

急冷凝固細線製造のための回転水中紡糸法における急冷促進

Forced Collapse of a Gas Sheet Formed upon Immersion of a Hot Body into Liquid Coolant

西尾 茂文*・上村 光宏*・高橋 義雄*・棚澤 一郎*

Shigefumi NISHIO, Mitsuhiro UEMURA, Yoshio TAKAHASHI and Ichiro TANASAWA

1. ま え が き

組織微細化，非晶質相の生成さらには溶質捕捉などを目的とした急速凝固においては一般に高い冷却速度が要求されるが，液体沸騰冷却を利用して急冷凝固細線を製造する代表的急冷凝固システムである回転水中紡糸法では，回転水中に噴出される融液ジェット後流に膜沸騰段階初期において形成される気相シートが冷却速度を低下させることが知られている^{1),2)}。一方，膜沸騰伝熱の促進については，(膜沸騰段階の強制崩壊を含めて) 電場や超音波の印加などがある程度の効果を持つこと^{3),4)}，また膜沸騰気液界面に電場を印加すると気液界面が不安定化すること⁵⁾が知られている。したがって，上述の気相シートに電場を印加し，気液界面を不安定化させることにより気相シートが強制崩壊できる可能性がある。そこで，本研究では，高温の水平細線がサブクール水中に突入し落下する過程^{1),2)}において形成される気相シートに電場を印加し，気相シートを強制崩壊させる可能性を検討した。

2. 実 験 装 置

図1に本実験において使用した実験装置の概略図を示した。回転水中紡糸法における融液を模擬した伝熱面は直径 $D=0.5\text{mm}$ の白金細線である。細線と電極との接合部からの蒸気膜の先行崩壊を防ぐために白金細線はU字型に曲げられており，その水平部長さは約80mmである。この水平部には，電圧測定用の直径0.03mmの白金極細線を約30mmの間隔を隔ててスポット溶接した。実験は，この細線を大気中で直流安定化電源により1300°Cまで直接通電加熱した後，所定サブクール度 ΔT_{sub} の大気圧水中に所定の速度 v で浸漬することにより行った。細線が停止するまでの水中落下距離 H は約150mmであり，細線が停止

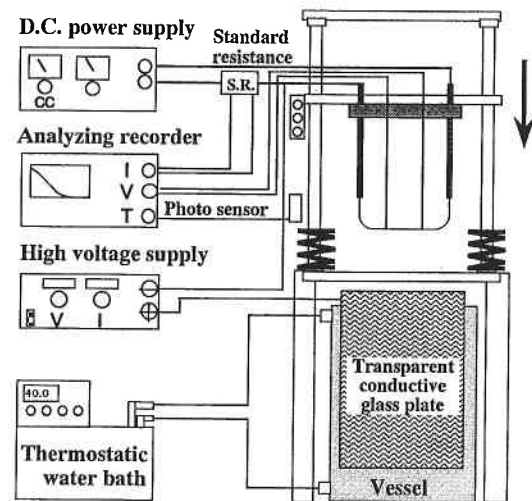


図1 実験装置の概略

するまでの水中落下距離 H は約150mmであり，細線が停止するまでを実験対象とした。また，実験サブクール度は $\Delta T_{\text{sub}}=40, 60, 80\text{K}$ であり，落下速度は落下高さにより調節し $v=0.5\sim 2.2\text{m/s}$ の間で変化させた。

水中には，水平細線の落下経路を中心として20mmの水平方向間隔で2枚の導電性ガラス(正電極)平板が鉛直に立てられており，電場印加実験では片側の導電性ガラス平板と水平細線間に直流電圧 E を印加した(但し，水平細線をアース側とした)。細線の落下過程における様相は，この導電性ガラスを通してバックライト法により高速カメラ(毎秒500コマ)により記録した。実験は，以下の2種類を行った。まず，水平細線落下過程における冷却速度の基礎データを得るための実験を行った。この実験では，(細線を大気中で昇温した後細線への通電量を所定の微小電流にまで減少させ)印加電圧 $E=0$ において細線を落下させ，この冷却過程における細線電圧変化を測定して，

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

白金電気抵抗の温度依存性より冷却曲線を求めた。次に、印加電圧の影響を調べる実験を行った。この実験では、電場が印加されているために細線電気抵抗から冷却曲線を求めることが困難であったため、高速度ビデオ観察のみを行った。

3. 予 備 的 検 討

図 2 は、細線が水中を落下する過程における冷却曲線を示したものである。図示したように、膜沸騰段階は白金細線温度が約 500°C 程度になるまで続いているが、この膜沸騰段階は、気相シートが形成されており冷却速度が膜沸騰段階の中でも顕著に低い気相シート段階と気相シートが細線から離脱し冷却速度が向上する後期膜沸騰段階により構成されていることがわかる^{1), 2)}。

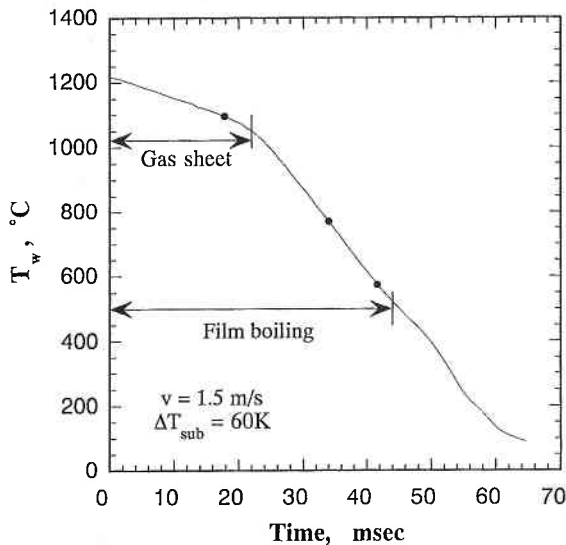


図 2 水平白金細線の冷却曲線

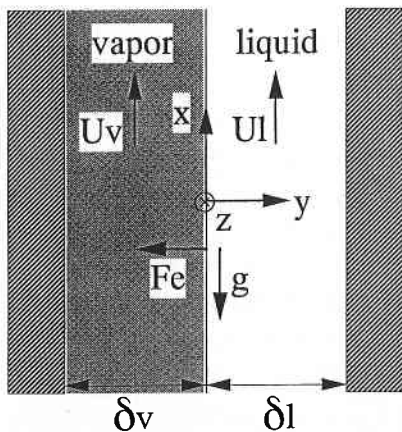


図 3 電場による気液界面不安定性解析におけるモデル系

さて、図 1 あるいは図 2 に示した系において電場により気相シートを不安定化させるためには、まず気相シートの代表長さが不安定波長以下である必要がある。さらに本実験のように水平細線が落下する短時間の間に擾乱が成長し不安定が発生するためには、擾乱成長速度が高い必要がある。そこで、不安定波長と擾乱成長速度に対する電場の影響について予備的検討を行った。本研究の目的から、細線が水中に突入してから早期に気液界面を不安定化する必要がある、このためには突入直後に細線回りに形成される蒸気膜を不安定化させ、その不安定により気相シートを不安定化させることが望ましい。そこで、細線下端から 90° の位置における膜沸騰様相を図 3 の一様電場における鉛直面系で近似し、界面不安定に対する電場の効果を調べた。実験液体は電荷の緩和時間が μsec オーダーである水であるので、完全導電性液体として扱うと次式の擾乱方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
 &(\rho_v \coth [M\delta_v] + \rho_l \coth [M\delta_l]) \omega^2 \\
 &+ 2m(\rho_v U_v \coth [M\delta_v] + \rho_l U_l \coth [M\delta_l]) \omega \\
 &+ m^2(\rho_v U_v^2 \coth [M\delta_v] + \rho_l U_l^2 \coth [M\delta_l]) \\
 &= \sigma M^3 - 8.85 \times 10^{-12} \epsilon_v (E/\delta_v)^2 \coth [M\delta_v] M^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、液相速度 U_l は細線落下速度であり、 ω は擾乱角周波数、 σ は表面張力、 ϵ_v は蒸気の誘電率、 m および n は x 方向および y 方向波数で $M^2 = m^2 + n^2$ である。ところで、本実験系では細線周方向 (図 3 では x 方向) の蒸気膜長さは短いため、膜沸騰気液界面には細線軸方向 (図 3 では z 方向) の擾乱の影響が強く現れるものと考えられる。そこで、(1) 式で $m = 0$ とすると、図 3 の気液界面に電場により不安定が発生する最小電圧すなわち臨界電圧 E_{cr} が次式のように定まる。

$$E_{cr} = \{n\delta_v^2 \sigma / (8.85 \times 10^{-12} \epsilon_v \coth [n\delta_v])\}^{1/2} \tag{2}$$

この式より、逆に印加電圧 E における臨界波長が求まり、同様にして印加電圧 E における擾乱成長速度あるいは成長速度の最も早い危険波長なども求まる。図 4 は、この臨界波長 (図中の曲線) や危険波長 (図中の・等の記号) と印加電圧との関係を示したものである。ただし、本実験では、空気の巻き込みのために蒸気膜厚さの評価が困難であるため、計算パラメータとしてある。図中に示した直線は、本実験で用いた細線の水平部長さである。図より、図示した中で最も蒸気膜厚さが厚い場合でも $E < 100V$ で臨界波長が細線水平部長さより短くなり、細線長さ方向に不安定が

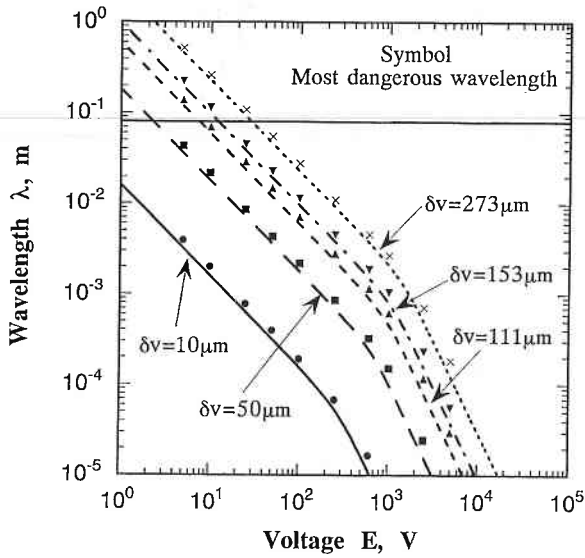


図4 気液界面不安定波長に対する印加電場の影響

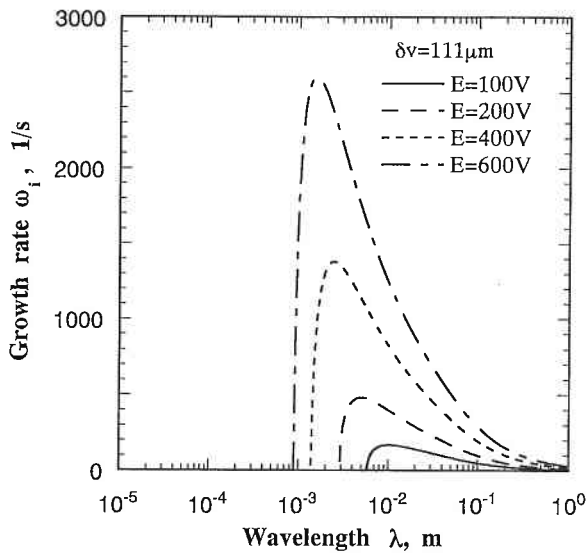
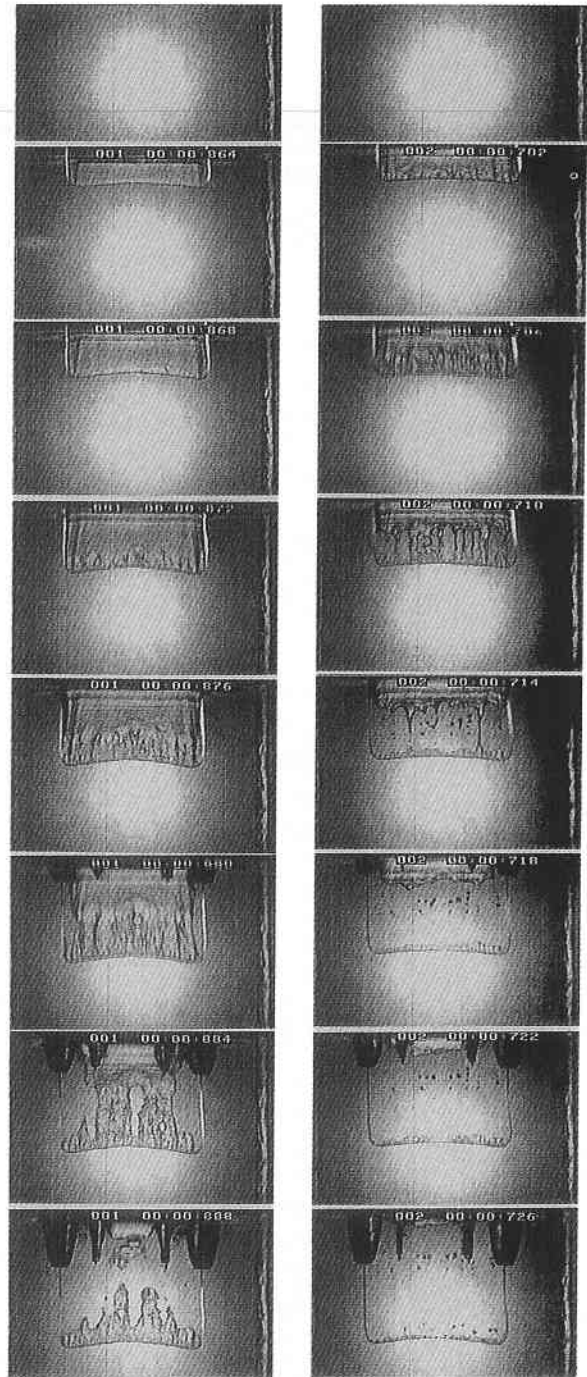


図5 気液界面不安定の成長速度に対する印加電場の影響

発生し得ることがわかる。一方、図5は擾乱の成長速度に対する印加電圧の影響の一例を示したものであるが、印加電圧の増大とともに擾乱成長速度が急速に高くなるのがわかる。以上の予備的検討により、 $E \sim 100V$ のオーダーの電圧を印加することにより、気相シートが強制崩壊できる可能性があるかと判断した。

4. 電場を印加した場合の実験結果

図6は、 $v = 2.2m/s$ 、 $\Delta T_{sub} = 60K$ における $E = 0V$ と $600V$ の場合の細線浸漬過程の状況を比較して示したものである。図より、 $E = 0V$ の場合に比べて、 $E = 600V$ の場



E=0V

E=600V

図6 水平細線後流に形成される気相シートへの印加電場の影響 (写真の時間間隔は4msec)

合は、気相シートは突入直後より乱れており、気相シートが細線より離脱する時間および発泡が停止するまでの時間がともに電場の印加により短縮されていることがわかる。

研究速報

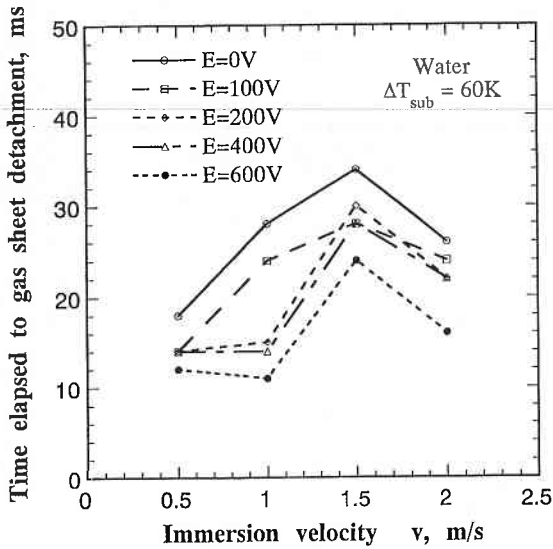


図7 水平細線後流の気相シート崩壊時間に対する印加電場の影響

突入直後から気相シートの気液界面に発生する乱れは、予備的検討に関して述べたような水平方向に波長を持つ乱れであり、突入後やや時間が経つと気相シートはいくつかの気相鉛直円柱に分割されている。

図7は、電場の印加による気相シート強制崩壊の急冷速

度への効果の目安として、 $\Delta T_{sub} = 60K$ の場合について、細線突入時から気相シートが離脱するまでの時間を印加電圧をパラメータとして浸漬速度に対して図示したものである。図より、電場の印加により、気相シート離脱までの期間ではおよそ2倍程度までの冷却促進が得られていることがわかる。

5. 結 言

液体沸騰冷却を利用した急凝固システムの代表例である回転水中紡糸法における急冷速度の向上を目的として、急冷速度を限定している気相シートの電場による強制崩壊について検討し、気相シートの強制崩壊に対して電場の印加が効果的であること、気相シートの強制崩壊により急冷速度が向上することなどを示した。

(1994年9月21日受理)

参 考 文 献

- 1) 島岡ほか3名, 機論, 54B(1988), p. 704.
- 2) 本田ほか3名, 機論, 58B(1992), p. 250.
- 3) 上村ほか2名, 機論, 57B(1991), p. 1019.
- 4) 芹澤昭示ほか3名, 第29回日本伝熱シンポ講論集, (1992), p. 295.
- 5) 高野清ほか2名, 機論, 57B(1991), p. 692.