曲がり円管の凍結破壊*

(第3報, 45°曲がり円管および直円管の凍結挙動)

稲葉英男^{*1}, 追分重義^{*1}
福田武幸^{*1}, 菅原征洋^{*2}

Pipe Fracture by Freezing in Curved Water Pipes (3rd Report, Freezing Behavior of 45° Curved and Straight Pipes)

Hideo INABA, Shigeyoshi OIWAKE,
Takeyuki FUKUDA, and Masahiro SUGAWARA

The formation of the ice growth that occurs in 45° curved and straight pipes containing water flow was investigated experimentally. The experiments were carried out under various experimental conditions over the range of Reynolds numbers (based on pipe i. d.) $Re=310-6760$ and cooling temperature ratios of the freezing parameter. $T^*=(T_f-T_w)/(T_w-T_f)$, $T_f=0^\circ\text{C}$, T_w =cooling pipe temperature, T_w =temperature of flowing water) $=1.25-12.9$. From the visualization of ice formation in the pipes, the 45° curved pipe with flowing water was first blocked by ice formation after the curved portion of the pipe, subsequently the upstream side of the curved portion, which had already had a narrow flow passage by ice formation, was frozen off and eventually freezing of the remaining water in the curved portion resulted in a pipe rupture at around the curved portion of the pipe. The transient behavior of ice formation, according to time proceeding, was expressed in the relationship between the pressure loss coefficient f and the Reynolds number for various cooling temperature ratios T^* . In addition, the critical condition of the complete ice blockage in the 45° curved and straight pipes was obtained with experimental correlation equations in terms of T^* and Re .

Key Words: Thermal Engineering, Phase Change, Ice Formation, Curved Pipe Flow, Pressure Drop

1. 緒 言

水道管の凍結による事故は、近年の防寒工法の発達により減少しているとはいえ寒冷地に住む人々を悩ます大きな問題である。また緊急に管内流動水を停止する必要がある場合など、バルブ操作を行うことなしに配管の一部を急冷し管内水を凍結により、その流動停止を行う試みが原子力関連などで計画されている⁽¹⁾。この例などは管内凍結を積極的に利用する試みで興味のあるものである。このような管内の局所的な凍結に関する研究は⁽²⁾⁻⁽⁵⁾、凍結界面が比較的滑らかに変化するとその前提のもとに行われてきた。Gilpin⁽⁶⁾そして平田⁽⁷⁾らは、管内水の流動状態および温度条件に依存して管の長さ方向に沿って流路が拡大・縮小を伴う、いわゆる ice-band 構造が複雑な凍結界面形状を呈することを報告している。この起伏に富んだ凍結界面形状は、界面の水側の熱輸送と氷層側の伝導による熱輸送の微妙な熱平衡のうえに定まるもので、伝熱学上大変興味のある問題でもある。しかしながら水道管凍結破壊事故の大部分は、水道配管網末端に相当する比較的

管径の小さい給水管曲がり部で多いようである。著者らは、この給水管曲がり部の凍結に着目し、180°⁽⁸⁾および90°⁽⁹⁾曲がり管の凍結現象を解明した。すなわち、曲がり部においては、流れのはく離に伴う偏流および遠心力により発生する二次流れの存在が、曲がり部の熱伝達を増大し、この部分での凍結層の発達を阻止する。したがって凍結による管閉そくは曲がり部前後の直管領域でまず起こり、次に曲がり部に閉じ込められた水が凍結膨張し、管が破壊するとの一連の凍結破壊機構を解明した。さらに曲がり管内水の流動状態および温度条件にもとづく凍結による管閉そく条件および管閉そくに要する時間を実験的に明らかにした。また、流れの乱れによる局所熱伝達率の大きな曲がり部の占める割合の大きい180°曲がり管のほうが90°曲がり管よりも凍結しづらくするとの実験結果も報告した。

本報告は、これらの知見のうえに、水道管給水管の流動方向の変化および熱応力緩和に多く用いられている45°曲がり管の凍結挙動を解明することを目的とする。すなわち凍結挙動の可視化、流動抵抗の経時変化および管閉そくに至る条件に影響をおよぼす流動水量、流動水温度および冷却温度の効果を実験的に明らかにするものである。45°曲がり管は、幾何学的形状からは、90°曲がり管と直管(曲がり角0°)との間にある

* 昭和62年11月19日 第948回講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月27日。

^{*1} 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

^{*2} 正員、秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町1-1)。

ことにより、本研究においては、45°曲がり管と同じ寸法を有す直管の凍結実験も行い、両者の比較検討も試みている。

記 号

- D : 曲がり円管の曲がり直径
 d, d_o : 円管内径, 円管外径
 Fo : フーリエ数 at/d^2
 Fo^* : 管閉そくまでのフーリエ数 $= at_c/d^2$
 f : 損失係数 $= (p_i - p_o)/[(\rho V^2)/2]$
 l : 曲がり円管の全体長さ
 p_i, p_o : 曲がり円管入口および出口圧力
 Re : レイノルズ数 $= Vd/\nu$
 Re^* : デュン数 $= Re(d/D)^{1/2}$
 Q : 水流量
 T_w, T_w, T_r : 流水温度, 曲がり管壁温度, 水の凍結温度 $^{\circ}C$
 T^* : 温度比 $= (T_f - T_w)/(T_w - T_r)$
 t : 時間
 t_c : 円管閉そくまでの時間
 V : 円管内水平平均流速
 α : 水の温度伝導率
 ρ : 水の密度
 ν : 水の動粘性係数
 θ : 曲がり角

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図1に示されるように、大別すると試験水循環系統、冷却ブライン循環系統および試験部の3要素に分けることができる。本実験においては、試験部を除いた他の部分は前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾と同じものを用いたので、その各部の機能の詳述は省略する。前報⁽⁹⁾の90°曲がり管の実験では、一般水道の給水管を想定し、管内径 $d=21.6$ mm (外径 $d_o=27.4$ mm), 曲がり直径 $D=114$ mm ($D/d=5.28$) および曲がり管全体の長さ $l=470$ mm の90°曲がり鋼管を用いた。本実験においてもその曲がり効果を調べることを主な目的としたため、次に述べるほぼ90°曲がり管と同一の寸法を有する45°曲がり管および直管を試験円管とした。

45°曲がり鋼管: 内径 $d=22.2$ mm, 外径 $d_o=27.4$ mm,

曲がり直径 $D=113.6$ mm ($D/d=5.12$)

$l=490$ mm ($l/d=22.1$)

直鋼管: 内径 $d=21.7$ mm, 外径 $d_o=26.5$ mm

$l=505$ mm ($l/d=23.3$)

円管内の流動および凍結挙動の可視化のため、鋼管とほぼ同じ寸法を有する耐圧ガラス製円管を用いた可視化実験も行われた。試験円管部入口には、その流入条件として十分に発達した管内流れを想定し、長さ4050 mmの助走区間用円管が設けてある。実験はまず試験部を一定の冷却温度 T_b に長期間保った後、定圧弁⑫より一定水温度 T_w および一定圧力 ($P_i=1.96 \times 10^5 \pm 5 \times 10^3$ Pa) に制御された試験水を試験円管に流入させることより開始する。凍結層の可視化実験では、少量の緑色染料を試験水に添加して着色することにより凍結層と水層の境界を明らかにし、凍結界面挙動を定性的に把握した。さらに、流動挙動の可視化実験では、墨をトレーサとして用いることより、正しく流れの状態を把握した。一方鋼管の実験では、内部の観察が不可能なことより試験部入口および出口に設けた微小圧力計 (p_i, p_o) の圧力変化を自動記録することにより、管内凍結状態を間接的に把握した。圧力変化と実

図1 実験装置概要

際の凍結状態の変化の整合性は、可視化実験において確認してあり鋼管の実験による圧力変化より十分に凍結状態の変化が推定できる。前報⁽⁹⁾と同様に、本実験は入口圧力一定の条件ともとで行われた。また、曲がり円管の壁温条件として均一な温度境界に近づけるために、整流板をブライン槽内に設置し、さらにブライン流量の制御などの工夫を行った。結果として冷却ブラインのブライン水槽内での温度 T_b の変化は 1°C 以内および試験円管壁温度 T_w の場所(3点測定)による変化は最大 0.6°C 以内とすることができた。実験データの整理に用いた諸量として、試験水の入口温度 T_m は、管入口温度を、冷却管壁温度 T_w は、円管壁に設けられた3点の熱電対(0.1 mm Cu-Co 熱電対)による温度の平均値を、水の流量 Q は、試験開始後の流量および無次元整理に使用する物性は、 T_m と凍結温度 $T_f(0^\circ\text{C})$ の平均温度を採用した。本実験の測定範囲は、次のとおりである。

45° 曲がり管 ただし () 内の直管の場合を示す。
円管壁温度

$$T_w = -3.2 \sim -17.3^\circ\text{C} (-5.1 \sim -20.1^\circ\text{C})$$

流水温度

$$T_m = 0.95 \sim 6.1^\circ\text{C} (0.95 \sim 7.2^\circ\text{C})$$

ブライン温度

$$T_b = -4.5 \sim -19.1^\circ\text{C} (-6.5 \sim -22.1^\circ\text{C})$$

温度比 $T^* = 1.5 \sim 10.5 (1.25 \sim 12.9)$

水流量 $Q = 0.50 \sim 24.2 \text{ L/min}$

$$(0.51 \sim 10.4 \text{ L/min})$$

レイノルズ数 $Re = 210 \sim 6\,760 (215 \sim 6\,290)$

ディーン数 $Re^* = 127 \sim 5\,912$

3. 実験結果とその考察

3.1 円管内の流動挙動 円管の凍結層発達に重要な影響をおよぼす管内水の流動状態の可視化が墨をトレーサとして用いることにより行われた。流動水温度および試験部の温度は室温とし、冷却の行わないもとで可視化実験が行われた。

図2は、45° 曲がり管の種々の Re -数における管内水の流動状態を示したものである。図2(a)は低流速の $Re=330$ の場合の例である。曲がり部において黒色のトレーサが曲がりの内側壁に押しやられ、そして曲がり出口に向かうにしたがってトレーサが管中央にもどされている。この曲がり部の流動挙動は、曲がり部での流れのはく離による偏流および遠心力による二次流れの効果によるものと考えられる。さらに流れが曲がり部下流の直管部に進むにつれ二次流れの効果が消滅し一般に直管に観察されるような発達された流れと

なる。この45° 曲がり管の曲がりによる二次流れの勢いは、前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾の180° および90° 曲がり管の場合に比較し減少する傾向にある。図2(b)は $Re=920$ の場合の例で、曲がり部の二次流れの効果が $Re=330$ の場合に比較し、曲がり部上流部までおよんでいることが理解できる。曲がり部出口では、流速の増大に伴って二次流れに起因する流れの旋回が観察され、その旋回流が下流までおよんでいることがわかる。図2(c)は、 $Re=1\,710$ の場合の流れ模様を示したものである。 $Re=920$ に比較し、この $Re=1\,710$ の場合には、その流速の増大に伴って曲がり部で発達した流れの乱れの周期は短くなり、その乱れも管全体に広がっているようすが理解できる。 $Re=3\,200$ の十分発達した乱流境界層での管流入条件の流れ模様を図2(d)に示す。前掲の3例の層流入条件に比較し、 $Re=3\,200$ の場合には、曲がり部での二次流れの影響が全体的に薄れているようすが理解できる。このことは乱流入条件では曲がり部の効果をそれほど考慮しなくても良いことを示唆しているものといえよう。

3.2 管内凍結変化の経時変化 図3は、 $Re=3\,650$ および温度比 $T^*=10$ ($T_m=1^\circ\text{C}$) における直管内水の凍結挙動を示した一連の可視化写真である。可視化円管として内径 $d=22.0 \text{ mm}$ 、外径 $d_o=25.2 \text{ mm}$ 、長さ $l=505 \text{ mm}$ ($l/d=22.9$) の耐圧ガラスを使用して、写真中、管中央の黒色部分は流動水を示し、周囲

(a) $Re=330$

(b) $Re=920$

(c) $Re=1\,710$

(d) $Re=3\,200$

図2 流れ挙動

の白色部分は凍結層を示す。図3(a)の凍結開始後 $t=30$ min の凍結状態を観察すると流れの下流に向かうにしたがって流路の比較的なだらかな減少が認められる。この流路のなだらかな減少は、流れが下流に向かうにしたがって管壁、凍結層との熱交換による流動水の温度低下および乱流状態の流路の縮小による層流化現象⁽⁶⁾などにより凍結層側の伝導伝熱による熱輸送量が水側の対流熱伝達量よりも上回ることに起因すると考えられる。一方、試験円管出口部では逆に流路の拡大が観察される。この流路の拡大は、円管出口部での外的要因にもとづく流れの乱れにより凍結層の融解により起こるものである。一度流路の拡大が起こるとこの拡大部での流れのはく離による局所熱伝達量の増大を生み、さらに凍結層の融解を促進し、その融解が上流側に進行することとなる。しかしながらこの流量および温度条件のもとでは $t=31$ min と時間が経過するに伴って、全体的に流路の減少が進行し流れの停止が管出口近くで認められる。 $t=32$ min の図3(c)に示される可視化写真においては、前例でみられた流水状態を示す黒色部分の色が薄くなっていることにより停止した水の凍結進行がわかる。この凍結状態では、管閉そく後の未凍結水の凍結進行は図3に示すように流路の狭い下流より上流に向かう。しかし上流側が開放されていることより凍結に伴う水の体積膨張による管破壊は起こらない結果となった。

図4は、 $Re=8300$ および $T^*=14(T_\infty=1^\circ\text{C})$ の場合の凍結状態を示したものである。図4(a)の $t=25$ min 後では流路の縮小および拡大が観察され、特に管出口近くにおいては再び流路の縮小傾向が認められる過渡的凍結状態を示している。この凍結挙動は、乱流状態の流入水条件のもとで流路縮小部での流れの層流化現象による熱伝達率の低下による凍結層の発達、そ

して流路の拡大部での流れのはく離による熱伝達率の増大による凍結層の衰退⁽⁶⁾に起因するものと考えられる。 $t=45$ min 後の図4(b)では、図4(a) $t=25$ min において観察された第2の流路縮小部の進行の停止がみられ、この状態で凍結層厚さの経時変化のない定常状態となる。この定常状態は、局所的にも凍結界面での水側と凍結層側の熱輸送量が平衡した状態である。

図5は、 $Re=1120$ および $T^*=10(T_\infty=1^\circ\text{C})$ の条件での 45° 曲がり管の凍結状態を示したものである。試験水をを通水して間もない図5(a) $t=5$ s 後の可視化写真からは凍結の発生はまだ観察されない。図5(b) $t=12$ min 後の可視化写真においては、凍結層の発達が曲がり管入口の直管部、曲がり部出口の曲がり内側壁および曲がり後の直管部に認められる。特に曲がり後の直管部では、凍結の急激な進行のため、用いた緑色の可視化トレーサの凍結層への巻込みがみられる。一方曲がり部上流の直管部では、トレーサの凍結層への巻込みがほとんど見られないことより、凍結界面は徐々に進行したことがわかる。さらに図5(c) t

図3 凍結状態 ($Re=3650$, $T^*=10\pm0.5$)

図4 凍結状態 ($Re=8300$, $T^*=14\pm0.5$)

図5 凍結状態 ($Re=1120$, $T^*=10\pm0.5$)

=25 min 後には曲がり部後方の直管部で凍結界面がほぼ管中心にまで達して流路の閉そく寸前の状況にあることがわかる。しかしながら管曲がり部は依然として未凍結部分に占められている。このように 45° 曲がり管の凍結状況は、前掲の直管の場合に比較し大きく異なる結果となる。流量を増大し、 $Re=1680$ および $T^*=10(T_\infty=1^\circ\text{C})$ とした場合の凍結挙動の可視化写真を図 6 に示す。凍結開始後 $t=35$ min [図 6 (a)] には、管出口部近傍で凍結層による管閉そくが行われているようすが水の存在を示す黒色トレーサが存在しないことより理解できる。図 6 (b) $t=36$ min 後には 1 min 前に起こった管出口部近傍での管閉そくによる流水の停止のため、曲がり部上流側での凍結界面の急激な進行が起こる。この状態での凍結層増大による未凍結層の圧力上昇により、まず曲がり部後方の凍結層がひび割れを起こしている。図 6 (c) $t=38$ min 後には、曲がり部上流側が完全に閉そくされた状態となり、曲がり部に閉じ込められた水の凍結が進行し、図にみられるように管の曲がり部での破壊が起こることになる。このように 45° 曲がり管の凍結による管破壊は、前報⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾の 180° および 90° の場合と同様に曲がり部においての管破壊が起こり、直管の結果とその様相を異にすることがわかる。

図 6 凍結状態 ($Re=1680$, $T^*=10\pm0.5$)

図 7 は、 $Re=2100$ および $T^*=10(T_\infty=1^\circ\text{C})$ における一連の凍結挙動を示したものである。この Re 数においては、管出口で発生した流れの変動による水側の熱伝達率の増大が、凍結層の融解を誘発し、流路の拡大を生じていることが理解できる。この流路の拡大部での流れのはく離による局所熱伝達率の増加により、凍結界面での熱平衡がくずれて凍結層の融解が上流側に向かって進行している。さらに $t=250$ min 後には管出口近傍で発生した凍結層が管出口部より再び融解しているようすがわかる [図 7 (d)]。 $t=390$ min 以降は、写真にみられるような凍結層形状を維持し、凍結界面において熱的平衡状態が保持される [図 7 (e)]。

図 8 は、乱流状態にて水が試験円管に流入した $Re=3330$ および $T^*=10(T_\infty=1^\circ\text{C})$ における一連の凍結状況を示したものである。この Re 数では、乱流状態で試験部に水の流入がありその凍結状況も図 7 の $Re=2100$ の場合と少し異なる。図 8 (b) $t=45$ min および図 8 (c) 60 min 後の可視化写真では、曲がり部上流の流路が曲がり内側壁に片寄り、さらに曲がり部の未凍結領域も $Re=2100$ の場合よりも増大して

図 7 凍結状態 ($Re=2100$, $T^*=10\pm0.5$)

いる。図8(d) $t=120$ min 後には、曲がり部上流の流路の曲がり内壁への片寄りが進行すると同時に曲がり部下流において流路が管壁に移動し、凍結層の発達が管中心に対して非対称となる。この非対称な凍結状態はその後維持され、最終的に図8(e) $t=360$ min にてその凍結形状の経時変化のなくなる定常状態となる。このように温度比と流量の条件により、凍結界面での水側と凍結層側の熱平衡が、微妙に水側の流動状態に依存する領域が存在する。

3.3 管内圧力損失の経時変化 図9は、 45° 曲がり鋼管の凍結による鋼管前後の圧力損失の経時変化を $T^*=10$ の温度条件のもとで圧力損失係数 f と無次元時間であるフーリエ数 Fo の関係で示したものである。図9中の破線は前報⁽⁹⁾の 90° 曲がり管の結果である。この f と Fo の関係より、圧力損失の形で管内の凍結挙動を推測することができる。 $Re=1180$ の低レイノルズ数領域では、圧力損失係数 f の急激な増加が観察され、その後一定の f 値を示し、すなわち定常状態となり管が凍結により閉そくされたことになる。温度比 $T^*=10$ の温度条件および低レイノルズ数領域のもとでは図5の凍結挙動の可視化写真でみられたよう

図8 凍結状態 ($Re=3330$, $T^*=10 \pm 0.5$)

に、凍結層を通して伝導による熱輸送量が水側の対流による熱輸送より大きく上回ることにより、このように f の値が時間とともに急激に増大することになる。一方、 $Re \geq 1700$ の領域に対して f の Fo に対する増加は比較的緩慢となり、凍結による管閉そくには多くの時間を必要とする。この緩慢な f の上昇は、 Re 数の増加とともに水側の対流による熱伝達量の増加により凍結の進行が遅れることに起因すると考えられる。また $Re=1700 \sim 3260$ の範囲においてはまだ凍結層を通しての熱輸送量が多いことより最終的に管の閉そくがみられる。本報における 45° 曲がり管の全体的な圧力損失係数 f の変化傾向は、前報の 90° 曲がり管の結果と類似している。しかしながら定量的には特に高レイノルズ数領域において両者の f に差が認められる。例えば、 $Re=1700$ においては 45° 曲がり管のほうが 90° 曲がり管に比較し約 $1/3$ の時間で管が閉そくしている。この両者の差は、 90° 曲がり管のほうが 45° 曲がり管に比較し流れのはく離および遠心力による二次流れの効果を増大することより生ずるものと考えられる。

図9 管の抵抗係数 f とフーリエ数 Fo の関係 ($T^*=10 \pm 0.5$)

図10 管の抵抗係数 f とフーリエ数 Fo の関係 ($T^*=10 \pm 0.5$)

図10は、直管(曲がり角 $\theta=0^\circ$)と 45° 曲がり管(破線)の f と Fo の関係を同じ温度比 $T^*=10(T_\infty=1^\circ\text{C})$ のもとで比較したものである。全体的 f の変化の傾向は、直管も 45° 曲がり管も類似しているが、凍結による管閉そく達するまでの時間(Fo の値)は、直管のほうが短くなっている。さらに両者の管閉そくまでの時間の差は、レイノルズ数の増加とともに小さくなっている。しかしながら 45° 曲がり管と直管の管閉そくまでの時間の差は、図9で示した 45° 曲がり管と 90° 曲がり管の差に比較してかなり小さいことがわかる。このことは、 45° 曲がり管のほうが 90° 曲がり管に比較してその流動状態が直管に比較的類似していることに起因する。

図11は、高レイノルズ数領域における 45° 曲がり管の圧力損失 Δp の経時変化を示したものである。全体的には、圧力変化の増減を繰返しながら一定の圧力損失の値に達し、完全に管閉そくの起こらない状態で定常状態となることがわかる。すなわち、実験開始後間もない状態での Δp の値の上昇は凍結層の急速な進行により起こるもので、その後局所熱伝達率の変化に対応して図7で示されたような流路の拡大および縮小を形成しながら熱的および流動的に安定の方向に向かい定常状態に達する。また $Re=6750$ の場合には、流量の増大に伴って水側の対流熱輸送量の増加により凍結層の発達が減少していることが Δp の上昇および時間的变化が小さいことより理解できる。

3.4 凍結による管閉そくの限界条件 図12は、凍結により管が完全に閉そくされる場合の限界条件を温度比 T^* とレイノルズ数 Re の関係にて示したものである。実験データは 45° 曲がり管のものをプロット

図11 圧力損失 Δp の経時変化($T^*=10\pm 0.5$)

図12 管閉そくの限界条件(T^* と Re の関係)

してあり、黒丸印は管が完全に閉そくする場合そして白丸印は管が完全に凍結層により閉そくしない場合を示す。参考として 180° および 90° 曲がり管そして直管の実験式も載せてある。図12よりも管が完全に凍結により閉そくする限界条件を Re 数と温度比 T^* の関係にて十分に表せることが理解できよう。 45° 曲がり管と直管($\theta=0^\circ$)の管閉そく限界条件を T^* と Re 数の関係にて実験式を最小二乗法により誘導すると相対誤差3%以内で次のようになる。

45° 曲がり管:

$$\begin{aligned} 250 \leq Re \leq 2450 \\ T^* = 1.31 + 2.56 \times 10^{-3} Re - 4.46 \times 10^{-7} Re^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} 2540 < Re < 5600 \\ T^* = -0.112 + 2.08 \times 10^{-3} Re \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

直管($\theta=0^\circ$)

$$\begin{aligned} 250 \leq Re \leq 3500 \\ T^* = 1.41 + 1.52 \times 10^{-3} Re - 2.79 \times 10^{-7} Re^2 \\ + 4.24 \times 10^{-11} Re^3 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} 3500 < Re \leq 6000 \\ T^* = -5.84 + 3.12 \times 10^{-3} Re \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

まず曲がり角 θ の管閉そくにおよぼす効果を述べると、同じ Re 数条件でも θ の大きなもののほど管閉そくに大きな温度比 T^* を必要とし、管閉そくが θ の増大とともに起こりづらくなることがわかる。このことは、曲がり角の増大とともに流れの乱れによる熱伝達率の大きい曲がり部の管全体に占める割合が大きくなることと大きな曲がり角ほどその流れの乱れ(二次流れ)の効果が大きくなることより説明できよう。 $\theta=180^\circ$ 曲がり管の場合には、 T^* の Re に対する変化は変曲点を伴わずに単調に増加している。一方、 $\theta=90^\circ, 45^\circ$ そして 0° (直管)と θ が減少するにつれ、限界曲線がそれぞれ $Re=1350, 2450$ そして 3500 を境として変化していることがわかる。この θ の減少に伴う限界曲線の変化する Re 数が増大する傾向は、流路内の流れ状態の変化に対応するものと考えられる。すなわち、曲がり角の減少に伴って二次流れの効果による流れの乱れが減少する。この θ の減少による流れの乱れの減少が T^* の Re 数のこの配の大きくなる実験式へ移行する限界 Re 数の増大をもたらすことになる。凍結を伴わない滑らかな直管の層流より乱流への移行は一般に $Re=2300 \sim 2600$ で起こるが、本研究のような凍結を伴う場合には流路の縮小および凍結界面形状による流れの乱れおよび乱流状態の流れの流路縮小部での層流化現象などの複雑な現象を伴うものでその乱流へ

図 13 管閉そくまでの無次元時間 Fo^* とディーン数 Re^* の関係

の遷移レイノルズ数の定義も一義的に決定できない状況にある。さらに $Re=5400$ 前後で 45° 曲がり管と直管の管閉そくの限界温度比 T^* が一致しているものも興味のあるところである。このように乱流の支配する流れ状態では直管より少しの曲がり角を有する管では曲がりの効果はそれほど管閉そくに寄与しないことがわかる。

図 13 は、 45° 曲がり管の凍結により管閉そくまでの無次元時間 Fo^* と曲率の影響を考慮したレイノルズ数の無次元量であるディーン数 Re^* の関係を温度比 T^* をパラメータに用いて示したものである。図 13 中の破線で示した曲線は 90° 曲がり管の結果である。ディーン数 Re^* の増大に伴って、 Fo^* の値も大きくなり、管閉そくの時間が多く掛かることがわかる。 Fo^* の Re^* に対する増加割合は、温度比 T^* の減少とともに増加する傾向にある。すなわち温度比 T^* の減少は凍結界面において相対的に凍結層側の熱伝導による熱輸送量が減少することを意味し、結果として凍結の進行が遅くなり管閉そくまでの多くの時間を必要とする。さらに温度比 $T^*=10$ の場合、 Re^* 数の大きな領域で Fo^* の増加割合が急激に大きくなる特徴を有する。この Fo^* の増加は前掲の可視化写真図 8 で観察されたように流れ状態に依存した水側の局所熱伝達率の変化が流路の拡大および縮小を伴う凍結界面形状の経時変化をもたらし凍結により管閉そくまでより多くの時間を必要とすることより説明できる。 45° 曲がり管の Fo^* の変化を 90° 曲がり管の結果と比較すると両者は各温度比に応じて類似した Fo^* の変化傾向を示す。しかしながら、 90° 曲がり管のほうが曲がりによる二次流れの効果が 45° 曲がり管に比較して大きいことより、管閉そくにより多くの時間を必要とすることが

わかる。

4. 結 論

45° 曲がり管および直管内の流動水に対する凍結実験が流動水量、流動水温および冷却温度を変化させ、凍結状況の可視化および試験円管前後の圧力損失の経時変化を実測することにより行われ、次の結論を得た。

(1) 45° 曲がり管においても、曲がり部に発生したはく離流れおよび二次流れにより曲がり部の局所熱伝達率が増大し、この部分での凍結の進行が阻止されることが凍結状況の可視化実験より明らかとなった。

(2) 45° 曲がり管の凍結破壊は、まず曲がり部下流の直管部での凍結による管閉そくが先行し、次に曲がり部上流の直管で管閉そくが行われ、最終的に曲がり部に閉じ込められた水の凍結により曲がり部が破壊することが判明した。

(3) 曲がり角の減少とともに同じ流量条件のもとで凍結により管閉そくの限界温度比が小さくなり、結果として曲がり角の小さいものほど短時間に管閉そくが行われることが明らかとなった。

(4) 45° 曲がり管および直管の凍結による管閉そく条件は、温度比とレイノルズ数の関係で整理することが可能であることがわかった。実験整理式の誘導にあたり流動状態に応じて二つの領域に整理式を分類できることが判明した。さらに管閉そくまでの必要とする時間を温度比をパラメータとしてフーリエ数とディーン数の関係にて定量的に表すことができた。

本研究の研究費の一部は、文部省料研費一般 C58550136 の補助を受けたことを記してここに感謝する。

文 献

- (1) 福迫, 機論, 48-433, B (昭 57), 1643.
- (2) Ozisik, M. N. and Mulligan, J. C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.* 91 (1969), 385.
- (3) Zerkle, R. D. and Sunderland, J. E., *Trans. ASME, J. Heat Transf.* 90 (1968), 183.
- (4) Thomason, S. B., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.* 100 (1978), 387.
- (5) 智田, 機論, 49-438, B (昭 58), 433.
- (6) Gilpin, R. R., *Trans. ASME, J. Heat Transf.* 103 (1981), 363.
- (7) 平田・石原, 機論, 51-464, A, B, C (昭 60), 1243.
- (8) 追分・稲葉, 機論, 51-471, B (昭 60), 3777.
- (9) 稲葉・ほか 3 名, 機論, 53-495, B (昭 62), (印刷中).

討 論

〔質問〕 服 部 賢〔長岡技術科学大学〕

この論文では、管閉そく条件をレイノルズ数で整理されている。ここで用いられたレイノルズ数は元の管径を代表長さとしているように思う。凍結問題のように、流路断面積が時間的、空間的に変化する現象がレイノルズ数（またはディーン数）で整理できることの物理的意味をご教示いただければ幸いである。

〔回答〕 論文中の可視化写真に見られるように、円管内の凍結界面形状およびその断面寸法は時々刻々変化し、複雑な管内凍結挙動を示す。現状においてはその変化に対応した物理的意味を明確にしたパラメータを見いだすには致っていない。しかしながら、元の管径を代表長さを用いたレイノルズ数およびディーン数により平均的な意味において、管閉そく条件などが結果として比較的簡単な関係にてまとめることができた次第である。今後は、凍結挙動の部分的な現象の把握より誘導される物理的現象を踏まえた新たなパラメータを提案すべく本研究を継続する考えである。

〔質問〕 平 田 哲 夫〔信州大学工学部〕

(1) 曲がり円管の凍結閉そく限界条件は、曲がり部上流部および下流部それぞれの直管部長さがパラメータになると思う。たとえば、曲がり部上流部が十分に長い管においては、図 12 の結果が示すように管閉そくは曲がり部よりむしろ直管部で起こってしまう。したがって管が長い程曲がり部の影響は小さくなり直管の閉そく条件に漸近すると思われる。一方曲がり部下流部が十分長い場合は、曲がり部での二次流れの影響は、流路の縮小・拡大部における加速・はく離を繰返

すうちに減衰し、これも管が長いほど直管の閉そく条件に近づくと推測される。貴論文では直管部長さに全くふれられてないが、どのようにお考えか。

(2) 図 12 には供試曲がり円管の上流部と下流部それぞれの直管部長さを明記すべきと思われるがどうか。

〔回答〕 (1) 本研究は配管網の部分的凍結として曲がり部の凍結現象を取りあげたものである。したがって比較的曲がり部の凍結に及ぼす影響の強い領域すなわち相対的に直管部の短い管系統に焦点を絞り実験を行い、曲がり部領域の凍結挙動に対する基礎資料を得ることを主目的としている。凍結はまず曲がり管部前後の直管部にて進行そして管閉そくが行われている。ご指摘のように直管部領域が長いほど、曲がり部の効果が減少し、結果として曲がり部を伴う場合でも直管の管閉そく条件に漸近するものと考えられる。したがって曲がり部の二次流れの影響が減衰する直管領域の研究も当然必要であり今後の研究課題と考える。

(2) 本論文で対象とする 45° 曲がり管の直管部の長さは、次のように決めてある。曲がり部後の直管部長さは、本実験のレイノルズ数範囲にて、流れの可視化実験より判断して二次流れの効果が比較的弱くなる長さ $l=313\text{ mm}$ ($l/d=14$, $d=22.2\text{ mm}$) とした。一方曲がり部前の直管部長さは、本実験条件にて、凍結により管閉そくが直管部一箇所で行き止まる極力短い長さとした。本実験においてはその長さ $l=95\text{ mm}$ ($l/d=4.3$) とした。