



私の論文

／ 今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

可視化実験の二面性 Two Aspects in In-situ Observation

江坂久雄
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

ふえらむの「私の論文」に執筆できる機会を得た。対象になる論文は第81回俵論文賞をいただいたもので、遠心鋳造プロセスを可視化実験に基づいて解析したものである。金属の凝固に近い透明有機物を用いた遠心鋳造時の凝固現象の可視化実験そのものは10年以上続けており、私たちのグループから鉄と銅に初めて関連する論文¹⁾が掲載されたのは2011年である。今回の対象論文ではそれまでの観察手法を大幅に改良し、高速度カメラを用いた観察によって現象に対する解析精度が格段に向上したことが受賞につながったものと考えている。

ここでは遠心鋳造プロセスの可視化実験を通して、この鋳造プロセスの特徴を明らかにできたと感じた時の「すっきりとした快感」を記述してみたい。また一方で、可視化実験等に潜んでいる危険な落とし穴について触れてみたい。

2 観察手法の大幅改善

私たちの遠心鋳造の可視化実験装置の特徴は観察の目としてのカメラが回転体上にあることである。そのため、特定の部位が凝固してゆく様子を継続して観察できる。また、カメラが回転体上にあることから、鋳型と相対運動するものを明瞭にピックアップできる。改造前の装置には1秒間に30コマ撮影できる(=30 frame per second, 30 fps) 通常のビデオカメラを搭載していた。照明を工夫すれば1コマ当たりのシャッター速度は1/5000秒程度にできた。1枚の「写真」

としては「瞬間」に近い画像が切り取れるが、2枚目の「写真」は1/30秒後の様子である。遠心鋳造のような比較的速い回転体では、特定の部位はこの1/30秒でかなり動いてしまう。具体的にどれくらいの角度のずれが生じるかは簡単な計算で求められる。その結果をFig.1に示す。fpsの値によらず、ずれ角度は回転数に比例して大きくなる。改造前によく実験していた250rpmの回転条件では、このずれ角の値は50°である。透明有機物を封入するガラスセルのサイズは直径100mmとしていたので、この回転条件では最外周に印加される遠心力の大きさは約3.5Gである。この回転条件では遠

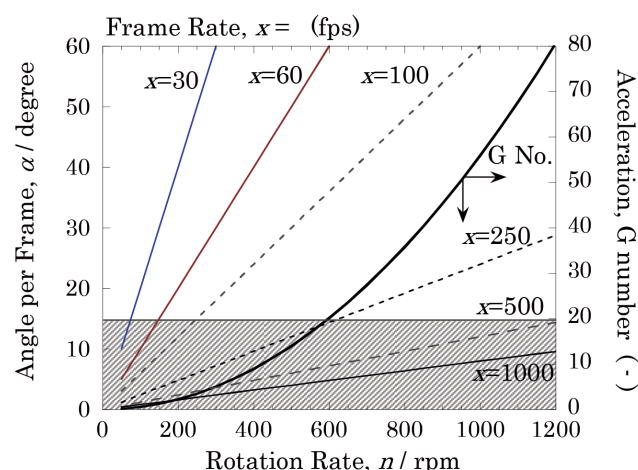


Fig.1 Relationship between rotation rate and angle per frame as a function of frame rate of a video camera. Acceleration at the periphery of the glass cell due to centrifugal force is also indicated.

* [今回の対象論文]

江坂久雄, 坪根誠一郎, 宮田寛之, 渡辺大起, 金子紘士, 河合康輔, 篠塚 計: 「高速度ビデオカメラによる横型遠心鋳造プロセスの直接観察」, 鉄と銅, Vol.103 (2017), No.12, pp.763-770 (第81回俵論文賞受賞論文)

心力が十分でないために、回転開始時には液相が崩れ落ちる寸前で、自由表面は大きく乱れていた。

実際の遠心鋳造では最外周での遠心力の大きさは50~150Gと言われている。その数値に合わせる必要はないが、約3.5Gという遠心力の下での凝固現象は実際の製造現場での現象を再現できていない可能性がある。可視化実験装置で回転数を上げて遠心力を大きくできないのは、カメラのfpsが小さいためであったので、高速度カメラの導入を検討した。その前段階として、遠心力の大きさを決定する必要がある。その時頼りになったのは、「ミクロ・マクロ偏析制御」研究会に参加していただいていた圧延ロールメーカーの技術者、研究者の人達であった。どこまでなら現象をシミュレートできるものかについては誰も明確な指針を持ってなかったが、50G以上であれば議論に耐えるであろうとの合意ができた。ガラスセルサイズは同一とすれば、この数値から装置の回転数の上限が決定できる。これからFig.1を利用して、コマずつのずれ角を小さく一具体的には15°未満一するために、500ないし1000fpsの高速度カメラが必要であることが決定できた。話は少しそれるが、日本鉄鋼協会の研究会では産業界の技術者とフランクに話せる雰囲気があったので、かなりデリケートな内容であっても話して互いに理解を深めることができた。このような産学が協同できる「場」は今後必要であると思う。

さて、このような経緯で、・1000fpsまでの撮影ができること、・映像記録時間に制約があることから、トリガー信号によって記録範囲が設定できること、・回転中は地上とは切り離されるため、バッテリー駆動方式であること、・30mm×40mm程度の領域を少し拡大して撮影できること、等々の条件を満足する高速度カメラを導入し、装置に組み込んだ。スペースに制約がある中で、バランス重視の考え方で実験装置を組み上げたため、従来のカメラの方向と変わったが、1000rpmまでト

ラブルなく回転できる実験装置が完成した。

3 高速度カメラによる観察で意外だったこと、すっきりしたこと

まず、30fpsと500fpsの撮影条件による違いを明確にするために250rpmの条件で比較を行った。対象は凝固途中に生成した等軸晶の動きである。結果をFig.2およびFig.3に示す。Fig.2に示した30fpsでも等軸晶の動きは追跡でき、回転と同期して相対運動していることがわかる。しかしそれらは50°毎の離散したデータであるため、プロット点は滑らかではなく、周期やピークの位置の正確な値は不明瞭であった¹⁾。それに対し、Fig.3に示した500fpsの映像から求めた等軸晶の軌跡は非常に滑らかであり、周期やピーク位置の正確な読み取りが可能であった。これらから高速度カメラの優位性は明瞭であった。なお、前述の通り、カメラの設置位置、ガラスセルや記録のタイミングが異なるために、縦軸で示す等軸晶位置の具体的な値は異なっている。

搭載した高速度カメラの機能が目標通り確認できたため、印加する遠心力を大きくすると何が変わるかについての可視化実験の準備が整った。生成した等軸晶をトレーサー粒子と見立てて、固液共存相の流動状態を評価した例をFig.4に示す。印加する遠心力が大きいほど（つまり、回転数が大きいほど）、円周方向にも半径方向にも等軸晶の動きは小さくなるのが明瞭にとらえられた。また、等軸晶の円周方向の振動の周期は1000rpmまでの実験の範囲内では、回転と完全に一致していることが確かめられた。

ところで、凝固状況を詳しく観察すると、回転数に依存して次のような興味深い現象が明らかになった。従来から横型遠心鋳造での通常の凝固組織は柱状晶と等軸晶から構成

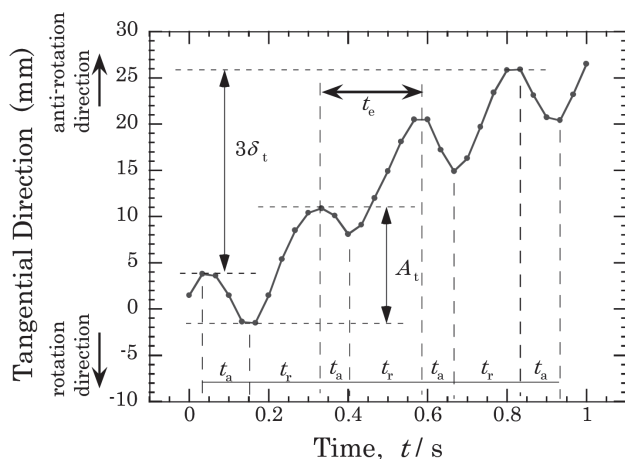


Fig.2 Movement of a certain equiaxed grain in tangential direction at a rotation rate of 250 rpm. Recording rate was 30 fps.

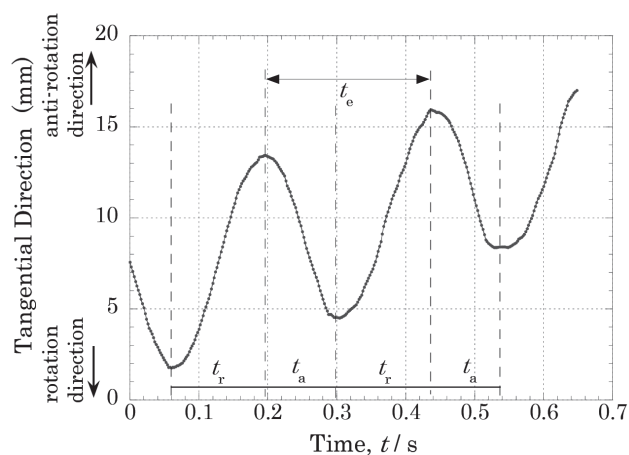


Fig.3 Movement of a certain equiaxed grain in tangential direction at a rotation rate of 250 rpm. Recording rate was 500 fps.

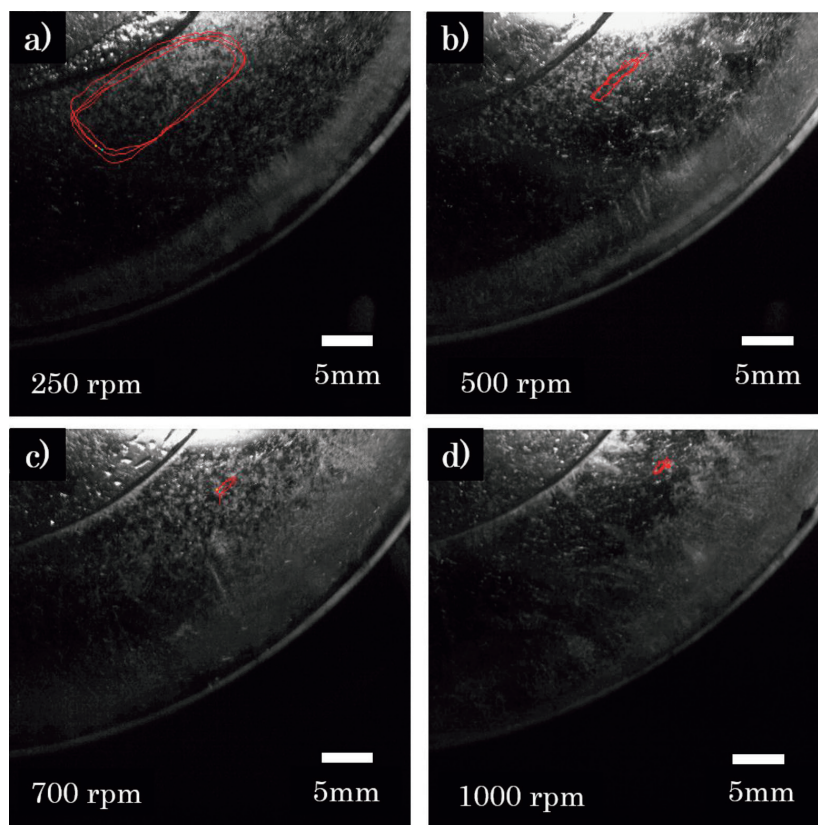


Fig.4 The loci of oscillation of equiaxed grain as function of rotation rate.
a) 250 rpm, b) 500 rpm, c) 700 rpm and d) 1000 rpm.

されることがわかっている¹⁴⁾。今回Fig.5に示すように、回転数を大きくすると柱状晶は長く成長することが明らかになった。横型遠心铸造プロセスでの等軸晶は、いくつか提唱されている機構の中で、液相または液相+固相の混相の流動による柱状デンドライトの分断により生成していると考えられる。しかも横型遠心铸造では回転ごとに方向が逆転するため、流動の方向変化する時の加速度が最も効果的ではないか、そして回転数が大きくなるほどこの値は大きくなると考えていたので、回転数が大きいほど等軸晶化が促進されるのではないかと推測していた。ところがFig.5に示したデータはこの仮説と逆の結果であり、実に意外であった。これは液相あるいは混相の単純な流れのみが等軸晶生成の主な機構ではないことを示していた。

前に、250rpmの回転初期には液相が崩れ落ちる寸前であると記述した。実際、従来の250rpmの実験を30fpsで撮影している時には、回転初期だけでなく凝固がある程度進んでも自由表面が乱れていることには気が付いていた。しかし、30fpsの撮影条件では撮影箇所が50°ずつずれ、液面の形状が異なり、前後のスナップショットと重ねられなかったために、この「乱れ」をうまく定量化できなかった。

高速度カメラの導入後、混相の厚みの変化が自由表面の

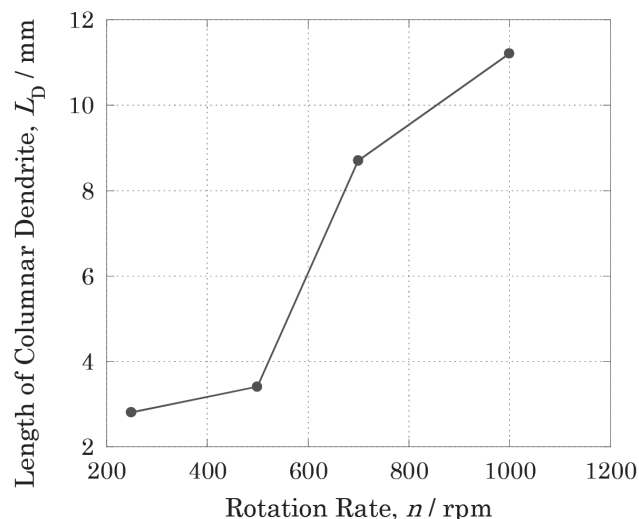


Fig.5 Relationship between rotation rate and the length of columnar dendrite.

「乱れ」を表現する指標になりうると考え、データを解析した。その結果をFig.6に示す。この図には回転中のどの位置の厚みデータであるかわかるように、回転の最下点から一回転分の変化として表示した。これから次の2点が明らかに

なった。①回転数が大きくなると厚み変化は小さくなる。②最上点の少し手前で最も厚くなり、最下点付近で最も薄くなる。これらの厚み変化のメカニズムは以下のように考えられる。混相の部分は鑄型とは独立しているの、鑄型の下降時には重力加速度の影響で加速され、鑄型の回転より進み、質量保存則から厚みが薄くなる。一方、鑄型の上昇時には減速されるため、鑄型の回転よりも遅れ、厚くなる。これから鑄型回転よりも進む/遅れるが円周方向の動きに対応し、混相厚みが厚くなる/薄くなるが半径方向の動きに対応するこ

とがわかる。鑄型回転が大きくなるほど下向きの重力加速度の影響が相対的に小さくなるため、円周方向、半径方向の変化は両方とも小さくなる。これから Fig.4 に示した等軸晶の動きが定量的にも説明できた。

混相厚みは回転数が小さいほど定常ではなく、回転ごとに異なる様相を示す。例として、250rpm の時の3回転分の変化を Fig.7 に示す。崩れ落ちる傾向の見られる最上部直前の部分で混相厚みは最大値を取るが、その挙動は回転ごとに違っており、非常に乱れていることを示している。繰り返しになるがこの乱れは回転数が大きくなれば小さくなり、物質保存則から導かれる単純な厚みの変化だけに変わってゆく。円周方向と半径方向の回転タイプの流動によっても柱状デンドライトの溶断もしくは分断による等軸晶化は促進されるが、それにも増して重要なのは表面流れの乱れである。これが顕著なのは回転数の比較的小さい場合であるが、表面流れの乱れが内部に伝わるために柱状デンドライトの分断に大きく寄与する。そして、この乱れが回転数の上昇とともに小さくなるために、表面乱れによる等軸晶化は急激に衰退する。これらから柱状デンドライトの溶断あるいは分断に作用する総和としての流動は鑄型回転数が小さいほど大きいと判断できる。それぞれの現象が互いにつながった時、「回転数アップにより自由表面での乱れが小→内部での流動が小→固液界面での流動が小→等軸晶化が小」、というストーリーがはっきりして、非常にすっきりとした論理展開になったと感じた。横型遠心鑄造での凝固現象の回転数依存性を明瞭にできたと思う瞬間であった。

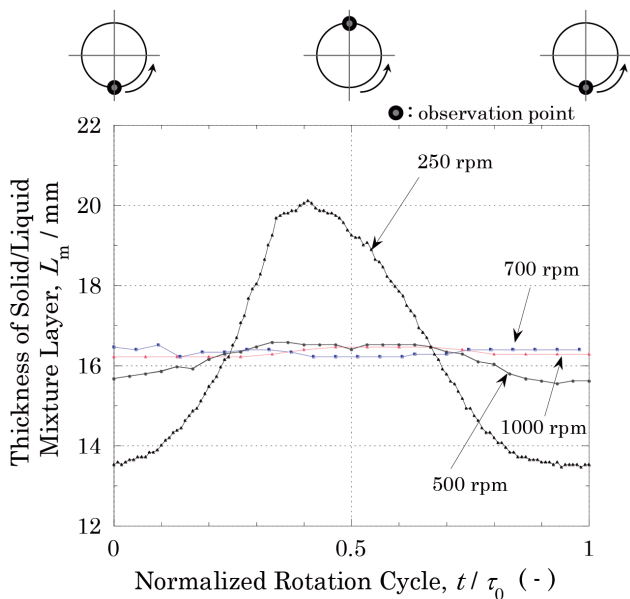


Fig.6 Relationship between thickness of solid/liquid mixture layer and the normalized rotation cycle as a function of rotation rate.

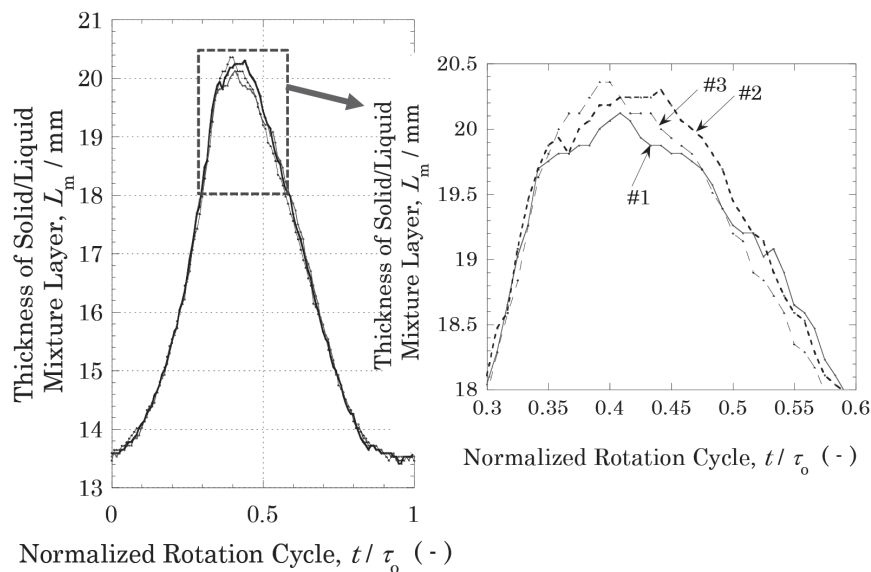


Fig.7 Change of solid/liquid mixture layer thickness in normalized rotation cycle for three rotations at a rotation rate of 250 rpm.

4 注意すべきこと

可視化実験の良い点は、目で見て直ちに理解できることである。また、反応プロセスが比較的容易に素過程に分離できることである。百聞は一見に如かず、という。動画を説明しながら見てもらおうと、ほとんどの場合ほぼ瞬時に理解してもらえる。

そのため、可視化実験をしている研究者は映像を見せることによって理解してもらえることが多いことから、「見たらわかるでしょう?」と往々にして考えがちなのではなかろうか。書き言葉でうまく説明する、分かりやすい図にするなどの作業を手抜きしがちであるように感じる。特に、その内容を論文にして理解してもらうには、表現を工夫しなければならない。今回のように、乱れている/乱れが少なくなった、動いている/動きが小さくなったなど、時間によって変化するもののその変化が比較的小さい場合は特に注意が必要だ。その結果はどうだったであろうか。例えば、横型遠心鑄造の場合は、回転のどこでどのようにふるまっているのかを表現する必要があった。そのため回転の天(最上部)と地(最下部)を明示するための工夫がFig.6の上につけた補助円である。最上部の少し手前で混相の厚みが最大になることを強調したかったのだが、私たち著者の意図通りに伝わったであろうか?

5 さいごに

クラシカルなテーマをクラシカルなアプローチではあるが、丁寧に扱うことにより新しい知見を見出した内容の論文はすばらしい。一方、実験方法に新しいツールを導入して、解析・分析精度を大幅に向上させたことによって新しい知見を見出した内容の論文もすばらしい。今回論文賞をいただいた私たちの論文は後者に分類できていると思っている。論文賞という観点で前者、後者を比較すると、個人的な印象では

あるが後者の方が受賞数は多いように思える。しかし、新しいツールを適用しただけで、新しい知見なり、先導するアイデアが提示されていないとだめだと思う。今回は実験事実としていろいろのことを明らかにできたと思っているが、それらのことを認めていただいたと信じたい。

とはいえ、やはりこの論文の一番のポイントは、1000rpmまで回転できる装置に、1000fpsまで撮影できる高速度カメラを搭載したことにある。最終的に実験装置を構築し、それを責任もって実験したのは私たちである。しかし、高速度カメラの撮影のためのレンズ系やトリガースイッチのノイズ対策に多くのアドバイスをいただいたカメラメーカーの技術者の方々、1000rpmで回転する装置の骨格部分について、どのように搭載するかもわからないまま作っていただいた製作所の面々、さらにいろいろなパーツを醸装するための回転部分の骨組みを設計変更ごとに作っていただいた工務店の方々、など多くの人に多大な協力をいただいた。そして、何よりも日本鉄鋼協会の研究会の研究費のおかげで、文字通り世界で唯一と言える実験装置を構築できた。そして実験方法や実験条件については研究会委員の方々に貴重なアドバイスをいただいた。この場を借りてすべての関係機関の皆様にお礼を申し上げるとともに、ここで得られた知見が遠心鑄造法を利用して作られる圧延ロールをはじめとする製品の品質向上に寄与できることを祈ってやまない。

参考文献

- 1) 江阪久雄, 平本潤一, 宮原翔太, 徳差圭, 篠塚計: 鉄と鋼, 97 (2011), 369.
- 2) 江阪久雄, 徳差圭, 篠塚計: 鉄と鋼, 99 (2013), 149.
- 3) 江阪久雄, 片岡佳将, 篠塚計: 鉄と鋼, 101 (2015), 488.
- 4) 本田順太郎: 鉄と鋼, 69 (1983), 507.

(2020年11月30日受付)