

# 過冷却固体面の浸漬過程における凝固シェル形成過程

Study of Formation Process of a Solidified Shell on a Supercooled Solid Surface  
Dipped into Melt Pool

西 尾 茂 文\*・稲 村 茂\*\*・永 井 二 郎\*  
Shigefumi NISHIO, Shigeru INAMURA and Niroh NAGAI

## 1. はじめに

連続鋳造や（双ロール法などの）直接製板においては、凝固材の表面性状が問題となっている。こうした凝固過程により形成される凝固材の表面性状は、冷却された移動固体面と融液とが形成する接触界線近傍における凝固現象と密接に関係していると思われる<sup>1)</sup>が、通常の金属融液では観察が容易でないため、発生機構に不明な点がある。そこで、本報告では、融液状態では透明であるが凝固すると白色となる流動パラフィンのプール中に、冷却された固体冷却面を一定速度で鉛直に浸漬してゆく際の凝固シェル形成過程の観察を行った。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置は、図 1 に示したように、試験液体を溜めている容器部、冷却面を含む凝固部、および凝固部駆動部よりなる。試験液体である流動パラフィン<sup>2)</sup>は、ガラス製の二重容器の内側容器に溜められ所定の温度に保持されている。

冷却面としては、図 2 に示したように平板状および円筒状冷却面を使用した。平板状冷却面（厚さ 3 mm、高さ 100mm、幅 40mm）は銅および SUS304 製平板であり、ベークライト製矩形容器の一側面に接着されており、容器内部に恒温槽より所定温度の冷却水を循環させることにより冷却面の初期温度設定を行った。円筒状冷却面（直径 50mm、肉厚 3 mm、高さ 100mm）は SUS304 製円筒の両端部をベークライト板により閉じたものであり、内部には恒温槽より所定温度の冷却水を循環させ、冷却面の初期温度設定を行った。平板および円筒状冷却面のいずれにも高さ方向の 3 カ所に冷却面を貫通する直径 0.5mm の挿入孔を設け、素線径 0.1mm の CA 熱電対を冷却面内側より差

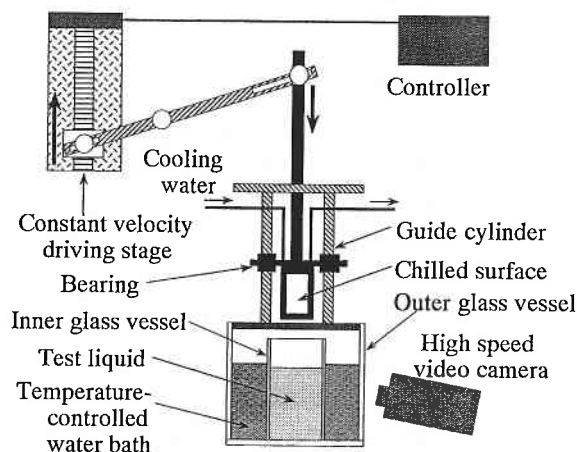


図 1 実験装置の概要

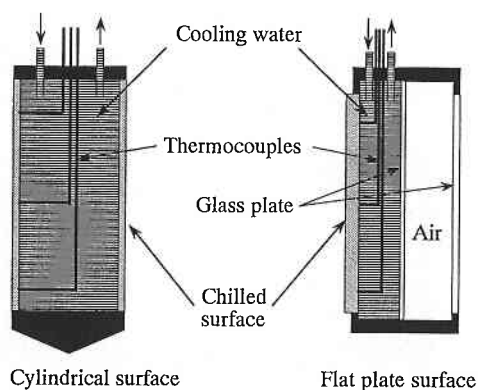


図 2 冷却面の概要

し込み、表面が平面となるよう挿入孔に半田を埋め込み、ペンレコーダにより冷却面初期温度と浸漬中の温度履歴の測定を行った。

この冷却面は、ステップモーターにより駆動される定速度移動ステージの移動量をリンク機構により拡大して鉛直

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部  
\*\*芝浦工業大学 工学部 学生

研 究 速 報

方向に駆動した。冷却面移動速度  $v$  は、高速度ビデオカメラにより測定した。本実験では、凝固部の浸漬により試験液体自由表面が上昇するので、 $v$  を試験液体自由表面と冷却面との相対速度に換算し、これを冷却面浸漬速度  $u$  とした。

実験では、冷却面を所定の浸漬速度で試験液体中に浸漬し、冷却面が試験液体中に完全に浸った状態で駆動を停止し、以後10秒程度の間凝固部を静止状態で保持した後に引き上げた。凝固実験に際しては、凝固状況を冷却面斜め下方および側面から高速度ビデオカメラ（毎秒500コマ）および CCD カメラにより撮影した。また、実験終了後、凝固シェルを冷却面から剥がし、凝固シェル表面（冷却面と接する面）の写真撮影を行うとともに顕微鏡による観察を行った。

2. 実 験 結 果

本実験において SUS304 製平板状冷却面に形成された典型的凝固シェル表面の正面からの撮影結果を、写真 1 ~ 4 に示した。ただし、各写真の横幅は冷却平板の幅40mm にほぼ等しく、また下方方向が浸漬方向であり、各写真中の黒線あるいは黒帯部分が凹み部分に、白い部分が冷却面に密着していた部分（凸部）にそれぞれ相当している。これらの写真に示されているように、本実験における実験条件（板材料、浸漬速度、冷却面初期過冷度および融液初期温度）では、いずれの場合においても、浸漬方向とほぼ直交する方向（つまり水平方向）に走る凹み部分が観察された。形成された凹部はその形状により、次のように大別される。  
 ①浸漬速度、冷却面初期過冷度がともに小さい写真1のように、ほぼ水平方向に互いに交差することなく形成されている2次元線状凹部（2D-L と略記）。②過冷度は

写真1と同様に小さいが浸漬速度が大きい写真2のように、方向が水平方向からやや傾斜して形成され冷却面中央部で干渉しあう3次元線状凹部（3D-L と略記）。③浸漬速度は写真1と同様に小さいが過冷度が大きい写真3のように、凹部の幅が太い2次元帯状凹部（2D-B と略記）。④過冷度および浸漬速度がともに写真1より大きい写真4のように、3次元帯状凹部（3D-B と略記）。これらの間の区分は定性的なものであるが、観察された凹部を上述のように4種に大別し、その出現領域を SUS304 製平板状冷却面について図3に示した。図より、冷却面初期過冷度および浸漬速度がともに小さい場合に形成される2次元線状凹部は、過冷度の増大とともに細線状から帯状へ、浸漬速度の増大とともに2次元から3次元へと移行す

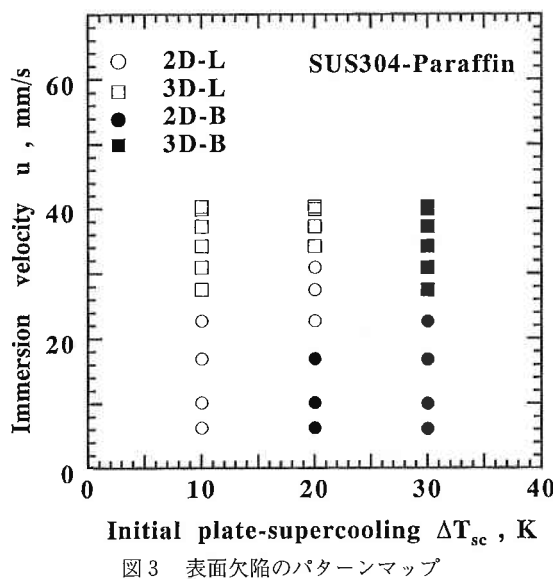


写真1 表面欠陥1 ( $\Delta T_{sc}=10K$ ,  $u=7.5mm/s$ )



写真2 表面欠陥2 ( $\Delta T_{sc}=10K$ ,  $u=32.6mm/s$ )

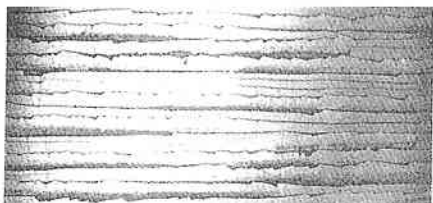


写真3 表面欠陥3 ( $\Delta T_{sc}=20K$ ,  $u=7.2mm/s$ )

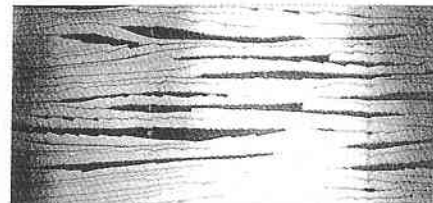


写真4 表面欠陥4 ( $\Delta T_{sc}=30K$ ,  $u=39.6mm/s$ )

ることがわかる。

次に、実験より得られた凝固シェル表面を幅方向に3分割し、各分割領域の中央部における凹部鉛直方向平均間隔  $S$  を測定し、それをさらに平均して凹部平均間隔  $S_m$  を求め、その典型的結果を図4に示した。図より凹部平均間隔の浸漬速度依存性は弱いことがわかる。また、図示はしていないがこの平均間隔の冷却面初期過冷度  $\Delta T_{sc}$ 、冷却面材料および冷却面形状への依存性も弱いことがわかった。

一方、写真5は、写真3のような二次元的な帯状凹部が出現する条件に近い条件における観察結果を示したものである。この観察より、以下の状況が起こっていることがわかる。  
 ①冷却面の浸漬とともにメニスカスが形成される(写真5の(A))。  
 ②メニスカス界線近傍に局部的凝固部が現れる((B))。  
 ③局部的凝固部が、下方の既形成凝固シェルとの間に一定区間の凝固遅れ部を介しながらメニスカス界線に沿って水平方向に伝播を開始する((C)~(F))。  
 ④局部的凝固部の伝播が冷却面の幅方向他端に至り((G))、しばらくすると再び①の状況が現れる。また、同様の観察によれば、浸漬速度が大きくなると、冷却面幅方向の一方の端から伝播し始めた局部的凝固部が他端に至る前に他端から局部的凝固部の伝播が開始される場合や、冷却面幅方向端部以外からも局部的凝固部が発生し、これがメニスカス界線に沿って伝播する場合など、複数の局所凝固部の伝播が干渉し合うことが観察された。なお、こうした状況は、円筒状冷却面でも同様に観察された。すなわち、本研究で対象としたメニスカス界線近傍における凝固シェルは、凝固シェルが鉛直方向に連続して成長してゆくことにより形成されるのではなく、メニスカス近傍における局

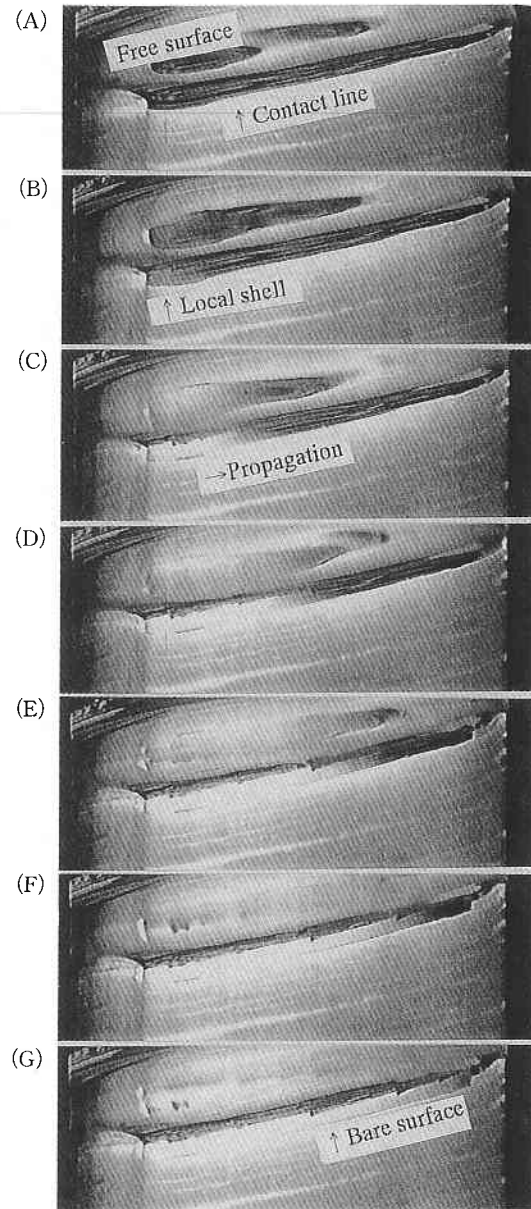


写真5 接触界線近傍における凝固シェル形成過程(写真コマ間隔は1/60秒)

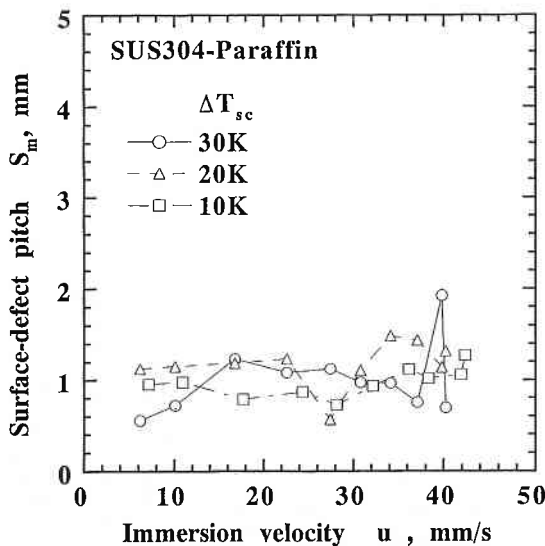


図4 表面欠陥の平均ピッチ

所的凝固部の発生とそのメニスカス界線方向伝播による帯状初期凝固シェルユニットの形成を1サイクルとする、帯状凝固シェルユニット形成過程の鉛直方向への積み重ねの結果として形成されると言える。

そこで、上述の凝固遅れ部の発生と凝固シェル表面の凹部との関係を調べるため、高速度ビデオ観察より、冷却面幅方向中央部を単位時間に通過する局部的凝固部の伝播回数  $n$  を測定し、 $S_p = u/n$  として伝播の冷却面鉛直方向平均間隔を求めた。この結果を、SUS304製平板状冷却面につ

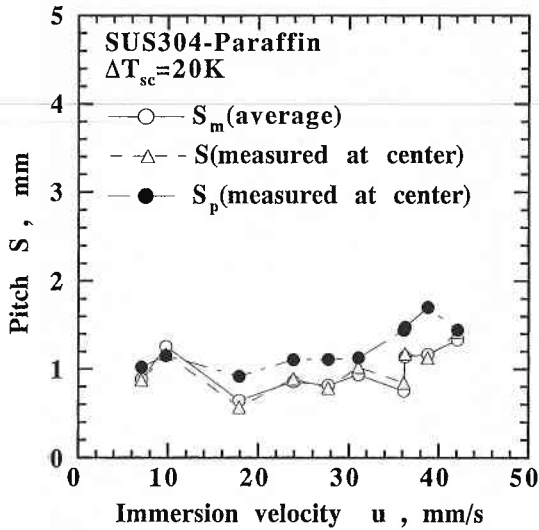


図5 表面欠陥平均ピッチ  $S_m$  と局所的凝固シェル伝播平均ピッチ  $S_p$

いて図5に示した (図5の  $S$ ,  $S_m$  および  $S_p$  は同一実験から得られた実験結果である)。図より、伝播平均間隔  $S_p$  と凹部平均間隔  $S_m$  とは、良好な一致を示していることがわかる。すなわち、凝固シェル表面の凹部は、局所的凝固

部の形成→その伝播と凝固遅れ部の形成→帯状凝固シェルユニットの形成といった過程と密接な関係にあることがわかり、凝固遅れ部の幅が凹部幅に近いことから、凝固遅れ部がその後の凝固シェル発達過程において凹部として残ることが考えられる。

#### 4. 結 言

過冷却冷却面を融液中に浸漬してゆく過程における初期凝固シェルの形成過程について、流動パラフィンを用いて実験を行い、以下の結論を得た。(1) 流動パラフィンにおいても、凝固シェル表面には、浸漬方向と直交する方向の凹凸が形成される。(2) 本研究で対象とした凝固系では、凝固シェルは、帯状初期凝固シェルユニットの浸漬方向への積み重ねとして形成される。(3) 局所的凝固シェルの伝播は、その下方にすでに形成されている凝固シェルユニットとの間に凝固遅れ部分を介して起こり、この凝固遅れ部が凝固シェル表面に凹部を形成する可能性がある。

(1994年9月20日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 杉谷・中村, 鉄と鋼, 65-12(1979), 1702.