ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう プロセス技術編 第6回 溶解・鋳造凝固(第46回技術セミナー)

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

1. はじめに

私達の身の回りの金属製品は、使い易いように形が整えられています。その形状は、大別して切削や鍛造などの加工と、型に溶けた金属を流し込む鋳造で作られますが、前者の加工も対象は金属の塊です。金属は鉱石から精錬後、溶解鋳造して製造します。本稿ではこの「溶解・鋳造凝固」について紹介します。「溶解」とは気体・液体・固体の物質が、他の液体や固体の物質(溶媒)に混合して均一な相を形成する現象を称し、物質が液体に溶けて溶液を生成することを称します。「鋳造」は、材料を融点より高温で加熱して液体にした後、型に流し込み、冷やして目的の形状に固める加工方法を称します。そして、「凝固」とは物質が液体から固体に変る現象を称します。

歴史をひもとくと人類が最初に製品として使用した金属は銅と考えられています。最も古い銅製品は、紀元前 6300~5500 年頃のアナトリア地方 (現在のトルコ)から発掘された銅製の腕輪との説があります。最古の銅製品については諸説があるものの、銅は人類が使用した最初の金属であることに間違いはないようです。紀元前 3600 年頃にはメソポタミア地方でシュメール人が銅よりも強度がある、錫との合金である青銅を発見し、溶解・鋳造技術が発展したと考えられます (青銅器時代)。その後、銅に続いて紀元前 2600 年ごろに金や銀が使用されましたが (図 1)、これ









図1 金製イヤリング(BC16世紀)、ペンダント(BC13世紀)、銅製酒器 (BC11~13世紀)、銅製品(紀元前3世紀) らの金属の特徴は、資源である鉱石が一か所に集まっていることと、化学的に単体金属として安定に存在し得ること、そして融点が鉄 (1539 $^{\circ}$ C) に比べ、銅は 1085 $^{\circ}$ C、銀は 961 $^{\circ}$ C、金は 1063 $^{\circ}$ Cと低いことが挙げられます。紀元前 4000 年頃の銅製品では、銅にヒ素やアンチモンを多量に含有していましたが、採掘した銅鉱石が地表近くの酸化銅や炭酸銅の鉱石層より深い層にある、ヒ素やアンチモンを含んでいたためと言われています。しかし図 1 に示すように、銅にこれらの元素を添加すると融

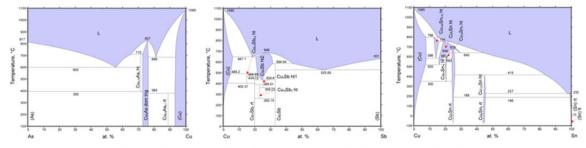


図2 銅-砒素(左)、銅-アンチモン(中)、銅-スズ(右)二元系状態図

点が低下しますので、安定に長時間の高温状態を作りだすことができなかった当時、そうせざるをえなかったと考えることも出来ます。一方、金属を溶解するには器が必要ですが、当然のことながらその器(坩堝と称します)にも耐熱性が求められます。初期の坩堝は、焼成温度が800~900℃の野焼きで製造したため、緻密化が得られず強度に劣りました。しかし、1100℃以上の高温が可能な地下式の窯と、ふいご等の送風設備の発明により、緻密で高強度の坩堝の製造が可能となりました。また酸素が充分に供給されない密閉状態に近い高温環境下では、熱源の炭素は十分に酸化されないで一酸化炭素として存在し、水の一部は水素として存在することから、還元雰囲気により鉱石の還元が可能になったと考えられます。こうして紀元前1500年頃に、アナトリア地方で銅よりも融点が高い鉄の精錬が可能となり、エジプト・メソポタミア地方で鉄器時代が始まったと言われています。金属利用のごく初期は、酸化物から金属を取り出す精錬技術が存在せず、金や銀など酸化しにくい一部の金属のみが、装飾品等に使われるだけでした。しかし、溶解技術の発達と共に武器や農耕具にも使用されるようになりました。

2. 溶解

前節で紹介したように、初期の金属溶解は野焼きで行っていたため、高温が得られず高融点金属の溶解はできませんでした。図3は我国古来の製鉄法である「たた

らぶき」の構造です。地表が乾燥すると地下水が地表に上昇して温度が低下するため、炉の下に排水溝を設け、小舟と称する予備燃焼室を設けてあります。また左右両側からふいごで風が送られ、たたらぶきの温度は1200~1300℃となります。しかしその温度分布は不均一のため、炭素の多い銑鉄と少ない鋼の混合物(ケラ)となり、ケラを砕いてより分け、下工程の原料に用いられました。こうした溶解

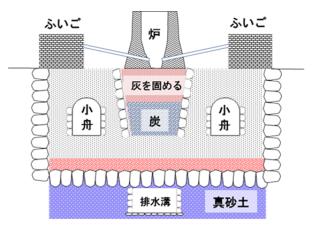


図3 たたら吹きの構造

法が大きく変貌したのは、坩堝の発明によります。坩堝により 1400℃以上の高温加熱が可能となり、原料金属を溶解すると共に異種金属との合金を製造する上でも重要な役割を果たしました。この坩堝の原料である酸化物(セラミックス)が耐火物として使用されるにおよび、溶解技術は大きく発展しました。現代、最も大量に製造される金属は鉄ですが、溶解には溶解炉の内側に高熱や衝撃に耐えられる耐火物が内貼りされ、1500℃以上の高温を維持することができます。耐火物の化学成分は SiO_2 と Al_2O_3 等の酸化物が主ですが、融点が2072℃の Al_2O_3 の割合が増加すると耐熱性が向上し、アルカリ雰囲気での侵食性に優れることからガラス炉やレキュペレーター(熱交換器)の部材に使用できます(SiO_2 の融点は約 1650℃)。耐火物(耐

火煉瓦)の耐火度は、ベルリン王立磁器製造所のゼーゲル(H. Seger)が考案したゼーゲルコーンで表示されます。これは、 Al_2O_3 に様々な物質を加えて作製した、高さが約6cm(第一種)あるいは3cm(第二種)の三角錐を炉の中に放置し、軟化変形した温度から評価する指標です。図4の様に低温の第一種と高温の第二種に分かれ、耐火度はゼーゲルコーンを表す Seger Kegel のSKで表記されます。

こうした耐火物の発達により、金属の溶 解技術は進歩しました。炭素量の多い鉄は 強度が高いことから、武器や工具に使用さ れましたが、初期はキュポラ溶解法で製造 されました。キュポラとは耐火物を内貼り した炉のことで、コークス、地金(銑鉄、 鋼屑、戻り材)を一定比率で装入し、羽口 から送風してコークスを燃焼し、その燃焼 熱で地金を溶解します(図5)。この方法で は大量の地金の溶解が可能で、亜鉛などの 不純物除去に効果的なこと、そして炭素が コークスから補給されるため、電気炉のよ うに溶解損失補てんの必要が無いという利 点がある一方で、大量のコークス使用に伴 う CO₂ 発生や成分の適中には熟練技術を要 するという課題があります。そのため最近

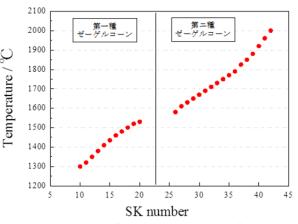


図4 耐火度番号SKと耐火温度

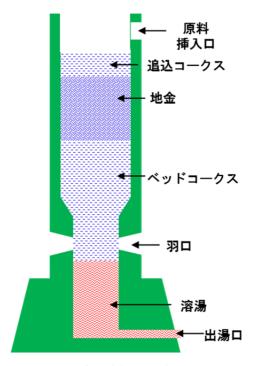


図5 キュポラ溶解炉の概略図

は電気炉溶解法が使用されるようになって きました。電気炉溶解法とは鉄芯の周りに 巻いたコイルに交流電流を流すことで坩堝 内に磁場が発生し、電磁誘導により坩堝内 の金属に流れた電流がジュール熱を発生し 溶解する方法です(図6)。溶けた金属はコ イルや炉殻と接触しないことから、耐火物 (ライニング)の耐用温度まで加熱が可能 で、高融点金属の溶解にも使用できます。 そして、CO₂等の燃焼ガスを出さないほど 電力原単位は向上します。一方、電気炉溶 解は原料がそのまま溶解されますので、原 料不純物は最後まで残り精錬ができません。

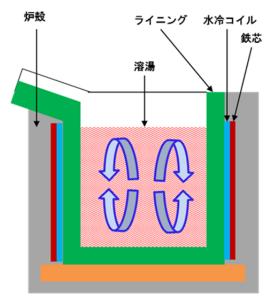


図6 電気炉の概略図

そして、炭素量の低い鋼の製造には、鉄鉱石の還元と脱炭の二つのプロセスで行われます。前者は鉄鉱石の鉄の酸化物を炭素で還元する還元反応で、高炉が使用されます。高炉の頂部から鉄鉱石とコークス、そして石灰石を入れ、下部側面から加熱空気を吹入れてコークスを燃焼させます。その結果、コークスの酸化により生成した一酸化炭素 CO が鉄鉱石(鉄酸化物 Fe_2O_3)を還元します。以下の(1)式が高炉での反応を集約したものです。

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 \cdots (1)$$

高炉の反応の特徴のもう一つは不純物の除去があります。挿入した石灰石 ($CaCO_3$) は鉄鉱石に含まれる SiO_2 などの不純物を(2)式の反応で粘性が小さく除去し易いスラグに取り込みます。

$$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow CO_2 + CaSiO_3 \cdots (2)$$

(1)式の反応では鉄鉱石還元と同時に鉄への浸炭も起こり、生成した鉄(銑鉄と称します)には多量の炭素が固溶するため、強度は高いのですが加工性に劣ります。そこで、この炭素を取り除く(脱炭)ための二つ目のプロセスが転炉反応です。転炉では、高炉で生成した銑鉄に空気や酸素を主体とするガスを吹き付け(上吹きと下吹きがあります)、銑鉄中の炭素を CO や CO_2 として、鉄を鋼に転換させます。鋼は脱炭により加工性がもたらされますので、様々な構造用材料に使用できます。また転炉においても、銑鉄中の不純物(Si, Mn, P)を除去できます。図 7 は転炉操業時間と不純物濃度の変化を模式的に描いたものですが、不純物の除去反応は、各不純物元素の酸化ポテンシャルに応じて時間変化することが判ります。

高炉反応を製銑、転炉反応を製鋼と称しますが、転炉で製造した溶鋼の不純物(S,C等)を更に少なくする、あるいは合金元素を添加する工程を二次精錬と称します(転炉反応を一次精錬とも呼びます)。二次精錬は、炉ではなく取鍋と称する溶融金属を一時保持する鋼の容器で行い、最終製品と同じ成分の鋼にするための溶解の最終工程となります。具体的には以下の方法があります。①LF法:溶鋼の脱硫と介在物制御を目的に、取鍋中の溶鋼をアーク放電

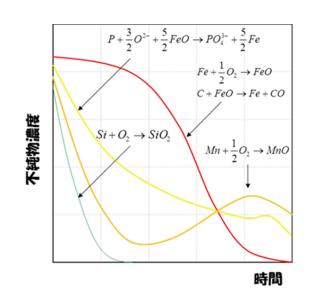


図7 転炉における不純物量の時間依存性

で加熱して精錬する方法。②RH 法:取鍋中の溶鋼に、真空槽から二本の浸漬管を挿入し、真空で溶鋼を吸い上げ、片方のパイプ側面からアルゴンガスを吹き込みます。溶鋼は浸漬管を通って真空槽に流れ込み、もう片方の管から取鍋に還流することで、真空槽中で溶鋼中の不純物ガスを除去する方法。③DH 法:一本浸漬管を備えた真空槽を取鍋に装着し、真空槽または取鍋を上下させることで真空槽内の溶鋼を入れ替える真空脱ガス法。④VAD 法:LF 法に真空脱ガス機能を加えた精錬炉で、酸化物を効率的に除去する方法。

上述の溶解は実用の金属や 合金の溶解に用いられる方法 ですが、研究機関では成分探索 用に非消耗型電極による小型 アーク溶解が利用されます。図 8 はその概略図で、真空チャン バー内の水冷銅ハース上に表 着した原料金属を、チャンバー 内に導入したアルゴンガスを タングステン電極で電離プラ ズマ化し、その熱源で溶解する 方法です。ゲッターを使用する

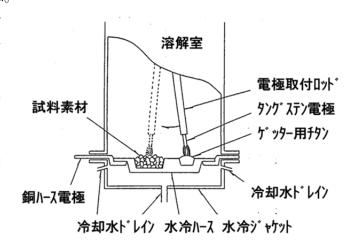


図8 非消耗電極型アーク溶解の概略図

ため不純物が少なく、所望の成分調整や高融点金属の溶解が可能で、プラズマ気流によるアーク撹拌が起こるために均質性が高いインゴットを創製できます。一方で、水冷銅ハースを用いるため特徴的な凝固組織が形成され、大型インゴットの溶製には不向きという特徴があります。

3. 鋳造

溶解プロセスで所望の成分に仕上げられた溶湯は、型に流し込んで固化させますが、型の形状を変えることで最終製品の形状に仕上げることができます。溶解量が少なく、最終製品の大きさが小さい様な小物の部品製造には、こうした鋳造プロセスがニアネットシェープとして有用ですが、鋼材のような大量製造の場合には話しが違います。前節で記載した、二次精錬で成分調整を終えた溶鋼は、数十~200 tonもの重量ですから、固化成形には連続的に鋳造する「連続鋳造」が採用されます。

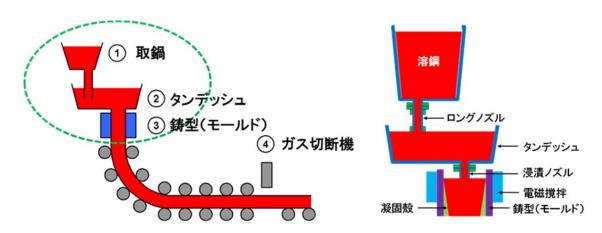


図9 連続鋳造の概略図(左図)と左図の緑点線で囲った部分の拡大図(右図)

図9は連続鋳造の模式図ですが、溶鋼の固化過程で鋼片を製造するため、左図の様に取鍋①の底から連続的に溶湯を引出して鋳造します。タンディッシュ②では二次精錬でも除去しきれなかった介在物を浮遊除去したり、電磁撹拌で最初に固まる外側に介在物を留めて固まらないようにし、水冷鋳型③に流します。水冷鋳型に接した溶鋼は急冷凝固され、所望な長さの鋼材をガス切断機④で切断します。鋼材の固液共存温度幅が大きいと液相(溶鋼)が噴出する可能性があり、連続鋳造を健全に行うためには温度幅は小さくなくてはなりません。そのため温度幅が大きい鋼の鋳造には鋳型(インゴットケース)を用いた鋳造が採用されます。なお連続鋳造でできた製品は半製品あるいは中間製品と称し、断面の長辺が300 mm以上のものを「スラブ」(板製品用)、130 mm以上のものを「ブルーム」(形鋼製品用)、それ以下は「ビレット」(線材製品用)と称します。

連続鋳造は大量生産技術です。一方、鋳型に溶けた金属を流し込んで成型する小型製品の生産の場合、様々な鋳造方法があります。鋳型に砂を使用する砂型鋳造法では、溶湯を砂で作った鋳型に流し込みますので、曲線を含む複雑な形状の製品製造が可能で、広く実用に供されている鋳造法です。一方、鋳型に鋳鉄や耐熱鋼などの金属を使用する金型鋳造法は、砂型鋳造法に比べて鋳造時の冷却速度が早いために製品の組織は微細となり機械的性質に優れます。また鋳肌や寸法精度に優れ、緻

密な鋳物製作が可能です。金型には、製品の形状付与と鋳造材の熱伝達の二つの機能があります。前者は製品の寸法精度に影響をおよぼし、発生するガスを逃がす構造を有し、引け巣などの欠陥や湯流れ性を制御します。後者は、鋳造材の冷却凝固は溶融金属と接する金型表面で始まりますので、損傷(ヒートショックと称します)を回避することが必要で、素材には熱間工具鋼が使用されます。

坩堝の中の溶湯表面を圧縮空気などの 気体で加圧し、ストークから溶湯を押し上 げて鋳型内に注湯する方法を金型低圧鋳 造法と称します(図10)。この方法を用い ると内部欠陥が少ない製品製造が可能な だけでなく、材料の歩留まりが高いという 利点があります。そして、砂の鋳型内に発 泡ポリスチレン製の模型を満たし、溶湯を 注入して鋳物を製造すると同時に発泡ポ リスチレンを燃焼気化させる方法をフル モールド鋳造法と称します(図11)。この 方法では従来の鋳型の型合わせや分割な どの作業が無いだけでなく、バリの発生が 無いことから仕上げ加工が良いのですが、 発泡ポリスチレンの炭素などが不純物と して製品に混入する課題があります。そし て、回転する円筒形容器に溶湯を注入し、 遠心力によって溶湯が容器内壁に押しつ けられ、パイプ状鋳物を製造する方法を遠 心鋳造法と称します。図 12 は縦型の遠心 鋳造法ですが、長さが短い製品製造に使用 されます(長い製品には横型遠心鋳造法を 使用します)。中子を使用しないパイプ製 造が可能で、湯口や押湯を使用しないため 経済的ですが、厚肉材の鋳造には不向きで 成分偏析が起こる場合があります。

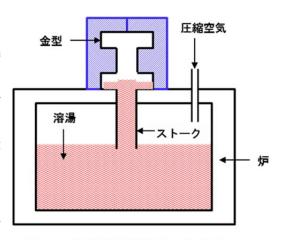


図10 金型低圧鋳造法の概略図

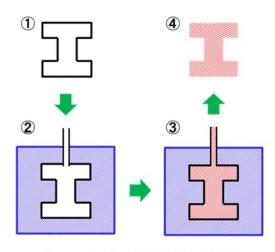


図11 フルモールド鋳造法の概略図

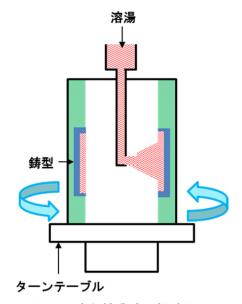


図12 遠心鋳造法の概略図

4. 凝固

型に鋳造された溶湯は液体から固体に変わりとまするとでであるとでいる。そこで調が溶りません。そこで調が溶りません。そこで調が変して、流動に変して、流動に変して、流動に変したが重要を強金属の対象で表され、が重要を強金属のが表され、原子レベルではがなりません。溶融液体が流動する時、

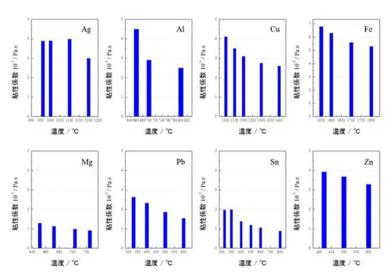


図13 様々な金属の粘性係数の温度依存性

界面の面積 A に働く力 F は流体速度 v の勾配 dv/dx との間で(3)式が成立します。(3) 式の η が粘性係数(単位は $Pa\cdot s$)で、液体運動においての摩擦に相当し、流体の種類や温度によって変化します。

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dx} \cdot \dots \cdot (3)$$

図 13 に様々な金属の粘性係数の温度依存性を示しますが、この図から、① ηは温度上昇により低下する、② ηの高い金属ほど流体移動が難しく低い金属ほど易しい、③ ηは金属の融点と相関がある、等が判ります。一方、液体が流動する場合に作用

する粘性抵抗は、粘性係数 η のほかに密度 ρ も関係し、粘性係数 η を密度 ρ で割った値(動粘性係数または動粘度と称し、記号 υ を使用)も粘性の指標です。水は室温では η =1、 ρ =1ですから、 υ =1です。一方、 Δ 1 は υ =0.2、 Δ 2、 Δ 3 には Δ 4、 Δ 5 にする人では金属の方が水より低く、液体では金属の方が水よりも流れやすいことが判ります。また流動性の評価には粘度だけではなく、凝固特性も加味した流動長が実用指標に用いられます。流動長とは液相線より高い一定温度に過熱した溶湯を、長い溝の鋳型の一端に注湯し、凝固までに進んだ距離を称します。

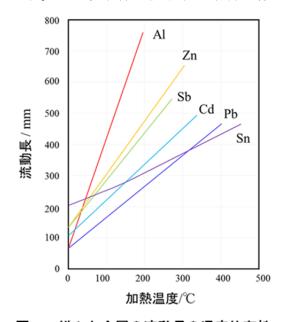


図14 様々な金属の流動長の温度依存性

図 14 に様々な金属の流動長の温度依存性を 示しますが、温度が高いほど流動性は増加す ることが判ります。流動長は共晶反応や金属 間化合物生成など、一定温度で凝固が進行す るほど長く、凝固温度幅(固液共存温度域) が大きいほど短くなります。図 15 は Fe-C 二 元合金の流動長と動粘性係数のC量依存性を 示した図です。共析反応 (C=0.8) や共晶反 応 (C=4.3) が起こる組成近傍で過冷度 (ΔT) によらず、流動長が長くなることが読み取れ ます。動粘性係数の C 量依存性は、共晶反応 組成近傍の高い流動性は説明できますが、共 析反応組成近傍の高い流動性は説明できま せん。これは共析反応は固相反応ですが、共 晶反応は液相から固相への反応であるため で、流動長は実践的な指標と言えます。

凝固時の湯流れが不十分であると型に溶融金属が低います。一方、鋳造欠陥は鋳造欠陥は金属の凝固収縮とのほどを関収縮とのです。図16は1600℃からを変温までの冷却中の体でです。図16は1600℃の収縮があり、そのうち液体収縮が引け巣の要因です。鋳した溶湯は鋳型接触部より

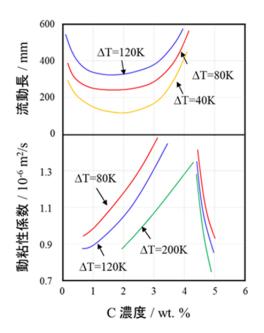


図15 Fe-C二元合金の流動長と動 粘性係数のC量依存性

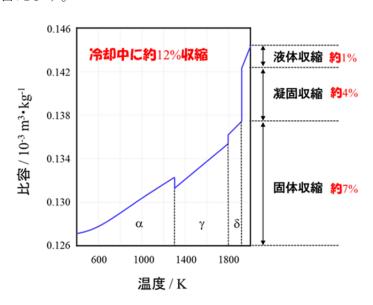


図16 1600℃から室温までの冷却中の鉄の収縮

内部の方が高温ですが、両者間の温度差に起因した液体収縮の大きい金型では、熱放散の低い砂型よりも巣が出来難いはずです。しかし、砂型は凝固時に鋳型壁が外側に移動して鋳型空隙部が大きくなるので、砂型の場合は液体収縮だけでは引け巣量を説明できません。また図 16 は鉄の場合で、冷却収縮のみですが、炭素量の多い鋳鉄では黒鉛が凝固時に膨張して引け巣形成に影響を与えます。一般に巣が発生しやすいのは純金属や共晶合金等の凝固時間の短い材料と言われています。

5. 凝固偏析

溶融金属が凝固する際には、溶湯に溶けている元素(溶質元素)が不均一に分布します。この不均一な分布を「偏析」と称しますが、偏析にはミクロ偏析とマクロ偏析があります。マクロ偏析は結晶粒よりも長い距離にわたり、肉眼でも判別できるほどの著しい偏析を称し、ミクロ偏析は結晶粒の中心部と外周部との間の組成不均一を称します。マクロ偏析は、ミクロ偏析によって溶質元素が濃化した液相の流動に起因しておこる場合が多く、流動は凝固時の温度差が原因で起こる対流や、凝固収縮により発生します。そこで、まず偏析の要因であるミクロ偏析について説明します。図 17 において、組成 x の合金を液相状態の温度 T_1 からゆっくり冷却すると、液相線(青線)との交点の温度 T_2 で凝固が始まり、温度 T_4 で凝固が完了しま

す。この間、液相と固相で原子の分配 がおこり、液相組成は $l_2 \rightarrow l_3 \rightarrow l_4$ 、固相 組成は $s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4$ に変化します。しか し、これは拡散を充分に伴った完全平 衡の場合です。短時間で液相から固相 に状態変化する凝固では、固相拡散は ほとんどありませんから、固相の平均 組成は、図 17 の赤線ではなく緑線の s₃² →s₄'→s₅'と変遷し、温度 T₄でも液相が 残り凝固は終了せず、温度 T₅で終了し ます。この結果、図18の様に、溶質原 子は中心部で最も濃度の低い s2 で、外 側に行くほど濃度が高くなり、最終凝 固部の粒の周辺部の濃度は s₅ となり最 も高くなります。以上のことから、結 晶粒の中心部と周辺部で組成が異なり、 この不均一は凝固区間の温度範囲が大 きい合金ほど顕著となります。また結 晶はデンドライト状に成長しますので、 ミクロ偏析はデンドライト状に確認さ れます。こうした偏析が起こると、鋳 物製品の性質が不均一となりますから、 これを除去するために、固相線直下で 長時間の熱処理を施し、溶質元素の拡 散を促進させます。この熱処理を均質 化処理と称します。

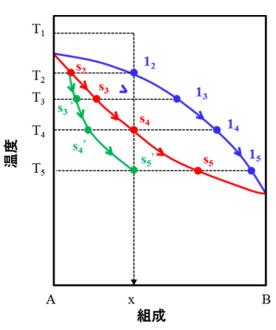


図17 凝固に伴うミクロ偏析

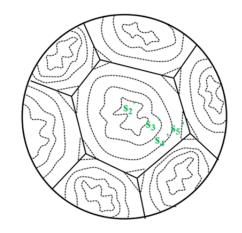


図18 結晶粒内のミクロ偏析

6. 凝固組織

鋳型に鋳込まれた溶融金属は鋳型の周壁から冷却され、鋳型表面で核生成が起こ ります。結晶核は温度勾配方向である鋳型壁と直角の方向(図 19 の緑矢印)に向 かって結晶成長し、図 19 の様な凝固組織となります。(a)は純金属の小型鋳造品の

場合ですが、壁 面から成長し た結晶粒が、他 の壁面から成 長した結晶粒 とぶつかるま で柱状晶組織 を形成するこ とが判ります。

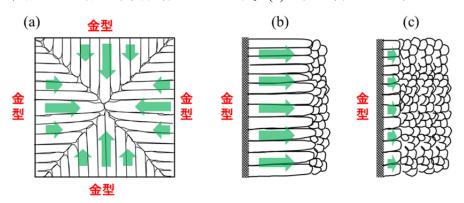


図19 凝固組織:純金属の小型鋳造品(a)と一般鋳造品(b)の合金の一般鋳造品(c)

(b)は同じ純金

属でも(a)よりも大きな製品の鋳造(一般鋳造品)の場合で、金型の壁面から成長し た柱状晶は成長の駆動力である温度勾配が無くなるまで成長しますが、成長が止ま

ったその先では、溶融金属は過冷状態と なって核生成し等軸粒が形成されます。 この様な組織は鋳物の中心部で観察で きます。(c)は合金の場合の一般鋳造品の 組織ですが、純金属と異なり柱状晶長が 短いことが判ります。これは固液二相領 域が存在するため、凝固の潜熱の消費が 純金属の場合よりも速いことに起因し ます。マクロ的には以上の様に整理でき ますが、凝固組織はミクロ的には「組成 的過冷」に起因したデンドライト(樹枝 状晶)が形成されます。図 20 は組成的 過冷の説明図ですが、(a)の C₀の液体が 温度 T。で凝固する時、So の組成の固相 が最初に析出します。定常的に凝固が進 むと溶質原子は固液界面に拡散し、界面 の組成は温度Tにおける組成で固相はS、 液相はCとなり、(c)の様な組成曲線が描 けます。(c)の赤線の液相組成に対応する 液相線の温度は、(a)の状態図で示される

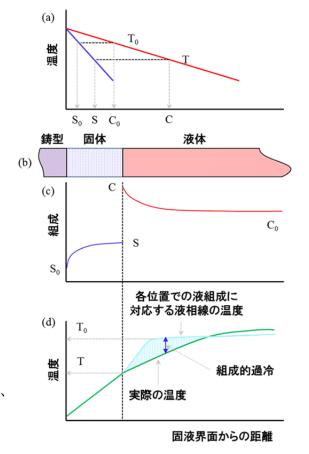


図20 組成的過冷の説明図

赤線の液相線温度変化((d)図の緑線)より高く、(d)図の水色の線となります。すなわちハッチングを施した領域では青矢印分の組成的過冷状態が起こっています。このような過冷状態が起きると、組成変化は(d)の水色の線に従いますが、同一温度の時の横軸の位置は、緑線上では固液界面からさらに離れた箇所となります。つまり結晶はより前方に向かって成長しようとなるため、固液界面は不安定状態になり、界面は凹凸が激しくなって樹脂状晶が形成します。樹脂状晶の形成は溶湯の湯流れを悪くするだけでなく、組成的過冷による核生成がおこるため溶湯の粘性を低下させ、さらに流動性を低下させることになります。

7. **おわりに**

「溶解・鋳造・凝固」は、人類が火を自在に使用することが可能になって以来、 人類の発展に寄与した主要技術の一つと言ってよいでしょう。古代世界において火 は神格化され、アステカ、アルメニア、インカ、ギリシャ、道教等々、世界中のあ らゆる神話に「火の神」が存在します。ソクラテス以前の古代ギリシャの自然哲学 者は、万物の根源への探求において火を特別な「もの」と考えました。紀元前 500 年頃にはエフェソスのヘラクレイトスが「基本的物質は火」と説き、紀元前 400 年 頃アグリジェントのエンペドクレスは「万物は四つの元素-水、空気、土、火から できている」と述べました。アテネのプラトンは「ティマイオス」で、この4元素 は4種類の正多面体の形をした粒子からできており、火は正四面体粒子から構成さ れていると記し、物質が基本的構成要素のアセンブリであるという現代科学に通じ る考えを築きました。古代から火をこのように考えた背景には、火が人類の進化や 文明の発達に大きな役割を果たしてきたからに他ならず、その具体的利用が本稿の 「溶解・鋳造・凝固」と言えます。金属が私達の生活の基幹材料である限り、将来 にわたり不可欠な技術であり、代替技術が出現する可能性は高くないと考えます。 最近、スーパーコンピューターを利用し、現象論的シミュレーションである Phase-field 法により、凝固組織形成における、三次元空間での複数樹脂状晶の競合 成長が可視化されました。同じ成長方向の樹脂状晶が相互にどのように配列するか の機構解明を目指した研究ですが、組織形成の計算予測が期待できます。液相から 固相への凝固時の核生成から結晶成長を経ての凝固組織形成過程において、樹枝状 晶の成長方位や、溶湯中の成分元素の分配、そして不純物の分布に至るまでの、凝 固の組織形態の予測が可能となれば、材料設計技術は大きく変わることになると考 えます。 鋳造・凝固の分野では数値解析技術は既に利用されており、凝固や湯流れ、 そして引け巣(鋳造欠陥)等がシミュレートされていますが、HPC システムの利用 で更なる発展が望まれます。歴史ある技術が最新の科学でひもとかれることで、ど のような将来が描けるか楽しみな分野です。