

水道分岐管の凍結挙動*

稲葉英男^{*1}, 大竹秀雄^{*2}

Freezing Behavior of Branched Water Supply Pipes

Hideo INABA and Hideo OOTAKE

The formation of ice growth that occurs in branched pipes (branch angle $\theta=45^\circ$ and 90°) containing water flow was investigated experimentally. The experiments were carried out under various experimental conditions over the range of Reynolds number (based on pipe i.d.) $Re=420-12\,500$ and cooling temperature ratios of the freezing parameter $T^*(=T_f - T_w)/(T_\infty - T_f)$, $T_f=0^\circ\text{C}$, T_w = cooling water pipe wall temperature, T_∞ = flowing water temperature $=1.3-11.1$. From the visualization of ice formation in the pipes, the branched pipe with flowing water was first blocked by ice formation; subsequently, the main pipe downstream of the branched portion was frozen off, and eventually the main pipe upstream of the branched portion was blocked by ice formation. As a result, freezing of the remaining water in the branched portion resulted in a pipe rupture at around the branched portion of the pipe. The transient behavior of ice formation, according to time proceeding, was expressed as a relationship between the pressure loss coefficient f and the Reynolds number Re for various cooling temperature ratios T^* . In addition, the critical condition of the complete ice blockage in branched pipes was obtained with experimental correlation equations in terms of T^* and Re .

Key Words: Heat Transfer, Freezing, Internal Flow, Branched Pipe, Pressure Loss Coefficient, Ice Blockage

1. 結 言

水道管の凍結問題は、寒冷地域に住む住民の生活安定上解決しなければならない重要な課題である。従来より直円管内の凍結問題に関する研究は、理論的および実験的に数多くなされ、その凍結機構の全容は明らかにされつつある。著者らは、水道曲がり管の凍結現象解明の実験研究を種々の曲がり管を対象として行ってきた^{(1)~(4)}。その結果曲がり部の局所熱伝達率の大きい領域での凍結の進行が遅れ、曲がり部前後の直管部においてまず最初に凍結により管閉そくが起り、最終的に曲がり部の停留水が密閉状態にて凍結し、曲がり部での管破壊が起こる機構とその凍結限界条件を解明した。水道管網においては、直管部、曲がり部以外に多数の配管分岐部より構成されているが、分岐管部の凍結に関する情報は、皆無に等しい。分岐管部は、曲がり部と同様に流れ状態の複雑な局所熱伝達率の大きい領域であり、凍結挙動も複雑となることが予想される。本研究は、水道管分岐部における基本的な凍結挙動に関する情報をえることを目的として、 45° および

90° 分岐管を対象とし、可視化実験による流れ状態、凍結層の進行状態の定性的把握および凍結層による分岐管前後の圧力差、温度差などの測定より、凍結による管閉そくの限界条件、管閉そくまでの時間そして主管と分岐管との相互干渉を実験的に検討したものである。

記 号

d, d_0 : 円管内直径, 円管外直径

F_0 : フーリエ数 $= at/d^2$

F_0^* : 管閉そくまでのフーリエ数 $= at_c/d^2$

f : 圧力損失係数 $=(p_1 - p_0)/[(\rho V^2)/2]$

l : 分岐管の全体長さ

p_i, p_o : 分岐管入口および出口圧力

Re : レイノルズ数 $= Vd/\nu$

Q : 水流量

T_∞, T_w, T_f, T_b : 流水温度, 分岐管壁温度, 水の凍結温度(0°C), 冷却ブライン温度

T^* : 冷却温度比 $=(T_f - T_w)/(T_\infty - T_f)$

t : 時間

t_c : 管閉そくまでの時間

V : 管内平均流速

α : 水の温度伝導率

* 原稿受付 平成元年11月24日。

*¹ 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1)。

*² 准員、サンデン(株) (〒372 伊勢崎市20)。

- ρ : 水の密度
 ν : 水の動粘性係数
 θ : 分岐角度

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、図1に示されるように試験水冷却系統、冷却ブライン系統および試験部の3要素から成り立っている。本実験においては、試験部を除いた他の部分は前報の曲がり管における実験装置⁽³⁾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。本実験では、一般水道管の給水管を想定し、管内径 $d=20.8$ mm (管外径 $d_0=22.2$ mm) および管全長 $l=670$ mm の鋼管を用い、図2(a), (b)に示すような位置に $\theta=90^\circ$ および 45° 分岐管部を設ける構造とした。さらに分岐管内の流動状態および凍結挙動の可視観測のため、管内径 $d=22$ mm (管外径 $d_0=26.1$ mm) の耐圧ガラス円管にて、鋼管と同じ配置の分岐管を製作し、可視化実験を行った。試験管入口部には、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 4100 mm の助走区間用円管(無冷却)が設けてある。実験は、まず試験部を一定の冷却温度 T_w に長時間保った後に、定圧弁⑮よりの一定圧力 ($p_i=1.013 \times 10^5 \pm 5 \times 10^3$ Pa) に制御された試験水を試験分岐管に流入させることより開始する。試験部の冷却は、図2に示される供試分岐管全体とし、極力均一な冷却が行われるように整流板により冷却ブラインの流れ状態を制御してある。本研究においては、基本的な分岐管の挙動把握のために、試験開始の初期条件として試験部入口主管(Main Pipe)の流量の半分が分岐管(Branch Pipe)に流れるように、主管および支管両出口に設けた流量調整弁により制御してある。したがって凍結層の発達とともに管内平均流量は減少することになる。分岐管内の凍結層の可視化実験では、少量の綠色染料を試験水に添加することにより、凍結層と流動水の境界を鮮明にし、凍結界面状態を目視観察および写真撮影により把握した。さらに流れ状態の可視化実験では、墨を試験部入口より徐々に注入し、そのトレーサとしての墨の流れ状態により試験水の流動状態を把握した。なお、本研究は、基本的に分岐管部周りの凍結挙動を把握することを主目的として、図2で示される分岐部全体の冷却を行っている。分岐管の壁温条件として均一な温度境界に近づけるために、試験部冷却水槽内に設けた整流板の調整、冷却ブラインの流量および温度調節により、試験水槽出入口のブライン温度差を最大 1°C 以内に制御することとした。その結果、分岐管壁温度 T_w の場所(4点測定)による変化は、最大 0.3°C

以内とすることが可能となった。実験データの整理に用いた諸量として、試験水の温度 T_w は、分岐管入口流水の温度、分岐管壁温度 T_w は、分岐管に設けた4点の熱電対(0.1 mm, Cu-Co 熱電対)による温度の平

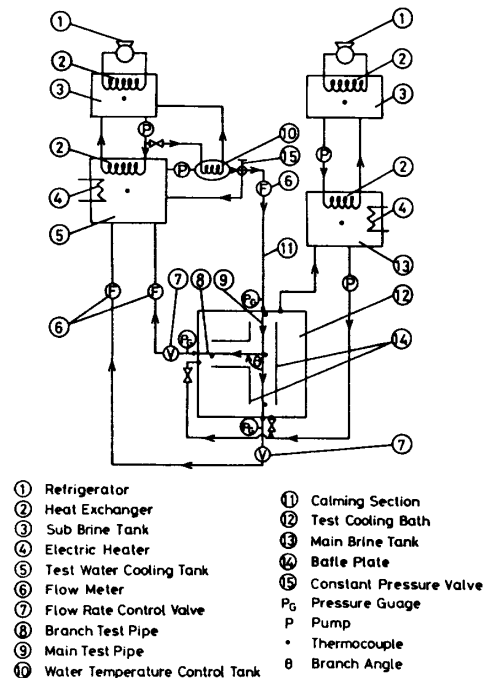
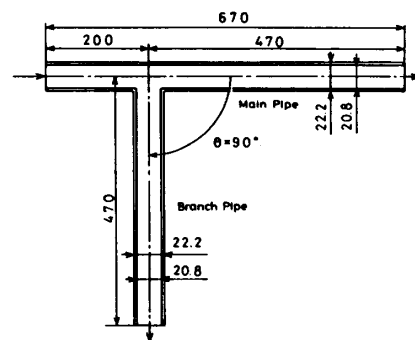
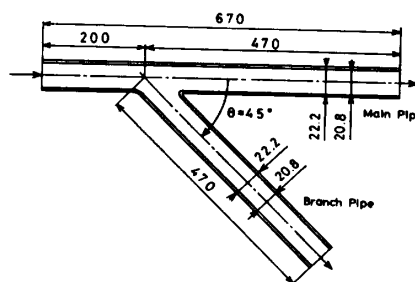


図1 実験装置概要



(a) $\theta=90^\circ$



(b) $\theta=45^\circ$

図2 分岐管詳細

均値, 水の流量 Q は, 試験開始直後の分岐管上流の主管における流量, および無次元整理のための物性値は, 凍結温度 T_f と T_∞ の平均値を採用した。なお, 圧力損失係数 f の算出における管内平均流速 V は試験開始直後の未凍結状態の値を用いた。本実験の範囲は, 次のとおりである。

試験水温度 $T_\infty = 0.4 \sim 8.2^\circ\text{C}$, 水流量 $Q = 0.7 \sim 21 \text{ l/min}$, 分岐管壁温度 $T_w = -3.2 \sim -15.2^\circ\text{C}$, 冷却温度比 $T^* = 1.3 \sim 11.1$, レイノルズ数 $Re = 420 \sim 12\,500$ 。

3. 実験結果およびその考察

流動水温度および試験部の温度は室温とし, 冷却の行わない条件のもとで流れ状態の可視化実験が行われた。図 3 (a), (b) は, 傾斜角 $\theta = 90^\circ$, $Re = 1\,260$ および $7\,100$ の場合における流れ模様をスケッチしたものである。層流の $Re = 1\,260$ においては, 図 3 (a) の A-A 断面方向より観察した流動状態より, (1) 管中央の流れ領域(主管下流へ流出), (2) 分岐部頂点(C)に衝突し, 分岐する流れ, 主管下流より戻って支管へ流入する逆流, そして支管へ流入後旋回して主管下流へ流出する逆流域を伴う複雑な流れ領域〔図 3 (a) 中黒色部分〕および(3) 管内壁に沿って旋回しながら支管に流入する円環状流れ領域〔図 3 (a) 中斜線部分〕に大まかに分けることができる⁽⁵⁾。図 3 (b) の $Re = 7\,100$ の乱流状態においては, もととの流れが乱れた流れ状態で分岐部に流入することより, 層流領域で観察された(2)の複雑な流れ模様領域が, 相対的に減少する傾向にある。図 4 (a), (b) は, $\theta = 45^\circ$, $Re = 1\,260$ および $6\,200$ における流れ模様のスケッチを示したもの

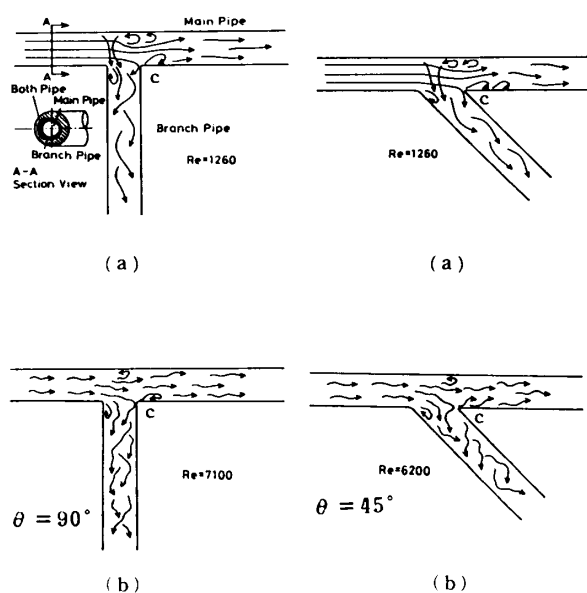


図 3 分岐管内水流れ模様

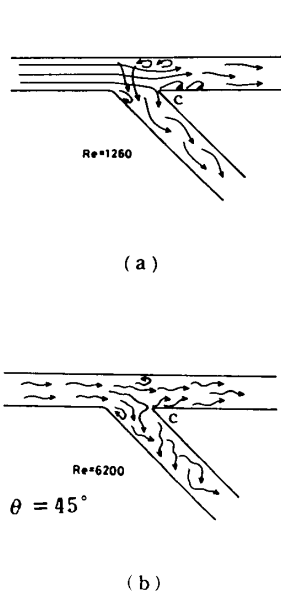


図 4 分岐管内水流れ模様

である。分岐角 $\theta = 45^\circ$ の場合も $\theta = 90^\circ$ と比較して基本的には類似した流れ挙動を示すが, $\theta = 45^\circ$ においては, $\theta = 90^\circ$ の場合よりも支管への流れの分岐が比較的円滑に行われている様子が理解できる。

図 5 (a) は, 分岐角 $\theta = 90^\circ$, 冷却温度比 $T^* = 8$ ($T_\infty = 1^\circ\text{C}$), および $Re = 6\,500$ の実験条件にて, 冷却開始後 $t = 120 \text{ min}$ における分岐管内の凍結状態の可視化写真を示したものである。図 5 中の黒色部分は, 流動水を示し, 白色部分は, 凍結層を示す。分岐部領域では, 前述の流れ模様の可視化実験結果より複雑に混合

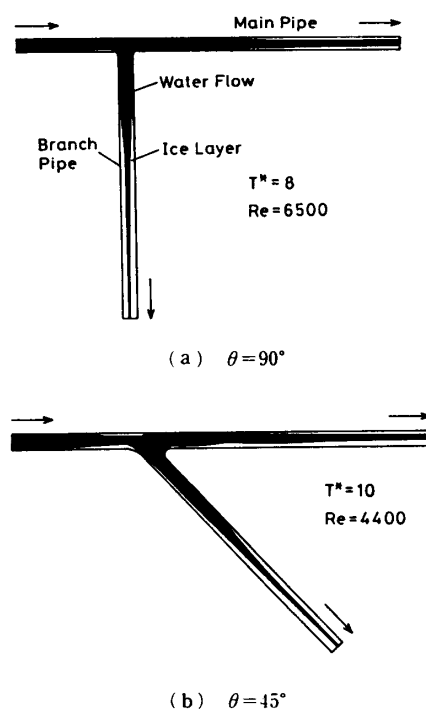


図 5 分岐管内の凍結状態

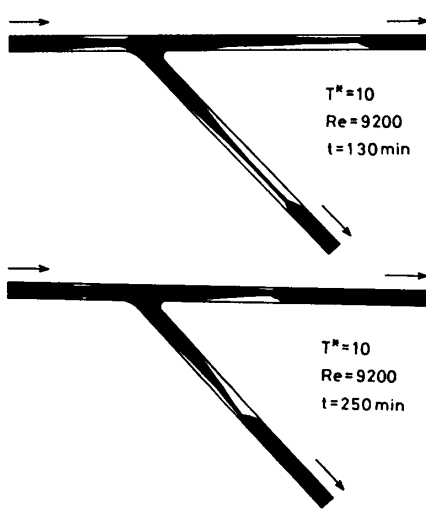


図 6 $\theta = 45^\circ$ 分岐管内の凍結状態

した流れとなり、この流れ状態が局所熱伝達率の増加を生み、結果として凍結層の発達を阻止しているものと考えられる。支管下流部の著しい凍結層の発達は、主管上流域の冷却面に近い低温度の円環状流れが、主として支管部に流出することに起因する支管全体の流入水温度低下により起こるものと思われる。図5(a)の条件にて、さらに長時間冷却実験を継続するとまず支管下流部での凍結による管閉そくが起り、次に主管下流部での管閉そくの発生、そして分岐部直前の主管での管閉そくを生ずる。最終的に、分岐部での停留水の凍結が密閉された状態で進行し、分岐部での水の凍結による体積膨張の影響で分岐部の管破壊が起こる結果となった。図5(b)は、 $\theta=45^\circ$ 、 $T^*=10$ ($T_\infty=1^\circ\text{C}$)、 $Re=4400$ の実験条件にて、冷却開始後 $t=180$ minにおける凍結状態の可視化写真を示したものである。基本的には、 $\theta=45^\circ$ の場合も図5(a)の $\theta=90^\circ$ における凍結挙動と類似した傾向を有するが、詳細に観察すると支管下流部の凍結層の発達は、 $\theta=45^\circ$ の場合よりも $\theta=90^\circ$ のほうが著しいことがわかる。図6(a)、(b)は、 $\theta=45^\circ$ 、 $T^*=10$ ($T_\infty=1^\circ\text{C}$)、 $Re=9200$ の実験条件における $t=130$ minおよび250 min後の凍結挙動の可視化写真を示したものである。時間の経過とともに支管下流および主管下流部の凍結層による流路拡大部におけるはく離流れの凍結層への再付着による局所熱伝達率増大の効果のため、凍結層の融解が上流側へ進行する特異な現象が観察された。これは、前報の曲がり管の実験結果においても観察され⁽¹⁾、管内の凍結現象は、凍結界面における微妙な熱平衡のうえに成り立っていることが理解できる。

分岐管前後の圧力差は、管内の凍結状況を知るうえで重要な因子である。図7は、冷却温度比 $T^*=10$ ($T_\infty=1^\circ\text{C}$)の条件のもとで、種々のレイノルズ数 Re に対する圧力損失係数 f と無次元時間であるフーリエ数 F_0 の関係を示したものである。フーリエ数 F_0 の増大とともに Re 数に応じてさまざまな f 値の増加割合となり、管内凍結層の発達が、 Re 数により大きく支配される様子がわかる。すなわち、一定の冷却温度比の条件では、 Re 数の増大とともに固一液界面の熱伝達率が増大し、その結果凍結層の発達が抑止され、管閉そくにより多くの時間がかかることになる。全体的に支管部のほうが分岐後の主管部より早い時期に凍結により管閉そくが起こる傾向にある。これは、前述の流れの可視化の結果からも支管部には、分岐部上流の冷却壁近傍に発達する比較的冷たい円環状流れが主として流入することにより、分岐部下流の主管部よりも早く凍結が進行し、管閉そくが起こるものと思われる。

低レイノルズ数領域では、凍結層を通しての伝導による熱輸送量が、水側の対流による熱輸送量を大きく上回ることで、 f 値の急激な上昇が観察されると同時に支管および主管の管閉そくまでの時間も近づく傾向となる。一方、 Re 数が大きくなるにしたがって、 f 値の増加も緩慢となるとともに主管と支管の管閉そくまでの時間の差が増大する。これは、支管の凍結層の発達とともに分岐部下流の主管へ流入する水量が増大することにより、主管側の熱伝達率が増大し、主管の管閉そくに多くの時間を必要とすることによるものと理解される。さらに Re 数が大きな乱流の流れ状態では、支管と主管部の管閉そく時間が接近している様子が理解できる。このような乱流状態においては、分岐部の効果が主流がもともと乱れているために相対的に軽減されることにより、支管および主管の凍結挙動に大きな差を生じない原因と思われる。さらに全体的に $\theta=90^\circ$ 分岐管のほうが $\theta=45^\circ$ 分岐管よりも早い時期に凍結により管閉そくが起こる傾向にある。この原因としては、 $\theta=90^\circ$ 分岐管の場合には、分岐部への流動抵抗は $\theta=45^\circ$ 分岐管に比較して大きく⁽⁶⁾、 $\theta=90^\circ$ 分岐

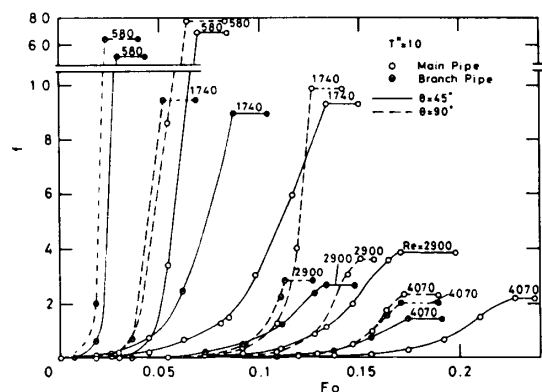


図7 圧力損失係数 f とフーリエ数 F_0 の関係

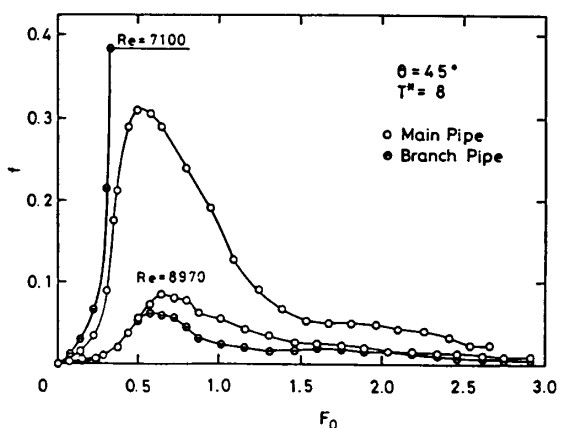


図8 圧力損失係数 f とフーリエ数 F_0 の関係

管で一度凍結層が発生し、管内流動抵抗の増大にともなう支管へ流入する流量が急激に減少し、その結果支管の凍結による管閉そくを助長するものと思われる。図8は、 $\theta=45^\circ$ および $T^*=8(T_\infty=1^\circ\text{C})$ の条件にて高レイノルズ数領域における f 値の変化を示したものである。 $Re=7100$ では、支管部に凍結による管閉そくが起こるが、主管部には管閉そくが起こらないことがわかる。さらに $Re=8970$ の場合には、支管および主管とも f 値の増減を繰り返しながら、一定の f 値に達し、完全に管閉そくの起こらない定常状態に到達することになる。凍結開始後の急激な f 値の増大は、凍結層の急速な進行により起こるもので、その後流れ状態に依存した局所熱伝達率の変化に応じて図6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な方向に向かって定常状態に達する。

図9は凍結により鋼製分岐管が完全閉そくされる場合の限界条件を、冷却温度比 T^* と Re 数の関係にて示したものである。図9中の黒丸印は、主管、支管とも

に閉そくする場合、白丸印は、主管、支管ともに閉そくしない場合、そして①印は、支管のみが閉そくする場合を表す。

図9より Re 数の増大とともに、凍結管閉そく限界を示す冷却温度比 T^* の増加となる様子が理解でき、管閉そく限界を十分に Re 数と T^* の関係にて表すことが可能である。支管部が凍結により管閉そくする場合の限界条件を T^* と Re 数の関係にて実験データを最小二乗法により整理すると相対誤差10%以内で次のような実験式が誘導された。

$\theta=90^\circ$ 分岐管： $500 \leq Re \leq 7200$ ；

$$T^* = 1.37 + 4.83 \times 10^{-4} Re \quad \cdots \cdots (1)$$

$7200 < Re \leq 12000$ ；

$$T^* = -1.69 + 9.13 \times 10^{-4} Re \quad \cdots \cdots (2)$$

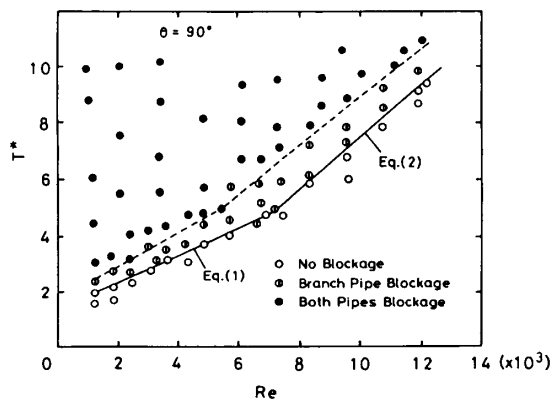
$\theta=45^\circ$ 分岐管： $500 \leq Re \leq 5000$ ；

$$T^* = 1.72 + 5.98 \times 10^{-4} Re \quad \cdots \cdots (3)$$

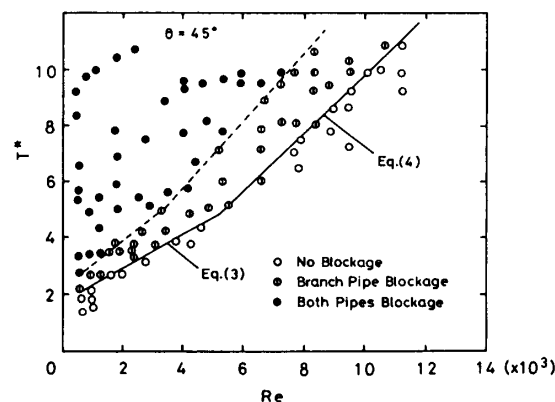
$5000 < Re \leq 11000$ ；

$$T^* = -0.44 + 1.01 \times 10^{-3} Re \quad \cdots \cdots (4)$$

いずれの分岐管においても二つの Re 数領域に分けて

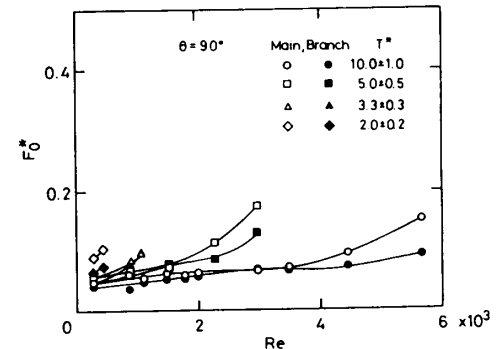


(a) $\theta=90^\circ$

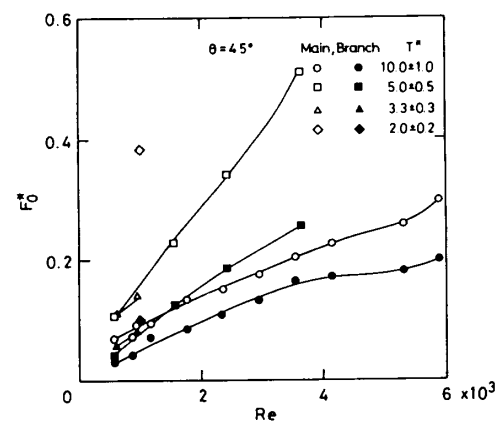


(b) $\theta=45^\circ$

図9 管閉そく限界(T^* と Re 数の関係)



(a) $\theta=90^\circ$



(b) $\theta=45^\circ$

図10 管閉そくまでの無次元時間 F_0^* とレイノルズ数 Re の関係

実験整理式が誘導されている。低レイノルズ数では、 T^* の Re 数に対するこう配が小さいが、高 Re 数領域では、そのこう配がより大きくなっている。この大きな T^* の Re 数に対するこう配は、高 Re 数になるにしたがって、乱流状態の流れが支配的となり、凍結の進行が阻止される割合が大きくなることによるものと思われる。さらに $\theta=90^\circ$ 分岐管は、 $\theta=45^\circ$ 分岐管に比較し、より小さな冷却温度比 T^* で管閉そくが起こり、凍結により管閉そくされやすい状況にあることもわかる。図10(a)、(b)は、それぞれ $\theta=90^\circ$ および 45° における分岐管の凍結開始より管閉そくまでの時間 t_c を用いた無次元時間である F^* と Re 数の関係を示したものである。

Re 数の増大とともに水側の対流熱伝達の増加が管閉そくまでの時間の増加となる様子が理解できる。また、冷却温度比 T^* の減少とともに同じ Re 数でも管閉そくにより多くの時間を必要とする。冷却温度比 T^* の減少は、相対的に水側の対流伝熱により運ばれる熱輸送量の増大により、凍結層の発達速度が減少することにより、 T^* の減少とともに管閉そくまでの時間が長くなるものと思われる。いずれの T^* においても高 Re 数にて管閉そくの F^* の値が急に大きくなっているのは、図6で観察された凍結層の融解・発達が繰返され、最終的に長時間をかけて管閉そくとなることによるものと考えられる。図10(a)の $\theta=90^\circ$ 分岐管と図10(b)の $\theta=45^\circ$ 分岐管の F^* 値を比較すると同じ Re 数および T^* 値でも $\theta=90^\circ$ 分岐管のほうが小さな F^* の値となり、図9で示した凍結限界の結果と同様凍結による管閉そくが起こりやすい状況にあること

も理解できる。

4. 結 言

分岐角 $\theta=45^\circ$ および 90° 水道分岐管内流動水の分岐管周りの部分冷却による凍結実験が、流動水量、流水温度および冷却温度を変化させ、凍結状況の可視化および分岐部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、分岐部を有する配管の凍結による管閉そくは、まず比較的低温水が流入する支管部での凍結層による管閉そくが先行し、次に分岐部下流での管閉そくが起こり、最後に分岐部上流の直管部での管閉そくとなる。したがって、分岐部に停留した未凍結水が、最終的密閉状態にて凍結し、分岐部での管破壊となる一連の凍結による管破壊機構が明らかとなった。さらに、 $\theta=90^\circ$ 分岐管のほうが、支管部での凍結層の発達が著しいことより、 $\theta=45^\circ$ 分岐管よりも早く凍結による管閉そくが起こることが判明した。両分岐管の凍結による管閉そく限界条件は、冷却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。

文 献

- (1) 追分・稲葉, 機論, 51-464, B(1985)3777.
- (2) 稲葉・追分・福田・菅原, 機論, 53-495, B(1987), 3317.
- (3) 稲葉・追分・福田・菅原, 機論, 54-500, B(1988), 984.
- (4) 稲葉・福田, 日本冷凍協会論文集, 4-2(1987), 71.
- (5) 東野・阿部・桶田・望月, 機論, 47-423, B (1981), 2139.
- (6) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (1968), 8-20, 日本機械学会.