

連携記事

遠心鑄造における凝固現象

Solidification in Centrifugal Casting Process

江阪久雄
Hisao Esaka

元 防衛大学校
機能材料工学科 教授
現 東京大学
生産技術研究所 特任研究員

1 はじめに

今回の特集は遠心鑄造機で製造される鑄鉄管です。まず、日本鉄鋼協会の中で、この鑄造プロセスがどのように扱われてきたのかに興味がありましたので、協会誌「鉄と鋼」あるいはその前身の「鐵と鋼」で記事を探してみました。

私が調べた範囲で、「遠心鑄造」という言葉の初出はおそらくペンネームと思われる「屈尺生」氏による抄録の記事です¹⁾。「鐵管鑄造用遠心機」と題したもので、出典はJ. American Soc. Mech. Eng. Vol.38, No.10となっています。短い記事ですが、同一サイズの鉄管を大量生産するのに適したプロセスであり、収縮孔や偏析がない鑄鉄管の製造が可能であることが紹介されています。その後、本格的な記事としては1924年の谷山榮介氏によるものです²⁾。関東大震災後の混乱期ではありましたが、縦型遠心鑄造を実施され、それから採取した試験片の評価を詳細に報告されています。砂型鑄造に対してザク等がなくなるために材質上のメリットが大きいこと、さらに設備費は高くつくものの、大量生産品であれば砂型鑄造に比べてコスト的にもメリットが大きいことを記述されています。

その後、鑄鉄関連やパイプ材あるいは圧延ロールの品質に関する記事の中で遠心鑄造という言葉はみられますが³⁻⁷⁾、素材製造の一手法という位置づけのみであり、プロセスに関する記事・論文は見当たらなくなりました。再度登場してくるのは本田氏の圧延ロール製造および品質に関する資料です⁸⁾。これは浅田賞受賞記念講演のもので、製造プロセス、組織形成、欠陥の防止技術など幅広く記述があり、大変参考になるものです。その後はロールの品質にかかわる報告が散見される程度です⁹⁾。2011年以降に私たちの研究グループからいくつか¹⁰⁻¹²⁾と2013年に日本鉄鋼協会の「ミクロマクロ偏析制御研究会」の終了報告を兼ねた特集号で流動現象や凝固現

象の解析例が報告されています¹³⁻¹⁷⁾。ただし、遠心鑄造プロセスの実験的研究では「鉄と鋼」ではありませんが、1997年に発表されている、姜氏、大中先生の遠心鑄造プロセスに関する先駆的な研究¹⁸⁻²⁰⁾を忘れることはできません。

古くから鉄管や圧延ロールなどがこのプロセスにより製造されています。前者は上下水道、土木建設で広く用いられ、後者は製鉄業を支える重要部品で多くの工程で活躍しています。しかし、重要な製品群ではありますが、意外にも記事が少ないという印象を受けました。

2 可視化実験の試みと 実験装置ができるまで

私自身が遠心鑄造に出会ったのは2003年9月26日(金)に開催された、鉄鋼協会の鑄鍛品工学フォーラム主催の栗本鐵工所(株)堺工場の見学会でした。遠心鑄造法による鉄管製造現場を初めて見学させていただき、個人的に非常に面白いと思いました。遠心力を受けながら凝固するとはどういうことなんだろう?という単純な疑問です。その疑問に答えるには、これも単純なのですが、それを直接見るしかない、と考えました。今なら放射光やCT技術を使って金属の凝固現象を直接観察する技術も発達してきています。しかし、当時はそのようなことはまだ思いもよらない時期でした。

金属の凝固に近い透明有機物は金属の凝固現象を理解するために、古くからしばしば用いられてきました²¹⁾。私自身も透明有機物を用いて一方向凝固実験を行ったり、流動による等軸晶生成の直接観察を行ったりしていました²²⁻²⁴⁾。少しは取り扱いにも慣れていましたので、何の疑いもなく透明有機物を用いて遠心鑄造の可視化実験をしてみようと決心しました。もちろんそのような実験装置は市販されていません。私たちの責任で設計し、購入し、組み上げなければなりません。

まず可視化のアイディアですが、図1に示すように考えました。流し込んだ液相は回転している鑄型にはりつきます。鑄型は液相よりも温度が低いために、凝固は外周から内側に向かって進むと考えられます。この様子を凝固開始から終了まで見続けることが目標です。そのためには観察のための「目」であるカメラを回転する装置に取り付ける必要があると判断しました。つまり、カメラがぐるぐる回る、ということです。

遠心鑄造は回転する鑄型に液相が注入されるのが一般的です。注入時、液相がどのように流動するか、というのも大変興味がありましたが、パイプ材の表面品質に大きく影響するものと思われました。しかし、凝固現象に主眼を置くため

に、注湯という操作はしなくてよいような実験装置とし、最初から透明有機物が封じ込められている、密閉型を前提としました。

遠心鑄造の可視化実験は防衛大学の4年生の卒業研究として取り組みましたので、直接観察用の実験装置として最終型に進化するのに実に14年を要しました。その経緯は別のところにも記しましたので²⁵⁾、ここでは要点だけにします。最初はどんな感じになるのか、研究として現象観察が本当に面白いのかどうかもわかりませんので、お金もかけられません。自転車用の歯車とチェーンを買ってきて、手回して観察を試みました。回転数が一定でなくかつ非常に小さな遠心力を受けた状態での凝固現象でしたが、生成した等軸晶が振動していました（正確には、非常にあやふやな映像でしたので、振動しているように見えました、と書くべきです。）。このようなラフな実験でしたが、使用するガラスセルのサイズや仕様、凝固を周囲から内側へ向かって進めるための温度条件など、実験装置の基本条件を決めることができました。第2世代からは、1) 回転数を一定にするために動力をモーターにする、2) 画像を流れないようにするためにシャッター速度を短くできる、マニュアルモード付のハイビジョンビデオカメラと専用の照明用ランプを取り付ける、3) 横型から縦型の遠心鑄造の観察ができるように回転軸の角度を可変とする、などの変更のために改造しました。さらに第4世代からは1) 回転数を上げられるようにモーターを強化する、2) 1コマずつの撮影角度を小さくして精度よく等軸晶や自由表面の動きを記録するために高速度ビデオカメラを搭載する、などのために大改造しました。最終的な可視化実験装置の模式図を図2に示します。中央部にガラスセルを配置し、透過光を利用して撮影できるようになっています。直径100mmのガラスセルにはサクシノニトリルに水を溶質として1～2wt%添加したものを封入しました。図2に示した装置は最高1000rpmで回転しました。ガラスセルの外周にかかる重力倍数は56Gで、製造現場で採用されている値(50G～150G)とほぼ同等です。この程度の回転になると、小さなねじ1本で

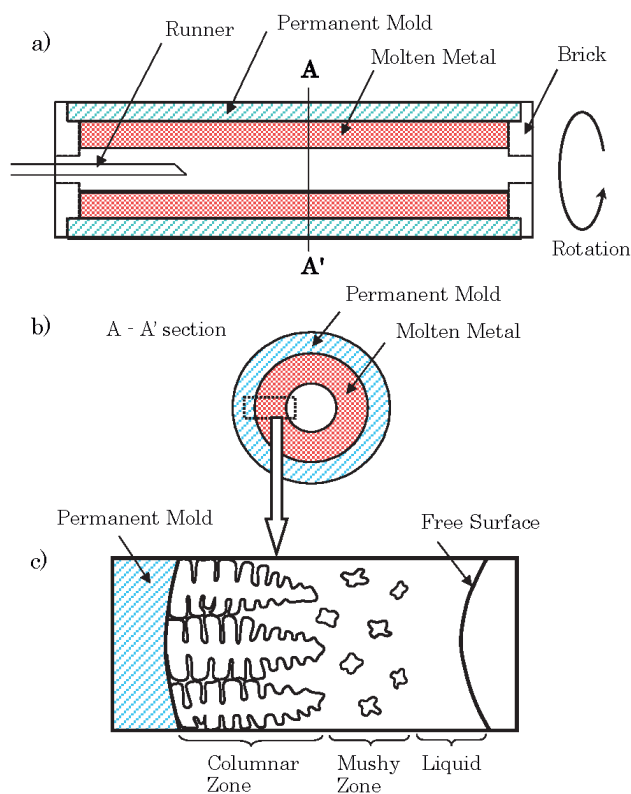


図1 遠心鑄造の可視化実験の考え方

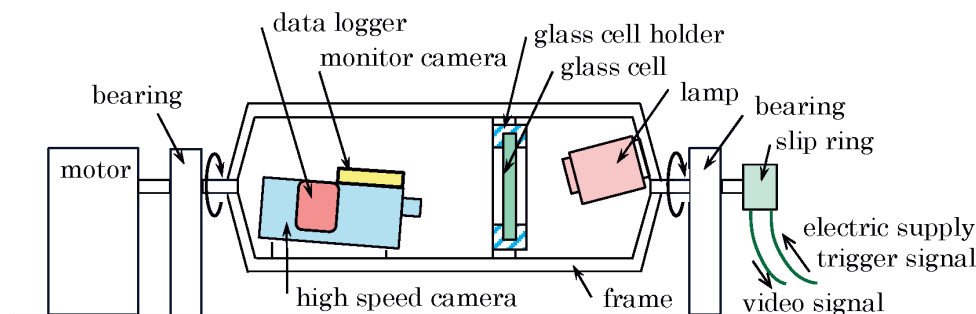


図2 最終型の遠心鑄造可視化実験装置の模式図

もバランスが崩れますので、バランス調整には大変神経を使いました。

3 可視化実験からわかったこと

今までに報告してきた内容^{10-12,14)}のエッセンスを以下に紹介します。

3.1 凝固の推移

横型遠心鑄造の場合、凝固がどのように推移するのかを図3に示します。これは第3世代の実験装置で撮影したもので、回転数は250rpmです。回転開始からの経過時間に対するスナップショットです。図3に示した写真には左側の中央にオリジナルでは赤のレーザーポインターの点が写り込んでいますが、これは回転中の最上点を示す標識です。スナップショットで白く見えるのが固相です。a) では固相は左側のガラスセルホルダーから成長しています。これは柱状晶であり、ホルダーと一緒に回っていますので、動画の中では静止しています。右側の大半は液相で、液相中には固相はありません。右端に写っているのが自由表面ですが、非常に複雑な形状をしているのがわかります。時間が経過して、b) では液相の中に1mm以下の白い点がいくつか認められます。これは等軸晶で、動画の中では動いています。等軸晶はc), d) になるにつれて、液相内全域に広がってゆき、柱状晶の成長は多数の等軸晶によって止まりました。d) は凝固の末期に対応しますが、自由界面の形がほぼ円の一部とみなせる形状になりました。外周部は柱状晶、内部は等軸晶から構成されるのが横型遠心鑄造の特徴です。等軸晶の生成メカニズムについては3.3で触れます。

3.2 等軸晶の動き

凝固の途中に発生した等軸晶は動画の中で動きます。その動きを追跡しました。250rpmで回転して、等軸晶が発生した直後の3回転分の軌跡を図4に示します。位置関係は図3と同じで、横軸が半径方向、縦軸が接線方向を表しています。図中の番号は撮影コマの順番で、1/30秒ごとのデータです。等軸晶は半径方向にも少し動きながら回転とは逆方向に大きく移動していることが特徴として挙げられます。

この動きを理解するためには横型遠心鑄造中の質点を受ける加速度を考える必要があります。反時計回りに回転している鑄型の外周部にある質点を受ける加速度を図5に示しま

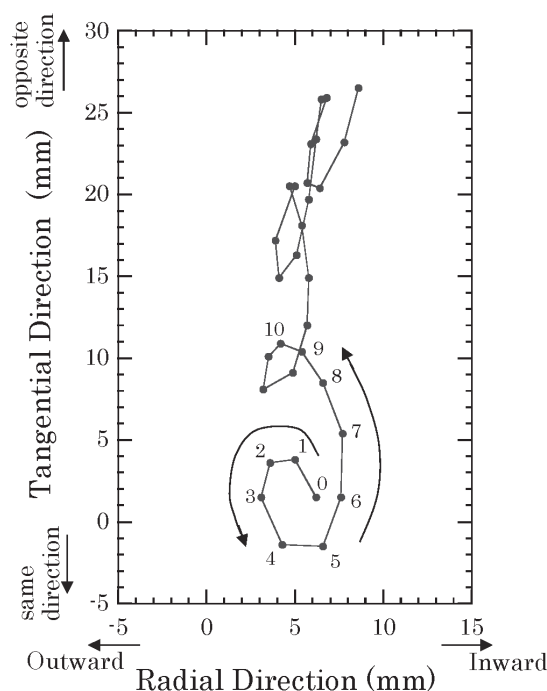


図4 横型遠心鑄造での比較的凝固初期段階における等軸晶の動き (250rpm)

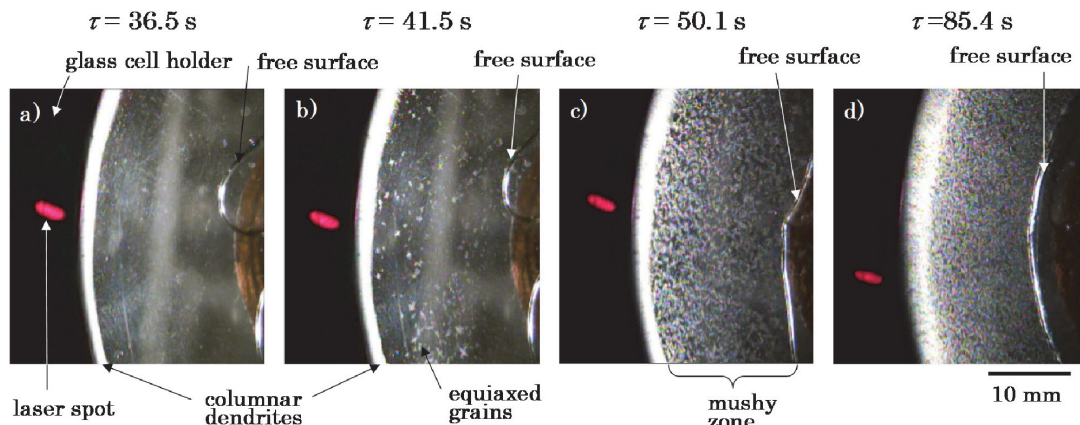


図3 横型遠心鑄造での凝固の推移 (250rpm)

す。鑄型が下降するA-B-C-Dの間は下向きに作用する重力加速度のために、質点は回転する鑄型よりも進む方向に動きます。一方、D-E-F-A間では下向きに作用する重力加速度のために鑄型よりも遅れる方向に動きます。角度範囲はどちらも 180° ですから、理想的には進む時間と遅れる時間は同一になります。これから、鑄型回転と同期する接線方向の振動は理解できます。250rpmではガラス外周での遠心力の重力倍数は3.5Gです。これはかなり小さな値で、固液共存相が周囲にはりつくには十分な遠心力ではありません。そのため、上に向かうF点あたりで、固液共存相が崩れ落ちる傾向があります。そして自由表面の形状が回復し、鑄型より進み始める点はA点よりもB点側にずれます。進める角度範囲よりも遅れる角度範囲の方が大きくなるので、全体としては遅れる方向に移動すると説明できます。

半径方向の動きは次のように説明できます。鑄型より進むときは固液共存相の厚みは薄くなりますので、流線に沿って外側へ移動します。逆に遅れるときは内側へ移動します。そして最上点を過ぎてから崩れていた自由表面が急激に回復するために外側へ移動します。この結果は粒子法を用いたシミュレーション結果¹⁷⁾とも一致しており、横型遠心鑄造の特徴と考えられます。

このような等軸晶の動きですが、凝固の進行によって変化します。等軸晶の3回転分の追跡を時間の経過にしたがって図示したものを図6に示します。等軸晶の生成直後は半径方向にも接線方向にも激しく動いていましたが、どちらの方向についても時間の経過にしたがって振幅が小さくなっていると認められます。これは凝固の進行に伴って固相率が上昇し、見かけの粘度が急激に高くなることが原因であると考えられます²⁶⁾。もちろん凝固が完了すれば全体が鑄型と同期して回転します。

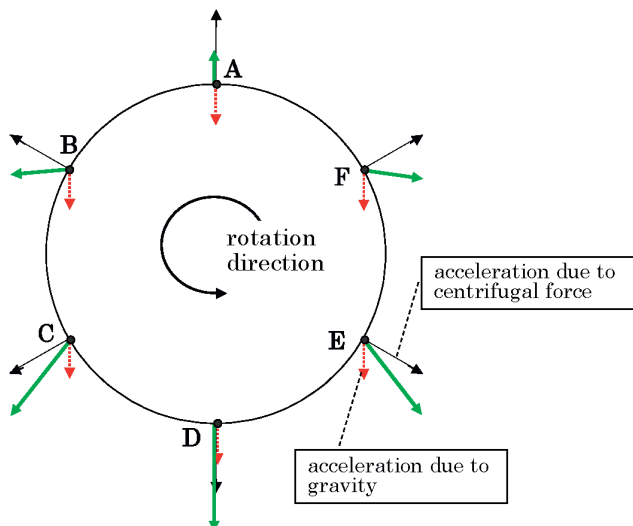


図5 横型遠心鑄造時の各位置での質点の受ける加速度

3.3 自由表面の挙動と等軸晶生成

前節で等軸晶の動きについて述べました。ところで、等軸晶はどのようにできるのでしょうか？横型遠心鑄造では等軸晶が必ず生成する、と考えられます。その生成メカニズムは自由表面で生じる波動で、これを詳しく解析するために高速度ビデオカメラを使って固液共存相の厚みを測定しました。等軸晶が生成した直後の共存相厚みの1回転分の変化を図7に示します。横軸は無次元周期で、0と1は最下点、0.5は最上点に対応します。共存相厚みは回転数が小さいと大きく変化し、回転数が大きくなると変化は小さくなります。共存相厚みは最上点近傍で最大、最下点近傍で最小となっています。

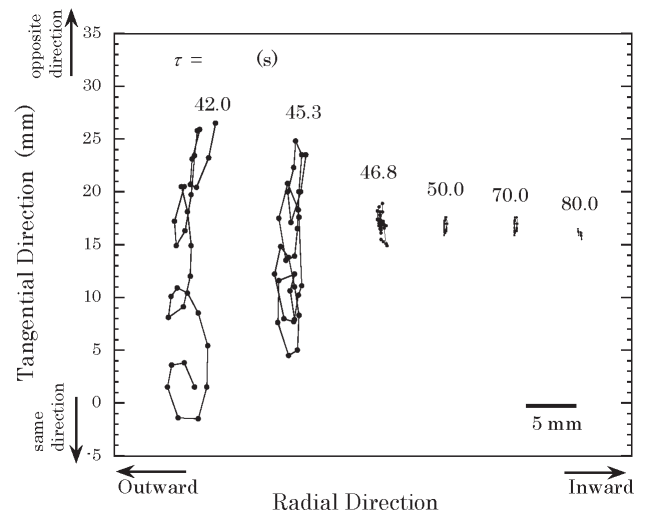


図6 等軸晶の動きの経時変化 (250rpm)

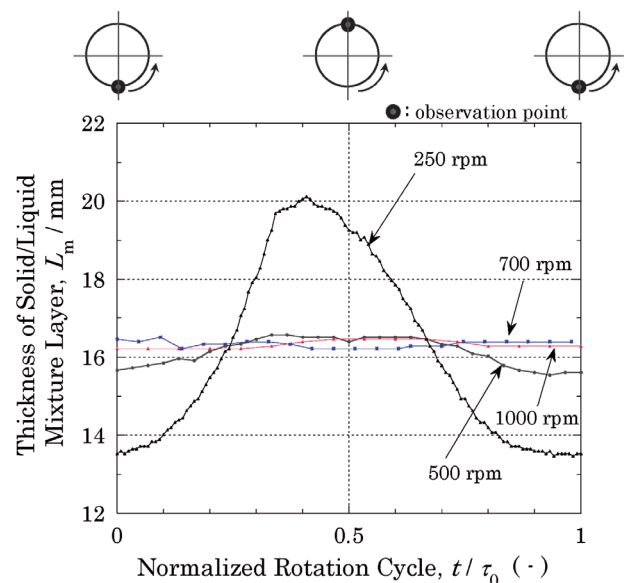


図7 一回転中の固液共存相厚み変化の回転数依存性

す。詳しく見ると、回転数の小さい、250rpmや500rpmでは厚みの最大となる位置は最上点の少し手前であることがわかります。これは遠心力が比較的小さいために、固液共存相が崩れ落ちている現象で、これが表面に生じる波動を大きくしています。図3のa) は最上点での自由表面の形状をとらえています。非常に複雑です。表面形状は一定ではないので、発生する表面の波動も複雑で激しくなります。これが内部にも波及して、柱状デンドライトの分断を誘発し、等軸晶化が起こると考えられます。

回転数を上げると共存相厚みの変化は小さくなるため、表面で発生する波動も小さくなります。各回転数で、等軸晶が生成した時の凝固の様子を図8に示します。これは高速度ビデオカメラによる映像ですが、図3とはカメラの取り付け位

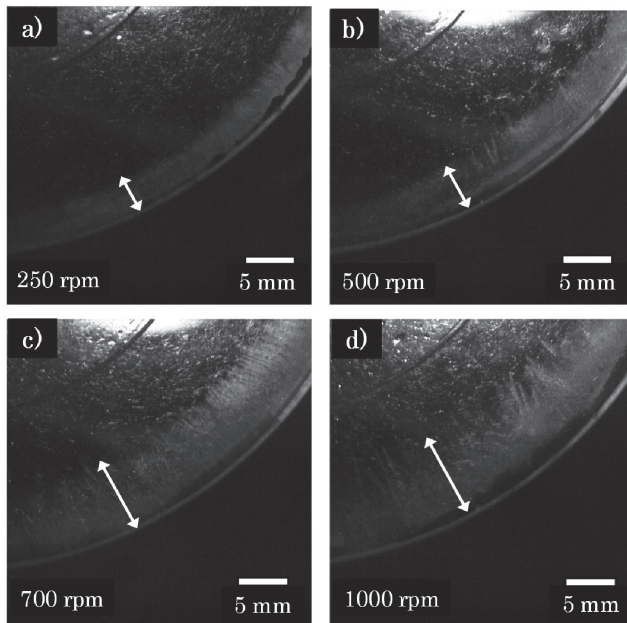


図8 各回転速度で等軸晶が生成時点のスナップショット

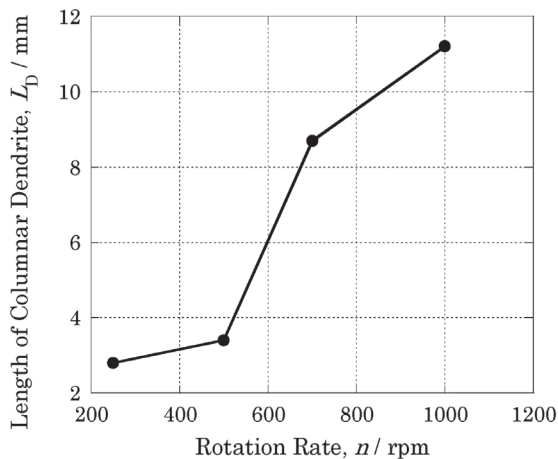


図9 柱状晶長さの回転数依存性

置が違います。図8では右下から左上に成長しているのが柱状晶、液相内に浮遊している白い点が等軸晶です。ここではわかりやすくするために、柱状晶を矢印で明示しました。回転数と柱状晶長さとの関係を示したものが図9です。明らかに回転数の上昇により柱状晶が長くなっています。換言すれば、回転数を上昇させると等軸晶化しにくい、ということを表しています。回転数を上昇させると、自由表面の波動が小さくなり、結果として内部へ波及する流動も小さくなるために等軸晶化を抑制した、と考えられます。

3.4 回転軸角度の影響

可視化実験装置の回転軸角度 (η) を変更できるようにして、横型 ($\eta = 0^\circ$) から縦型 ($\eta = 90^\circ$) まで、 30° 刻みで遠心鋳造の可視化実験を行いました。 $\eta = 0^\circ$ と $\eta = 90^\circ$ の場合の凝固の様子を図10に示します。いずれも回転数は250rpmです。 $\eta = 0^\circ$ では多数の等軸晶が生成しましたが、 $\eta = 90^\circ$ では柱状晶のみで、全く等軸晶は生成しませんでした。回転軸角度と柱状晶長さとの関係を図示したものを図11に示します。回転軸角度が大きくなるにつれて、柱状晶長さが長くなりました。これは回転軸角度が大きくなるほど、重力加速度に起因する表面の波動が小さくなり、結果として内部へ及ぶ流動も

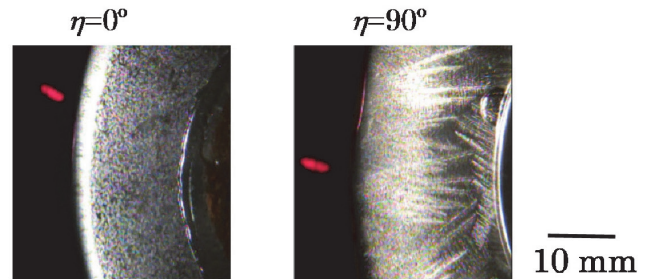


図10 回転軸角度の違いによる凝固組織の違い
 $\eta = 0^\circ$: 横型遠心鋳造、 $\eta = 90^\circ$: 縦型遠心鋳造 $n=250\text{rpm}$

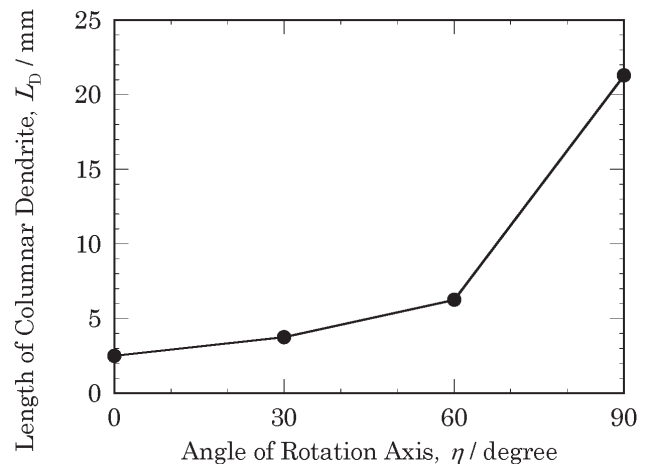


図11 回転軸角度と柱状晶長さとの関係 (250rpm)

小さくなるため等軸晶化を抑制したと判断できます。そして、 $\eta = 90^\circ$ になれば重力加速度の影響はなくなるため、等軸晶生成が完全に抑制されたと理解できます。

4 さいごに

「遠心力を受けながら凝固すること」は面白いに違いないという、全く個人的な興味で始めた実験でした。前章で紹介したように、多くのことがわかりました。個人的に最も面白いと思ったことは二つあり、1つ目は固液共存相の振動現象です。鋳型回転数を上昇すれば重力加速度の影響は小さくなりますが、決してゼロにはなりません。液相がある限り、小さくはなりますが等軸晶の振動が観察されましたので、注意が必要です。2つ目は遠心分離現象です。凝固中に生成した等軸晶は液相よりも5%程度密度が大きいですが、外側から凝固が進んできており、移動できるスペースが限られるため、明瞭な外側への移動現象は観察できませんでした。一方、凝固界面で発生した気泡は内側の方が固相率は低いので、自由表面への移動が観察できました。

さて、このようなことがわかって、鋳鉄管の製造現場で役に立つのでしょうか？「回転数は可能な範囲で高い方がよいだろう」や「肉厚のパイプの方が作りやすいだろう」などは可視化実験から推測できる操業指針ですが、製造現場ではこれらのことは既に何年も前から経験的につかんでおられたことと想像します。これらの経験知が、完全に後追いではあっても、一連の可視化実験から理論的あるいは現象論的に説明できるのであれば、研究をしてきた者にとって非常にうれしいことです。また鉄管製造に限らず、あらゆる種類の遠心鋳造プロセスの理解や発展にこれら一連の可視化実験が少しでも寄与できるのであれば、関与した者として望外の喜びです。

参考文献

- 1) 屈尺生：鉄と鋼, 3 (1917), 1013.
- 2) 谷山榮介：鉄と鋼, 10 (1924), 802.
- 3) 谷山巖：鉄と鋼, 19 (1933), 449.
- 4) 松浦春吉：鉄と鋼, 21 (1935), 458.
- 5) 谷村熙：鉄と鋼, 25 (1939), 559.
- 6) 宮下格之助：鉄と鋼, 57 (1971), 696.
- 7) 河原英麿：鉄と鋼, 57 (1971), 761.
- 8) 本田順太郎：鉄と鋼, 69 (1983), 507.
- 9) 中川義弘, 橋本隆, 片山博彰, 森川長：鉄と鋼, 74 (1988), 1993.
- 10) 江阪久雄, 平本潤一, 宮原翔太, 徳差圭, 篠塚計：鉄と鋼, 97 (2011), 369.
- 11) 江阪久雄, 片岡佳将, 篠塚計：鉄と鋼, 101 (2015), 488.
- 12) 江阪久雄, 坪根誠一郎, 宮田寛之, 渡辺大起, 金子紘土, 河合康輔, 篠塚計：鉄と鋼, 103 (2017), 763.
- 13) 山本昌宏, 成田一人, 宮原広郁：鉄と鋼, 99 (2013), 72.
- 14) 江阪久雄, 徳差圭, 篠塚計：鉄と鋼, 99 (2013), 149.
- 15) 鈴木悠, 岩井一彦：鉄と鋼, 99 (2013), 156.
- 16) 鈴木悠, 岩井一彦：鉄と鋼, 99 (2013), 161.
- 17) 平田直哉, Y.M.Zulaida, 安斎浩一：鉄と鋼, 99 (2013), 167.
- 18) 姜一求, 大中逸雄：鋳造工学, 69 (1997), 119.
- 19) 姜一求, 大中逸雄：鋳造工学, 69 (1997), 240.
- 20) 姜一求, 大中逸雄：鋳造工学, 69 (1997), 815.
- 21) 例えば M.E. Glicksman, R.J. Schaefer and J.D. Ayers : Metall. Trans A, 7 (1976), 1747.
- 22) H. Esaka and W. Kurz : J. Cryst. Growth, 72 (1985), 578.
- 23) 江阪久雄, 田村学：鉄と鋼, 86 (2000), 252.
- 24) 江阪久雄, 藤田香奈, 大門博康, 田村学, 篠塚計：日本金属学会誌, 64 (2000), 1206.
- 25) 江阪久雄：ふえらむ, 24 (2019), 348.
- 26) D.B. Spencer, R. Mehrabian and M.C. Flemings : Metall. Trans., 3 (1972), 1925.

(2020年3月2日受付)