遠心鑄造における等軸晶挙動に及ぼす回転軸の傾きの影響

江坂 久雄^{1)*}・徳差 圭²⁾・篠塚 計¹⁾

Effect of Inclined Rotation Angles on The Motion of Equiaxed Grains in Centrifugal Casting

Hisao ESAKA, Kei TOKUSASHI and Kei SHINOZUKA

Synopsis : In order to understand the role of angle of rotation axis, experimental work using organic substance has been performed. One of the advantageous points of the experimental equipment is that visual point (=the video camera) can be rotating with the glass cell, in which organic material was filled. In-situ observation has been carried out at the rotation rate of 250 rpm, changing the angle of rotation axis (η) at the interval of 30°, defining 0° as being horizontal to ground.

In case of $\eta < 90^\circ$, the equiaxed grains formed in the middle of solidification process. Equiaxed grains oscillated with respect to the mold wall back and forth in accordance with rotation. Amplitude of oscillation decreased with increasing η . Equiaxed grains also travelled backward with respect to the rotation. Travelling length per revolution decreased with increasing η . Since the contribution of gravitational acceleration to the movement of solid/liquid mixture decreases with increasing η , the turbulence of the surface of liquid phase decreases with increasing η .

In case of $\eta = 90^\circ$, the typical columnar dendrites grew from the mold and no equiaxed grains formed. The liquid phase is completely stabilized by centrifugal force, because the effect of acceleration due to gravity vanishes in this condition.

Key words: centrifugal casting; gravity; equiaxed grain; macrosegregation; in-situ observation.

1. 緒言

遠心鑄造プロセスは遠心力によって回転する円筒状の鑄型に熔融金属を流し込み、熔融金属が遠心力で鑄型に押し付けられながら凝固することから、パイプ状のニアネット製造技術として広く適用されている¹⁾。遠心鑄造法には回転軸がほぼ水平である横型遠心鑄造法と回転軸がほぼ垂直である縦型遠心鑄造法の2種類がある。これらは主として製品のサイズによって使い分けられており、比較的長尺の製品に対しては横型遠心鑄造法が用いられている。また、横型遠心鑄造法においても、熔融金属の供給方法にも依存するが、回転軸を少し傾けた方式も広く採用されている。

横型遠心鑄造プロセスで製造した鑄片にはラミネーション偏析と呼ばれるバンド状のマクロ偏析が発生することが知られている²⁻⁴⁾。これは鑄造中に発生する等軸晶の挙動および分布が重要であると考えられている。そこで、前報⁵⁾において、透明有機物を用いて横型遠心鑄造プロセスの可視化実験を行ったところ、生成した等軸晶が鑄型の下降時には鑄型回転よりも進み、鑄型の上昇時には鑄型回転よりも遅れるという、特異な挙動をしていることが明らかになった。これは遠心力による加速度とは別に、常にかかっている重力加速度が原因であると考察した。すなわ

ち、鑄型の下降時には等軸晶は重力加速度によって下向きに加速されるのに対し、鑄型の上昇時には逆に減速されるために、等軸晶は上記のような複雑な挙動をとったものと考えられる。

重力加速度の方向に着目すると、回転軸と重力加速度の方向が直交するのが横型遠心鑄造法であり、この両者が平行であるのが縦型遠心鑄造法であると言える。したがって、横型と縦型では凝固プロセスに対する重力加速度の影響が大きく異なると予想される。しかし、遠心鑄造プロセスにおいて、組織形成過程や欠陥の生成メカニズムの解明を試みた研究例はあるものの²⁻⁶⁾、凝固プロセス、特に等軸晶の生成およびその挙動について、横型遠心鑄造法と縦型遠心鑄造法での差異について詳細に論じた報告は見当たらない。

そこで本研究では、前報で述べた横型遠心鑄造プロセスの可視化実験装置⁵⁾を改良し、回転軸の地面に対する角度を変更できる構造とした。これにより、遠心鑄造プロセスにおける重力加速度の寄与について定量的に解析を行った。

2. 実験方法

前報⁵⁾で述べたように、遠心力を受けながら凝固する現

平成24年6月4日受付 平成24年7月9日受理 (Received on Jun. 4, 2012; Accepted on Jul. 9, 2012)

1) 防衛大学校機能材料工学科 (Department of Materials Science and Engineering, National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu Yokosuka Kanagawa 239-8686)

2) 防衛大学校学生 (Undergraduate student, National Defense Academy)

* Corresponding author: E-mail: hesaka@nda.ac.jp

DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.99.149>

Fig. 1. A schematic illustration of an experimental equipment for in-situ observation of centrifugal casting²⁾.

象を透明有機物を用いて直接観察できる実験装置を開発した。その模式図を Fig.1 に示す。最大の特徴は、視点であるビデオカメラを回転系に取り付けたことである。常に同一視野を観察できることから、回転と同期する物体は画像の中では静止するのに対し、回転と同期しない物体は画像の中で動く。本研究では装置全体を傾斜できる機構を新たに加え、Fig.2 にビデオカメラとガラスセルの位置関係を示したように、回転軸角度 (η) を水平 (0°) から垂直 (90°) まで 30° 間隔で変更できる構造とした。これにより、回転するガラスセルに作用する重力加速度の方向を 30° 間隔で変更した。

具体的な実験方法は前報⁵⁾ に記述した通りである。直径 100 mm、間隔を 1.3 mm としたガラスセルにサクシノニトリルー水合金を約 50% 注入し、完全に密封した。合金を溶融後、ガラスセルホルダーに固定し、所定の回転数で遠心力を印加する。合金融液は遠心力によりガラスセルの外周部に押し付けられるが、あらかじめ冷却しておいたガラスセルホルダーの効果により外周部から中央部への指向性凝固が実現する。液相流動のために凝固途中で生成する等軸晶の挙動に着目して、解析を行った。なお、撮影は 1 秒間に 30 フレーム撮影できるハイビジョンカメラを使用し、シャッター速度は $1/2000$ 秒とした。1 フレームずつの移動角度が大きくなると明瞭な観察ができなくなるため、ガラスセルの回転数は 250 rpm とした。回転の最上部と最下部には赤および緑のレーザーポインターを照射し、ビデオカメラに写し込むことにより、撮影位置を特定した。また、等軸晶の挙動は画像解析ソフトを用いて、約 2 秒間にわたって解析した。

3. 実験結果

3.1 凝固の進行

それぞれの回転軸角度について、凝固の進行に合わせて示したスナップショットを Fig.3 に示す。上から $\eta = 0^\circ$,

Fig. 2. A Schematic view of an experimental equipment for analyzing the effect of rotation axis. The angle of rotation axis (η) changed from 0° (=a), horizontal centrifugal casting) to 90° (=d), vertical centrifugal casting) at an interval of 30° .

30° , 60° , 90° であり、いずれも赤のレーザーマーカが写っていることから、それぞれの角度において最上部に対応する。なお、 $\eta = 90^\circ$ は水平面内を回転しているため、上下は関係ないが、他の画像と同一とした。

$\eta = 0^\circ$ の場合は、以下のように推移した。a) では外周部から白く観察できる柱状晶が成長している。液相中には等軸晶は見られない。内側の液相表面は赤の矢印で示したように、一様な円弧ではなく、大きく乱れていることがわかる。b) は等軸晶が発生した直後のシーンである。多くの微細な等軸晶が生成した様子が観察できる。なお後述するが、他の回転軸角度と比較すると、 $\eta = 0^\circ$ では等軸晶の数が多く、サイズも小さい。この時も液相表面は a) と同様

Fig. 3. Results of in-situ observation of centrifugal casting at a rotation rate of 250 rpm as a function of angle of rotation axis. Positions of these snap shots are top of the ration.

に大きく乱れている。等軸晶はガラスセルの回転に同期して、この写真の中では主として上下に振動していた。c) では等軸晶が増加し、液相内全体に分布した時点のスナップショットである。この時、等軸晶は全体として振動していた。液相表面の乱れはb) に比較して少し軽微になっていた。d) は凝固の末期に対応し、等軸晶の振動は小さくなり、液相表面の乱れはほとんどなくなり、液相表面の形状はほぼ円形となった。なお、 $\eta = 0^\circ$ の場合は、前報⁵⁾ と同一条件であり、等軸晶および液相表面の挙動等、良い一致を示した。

$\eta = 30^\circ$ の場合は次のように変化した。a) では柱状晶のみである。液相表面は赤の矢印で示したように乱れている。しかし、 $\eta = 0^\circ$ でのa) と比較すると、乱れは軽微になっていると判断できる。b) は等軸晶が生成した直後のスナップショットである。特に写真の下方にいくつかの等軸晶が観察できる。液相表面の形状はa) のそれとほとんど同一であり、乱れていた。 $\eta = 0^\circ$ の場合と比較すると、等軸晶のサイズはわずかではあるが、大きいように見受けられる。c) は液相内全体に等軸晶の分布が広がった時点のシーンである。ここでも等軸晶は全体としてみれば図中で上下に振動していた。この時点では液相表面の形状はほぼ円形

とみなせ、乱れは小さくなったと判断できる。d) は凝固末期のものであり、等軸晶の動きはほとんどなくなり、液相表面の動きもほぼ停止して、その形状は円形であった。

$\eta = 60^\circ$ の変化は以下の通りである。a) は等軸晶が発生する直前のスナップショットであり、優勢な柱状晶が見られる。液相表面の形状はほぼ円形であり、液相表面の乱れは少ないと判断できる。b) は等軸晶が生成した直後のものであり、2-3個の等軸晶が柱状晶前方にみられる。そのサイズは黄色の矢印で示したように、 $\eta = 0^\circ$ や $\eta = 30^\circ$ の場合と比較すると明らかに大きいものがあつた。また生成した等軸晶の数は少ない。等軸晶は図中では回転に同期して上下に振動していたが、その動きは $\eta = 0^\circ$ や $\eta = 30^\circ$ と比較すると小さい。c) は液相全体に等軸晶が分布した時点の画像である。大きな等軸晶もみられ、サイズにばらつきがあることがわかる。内側の液相表面の形状はほぼ円形であり、乱れは非常に少ないと言える。d) は凝固末期の状態である。等軸晶の振動は少なく、液相表面の形状もほぼ円形であった。

$\eta = 90^\circ$ の変化は以下の通りである。a), b) とともに外周部から成長する柱状晶が優勢に発達していることがわかる。外側での成長方向と変化ないことから、初期にガラス

セルの外周部で核生成した際の、それぞれの優先成長方向に成長したと思われる。回転中心などの特定の方向に向かって成長しているわけではない。液相の自由表面は極めて安定しており、まったく振動がなかった。また、成長が進んでいる部位や遅れている部位があった。c) では外周からの柱状デンドライトがさらに成長した。また、液相表面から外周部に向かって成長したデンドライトが認められる。d) では外周部から成長した柱状デンドライト、内部の自由表面から成長したデンドライトの両者がぶつかり、ほぼ凝固末期の状態である。 $\eta = 90^\circ$ では今回の実験の範囲内では等軸晶は発生しなかった。

各回転軸角度において等軸晶生成直後のb) のスナップショットを比較すると、 η が小さいほど等軸晶サイズは小さく、数は多いことがわかる。また、b) の段階での柱状晶を比較すると、 $\eta = 0^\circ$ と $\eta = 30^\circ$ ではあまり長さに差は認められないが、 $\eta = 60^\circ$ では明らかに柱状晶が長いことがわかる。

液相表面の乱れについては、それぞれの角度のa) を比較すると、 η が大きいほど乱れが小さくなった。そして、 $\eta = 90^\circ$ では完全に液相表面は静止した。また、 $\eta = 90^\circ$ を除いて、液相表面の乱れは凝固が進むにつれて小さくなり、完全凝固すれば自由界面は完全に静止した。

Fig.3d) に黄色の円で囲んだ領域はスナップショット上で暗く見える領域である。これらについては4・4で後述するが、固液共存域内で液相の多い部分に対応する領域である。

3・2 等軸晶径

等軸晶の生成後、液相内全体に等軸晶が分布する間に等軸晶のサイズを測定した。この時点で測定したのは等軸晶が液相中に単独で存在し、重なり合うことによる測定誤差を避けるためである。1枚のスナップショットから約40個の等軸晶を選び、その最も長い径を測定した。回転軸角と等軸晶径 (d) の算術平均との関係をFig.4に示す。 $\eta = 0^\circ$ の場合、1.16mmと微細であるのに対し、 $\eta = 30^\circ$ 、 $\eta = 60^\circ$

Fig. 4. Average diameter of equiaxed grains at the first stage of formation of equiaxed grains as a function of angle of rotation axis.

と、回転軸角度が大きくなるにしたがって、等軸晶径が大きくなることが明らかになった。

約40点の測定点の標準偏差を求め、回転軸角度との関係を図示したものがFig.5である。回転軸角度が大きくなると、等軸晶径のばらつきが大きくなることがわかる。 $\eta = 0^\circ$ では標準偏差は非常に小さく、等軸晶径のばらつきは少ないと判断できる。

3・3 等軸晶の挙動

3・1で記述したように、凝固途中で生成した等軸晶は回転に応じて運動している。その動きは半径方向と円周方向とに分離できる。半径方向はFig.3での表示方法では図の左右方向、円周方向は上下方向に対応する。前報で論じたように⁵⁾、運動の重要性からここでは円周方向の運動を分析した。

等軸晶が発生した直後の、柱状晶前面に近い部分にあった等軸晶を選定し、その動きを2秒間にわたって追跡した。その結果をFig.6～8に示す。Fig.6は $\eta = 0^\circ$ の場合であり、注目した等軸晶が大きく移動して、観察視野から外れてしまったため、2秒未満のデータである。前報の結果とよく一致し⁵⁾、振動を繰り返しながら、徐々に縦軸の(+)の方向、すなわち、鋳型回転よりも遅れる方向に移動した。Fig.7, Fig.8はそれぞれ $\eta = 30^\circ$ 、 $\eta = 60^\circ$ の場合の等軸晶追跡データである。いずれも基本的にはFig.6と同様に、規則的な振動を繰り返しながら徐々に縦軸の(+)側に移動した。また、振動の周期は測定精度の範囲内で、いずれの回転軸角の場合も鋳型回転周期と一致していた。

前報⁵⁾と同様に、振動の振幅： A 、回転よりも遅れる方向への一回転あたりの移動距離： δ_c をFig.6のように定義し、それぞれの回転軸角について測定した。振動の振幅を回転軸角の関数として示したものをFig.9に示す。ここで、 $\eta = 90^\circ$ では等軸晶は生成しなかったが、振動の振幅は0として表示した。振幅は回転軸角の増加につれて一様に減少する。一回転あたりの等軸晶移動距離を回転軸角の関数

Fig. 5. Standard deviation of the diameter of equiaxed grains at the first stage of formation of equiaxed grains as a function of angle of rotation axis.

として表示したものをFig.10に示す。ここでも $\eta = 90^\circ$ では等軸晶は発生しなかったが移動距離は0として表示した。 $\eta = 0^\circ$ では回転の遅れる方向に大きく移動するのに対し、回転軸角が大きくなると、移動距離が急激に小さくなり、0に漸近することが判る。

Fig. 6. Oscillation of an equiaxed grain in tangential direction in case of $\eta=0^\circ$. The definitions of A_t and δ_c are also indicated.

Fig. 7. Oscillation of an equiaxed grain in tangential direction in case of $\eta=30^\circ$.

Fig. 8. Oscillation of an equiaxed grain in tangential direction in case of $\eta=60^\circ$.

4. 考察

4・1 重力加速度の回転軸角度依存性

回転する面内の重力加速度の影響は以下のように示せる。 $\eta = 0^\circ$ の場合、 $\eta = 60^\circ$ の場合を例としてFig.11に示す。この図は質点の円周方向の運動に影響する重力加速度のガラスセルの面内成分を示している。図から明らかなよ

Fig. 9. Change of amplitude of oscillation of equiaxed grain in tangential direction as a function of angle of rotation axis.

Fig. 10. Change in traveling length per revolution of equiaxed grain in tangential direction as a function of angle of rotation axis.

Fig. 11. Concept of partial gravitational acceleration along tangential direction as a function of angle of rotation axis.

Fig. 12. Concept of acceleration acting on a particle in centrifugal casting. Definitions of θ and ϕ are also indicated.

Fig. 13. Relation between θ and ϕ as a function of angle of rotation axis at a rotation rate of 250 rpm.

うに、重力加速度の面内成分 (g_η) は回転軸角 (η) を用いて次式のように示せる。

$$g_\eta = g \cos \eta \quad \text{..... (1)}$$

この式から明らかなように、重力加速度の面内成分は回転軸角が大きくなるにつれて小さくなり、 $\eta = 90^\circ$ 、つまり縦型遠心鑄造の場合には0になる。

4・2 等軸晶の挙動に対する回転軸角の影響

a) 等軸晶の振動

ガラスセル内の質点は遠心力による加速度と重力加速度の面内成分の二つの加速度を受ける。ここではこれら二つの加速度の合成ベクトルに着目し、その方向について検討を加える。考え方をFig.12に示す。 θ は質点の位置、 ϕ は合成ベクトルの方向であり、それぞれ頂点から反時計回りに測定した角度である。ベクトルの合成から、 ϕ は次式のように求められる。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{b \sin \theta}{b \cos \theta - g_\eta} \right) \quad \text{..... (2)}$$

Fig. 14. Relation between θ and $\phi - \theta$ as a function of angle of rotation axis at a rotation rate of 250 rpm.

ただし、 b は遠心力による加速度の大きさを、 $r\omega^2$ で示される。ガラスセルの最外周にある質点の動きを考えると、 $r = 0.05m$ として具体的な計算を行った。250rpmの場合、質点の位置が 0° から 360° まで変化する場合に、合成加速度の方向はFig.13のように変化する。 $\eta = 90^\circ$ では θ と ϕ の値は完全に一致するが、 η が 90° 未満の場合には回転軸角に応じて θ が 0° から 180° までは ϕ の方が大きく、 180° から 360° までは ϕ の方が小さくなる。これは下降する場合には回転よりも進み、上昇する場合は回転より遅れるという、相対運動を起こすことを意味する。

差を明瞭に示すために、 $(\phi - \theta)$ を縦軸にとった図をFig.14に示す。 $(\phi - \theta)$ のピークの値は η が増加するにしたがって小さくなることが明らかである。すなわち、質点の鑄型に対する相対運動は回転軸角が大きくなるにつれて小さくなる。これは回転が安定化することに対応する。そして $\eta = 90^\circ$ になると、相対運動は完全になくなり、鑄型回転と同期した動きになる。等軸晶の振幅はFig.9に示したとおり、回転軸角の増加と共に小さくなったが、これは上記のように回転軸角が大きくなるにしたがって、重力加速度の面内成分寄与分が小さくなるためであると結論付けられる。

b) 等軸晶の移動

鑄型下降時の加速度の上昇分と鑄型の上昇時の加速度の減少分は一致するので、回転軸角が 90° 未満の場合、質点は振動するが時間平均を取ると同一場所にとどまることが予想できる。しかし、実際にはFig.6～Fig.8に示したように、等軸晶は鑄型の回転よりも遅れる方向に移動した。これについては前報²⁾でも考察したが、液相表面の乱れ、つまり液相表面での波立ちの影響と考えられる。Fig.14に示したように、合成加速度の方向が半径方向からずれることにより、液相表面が乱れ、液相内に激しい流動が起こる。これにより運動エネルギーが消費され、固液共存部分が全体として鑄型回転には追従できなくなるため、鑄型回転よりも遅れると考えられる。また、この移動については鑄型

1回転あたりの移動距離により定量化したが、Fig.10に示したように、回転軸角が大きくなると小さくなった。回転軸角が大きくなると、Fig.14で示したように、合成加速度のずれが小さくなる。その結果、誘発される液相表面の乱れが小さくなり、等軸晶の遅れは回転軸角の増加によって小さくなったと理解できる。

撮影に用いたハイビジョンカメラの1フレーム毎の回転軸角が 50° と大きいために、液相表面の乱れの定量化は難しいが、回転軸角を大きくすると液相表面の乱れが小さくなることはFig.3a)のスナップショットに示したとおりであり、実験結果に一致している。

4・3 等軸晶生成に対する回転軸角の効果

ここまでの議論で、 $(\phi - \theta)$ の大きさが0でなければ液相表面の乱れを誘発し、液相内に流動が起こる。これにより柱状デンドライトの分断が起こり、等軸晶が生成すると考えられる⁷⁾。Fig.14に示したように、 $(\phi - \theta)$ の最大値が大きいほど、すなわち回転軸角が小さいほど、自由界面が乱れ、液相流動が激しくなり、早期に微細で均一な等軸晶が生成したと考えられ、今回の実験結果と一致する。また、回転軸角が小さいほど流動が激しいために、等軸晶径にばらつきが少なかったことも妥当と考えられる。なお、今回の実験の範囲では観察の倍率の関係から等軸晶の生成メカニズムを特定することができなかったが、遠心鑄造プロセスにおいては上記のように、液相流動によるデンドライト分断が有力と考えられる。

一方、 $\eta = 90^\circ$ では $(\phi - \theta)$ はFig.14に示したように0になり、鑄型と等軸晶との相対運動の駆動力はなくなるため、液相表面の乱れおよび液相内の流動はなくなると考えられる。Fig.3に示したように、柱状デンドライトがそれぞれの優先成長方向に成長し、特定の方向に配向しなかったことは、液相流動が皆無であったことを示している。また、等軸晶が発生しなかったことも液相は静止していたことを示しており、解析結果と実験結果はよく一致している。

4・4 遠心鑄造のスポット状偏析の生成

Fig.3の $\eta = 0^\circ$ 、 $\eta = 30^\circ$ 、 $\eta = 60^\circ$ でのd)に示した凝固末期のスナップショット中には、黄色の円で例示したような黒い領域が点在している。これは等軸晶の少ない部分、言い換えれば液相の多い部分である。この液相が多い部位は $\eta = 0^\circ$ 、 $\eta = 30^\circ$ 、 $\eta = 60^\circ$ のどの場合にも見られ、外周

部にも内周部にも存在した。凝固末期には等軸晶は互いに絡み合い、内部に液相を内包した剛体のようにふるまっており、円周方向に振動しても内包液相の形状はあまり変化しなかった。この液相部分が最終凝固まで残存すれば、サクシオンによって周囲の溶質を濃縮した液相を吸引し、スポット状偏析につながると予想される。しかし、その存在位置には規則性は現状では認められず、その特徴や形成過程についてはさらに検討を加える必要がある。

5. 結言

回転軸角(η)を変更した遠心鑄造プロセスの直接観察を、透明有機物を用いて行った。重力の方向の凝固組織形成過程や生成する等軸晶の挙動に関して検討し、以下の結論を得た。

- (1) η が小さいほど、早期に微細で均一な等軸晶が生成した。
- (2) 等軸晶は鑄型の回転に応じて円周方向に相対的に振動し、その振幅は η が小さいほど大きい。また、鑄型回転よりも遅れる方向に移動し、その移動量は η が小さいほど大きい。
- (3) $\eta = 90^\circ$ では外周部から柱状デンドライトが成長し、等軸晶は生成しなかった。
- (4) 回転中に質点を受ける加速度の半径方向からのずれは η に依存する。上記の結果は、 $\eta < 90^\circ$ では η が小さいほどずれは大きく、液相内流動が激しくなるため、また、 $\eta = 90^\circ$ ではずれがないため、液相内流動は皆無となるため、と考えられる。

文 献

- 1) A.Royer and S.Vasseur: *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol.15, ASM, Metals Park, Ohio, (1988), 296.
- 2) I.Kang and I.Ohnaka: *J. JFS*, **69** (1997), 119.
- 3) I.Kang and I.Ohnaka: *J. JFS*, **69** (1997), 240.
- 4) I.Kang and I.Ohnaka: *J. JFS*, **69** (1997), 815.
- 5) H.Esaka, J.Hiramoto, S.Miyahara, K.Tokusashi and K.Shinozuka: *Tetsu-to-Hagané*, **97** (2011), 369.
- 6) K.S.Keerthiprasad, M.S.Murali, P.G.Mukunda and S.Majumdar: *Metall. Mater. Trans. B*, **42B** (2011), 144.
- 7) K.A.Jackson, J.D.Hunt, D.R.Uhlmann and T.P.Seward, III: *Trans. Met. Soc. AIME*, **236** (1966), 149.