HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	管内ステップ状凍結層発生原因に関する一考察
Author(s)	田子, 真; 福迫, 尚一郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 152, 57-66
Issue Date	1990-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42245
Type	departmental bulletin paper
File Information	152_57-66.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第152号（平成2年）

Bulletin of the Faculty of Engineering
Hokkaido University. No. 152 (1990)

管内ステップ状凍結層発生原因に関する一考察

田子　真　福迫尚一郎

（平成2年6月30日受理）

An Experimental Study of Ice-Layer Transition Phenomena

Makoto TAGO and Shoichiro FUKUSAKO

(Received June 30, 1990)

Abstract

An experimental study is performed to investigate the ice-layer transition phenomena observed in a channel which has a lower cooled wall. The rectangular test channel with cross-sectional dimensions of 50 mm by 19 mm was used in the present measurements. The velocity distribution and the turbulence intensity in a flow passage were measured using the Laser Doppler Velocimeter set up on the two-dimensional traversing device. The freezing experiments were carried out under the condition of constant amount of flow even after the ice-layer developed in the channel. From the present measurements, it was found that onset of the ice-layer transition might be quite closely related to the increase of the turbulence intensity in a flow along the developing ice-layer surface.

1. 緒　　言

水道管の凍結破損に代表される管内静水の凍結は，北海道のような寒冷地において，冬期間によく見られる現象である。このような静水の凍結は，相変化現象の一つとして興味ある問題であり，従来より多くの解析的あるいは実験的研究がなされている。一般に，管内の静水が緩慢な冷却を受ける場合，静水は凍結温度以下になっても固相に変化せず過冷却状態となり，その後突然に管壁から樹枝状氷[1]が発生する。その過程において静水内には，温度変化に伴う密度逆転が生じるため自然対流の影響が顕著に現れ，現象はかなり複雑なものとなる[2]ことが報告されている。

一方，流水を伴う管内凍結については，円管や二平行平板などの直行流路の他，角度の異なる曲がり管やベンドを用いて，主に実験的研究がなされている。これらの研究結果から，管内に成長する凍結層はある条件下において，流れ方向に沿い凹凸状の凍結層へと形状変化することが観察されており，〝ステップ状凍結層〟[3]，〝Ice-Wave〟[4]，〝リップル状凍結層〟[5]などと呼ばれている。このように強制対流下での凍結現象はさらに複雑なものとなる。これらの現象は，非定常的な凍結層の成長により管内流動が変化し，これが凍結界面の熱バランスに影響を与え，凍結層の形状変化が生じるというように，凍結層・流れ場・温度場の三者が密接に影響を及ぼし合いながら非定常的変化を繰り返す，と言うことに起因しているものと考えられている。ひとたび凍結層

機械工学第二学科　伝熱工学講座

が凹凸状へと形状変化した後は，凸部において流れが剝離し，剝離点後方での渦や逆流により凍結層が下流より融解され，最終的には定常状態へ至るものと考えられる。しかしながら，凍結層が凹凸状へ形状変化する，その発端となる原因については，現在のところ定性的な議論がなされている段階にある。

本研究は，流れを伴う管内に成長する凍結層界面上の流動挙動を，レーザ・ドップラー流速計（ＬＤＶ）を用いて測定することにより明らかにし，凹凸状凍結層の発生原因について定量的検討を行なったものである。

記　号

T　：乱れ強さ　$\sqrt{(1/n)\Sigma U'^2}/U\times 100$, $\sqrt{(1/n)\Sigma V'^2}/V\times 100$　%

U　：速度　m/s

x　：冷却開始点よりの距離　m

Y　：冷却面より測定した垂直方向距離　m

Y'　：凍結層界面より測定した垂直方向距離　m

ギリシャ文字

δ　：速度境界層厚さ　m

ν　：動粘性係数　m^2/s

添え字

in　：入口

w　：冷却壁面

∞　：主流

m　：平均

2.　実験装置および測定方法

2.1　実験装置

実験装置の概要を図１に示す。本実験装置は，貯水槽，縮流部，助走部，および試験部よりなる水回流系統と，冷却壁温度ならびに流水温度を制御するための冷却液回流系統より構成され，それぞれ遠心ポンプにて回流を行った。貯水槽内には，冷却用熱交換器が設置され，回流水を常温から凍結温度近傍までの所定温度に制御できる。試験部は，高さ 19 mm，幅 50 mm，および長さ 928 mm の下面に冷却壁を有する二次元直行矩形流路である。冷却壁は，厚さ 3 mm の銅板にて作製し，冷却面温度測定のために ϕ 0.3 mm の銅・コンスタンタン熱電対を，流路幅中央部に流れ方向に沿って合計 11 箇所取り付けた。冷却壁下部は冷却用ブラインで満たされる冷却室となっており，内部にはそれぞれ多数のブライン噴き出し孔を設けた冷却ノズルが 8 本取り付けられており，おのおの独立に流量を制御することにより，冷却面等温度を維持できる構造となっている。試験部側面には，流路内に発達する凍結層の非定常的な観察と，ＬＤＶ装置による流動挙動の測定を行うために，厚さ 10 mm の透明アクリル樹脂性板を用いた。試験部入口および出口にも熱電対を取り付け，流水温度を測定した。なお，実験は凍結層が成長した後も流量一定の条件にて行った。

2.2　測定装置

凍結層界面上の流速ならびに乱れ強さの測定には，図２に示す二次元トラバース装置上に設置

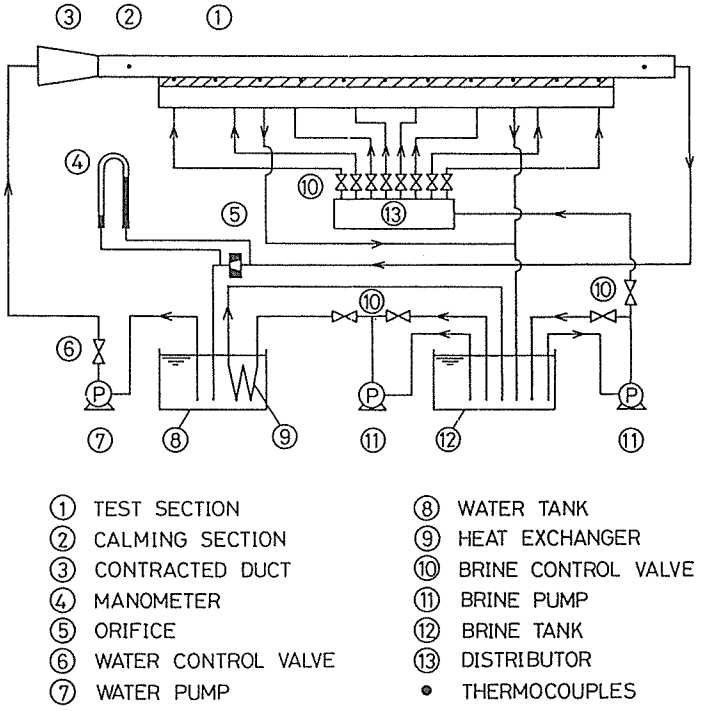

図1　実験装置概要

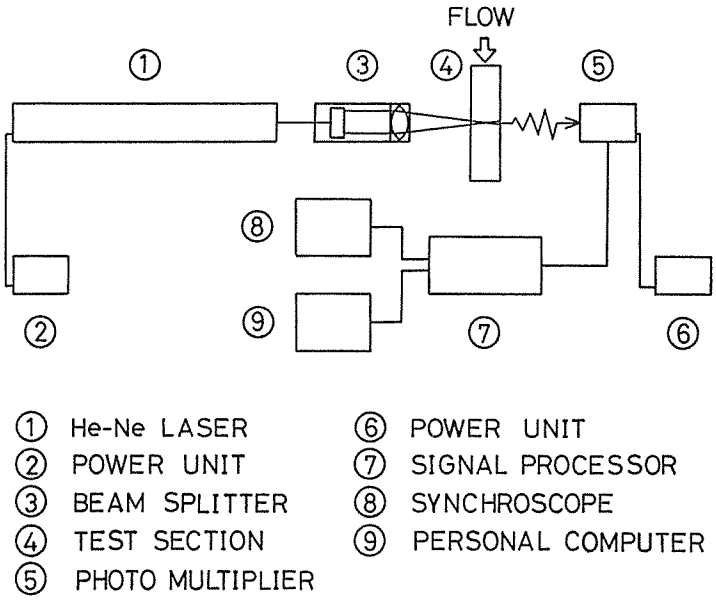

図2　光学系

された前方散乱型ＬＤＶを用いた。このトラバース装置により，主流と直角なＹ軸方向に 1/100 mm の精度で測定点の移動が可能である。測定点内の散乱粒子の通過により得られた散乱信号光

は，フォトマルチプライヤにより電気信号に変換され，信号処理器を介して求められたドップラー周波数より流速特性が算出される。本測定にはカウンタタイプ信号処理器を用い，パーソナルコンピュータにてデータの抽出を行った。

2.3 測定方法

遠心ポンプにより貯水槽より吐出された水流は，縮流部，助走部を通過し発達した乱流として試験部流路へ流入する。所定の流水温度が得られた後，試験部下面の冷却を開始し，流路内凍結層の観察ならびに凍結界面上の流動挙動を測定した。ステップ状凍結層の発生原因を検討するにあたり，あらかじめ定めた実験条件の下で数回の予備実験を行い，凍結層の非定常挙動の把握ならびに再現性の確認を行った。これらの予備実験に基づき，凍結層が形状変化を開始する位置近傍にレーザー光の測定点を固定し，凍結層の発達に伴う速度および乱れ強さの非定常測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 凍結層の非定常挙動

流水を伴う場合，流路内に成長・発達する凍結層の一例を図3に示す。これらの写真は，入口平均流速 0.5 m/s，流入水温度 1.5℃，冷却面温度－13.0℃の実験条件下における流路内凍結層の非定常挙動を示している。冷却開始後5分において，凍結層は冷却面に沿ってなめらかにほぼ一

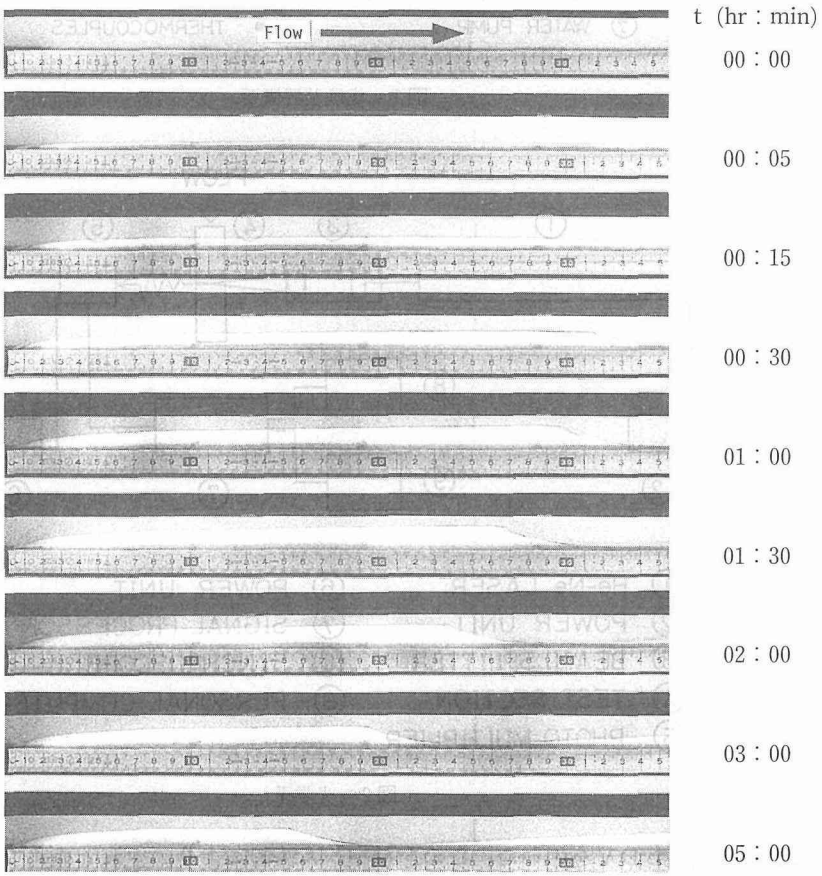

図3 非定常凍結層形状

様に成長しているが，15分で冷却開始端より約32 cmの位置において凍結層の局所的な融解が観察される。さらに時間が経過すると，凍結層は顕著な凹凸状へと形状変化しながら，凸部は上流側へと移動していく様子が認められる。このように氷層厚さが急激に減少する凍結層を，以後ステップと呼ぶこととする。本研究報告では，ステップが形成される初期要因（図3の凍結層写真で5分から15分に至る間の原因）について検討することが主たる目的である。

3.2　凍結層先端より発達する層流境界層

一様な流れの中に直交しておかれた滑らかな円柱まわりの流れでは，よどみ点より層流境界層が形成され，円柱表面に沿って剝離点まで持続することはよく知られている。また，曲率を持つ翼型まわりでも同様な流れが見られる。このような境界層流れは，一様流中におかれた平板上でも形成されるが，さらにベルマウスのような入口形状をもつ管内にも発達する[5]ことが報告されている。したがって，流路途中に冷却伝熱面を持ち，伝熱面前縁より凍結層が成長するような場合，ある条件においては，上流側の流れがたとえ発達した乱流であっても，凍結層先端より層流境界層が形成されるものと考えられる。このような理由から，ステップが形成される原因は，凍結層先端より発達する層流境界層が乱流へと遷移するためではないかと考えられてきた。

図4は，入口平均流速0.5 m/s，流入水温度5℃，冷却面温度－8℃の条件下で，凍結層が冷却開始端より単調に成長し，かつ凍結層厚さが薄い場合（図3の凍結層写真では，冷却開始から5分の状態にほぼ相当）の凍結界面上の速度分布（図4－1および4－2）および乱れ強さ（図4－3）の測定結果を示す。図より，冷却開始端（X＝0 mm）において，流れは発達した乱流状態（Re_d＝9200）にあるが，凍結層先端より下流に沿って速度境界層は発達し，放物線状の速度分布へと移行していく様子がうかがわれる。凍結層の厚さは冷却開始端近傍を除いて約3 mm程度であり，流れ方向に沿ってほぼ一様であるが，このように凍結層が薄い場合にも，凍結層先端より速度境界層が形成されることがわかる。また図には，Blasiusの速度分布[7]から平板上に発達する層流境界層厚さ $\delta=5.0/(\nu X/U_\infty)^{1/2}$ より求めた値を示してあるが，実測値と比較的良く一致している。さらに図4－3から，凍結界面上の境界層内の乱れ強さは数%であるが，下流に沿って増大していく傾向にあることがわかる。なお，速度分布ならにび乱れ強さに変動が見られるが，これは凍結層界面上の流れが準定常であることの影響が現われているものと考えられる。

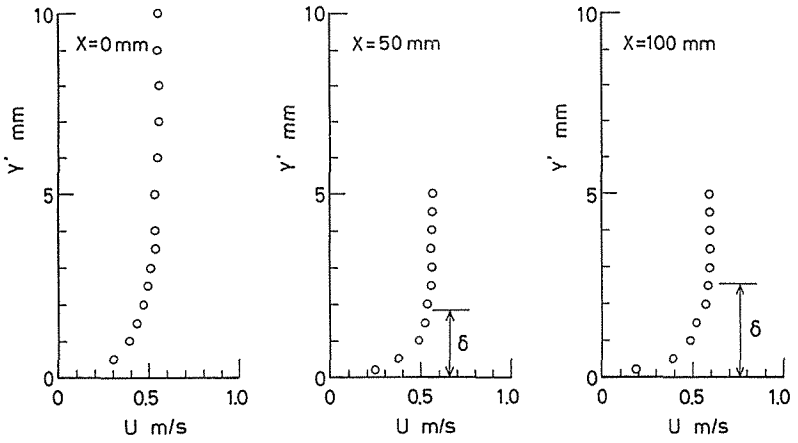

図4－1　速度分布

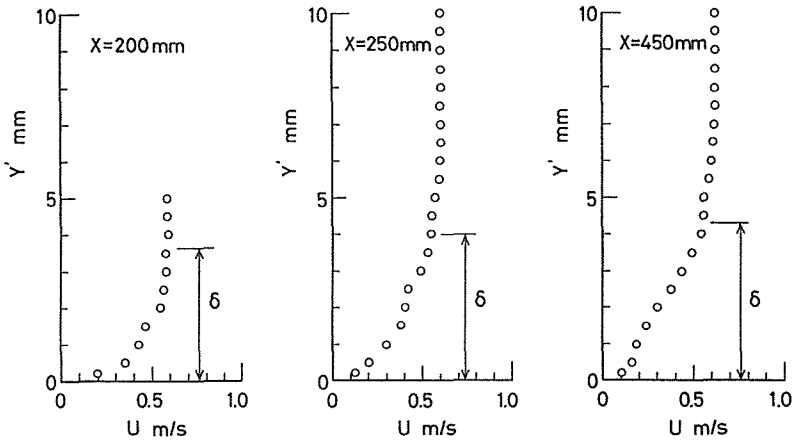

図4－2 速度分布

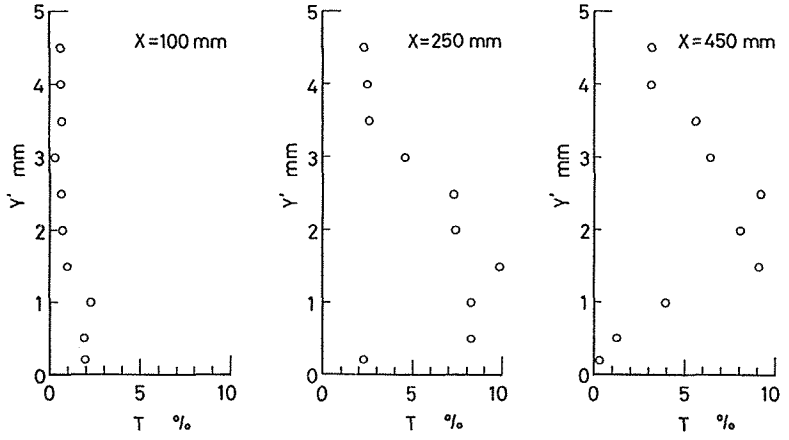

図4－3 乱れ強さ分布

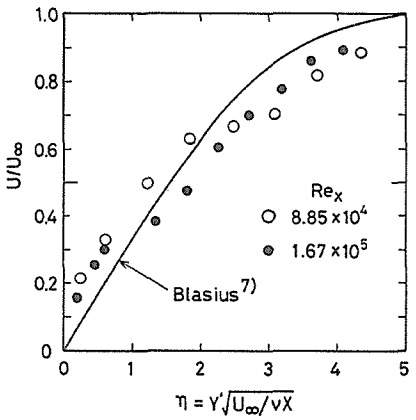

図5 層流境界層内速度分布

このように凍結層が薄い場合，凍結界面上の流れの加速も小さいことから，主流の圧力勾配が境界層内の速度分布に及ぼす影響も小さいものと考えられる。図5には，図4における境界層内の速度分布（X＝250 mm および 450 mm）を示してある。また図には，平板に沿う圧力勾配のない層流境界層内速度分布（Blasius[7]による理論値）も併記してある。本実測値は理論値と比較的良く一致していることがわかる。

3.3　凍結層界面上の加速流れ

図6は，ステップ形成後の凍結層写真(図6－1)，ならびにこの状態での各断面における速度分布（図6－2），および乱れ強さの分布（図6－3）を示す。測定は先に述べた場合と同様，準定常下で行われている。図より，下流に行くに従って主流速度が加速されつつ，凍結層先端より

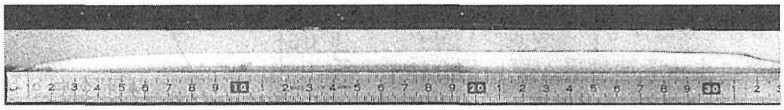

図6－1　氷層形状

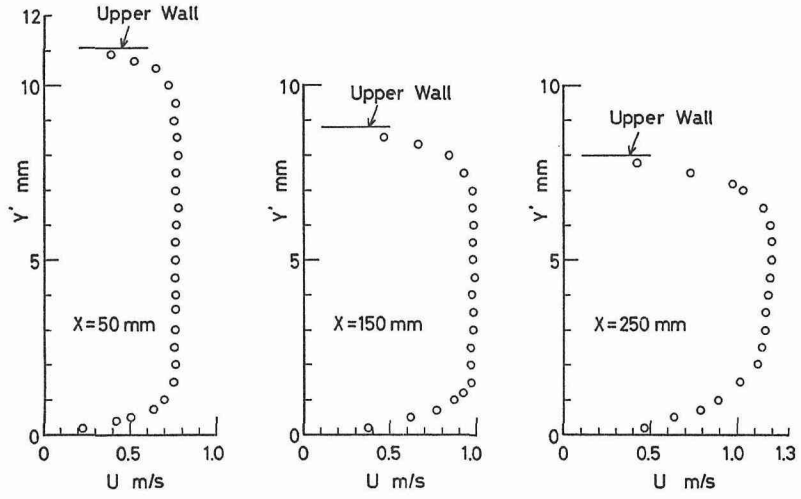

図6－2　速度分布

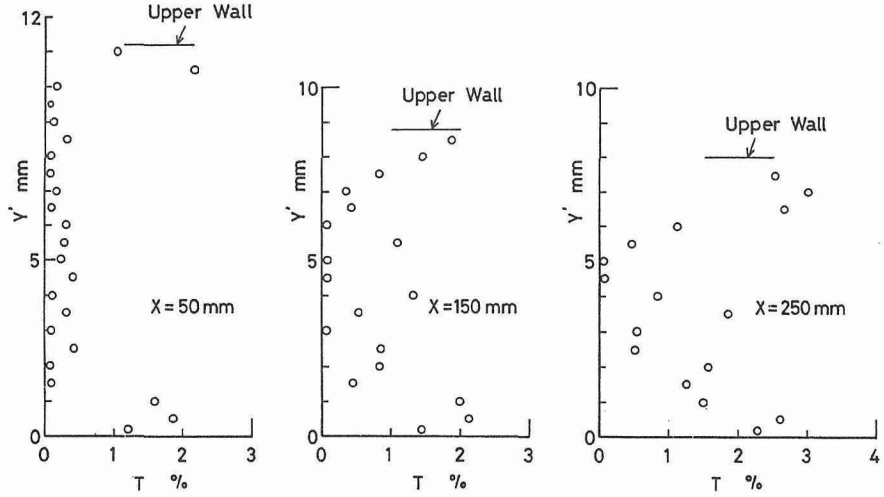

図6－3　乱れ強さ分布

速度境界層が成長していく様子が認められる。また，乱れ強さも数%の低い値であるが，下流に行くにしたがい増大していく傾向が認められる。流路が狭められることにより主流部分の流れが加速されるため，その変動が凍結層界面上の境界層内に影響を及ぼすものと考えられる。このように流路に占める凍結層が厚い場合には，加速された流れとなり，境界層内の速度分布は圧力勾配の影響を受けることが予想される。圧力勾配のある層流境界層内の速度分布については，Pohlhausen が近似的に解析[7]を行っており，それとの比較を図7に示す。測定結果は図6（X＝150 mm）より得られたものであり，近似式に用いた形状係数 Λ は，実測値より算定した。本実測値は Pohlhausen の解析値とよく一致している。

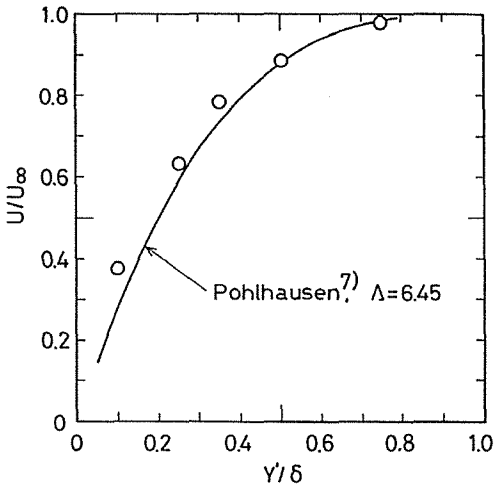

図7 圧力勾配を有する層流境界層内速度分布

以上の結果から，本実験条件下では，凍結層先端より発達する速度境界層は層流境界層であると考えられ，また下流方向に沿って境界層内の乱れ強さが増大していくものと思われる。このように，凍結界面上の加速された流れは，流れ方向に沿って放物線状の発達した層流速度分布へと移行する状態にあるものと考えられるが，乱れが抑えられるという層流化現象は，この場合には測定されず，逆に凍結界面近傍の流れは不安定な状態になるようである。

3.4 凍結層界面上の非定常流れ挙動

今までの議論は，ステップが形成される前後での凍結界面上の準定常的な流れ挙動を測定した結果に関するものであり，ステップが形成される直接的原因を検討したものではなかった。ステッ

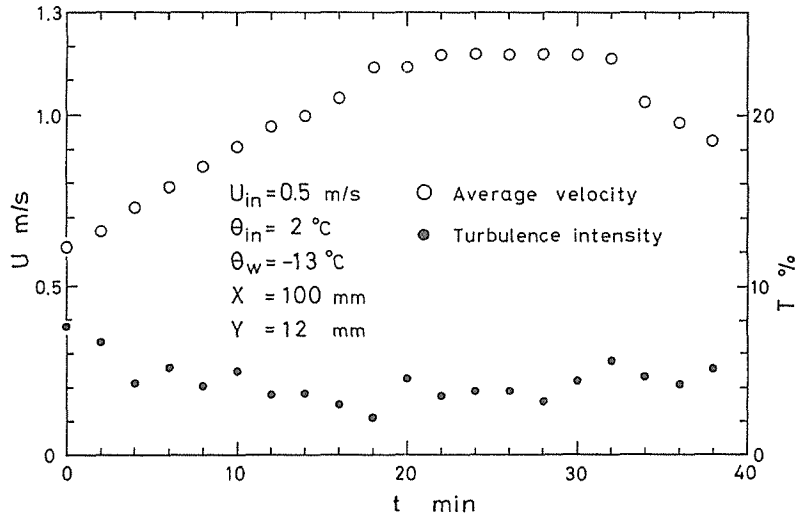

図8 流速および乱れ強さの時間変動

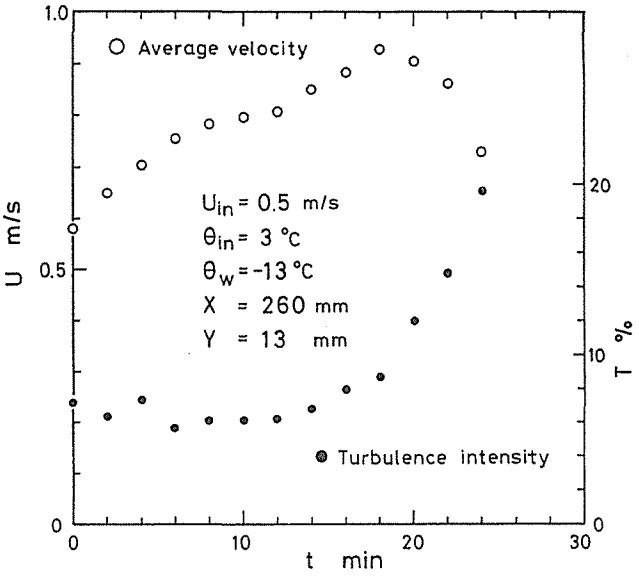

図9　流速および乱れ強さの時間変動

プの形成は，非定常の下で生じる現象であるため，以下では凍結界面上の非定常流れ挙動に関する測定結果について検討する。

図8は，冷却開始領域(X＝100 mm, Y＝12 mm)におけるX－方向の平均流速Uならびに Y－方向より時計回りに 30 deg. 傾いた方向における平均速度Vの乱れ強さの非定常測定結果を示す。冷却開始から約 30 分までは，凍結層の成長により流れが加速されるため，平均速度は増加しているが，その後は減速している。30 分以降での平均速度Uの減少は，凍結層の成長により，凍結界面が測定点に接近し，速度境界層内に入ったためと思われる。一方，この位置における乱れ強さは，冷却開始から多少の変動は見られるものの，その値は 8 %以下の比較的安定した流れとなっていることがわかる。

さらに下流側(X＝260 mm, Y＝13 mm)における非定常測定結果を図9に示す。この位置は，ステップの初生が観察される位置からわずかばかり上流側である。冷却開始から 18 分までの間は，凍結層の成長とともに平均速度は増加するが，その後凍結界面の測定点への接近により減少している。また乱れ強さは 14 分以降から増加の傾向を示し，20 分前後において急激に増加している。このような乱れ強さの急激な増加は，上流側の冷却開始領域では測定されなかったものである。

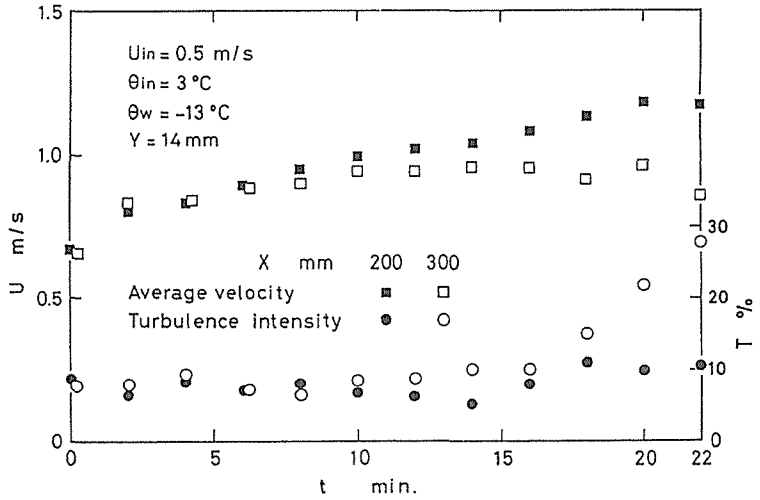

図10　流速および乱れ強さの時間変動

図10には，ステップ初生近傍位置(X＝300 mm, Y＝14 mm)およびその上流側(X＝200 mm, Y＝14 mm)での測定結果を比較し示してある。ステップ初生近傍では，約15分後において乱れ強さが増大し，そのため凍結層の成長が抑制され平均速度は頭打ちの状態となり，さらに低下する傾向にある。一方その上流側では，凍結層の成長に伴い平均速度は増加し，かつ乱れ強さは約10%とほとんど変動が見られない。

3.5 ステップ形成原因

以上のように，凍結層界面近傍の流れの乱れ強さが下流に向い増大する傾向にあること，さらにステップ形成位置近傍において，非定常的な乱れ強さの急激な増加が測定されたことより，ステップの形成原因に乱れ強さの増加が密接に関与しているものと考えられる。凍結層界面近傍における乱れ強さの急激な増加が，凍結層先端よりの層流境界層が乱流へと遷移したことによるものなのか，あるいは他の原因に基づく現象なのかは，今のところ定かでない。しかしながら，主流に含まれる乱れが境界層の遷移位置や，特に主流に圧力勾配がある場合，層流境界層内の伝熱量の増加に著しく影響を及ぼす[8]という事実と考え合わせると，ステップ形成原因が，凍結層先端より発達する層流境界層が乱流へ遷移することに基づいているという可能性は大きいものと考えられる。いずれにせよ，凍結層の成長に伴う加速流内の乱れの増大によりステップが形成されるものと思われ，さらに境界層遷移に関する複雑なメカニズムについては今後の研究課題と考えられる。

4. 結　　言

凍結界面上の速度分布ならびに乱れ強さの非定常測定を行った結果，凍結層厚さが急激に変化する現象であるステップの発生に，凍結層近傍における非定常的な乱れ強さの増大が密接に関与していることが明らかとなった。

参考文献

1) R.R.Gilpin： Int.J.Heat Mass Transfer,20 (1977), 693－699.
2) T.Takeuchi ら： Wärme-und Stoffübertragung, 9 (1976), pp.215－225.
3) 関ら：日機論，49 (昭58)，446，pp.2172－2180.
4) R.R.Gilpin： Trans.ASME., J.Heat Transfer, 103 (1981), pp.363－368.
5) 平田ら：第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(昭60)，pp.202－204.
6) A.F.Mills： J.Mech.Eng.Sci., 4 (1962), pp. 63－77.
7) H.Schlichting： Boundary Layer Theory, 4 th Ed., p.243, McGRAW-HILL.
8) 甲藤好郎：伝熱概論 (昭55)，p.158，養賢堂.