曲線の変化が明瞭に認められ、それは溶融池内各位置で異なり、図中□内に示すように溶融池中心から離れた位置は

Fig. 1(a) Schematic diagram of measuring system of temperature.

Fig. 1(b) Schematic diagram of setting device adaptable to temperature measurement.

ど緩やかになる。そこで凝固過程における固液界面の中で凝固層先端の固液界面の固液界面、すなわち凝固前面の位置と冷却曲線上の位置との対応関係を知るために、溶融池内の各位置の温度測定と凝固過程の高速度撮影を同時に行い、データを重ね合わせて検討した。その結果 Fig. 2 の A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 の各点に相当する位置がそれぞれ凝固前面が熱電対の熱接点を通過する時点であることが確認された。

一方冷却曲線の温度変化は熱接点部分の熱容量のために厳密には時間遅れを生じ、測温部の真の温度を示さないで、この時間遅れの程度を調べておく必要がある。一般に熱電対の温度追従速度は溶融金属と熱接点間の温度境界層の温度勾配、熱接点の熱容量と表面積に支配される。そこで本実験に使用した熱電対のうち最も大きな熱接点 ($\phi 0.27$ mm) を有する熱電対について、境界層の温度差 400 °C で熱電対の温度追従特性を調べた。その

Fig. 2 An example of heating and cooling curve.

結果時間遅れは 1×10^{-2} s 以下であり、解析上問題はないと判断した。

3.2 凝固過程における凝固前面の挙動

Fig. 3 は本実験より得られたアーク消去後の時間経過 (t) と凝固界面の進行距離 (L) の関係を示したものの (以後これを凝固進行曲線と呼ぶ) であるが、アーク消去直後に凝固は開始せず若干の時間遅れ (以後この時間遅れを凝固停滞時間と呼ぶ) の後開始することがわかる。

凝固停滞時間はアークタイムの大きいものほど長くなっており、凝固が始まると途中ごくわずかの変動は認められるが全体として 2 次曲線的な傾向で急速に凝固が進行する。図中 $t_{s5} \sim t_{s15}$ は各アークタイム ($T=5 \sim 15$ 秒) における凝固停滞時間 (t_{st}) である。また $t_5 \sim t_{15}$ はアーク消去後から凝固界面が溶融池の中央に達するまでの時間であって以後これを凝固時間 (t_T) と呼ぶ。

Fig. 4 はこれらの凝固停滞時間、凝固時間とアークタイムの関係を両対数表示したもので、いずれもほぼ直線関係となっており次式で表示できる。

$$t_{st} = 0.0125 T^{0.95S} \quad \dots\dots(1)$$

$$t_T = 0.078 T \quad \dots\dots(2)$$

ただし $5 \leq T \leq 15$ s

これより凝固時間はアークタイムのほぼ 8% となっており、そのうち 14~15% ほどを凝固停滞時間がしめてい

Fig. 3 Relation between distance from fusion boundary to solidification front (L) and passed time after elimination of arc (t) in solidification processing of Tig arc spot welding.

Fig. 4 Relation between arc time (T) and solidification time (t_T) and time lag required for a solidification start (t_{st}).

ることがわかる。

溶接金属の凝固 (結晶成長) は未溶融の母材側の結晶の上に、これと結晶学的に同一の方位を持っていわれる Epitaxial growth によってなされるから母材と溶接金属は一体であり、凝固開始時において通常の鋳塊凝固の場合のようなチル部における結晶の核生成を必要としない。したがって上記の凝固停滞時間は溶融池の冷却過程において高温部から低温部へ、そして未溶融の母材部へと保有熱量が放射状に周囲に伝導拡散して溶融池内の各部の温度が逐次低下し、ついに溶融界面における温度が母材の平衡凝固温度 (T_{MP}) より低くなり、そこでの冷却速度にみあった過冷が発生し、それに対応して凝固を開始するまでの時間であると考えられる。

一般に溶融金属が一方に凝固する場合、凝固層の厚さ (L) と鋳込後の経過時間 (t) の関係について種々の仮定のもとで伝熱論的解析の結果次式の関係が導かれている⁹⁾。

$$L = k \cdot t^{0.5} \text{ (mm)} \quad \dots\dots(3)$$

この関係はかなり非現実的な仮定 (たとえば溶融金属と鋳型の両方が半無限であり、金属・鋳型界面が一定温度に保持され、溶融金属は最初融点にあって過熱しておらず、凝固過程における凝固界面は平らであり過冷はないなど) のもとで導かれているが、実用鋼塊の凝固過程において凝固時間の 2/3 程度まで大略一致するとして実用上便利な式として用いられている。しかしながら Al の一方凝固に関する実験では、より一般的に (4) 式の関係となることが報告されている¹⁰⁾。

$$L = k' \cdot t^n \text{ (mm)} \quad \dots\dots(4)$$

Fig. 5 Relation between distance from fusion boundary to solidification front (L) and passed time after elimination of arc (t).

そこで本実験においてもこの関係調べたのが Fig. 5 である。これは Fig. 3 を両対数のグラフに描きなおしたものにほかならず、凝固開始直後を除いて各アークタイムとも凝固層厚さ (L) と経過時間 (t) とがほぼ直線関係となっており、溶接金属の凝固のような急速な凝固過程においても (4) 式で表示できることが確認された。

3.3 凝固過程における凝固速度

凝固進行曲線 Fig. 3 からアーク消去後の任意の時刻における接線の勾配を求めることによりその位置における凝固界面の移動速度、すなわち溶融池の半径方向の線凝固速度を求めることができる。その結果を Fig. 6 に示す。

線凝固速度は凝固開始後急速に増大し、極大値に達したのち若干減少し始め極小値を示しその後は漸次速度を増加して凝固を終了している。この傾向はアークタイムが変化しても変わらないが、アークタイムの短い方が溶融池半径が小さく線凝固速度曲線が上方に位置しており凝固速度が全般にわたり大きくなっている。Fig. 6 にみる線凝固速度の変動はその位置における凝固に伴う潜熱の発生量と伝熱による放散熱量のバランスによるものと考えられる。

通常の一方方向凝固実験においては熱流の方向は一方であるから線凝固速度の大小と潜熱の発生量は対応する。しかしながら本実験における溶融池は円形である

Fig. 6 Relation between linear solidification rate (R_L) and distance from fusion boundary to solidification front (L).

から冷却に伴う放熱は放射状となり、Fig. 6 に示した半径方向の凝固速度すなわち線凝固速度は凝固潜熱の発生量とは対応しておらず、いわば見掛けの凝固速度である。そこで潜熱の発生量すなわち凝固した固体の量と対応する凝固速度として面積凝固速度を求めた。面積凝固速度 (R_A) は線凝固速度 ($R_L = dL/dt = -dL'/dt$) を基に次式により計算できる。

$$R_A = \frac{2\pi \cdot L' \cdot (-dL)}{dt} = 2\pi \cdot L' \cdot R_L (\text{mm}^2/\text{sec}) \quad \dots\dots(5)$$

ただし、 L' は溶接金属の中心から凝固界面までの距離である。

すなわち面積凝固速度は L' と L の減少とともにほぼ単調に増加する R_L の積でできまり、Fig. 6 より求められる。その結果を Fig. 7 に示す。

これより面積凝固速度 (潜熱放出量、凝固量と対応するものである) は凝固開始時が最も大きく、溶融池内

Fig. 7 Relation between area solidification rate (R_A) and distance from center of weld metal to solidification front (L').

部に向って凝固が進むにしたがって低下することがわかる。したがって Fig. 6 の線凝固速度の傾向とは非常に異なっており、本実験のような溶接凝固の場合は真の凝固速度(= R_A)に換算してみると等速にならないことは当然であるが、 R_A (見掛けの凝固速度)とほぼ逆の傾向を示した。

一方溶融池半径(L_c)を凝固時間(t_T)で除せば全凝固過程における平均線凝固速度(R_{LM})を求めることができる。Fig. 8 がその結果でありアークタイム(T)との関係は次式で与えられる。

$$R_{LM} = 18 T^{-0.38} \text{ mm/sec} \quad \cdots \cdots (6)$$

ただし $5 \leq T \leq 15 \text{ s}$

3.4 凝固過程における温度分布と冷却速度

溶融池の各部の最高到達温度ならびにその分布は溶融池の吸収ガス量や溶湯の対流状況に影響する。また溶融池の冷却状況は吸収ガスの放出、残留程度、溶湯の粘性変化に影響する。特に冷却速度は凝固過程において、一般に冷却速度の変化→過冷度の変化→凝固速度の変化→凝固組織の変化とつながるので極めて重要な因子である⁶⁻¹⁰⁾。

最高到達温度の分布すなわちアーク消去時の温度分布は Fig. 9 に示す通りであって、準正規分布曲線状で溶融池中心付近が最も温度が高く、その絶対値はアークタイムの大小に関係なくほぼ1000℃程度となっている。

また Fig. 10 に凝固終了までの任意の時刻における温度分布の一例を示す。温度分布は本来測定点の実測値をスムーズに結ぶ曲線となると思われるが、凝固界面の温度勾配の変化を強調する意味からあえて折線表示とした。これより時間の経過に伴う温度の変化は溶融池中心に近いほど大きく、凝固が進むに従って凝固界面の液相

Fig. 8 Relation between mean linear solidification rate (R_{LM}) and arc time (T).

Fig. 9 Distribution of maximum temperature in molten pool just after elimination of arc (T_{MAX}).

Fig. 10 Variation of distribution of temperature during solidification.

側の温度勾配が固相側に比べて急速に小さくなるのがわかる。

アーク消去後の冷却速度は Fig. 2 の冷却曲線の形状から明らかなように、溶融池内各部の最高到達温度から凝固温度までの温度降下が経過時間に対して比例的でなく連続的に変化しているので単純に表示できない。そこで次の4つの冷却速度に分類して検討した。すなわちアーク消去直後の冷却速度(C_{MAX})、平衡凝固温度($T_{MP} = 660^\circ\text{C}$)における冷却速度(C_{MP})、真の凝固温度(T_A)における冷却速度(C_A)、そして最高到達温度(T_{MAX})から平衡凝固温度(T_{MP})へ降下するまでの平均冷却速

度 (C_M) である。Fig. 11, 12, 13, 14 はこれらの冷却速度を溶融池の各位置について求めたものである。

Fig. 11 のアーク消却直後の冷却速度 C_{MAX} は最大値の位置が温度の最も高い溶融池の中心ではなく、半径の50%~60%の位置となっているのが注目される。これはアーク消去直後においては半径方向への熱伝導、表面に

Fig. 11 Distribution of cooling rate in molten pool just after elimination of arc (C_{MAX}).

Fig. 12 Relation between cooling rate at melting point (C_{MP}) and distance from fusion boundary to solidification front during solidification.

Fig. 13 Relation between cooling rate (C_A) and distance from fusion boundary to solidification front.

Fig. 14 Distribution of mean cooling rate at the temperature range from maximum temperature just after elimination of arc to melting point (C_M).

における対流熱伝達の総合効果として50%~60%の位置が伝熱条件が最も良好となるためではないかと考えられる。

C_{MP} と C_A の傾向は Fig. 12, 13 に見る通り両者とも大体似かよっており、溶融界面に近いほど大きくなっている。したがって C_{MAX} とは全く傾向が異なるわけで、 T_{MAX} から T_{MP} あるいは T_A まで温度が降下する間における冷却の状況が極めて大きく変化していることになる。そこでこの間の冷却速度を代表するものとして求めたのが、Fig. 14 の C_M である。図中の破線は松田らによって伝熱計算から求められている凝固界面の冷却速度曲線²⁾である。両曲線は絶対値は異なるが傾向は類似している。伝熱計算は凝固界面の冷却速度を求めているのであるから、実測値の C_A あるいは C_{MP} と対応して良いはずであるが両者とも計算結果とは逆傾向となっている。これは伝熱計算を行うに当たってなされている仮定(表面からの熱放散はない、潜熱無視、比熱、密度、熱伝導率などの物理定数は温度に無関係に一定)がこのような急速な過渡現象においては必ずしも妥当ではないためではないかと思われる。

3.5 凝固過程における凝固前面の温度勾配と過冷度

凝固過程における凝固前面での液相側の温度勾配 G_L と凝固速度 R の一般には n 乗の比 (G_L/R^n) は溶質濃度との関係で凝固組織を変化させる^{9,10)}。固液界面に顕著な溶質の濃縮を伴う合金の凝固においてはそこの温度勾配は特に重要であって、温度勾配が小さいと大きな組成的過冷を発生し組織を大幅に変化させる要因となる。また凝固前面における過冷度^{7,8)}(見掛けの過冷度 ΔT = 熱的過冷度)も凝固組織を変化させることが知られている。

本実験による溶接金属の凝固組織は整列したセル組織

から成り立っており単純であるが、凝固速度 (R) は凝固前面での温度勾配と冷却速度によって定まり冷却速度は過冷度を変化させる⁷⁾。したがって溶接時の凝固過程における凝固前面での温度勾配、過冷度がどの程度の値となるのか、またどのように変化するかを検討した。既に Fig. 10 より明らかなように凝固前面が通過する所では凝固が進むほど液相側の温度勾配が顕著に低下している。そこで各アークタイム毎に凝固前面の温度勾配の凝固過程における変化を求めた。結果を Fig. 15 に示しているが、その変化傾向は直角双曲線的である。

最大値は溶融界面にあり $T=5$ 秒の場合大略 $140^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 程度、また $T=15$ 秒では $60^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 程度である。凝固の進行の初期に急減するが溶融半径のほぼ80%以上の位置に達すると $5\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ と極めて小さな値となる。図中の破線は松田らにより伝熱計算により求められている凝固過程における温度勾配である²⁾。絶対値にかなりの違いが認められるものの全体的傾向は良く類似している。

Fig. 16 は 3.4 に示した凝固前面における冷却速度 C_A を Fig. 15 の凝固前面の温度勾配 (G_L) で除して、そこでの線凝固速度 $R'_L = C_A/G_L$ を求めた結果である。この結果は 3.2 Fig. 6 に示した線凝固速度 (R_L ; 図中の破線) と良く一致する。これは冷却曲線から直接求めた 1 次データである C_A に対して G_L , R_L などの 2 次データの相対精度が十分満足できるものであることを実証するも

Fig. 15 Variation of temperature gradient on solidification front during solidification.

Fig. 16. Relation between ratio of cooling rate (C_A) to temperature gradient (G_L) at point A solidification front i.e. linear solidification rate (R'_L) and distance from fusion boundary to solidification front (L).

のと考えられる。

一方凝固過程における過冷度 ($\Delta T = T_{MP} - T_A$ = 熱的過冷度) を求めると Fig. 17 のようになり、溶融界面付近で大きく $30\sim 20^{\circ}\text{C}$ ($T=5\sim 15\text{ s}$) 程度であり溶接金属の中心に向うにしたがって漸減し、半径の50%以上では溶融界面付近の $1/2\sim 1/5$ 程度になる。一般に過冷度は冷却速度によって変化することが知られている^{6,7)} ので ΔT と C_{MP} の関係をもとめたのが Fig. 18 である。これより C_{MP} の増加と共に ΔT は全体として図中破線で示すように放物線的に増大することがわかる。ただし本実験のように溶接凝固の場合には、 ΔT は C_{MP} のみで一義的に決まるものではなく、 C_{MP} が同一であってもアークタイムによって異なり、アークタイム別に図中の実線で示すように分別される。これはアークタイムが異なると溶融池

Fig. 17 Relation between undercooling (ΔT) and distance from fusion boundary to solidification front.

Fig. 18 Relation between undercooling (ΔT) and cooling rate at melting point (C_{MP}).

の大きさが異なるので, 同一の C_{MP} となる溶融界面からの距離が異なり, そこでの温度勾配が異なるためと考えられる (Fig. 12, 15, 17 参照).

4. 結 言

溶接金属の凝固過程を究明する基礎的な段階として, 凝固過程の単純な高純度 Al の薄板を用い, 極細の熱電対による精密な温度の測定手法を確立すると共に, 重要な因子について実測値を求めた. 解析に当っては温度測定結果と, 同時に行った高速度カメラ撮影による結果を重ね合わせて検討した.

本実験の範囲 (アークタイム 5~15s) で得られた結論をまとめると以下の通りである.

- 1) アーク消去後凝固開始までには一定の時間経過 (凝固停滞時間 t_{ST}) が必要であり, アークタイム (T) との間に, $t_{ST} = 0.013 T^{0.95} s$ の関係があった.
- 2) 凝固開始後の経過時間 (t) と凝固層の進行距離 (L) との間には一般的に $L = k \cdot t^n$ の関係がある.
- 3) アーク消去時から凝固終了までに要する時間 (凝固時間 t_T) はアークタイム (T) との間に $t_T = 0.078 T$ の関係があった.
- 4) 溶融界面から溶融池中心に向う線凝固速度 (R_L) は Fig. 6 に示す傾向で変動し, 最大値は凝固終了時にあり, $T = 5 \sim 15 s$ で $R_L = 50 \sim 14 mm/s$ 程度である. また全凝固過程の平均的線凝固速度 (R_{LM}) は $R_{LM} = 18 \cdot T^{-0.38}$ で表示できた. なお凝固に伴う潜熱放出量 (あるいは凝固量) と対応するものとして面積凝固速度 (R_A) を求めると Fig. 7 の通りであり, Fig. 6 の線凝固速度の傾向とは非常に異なっており, 本実験のような溶接凝固の場合は真の凝固速度ともいえる R_A に換算してみると等速にならないことは当然であるが, R_L (見掛けの凝固速度) とほぼ逆の傾向を示した.

5) アーク消去時の温度 (T_{MAX}) の分布ならびにその後の変化は準正規分布曲線的である. なお最高到達温度はアークタイムに関係なくほぼ 1000℃ 程度である.

6) 溶融池の冷却速度は真の凝固温度 (T_A) に降下する間で大きく変化する. したがってアーク消去直後 (C_{MAX}), 平衡凝固温度通過時 (C_{MP}) 真の凝固点通過時 (C_A), T_{MAX} から凝固点 T_{MP} までの平均冷却速度 (C_M) をそれぞれ求め Fig. 11~14 に示す結果を得た. なお従来凝固界面の冷却速度として伝熱計算により求められている結果と C_M の傾向が一致することを認めた. しかしながら過渡的な冷却速度 C_{MP} , C_A とは大幅に異なる.

7) 凝固界面における温度勾配 G_L は凝固過程において直角双曲線的に変化し, 伝熱計算により求められている傾向とほぼ一致することがわかった.

8) 凝固界面における過冷度 (ΔT) は溶融界面で大きく溶接金属内部に向って漸減する傾向があり, 最大値は $T = 5 sec$ で 30℃ 程度, $T = 15 s$ で 20℃ 程度であった. また ΔT は冷却速度 (C_{MP}) の増加によってほぼ放物線的に増大するが, 冷却速度によって一義的に決まるものではなく, アークタイムの影響をうける.

9) 冷却曲線から求めた凝固界面での冷却速度 (C_A) を凝固過程の温度分布曲線から求めた凝固界面における温度勾配 (G_L) で除して求めた線凝固速度 (R'_L) は凝固進行曲線から求めた線凝固速度 (R_L ; Fig. 6) と良く一致することが確認された.

参 考 文 献

- 1) W.F. Savage, C.D. Lundin and A.H. Aronson: "Weld metal solidification mechanics", W.J., Vol. 44(1965), 175s~181s
- 2) 仙田富男, 松田福久, 加藤光昭, 中川博二, 岡本宏二: "溶接凝固機構とその組織の特性 (第4報), 溶接学会誌, 第40巻 (1971), 25~34
- 3) 柴田晴彦, 浅井公屋: "アルミニウム溶接凝固過程の高速度撮影による検討" 溶接学会全国大会講演概要 (第15集), 1974, 396
- 4) B. Chalmers: "Principles of Solidification" (1964), 邦訳: 岡本平, 鈴木章共訳: 金属の凝固"丸善 No. 20 (1956), 22
- 5) 中尾善信: "純アルミニウムの凝固の研究 (第1報), 軽金属, No. 20 (1956), 22
- 6) M.C. Flemings: "Solidification Processing: McGraw-Hill, New York, (1974), 167
- 7) 市川理衛, 池田徹之, 大橋照男: "個々のアルミニウム合金の凝固組織に及ぼす冷却速度と過冷度の影響" 鈷物, 第46巻, 第1号 (1974), 25
- 8) 高橋忠義, 鈴木敏夫, 市川冽: "Al-4%Cu 合金の過冷凝固現象について" 日本金属学会誌, 第32巻 (1968), 821~825
- 9) W.A. Tiller, J.W. Rutter: "The effect of growth conditions upon the solidification of Binary alloy", Can. J. Phys., Vol. 34 (1956), 96
- 10) T.S. Plaskett, W.C. Winegard: "Cell to dendrite transition in Tin base alloys", Can. J. Phys., Vol. 38 (1960), 1086