

研究ノート

水膜流による復氷速度の抑制および水膜厚さと その粘性係数の推定

対馬 勝年¹

要 旨

両端を錘で引かれたワイヤーが半円柱氷に貫入する復氷実験で、ナイロン線から銀線までワイヤーの熱伝導率 λ が 10^3 倍に変わっても、貫入速度 V の変化が 10 倍以内の小さい値に留まる事実を考察した。この事実は従来の熱的説明では解釈が難しいとされていたものである。同一最大圧力下での V を比較したところステンレス線、銅線とも V は太さに反比例する結果を得た。ワイヤー前面の水が後方に流れた分だけワイヤーが貫入するという見地からすると、ワイヤーの太さと最大圧力が同じなら、水膜の流量はワイヤーの λ に依存しないことになる。熱流支配からは説明の難しかった V に及ぼすワイヤー太さや λ の効果が水流支配の立場から直観的に説明できた。次に、通常の貫入速度計測に加え、ワイヤーに滑りを与えたときの力と滑り速度測定の結果を組み合わせることにより、従来決定が困難と考えられていたワイヤー前面水膜厚さ d と水の粘性係数 η の同時決定を可能にした。ナイロン線（太さ 0.3 mm）に対し、 $d=0.6 \mu\text{m}$ 、 η としてバルクの水の粘性より 200 倍も大きい $0.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を得た。

キーワード：復氷、水膜流、熱流解析、流体摩擦、粘性

Key words: regelation of ice, flow of water film, heat flow analysis, fluid friction, viscosity

1. 序論

復氷現象においてはワイヤー前面で圧力による氷点降下が発生し、ワイヤー後端からワイヤー前面の水・氷界面へ熱が流れ、氷が融けた分だけワイヤーは前進すると考えられてきた (Ornstein, 1906; Nye, 1967; Drake and Shreve, 1973; 外塚ら, 1979)。伝統的な熱流の観点からすると熱伝導率 λ の大きいワイヤーほど貫入速度 V が速いはずである。しかし、外塚ら (1979)、対馬・田中 (2010)、対馬 (2011) はワイヤーがナイロン ($\lambda = 0.27 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) から銅または銀 ($\lambda = 425 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) まで λ で 1000 倍以上に変わっても、 V の増加は 10 倍以内であり、なぜ λ の効果が小さいのか疑問が持たれていた。従来、 V におよぼす λ の効果が小さい理由としては、 λ の小さい水膜 ($\lambda = 0.56 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) がワイヤーを断熱材のよう

に取り囲んで熱流を抑制しているためと解釈 (Nye, 1967) されてきたようである (図 1a)。つまり水膜による熱流の抑制作用がワイヤーの λ の効果を阻止していると考えられてきたわけである。

見方を変えて、水の流れの方に着目すれば、融け水がワイヤー後方へ流れた分だけワイヤーが前進すると解釈できる (図 1b)。この場合、水膜の流量はワイヤー表面に沿う圧力勾配に比例するから、同一太さ、同一圧力の条件下では水膜内の圧力勾配に支配される。 V に及ぼす材質つまり λ の効果が小さい理由も理解できる。ただし水膜の粘性に関しては水膜が薄いから膜内の水分子がワイヤー表面との間の電気的な力により拘束され、粘性を増す可能性も考えられる。

最大圧力一定の条件下で、 V に及ぼすワイヤー太さの効果を調べた Hahne and Grigull (1969)、外塚ら (1979)、対馬・田中 (2010)、対馬 (2011) はワイヤーが太くなるほど V が遅くなる結果を

¹ 富山大学理学部

〒930-8555 富山市五福 3190

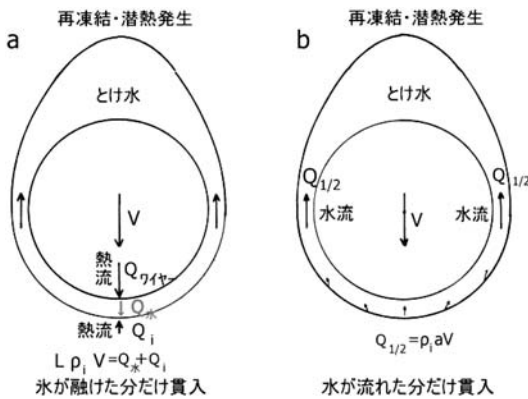


図1 復水の熱流支配(左)と水流支配(右).

V : ワイヤの貫入速度, $Q_{\text{ワイヤ}}$: ワイヤを流れる熱流束, Q_i : 氷を流れる熱流束, L : 氷の融解熱, ρ_i : 氷の密度, $Q_{\text{水}}$: 下面水膜を流れる熱流束 ($=Q_{\text{ワイヤ}}$), a : ワイヤの半径, $Q_{1/2}$: 全水流量の半分

得た. 外塚ら (1979) はナイロン線では V は太さに反比例し, 銅線でも太さに依存するが, 低圧力と高圧力で太さ依存の強さが異なる結果を得た. Drake and Shreve (1973) の測定でも銅線の V は (同じ圧力で比べると) 太いワイヤの方が遅かった. これらの測定で特に注目されるのは λ の大きい銅線で太さ依存性が検出されていたことである. 銅と水では λ に 720 倍の違いがあるため, ワイヤ内の温度勾配は水膜内の温度勾配の 720 分の 1 となり, ワイヤ内の温度差は水膜内の温度差に比べ著しく小さくなる. それゆえ, 水膜内の温度差はワイヤの太さの影響を余り受けず, 水膜内の熱流もワイヤの太さの影響を受けないはずである. 実験結果がそうはなっていないことは復水現象が単純な熱流支配とはなっていないことを意味するのであろう.

対馬・田中 (2010) は Ornstein (1906) や Nye (1967) による $\theta = A \cos \phi$ (θ : 温度, ϕ : ワイヤの中心を通り貫入方向からの角度) の仮定はワイヤ軸に平行にワイヤを切断した各素片を流れる熱流が等しいことに着目した. ワイヤ素片を流れる熱流はまたワイヤ前面の水膜素片を流れる熱流に等しい. ワイヤの最大直径を含む素片では $q = k_{\text{wire}} \Delta T_{\text{wire}} \phi^{-1} = k_{\text{水膜}} \Delta T_{\text{水膜}} d^{-1}$ となる. 水 ($\lambda = 0.56 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) に比べ 720 倍 λ の

大きい銅 ($403 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) 線ではワイヤ内の最大温度差は大変小さく, 太さに関係なく温度差のほとんどが水膜内に発生する. したがって, 水膜厚さが変わらないと仮定すれば, 熱流はワイヤの太さに依存せず, V は変わらないはずである. 一方, 水膜流が V の支配要因になっている場合, 最大圧力一定の条件下ではワイヤの太さに反比例して水膜流内の圧力勾配が小さくなるから, V は太さに反比例して小さくなるはずである. 外塚ら (1979) の銅線の結果は水膜流が V に対する支配要因となっている可能性を暗示させる.

ワイヤ前面で水膜内の水は圧力によりワイヤ後方に絞り出されている. 仮にワイヤの材質による粘性係数の違いがないと仮定すれば, ワイヤの太さと最大駆動圧力が一定なら, V が遅いものほど長い時間をかけて水膜が絞り出されることになるから, 水膜は薄くなるであろう.

圧力の加わるワイヤ前面と圧力から解放されるワイヤ後面で水膜厚さが異なると考えられることから, 前面と後面を含む全体の水膜厚さは決定できても, ワイヤ前面の水膜厚さは決定できなかった. そこで, これまでは「ワイヤ全体が均一な厚さの水膜に囲まれているとの仮定」のもとに解析が行われてきた.

問題の水膜の流量についてはワイヤの半径 a , 水膜厚さ d と水の粘性係数 η が関係する. Ornstein (1906) は貫入速度 V に対し次式

$$V = f d^3 P_{\text{max}} (12 \eta a^2)^{-1} \quad (1)$$

を導いた. d はワイヤ前面の水膜厚さと見なしでよい. ただし, P_{max} は最大圧力, f は氷と水の密度比 $f = \sigma_w \sigma_i^{-1}$ であり, ワイヤ前面の水膜厚さ d のわずかな変化で V は著しく変わる. η について Jellinek (1960) は氷の剪断付着力の測定から, 氷と固体界面に形成される薄い水膜の η がバルクの氷の値より桁違いに大きくなること, また表面材により η が異なるという結果を報告している. d には従来の熱流解析と等価水膜法による解析との間に一桁近い違いがあった.

さて, 復水過程にあるワイヤに滑りを加えてみよう. 片方の錘の上に分銅 m を加えることによってワイヤを引く力 $F (=mg)$ を与え, その時の滑り速度 U を測定する. 水と接するワイ

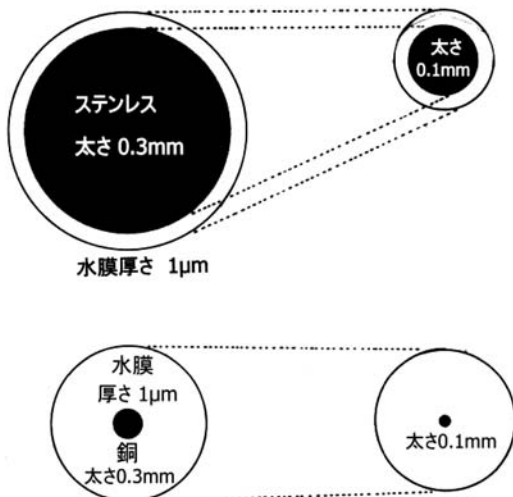


図 2 ステンレス、銅に対する等価水膜図。
ワイヤー太さ 0.3mm および 0.1mm、水膜厚さ
1μm の場合の図でステンレスと銅で縮尺を変
えて示している。太さが 1/3 に変わるとステ
ンレスでは水膜円の大きさが著しく小さくな
るが、銅では変化が小さい。

ワイヤー下面の面積を A とすると

$$F = \eta (Ud^{-1})A \quad (2)$$

の関係式が得られる。 d はワイヤー下面水膜の厚
さ、 η はその粘性係数である。 a, F は既知であり、
 V, U, A は実験的に決定できるから、本研究では
式 (1) と式 (2) を組み合わせることにより、 d と η
を決定した。

2. 実験方法

実験は Drake and Shreve (1973) と同じ半円柱
氷 (市販氷) にワイヤーをかけ、ワイヤーの両端
に等しい質量の錘 w_1, w_2 を吊り下げる方法で行っ
た。氷の直径は 0.15~0.2m、錘の質量は 0.25
kg~1.5kg を使用した。実験は高さ 1m のアクリ
ル製 (二重壁) の箱内に氷試料を設置して行った。
低温実験室の温度は平均 +2℃ であったが、温度
変動があるので、箱内に電熱ヒータを設置して、
箱内の温度を 3~5℃ 程度に調整し、装置内が 0℃
以下に冷える瞬間がないようにした。

ワイヤー間の間隔は読取顕微鏡 (ピカ精工 (株)
PRM-2) で計測した。ワイヤーを引いている錘の
一方に質量 0.2g~2g の分銅を追加したとき滑り

表 1 貫入速度 V に及ぼすワイヤー太さ $2a$ の効果
(ステンレスの場合), $P_{\max} = 0.5 \text{ MPa}$, $\Delta T =$
 -0.026°C $\lambda_{\text{stainless}} = 14.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

$2a, \text{ mm}$	0.1	0.2	0.3	0.5
$V_{\text{meas}}, \mu \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	4.0	6.56	4.48	2.90

による錘の鉛直方向の移動を開始から 10 分間
1 分毎に読み取り顕微鏡で計測した。

3. 実験結果

3.1 最大圧力一定の条件下におけるワイヤー太 さと貫入速度の関係

氷に貫入するワイヤーの最大圧力 $P_{\max}$ を一定に
保っても、 V はワイヤー (太さ $2a$) が太くなるほど
顕著に遅くなることが知られている (Hahne and
Grigull, 1976; 外塚ら 1979; Tozuka and Wakahama,
1983; 対馬・田中, 2010; 対馬, 2011)。

等価水膜法 (対馬・田中, 2010) によれば図 2 に
示されるように太さ 0.3mm と 0.1mm のワイ
ヤーの場合 (水膜厚さ 1μm と仮定), λ の小さい
ステンレス線ではワイヤーの太さに比べ等価水膜
厚さは薄く、熱流に対する水膜の影響は小さい。
一方、銅線では等価水膜厚さはワイヤー太さの 2.4
~7 倍大きく、熱流に対する水膜の影響が大きい。
したがって、ステンレス線では V はワイヤー太
さに反比例するが、熱伝導率の大きい銅線で V
はワイヤー太さにあまり依存しないはずである。

半円柱氷試料の両端に等しい重さの錘のついた
ワイヤーをかけて復氷させる Drake and Shreve
(1973) の方法で得られた結果は、表 1、図 3 に示
されるようにステンレス線で太さが 0.1mm から
0.5mm に増大すると V は $14 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ から 2.9μ
 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ へ 5 分の 1 に減少し、ワイヤーの太さ ($2a$)
に反比例した。実験では経過時間 t とワイヤー間
距離 D が測定されるが、 D は読み取り顕微鏡を
用いて読み取った。しかし、熱伝導率の大きい銅
線の場合にも、表 2、図 3 に示されるように太さ
が 0.1mm から 2.0mm に増大すると V は 20μ
 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ から $1.7 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ へ減少し、 V はワイヤー太
さによって変わった。

ワイヤー太さ ($2a$) を変えても水膜厚さが変わ
らなると仮定すれば、最大圧力 $P_{\max}$ が等しい条
件下で比較しているのだから、熱流解析によると

表 2 貫入速度 V に及ぼすワイヤー太さ $2a$ の効果 (銅線の場合) $P_{\max}=0.5 \text{ MPa}$, $\Delta T=-0.047^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{銅}}=403 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

2a, mm	0.1	0.2	0.3	0.5	2.0
$V_{\text{meas.}}, \mu\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	20.2	9.0	6.2	5.0	1.7

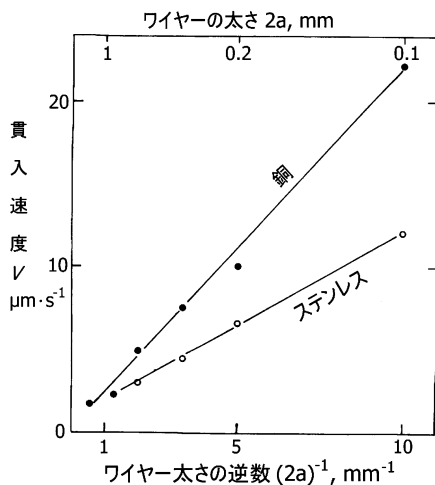


図 3 ワイヤー太さ ($2a$) の逆数と貫入速度の関係。
銅, ステンレスとも貫入速度が太さの逆数に比
例し, 熱流ではなく水膜流の影響を示している。

V の値は変わらないはずである。しかし, 銅線に対する実測値は表 2, 図 3 のとおりワイヤーが太くなるほど遅くなった。表 1 の $P_{\max}=0.5 \text{ MPa}$ の場合, ステンレス線と同じ $V \propto a^{-1}$ の関係にある。この関係は水膜流に対する圧力勾配 $2P_{\max}(\pi a)^{-1}$ におけるワイヤー太さ依存性と一致し, 圧力勾配が貫入速度 V を支配していることを意味する。

図 4 で λ の影響が小さい理由は水流が貫入速度に対する主たる支配要因であると考えれば理解できる。つまり, 水膜がワイヤー後方に流れた分だけワイヤーは前進する。最大圧力一定の条件下で比較しているから, ワイヤー前面の水膜厚さの違いも小さいはずである。水膜の流れの原因となる水膜内の圧力勾配が同じなのだから, ワイヤーの種類による水膜の粘性の変化が小さいと仮定すれば, 後方に輸送される水の量もほぼ似たものとなる。もちろん, 熱流によって水が融けるのだから, λ の大きいものほど V が大きくなるはずである。しかし, 熱流の影響が小さい理由は, ワイヤー後

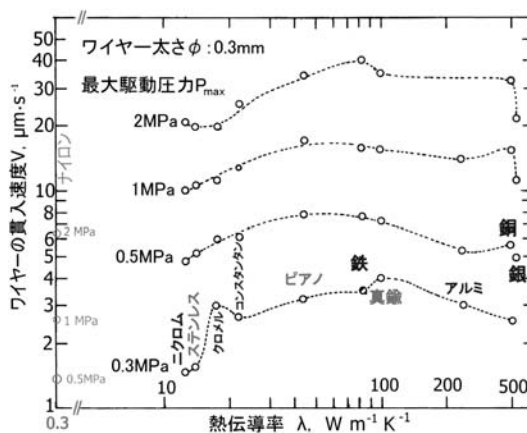


図 4 貫入速度 V に及ぼすワイヤーの熱伝導率 λ の効果 (ワイヤー太さ 0.3 mm , 最大圧力 $0.3, 0.5, 1, 2 \text{ MPa}$) 熱伝導率がニクロムから銀まで 40 倍に変わっても貫入速度の変化は 3 倍以内と小さい。

面に形成される水膜厚さが λ の大きいワイヤーほど厚くなって, λ の違いに起因する熱流の違いが抑制されているものと推測される。

3.2 ワイヤーの滑り実験

水膜厚さ d と粘性係数 η の関係はワイヤーの滑りからも得られる。半円柱水にかけたワイヤーの両端には通常等しい質量 (0.75 kg) の錘 w_1, w_2 が吊り下げられている。ここで $0.1 \sim 1 \text{ g}$ の分銅を右の錘の上に追加するとワイヤーは右の方に滑り, 左の錘の上に追加すると左の方へ滑った。実験は主にナイロン線について行った。ナイロン線に吊されている錘の高さ h を読み取り顕微鏡で 1 分間隔に 10 分まで読み取り, 初めと 12 分後のワイヤー間隔も同顕微鏡で読み取った (図 5)。ナイロンではワイヤー後面 (通過面) には Drake and Shreve (1973) の図に示されるように未凍結の水が連続したテーブル状に残るから, 滑りに対する抵抗はワイヤー下面だけから生ずると考えた。抵抗は流体摩擦であると仮定し, 抵抗の生ずる面積

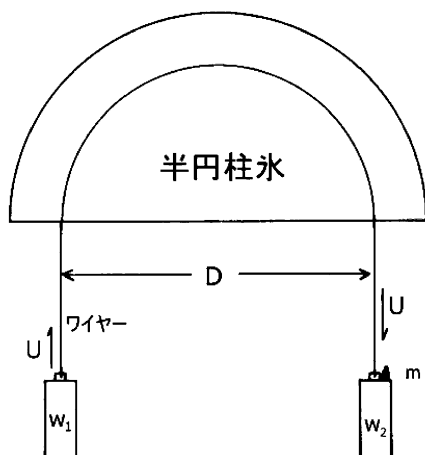


図 5 ワイヤーの滑り.

右側や左側の錘の上に小質量の分銅 m を乗せて滑りを発生させる. 分銅の上下移動を読み取り顕微鏡で計測する.

A をワイヤーの太さ $2a$ とワイヤー間距離 D から $\pi^2 aD/2$ と見積もった.

分銅を追加すると 1 分毎の錘の高さは図 6 に示されるように直線的に上昇または下降した. 直線の傾きが滑り速度 U を与え, 追加した重さ $F (= mg, g$ は重力加速度) と U との関係は図 7 のように直線となった. 直線の傾き UF^{-1} は $0.016 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ N}^{-1}$ であった. $D=0.14 \text{ m}$ 程度だったので, $A=1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ となる. したがって, ナイロン線の場合, 式 (2) から d と η の単位を m , $\text{Pa} \cdot \text{s}$ として

$$\eta = 0.6 \times 10^6 d \quad (3)$$

の関係が得られた.

3.3 ワイヤー前面の水膜厚さと粘性係数

前節の測定から復氷過程でのナイロン線の滑りについて, d と η の関係式 (3) が導かれた. 最大圧力 $P_{\max}$ は 0.5 MPa , ワイヤーの太さは 0.3 mm であった. この条件における V は $1.2 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ なので, 式 (1) から

$$d^3 = 0.59 \eta \quad (4)$$

の関係が導かれる.

式 (4) と式 (3) から d と η の値が定まり,

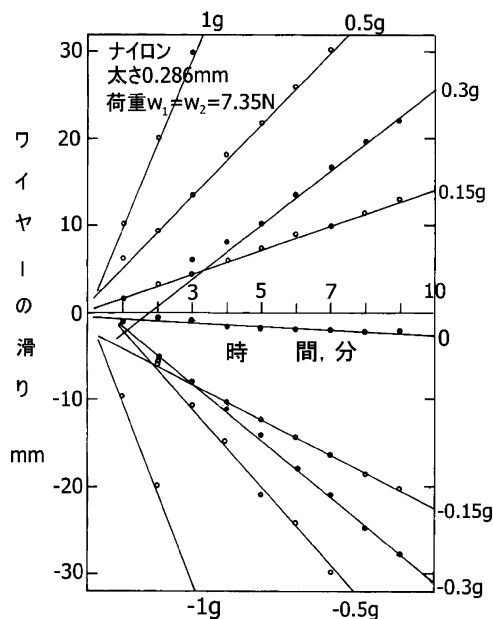
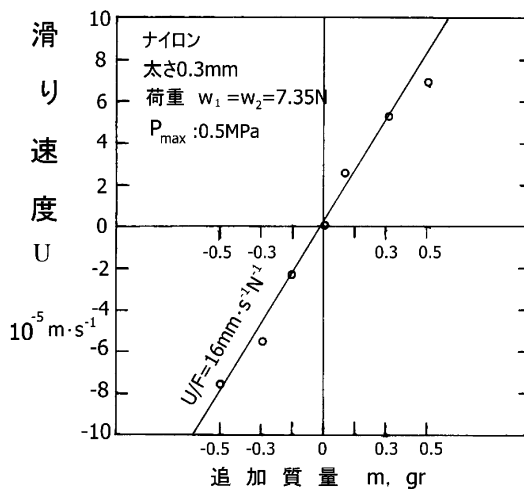


図 6 ワイヤーの滑りの計測.

太さ 0.286 mm のナイロン線の滑り. 直線に付した数値は分銅 m の大きさ. 縦軸は錘の鉛直位置, 横軸は時間, 分.

図 7 追加質量 m と滑り速度 U の関係. 図 6 の各直線の傾きをプロットした.

$$d = 0.6 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (5)$$

$$\eta = 0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (6)$$

と求まった。

4. 考察

4.1 熱流解析 (氷を流れる熱流束)

前項 3.3 で述べたように、主に水膜流の解析からワイヤー前面の水膜厚さが決定された。一方、等価水膜法はワイヤー前面と後面のトータルの水膜厚さを与える。

ナイロン線 ($2a=0.3\text{ mm}$, $P_{\max}=0.5\text{ MPa}$) の場合、ワイヤー上下間の温度差の最大は圧力による氷点降下 ΔT_p によって決まるから、ナイロン線を通る最大熱流束 q は、

$$\begin{aligned} q &= \lambda \Delta T_p (2a)^{-1} \\ &= (0.27\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) (0.037\text{ K}) (0.3 \times 10^{-3}\text{ m}^{-1}) \\ &= 33\text{ Wm}^{-2} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。したがって、ワイヤー前面水膜内の温度差 $\Delta T_{\text{水膜}}$ が $q = \lambda_{\text{水膜}} \Delta T_{\text{水膜}} d^{-1}$ から決定され、

$$33 = -0.56 [\Delta T_{\text{水膜}} (0.6 \times 10^{-6})^{-1}] \quad (8)$$

$$\Delta T_{\text{水膜}} = 4.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

と求まる。この値はナイロン線内温度差のわずか 1000 分の 1 に過ぎず、温度差の殆どがナイロン線内に生ずるとした上の仮定が妥当であったことを意味する。なお、 V は $1.2 \times 10^{-6}\text{ ms}^{-1}$ なので、全熱流束 ($=L\rho_i V$, L : 氷の融解熱, ρ_i : 氷の密度) は 368 Wm^{-2} となり、氷を流れる熱流は 335 Wm^{-2} と見積もられる。

Nye の理論では氷を流れる熱流束はワイヤーの熱伝導率 λ を氷の値に置き換えたときのワイヤーを流れる熱流に等しいと仮定された。Nye の理論は上の値の 1/5 にすぎず、小さすぎるといえる。

ニクロム線 (太さ $2a=0.3\text{ mm}$, $P_{\max}=0.5\text{ MPa}$, $V=4.8\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) の場合は V からワイヤーと氷を流れるトータルの熱流束 q_{total} が決定される。氷を流れる熱流束はナイロンの V から推定され、ワイヤー内を流れる熱流束 q_{wire} は $q_{\text{wire}} = 1135\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ となるので、ワイヤー内の最大温度差を $\Delta T_{\text{ニクロム}}$ とすると、

$$\begin{aligned} q &= \lambda \Delta T_{\text{ニクロム}} (2a)^{-1} \\ &= (12.5\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) \Delta T_{\text{ニクロム}} (0.3 \times 10^{-3}\text{ m})^{-1} \\ &= 1135\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

したがって、ワイヤー内最大温度差は

$$\Delta T_{\text{ニクロム}} = 0.027^\circ\text{C} \quad (11)$$

となる。上下の水・氷界面間の最大温度差は前面の圧力 (0.5 MPa) による氷点降下 -0.037°C とワイヤー後面の最大温度 $+0.01^\circ\text{C}$ との差 0.047°C である。そのうちワイヤー内の温度差が 0.027°C なので、水膜の全温度差は 0.02°C と見積もられる。ワイヤー下面の水膜厚さ d を $1 \times 10^{-6}\text{ m}$ と仮定すれば、水膜を流れる熱流束とワイヤーを流れる熱流束は等しいので、下面水膜内の温度差 $\Delta T_{\text{水膜}}$ は

$$\begin{aligned} 0.56 [\Delta T_{\text{水膜}} (1 \times 10^{-6})^{-1}] \\ = 1135\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{水膜}} = 2.0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

と求まる。この値はワイヤー内温度差の 1/14 に過ぎない。ワイヤー前面の水膜厚さを実験的に決定する方法として、ワイヤー表面温度を精密に計測し、圧力融解温度にある水・氷界面温度との温度差から水膜内の温度差を推定する方法も考えられる。しかし、本節の解析は温度計測による水膜内温度差の決定が極めて難しいことを意味する。

ワイヤー後面の水膜厚さは式(13)と等価水膜法から

$$d_{\text{水膜(後面)}} = 9.7 \times 10^{-6}\text{ m}$$

と決定される。

4.2 ワイヤー前面の水膜の粘性係数について

狭い隙間にはさまれた水膜の場合、水分子が界面の影響を受けて粘性係数が増大する可能性をしがきで述べた。本実験ではナイロン線に対しワイヤー前面の水膜厚さ $0.6\text{ }\mu\text{m}$ に対し、水膜の粘性係数として通常の水の粘性係数の 200 倍余り大きい $0.4\text{ Pa}\cdot\text{s}$ を得た。Jellinek (1960) は水平板とステンレス板や石英板との付着面の剪断付着強さを調べ、氷が平板に密着して滑ること、付着強さは剪断速度 ($5.3 \sim 410\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) に比例して増大したことから $1 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ の厚さをもつ水膜の粘性

係数としてステンレス板の場合 $150 \sim 15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (石英板では $700 \sim 70 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) を得ている。しかし、薄い隙間にはさまれた潤滑膜の流れを調べた笹田・上条 (1969) は金属板間に挟まれた $0.1 \sim \text{数 } \mu\text{m}$ 程度の厚さの水の流れに対し、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の隙間では水の粘性が増大するが、 $1 \mu\text{m}$ 程度の厚さではバルクの粘性と変わらないという結果を報告している。水膜は充分厚くなれば、バルクの水の粘性 $1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ になるはずである。復氷実験では水氷界面の水が融けて水流に加わるという特異性があり、ワイヤーの滑り速度も $20 \sim 80 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ という遅い速度での値である。隙間の水の状態は Jellinek の場合、水膜に流れがなく、温度も -4°C で復氷の 0°C とは異なり、笹田・上条 (1969) の金属間の隙間を水が流れる実験とも異なる。薄い水膜の粘性係数はワイヤーの材質の影響も受け、また充分厚くなれば、バルクの粘性係数に等しくなるはずである。一方、復氷の場合は水膜厚さはワイヤーの太さ、最大圧力、ワイヤー表面の粗さ・材質などの影響を受けると考えられる。本実験に使用したナイロン線は釣り糸用のものであった。太さや表面仕上げについて高精度のナイロン線が使用されたときの滑りが本報のものよりよく滑ると仮定すれば、 η はより小さいバルクの水の値の方へ変動するものであり、気かりな点である。

5. おわりに

復氷はよく知られた現象であるが、研究の歴史は長く、Bottomley (1872) 以来、足かけ 3 世紀に渡る。従来、復氷現象の説明は熱流に重点がおかれていた。しかし、貫入速度に及ぼすワイヤー熱伝導率の影響が小さいという実験結果は熱流説からは直観的説明が難しいと思われ、問題視されていた。本研究では対馬・田中 (2010) の水流支配により上の問題も解決されることを示した。実測が難しいワイヤー前面の水膜厚さについては、Ornstein (1906) や Nye (1957) の理論に実験結果を組み合わせ水膜厚さを推定する試みが過去にも行われた (Meerburg, 1907; Nunn and Rowell, 1967)。しかし、得られた水膜厚さは $0.1 \mu\text{m}$ のオーダーであって、長年復氷実験に携わった経験やその間の観察からは薄すぎると思われるもので

あった。長らく水膜の粘性と水膜厚さを同時決定する方法を見出せなかったために、暫定的に水の粘性係数を適用してきた結果ともいえる。本研究では復氷実験とワイヤーの滑りの計測という二つの実験を組み合わせることにより、水膜厚さと粘性係数を同時決定できた。その結果、太さ 0.3 mm のナイロン線に対して水膜厚さ d を $0.6 \mu\text{m}$ 、水膜の粘性係数 η を $0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ と決定された。従来 $0.2 \mu\text{m}$ 程度の薄い水膜とされた理由が水膜の粘性係数としてバルクの水の粘性係数 $1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ を適用していたことに起因することを明らかにした。

前報 (対馬・田中, 2010) の等価水膜法による解析と本研究によって復氷の主要部分に新しい説明が与えられたと見なしてよいであろう。

なお今後に解明が求められる項目としてはワイヤー後面に発生する蒸気泡の大きさを手がかりとしたワイヤー後面の水膜圧力の決定、ワイヤーの熱伝導率と貫入速度間の逆転現象の説明、本研究では扱っていないが Drake and Shreve (1973) により低圧力領域に発見された貫入速度が桁違いに変化する遷移領域の問題等が挙げられる。

本論文をまとめるに当たり、富山大学理学部地球科学科で著者の下で復氷実験に関する卒業研究・修士論文をまとめられた佐藤知紀君、他多くの学生、学生の指導に協力された田中るみさんらの研究成果が基盤になったことを記して、感謝の意を表したい。

文 献

- Bottomley, J. T., 1872 : Melting and regelation of ice. *Nature*, **5**, 185.
- Drake, L. D. and R. L. Shreve, 1973 : Pressure melting and regelation of ice by round wires. *Proc. Roy. Soc. Lond., A*, **332**, 51-83.
- Hahne, E. and U. Grigull, 1969 : Some experiments on the regelation of ice. Ed. N. Riel, B. Bullemer, and H. Engelhalt, 320-328.
- Jellinek, H. H. G., 1960 : Adhesive properties of ice, Part II. *SIPRE Research Report* **62**, 10pp.
- Meerburg, J. H., 1907 : On the motion of a metal wire through a piece of ice. *Proc. K. ned. Akad. Wet.* **9**, part 2, 718-726.
- Nunn, K. B. and D. M. Rowell, 1967 : Regelation experiments with wires. *Phil. Mag.* **16**, 1281-1283.

- Nye, J.F., 1967 : Theory of regelation. *Phil. Mag.* **16**, 1249-1266.
- Ornstein, L.S., 1906 : On the motion of a metal wire through a lump of ice. *Proc. K. ned. Akad. Wet.* **8**, part 2, 653-659.
- 笹田 直・上条謙二郎, 1969: せまいすきまの流れ (第2報). 潤滑, **14**, 296-301.
- 外塚 信・対馬勝年・若浜五郎, 1979: 復氷の実験的研究. 低温科学, 物理篇, **38**, 1-15.
- Tozuka, S. and G. Wakahama, 1983 : Studies on regelation 1. Flow of heat in regelation process. *J. Phys. Chem.* **87**, 4147-4150.
- 対馬勝年・田中るみ, 2010: 等価水膜法による復氷過程の解析. 雪氷, **72**, 169-179.
- 対馬勝年, 2011: 復氷の機構をめぐる問題. 寒地技術論文・報告集, **27**, 251-256.

Water flow control of ice regelation and estimation of thickness and viscosity of water film

Katsutoshi TUSIMA¹

¹ Faculty of Science, University of Toyama, 3190, Gofuku, Toyama 930-8555

Abstract: During regelation of ice, in general, the heat flow through a wire has considered to control the regulation velocity, i.e., thermal control. However, the extremely small dependence of the regulation velocity on the thermal conductivity of the wire has not been clarified. We investigated the mechanisms that control the penetration of a wire through ice during regelation. Our experiments showed that the penetration velocity was inversely proportional to the diameter of a copper wire and a stainless wire under constant driving pressure. This implies that water flow controls the penetration velocity and thus clarifies the small dependency of the regulation velocity on thermal conductivity. Regelation velocity and slip of the wire were measured to determine the thickness and viscosity of the water film in front of wire. For a 0.3-mm-diameter nylon wire and a maximum driving pressure of 0.5 MPa, the estimated thickness and viscosity of the water film were 0.6 μm and 0.4 Pa $\cdot$ s respectively.

(2012 年 6 月 19 日受付, 2012 年 9 月 16 日改稿受付, 2012 年 10 月 9 日最終改稿受付,
2012 年 10 月 10 日受理, 討論期限 2013 年 5 月 15 日)