

水表面放出温噴流の基礎的実験

BASIC EXPERIMENT ON HEATED WATER JET DISCHARGED AT WATER SURFACE

中央大学理工学部 正 員 林 泰造
中央大学大学院 学生員 ○首藤 啓
中央大学大学院 学生員 後藤幸司

1. 諸言

温度密度流の拡散過程に関する研究は環境水理学上の重要な課題であり、1960年代半ばよりこの問題に関連した研究が行われている。理論的研究として、Stolzenbach・Harleman(1971), Prych(1972), Shirazi・Davis(1974), 林・有田(1975), 和田(1968), 玉井(1969)等の研究がある。一方、実験的研究として、林・首藤(1967), Tamai・Wiegel・Tornberg(1969), Stolzenbach・Harleman(1971), Stefan・Hayakawa・Schiebe(1971), Kotsovinos(1975)等、さらに実測ではArgonne National Laboratory(1972, 1974)で行われた実測結果が特に有名であるが、現象の複雑さから実験的研究は理論的研究に比べ少いように思われる。

温排水の実験を行うにあたって初めに考慮しなければならない問題に放出場の変化に伴う温噴流の非定常性があげられる。この流況の非定常性の大きな原因として、実験水槽の大きさが有限であることが考えられる。しかし、実際の温排水では無限水域の放出場と考えるのが妥当であり、理論的研究においてもそのような放出場を考える場合が多い。そこで、本研究は限られた空間内において水槽固有による影響を無視できるように定常的な流況に見合う状態の検討を行い、そのことを考慮に入れた上で拡がり形状を大きく左右する放出フルード数を実際の温排水の場合と同様に $Fr_o = 2.5$ 前後にして基礎的実験を行い、表面放出温噴流の諸特性を研究したものである。

2. 実験装置および方法

実験に使用した水槽は図-1に示されるように、長さ12m、縦5.4m、深さ0.5mの平面水槽であり、水槽内には cross-flow のある場における実験用の諸施設を備えている。温水は3台のボイラーを通し供給され、流量を検定した後タンクに貯えられる。本装置において流量1ℓ/s、平常水との温度差30℃程度までの温水を供給できる。放出口は5cm×5cmの矩形水路であり水槽底面より45cmの高さにある。また、実験中水深を一定に保つため、水槽底面にある10個の穴から水深調節用水槽にパイプで連絡してある。

本実験に用いた測定方法は、まず、温度計測に対して主にサーミスタ50本によって遂行され、特に乱れ

の計測に関しては hot-film を使用した。サーミスタは宝工業社製の時定数0.15秒程度、外径1mmのものでダイオードがビニールによって被覆されているため点測定に向いている。データは同社製のA-D変換器、プリンター内蔵、最高99点の測定ができるデータ集積装置K-700を使用して自動記録させた。一方、流速の測定に対しては放出温水に染料を加えモータードライブ・カメラで追跡撮影する方法、水表面に多数の微小浮子を浮かべステレオ・カメラによって移動距離を解析する方法が用いられた。また、乱れの測定は温度補償を行うことによって温度変動に影響されない流速を hot-film により測定した。ステレオ・カメラ

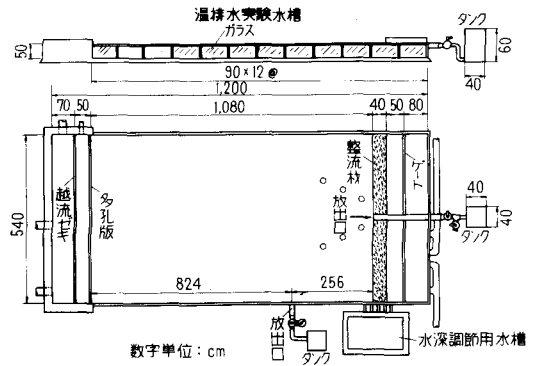


図-1 実験装置全体図

の原理は2台のカメラにより得られた一対の写真を図化機にかけ実体視するとカメロン効果により流速に応じて著しい隆起または陥没を示し、この高低の度合が流れの緩急の度合を示すこととなり、それから流速値を求めるものである。また、流速および温度の乱流測定は2本の hot-film を用いることによって、温度および温度に影響されない流速の同時測定を行った。

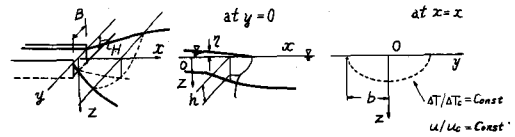


図-2 座標軸

測定には日本科学工業社製の hot-film 流速計システムと測温ユニットを組合せ使用し、両センサーは円錐型でその間隔は約 2 mm である。測定は $x = 30 \text{ cm}$ と 40 cm の 2 断面を選び水表面下 0.5 cm より 0.5 cm 間隔で深さ 5 cm まで計 10 点ずつについて行った。データは TEAC 製 R-80 データレコーダーに収録し、A-D 変換の後、サンプリング間隔 0.01 秒、データ総数 2048 で統計処理を行った。

以下の説明にあたって、図-2 に示す座標系を用いた。また、使用した記号は次の通りである。

Fro: 放出フルード数, Reo: 放出レイノルズ数, Q: 放出流量, u_0 : 放出流速, ΔT_0 : 放出上昇水温, u_c : 軸上表面流速, ΔT_c : 軸上表面上昇水温, b: 拡がり幅, h: 躍層厚, u : 流速の x 方向成分, v : 流速の y 方向成分, T_0 : 放出水温, T_a : 周囲水温, λ : 放出口縦横比

3. 実験結果および考察

(1) 定常性について

実験に使用する水槽は限定された熱容量しか持ち得ないため、温水の連続放出によって定常的な温度分布を持つことはない。従って、疑似的な準定常状態に達した時、定常状態と見なし実験を行うことになる。

放出後、時間が経過しすぎると放出温水による躍層が発達し、温度上昇、流速の加速、拡がり幅の減少などの現象が起こるが、これらの現象は温噴流の両側にできる大スケールの渦と相まって一層温度上昇に寄与

表-1 放出水利条件

Run	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_0(^{\circ}\text{C})$	$Q(\ell/\text{s})$	$u_0(\text{cm/s})$	λ	Fro	Reo
1	15.2	30.0	14.8	0.245	9.8	1	2.40	5.160
2	17.4	33.2	15.8	0.258	10.3	1	2.34	5.790
3	18.1	28.7	10.6	0.230	9.2	1	2.61	4.950
4	17.3	31.7	14.4	0.245	9.8	1	2.33	5.440
5	15.4	34.2	18.8	0.280	11.2	1	2.33	7.600
6	14.5	29.0	14.5	0.263	10.5	1	2.60	5.530
7	17.3	32.2	14.9	0.278	11.1	1	2.60	6.180
8	15.2	30.2	15.1	0.285	11.4	1	2.76	6.060
9	14.6	31.2	16.6	0.245	9.8	1	2.37	5.160
10	17.8	30.4	12.6	0.276	11.0	1	2.76	6.900
11	13.5	29.5	16.0	0.258	10.3	1	2.43	5.420
12	8.1	24.0	15.9	0.221	8.8	1	2.43	4.860

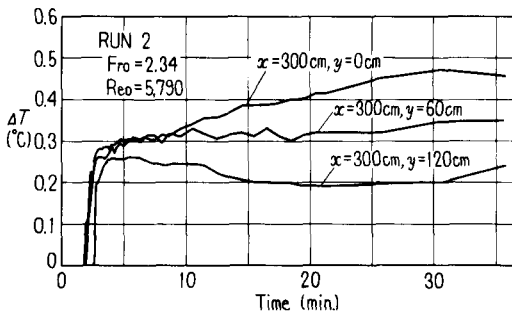


図-3 水表面温度の時間的变化

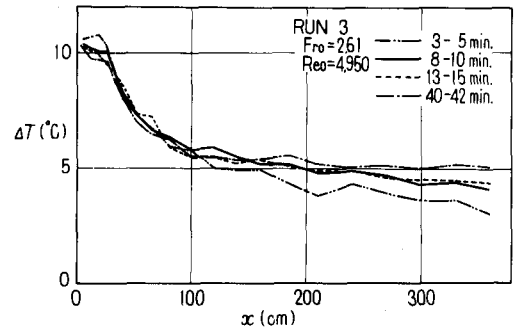
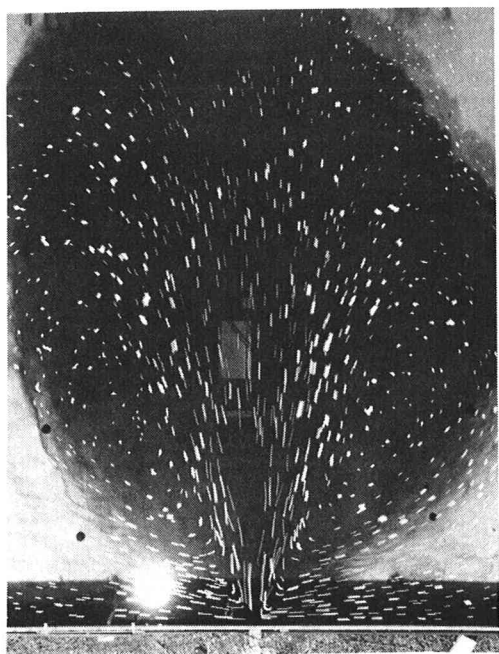


図-4 軸上表面温度の時間的变化



(a)



(b)



(c)

写真-1

平面渦の形成による噴流流況の変化
(RUN 1,

$Fro = 240$, $Reo = 5,160$)

(a) 放出後 3 分

(b) 放出後 7 分

(c) 放出後 20 分

することとなる。この渦は放出直後から発達し始め次第に大きなスケールの渦に成長する。写真-1(a)~(c)は表面浮子の動きから流況を示したもので、放出経過時間の変化を示している。(a)は放出後3分のごく初期の状態であるが両側に渦を形成していることが判る。また、(b)は同じく7分の状態であるが、ほぼ同じような流況を示している。しかし、(c)は20分後であるが、より大スケールの渦が細長い形に成長し前者等に比較して拡がりは極端に狭められ、明らかに異った流況を示していることが判る。このようなことは温度分布においても同様なことが類推できるであろう。図-3

は放出口から3mの3点における表面水温の時間的変化を示したものである。この図より軸上においては3分~10分がほぼ一定な値を示す他は時間と共に上昇しており、渦によって放出温水が再び連行され温度が上昇していくことを示している。また、 $y=60\text{ cm}$ はほぼ一定であるが、 $y=120\text{ cm}$ では異った変化をする。つまり、一度上昇した水温が10分過ぎ頃から逆に低下し30分頃再び上昇していくような現象を示す。これは前述の温噴流が狭くなる現象を表わし、初期においては温噴流内にあった位置が噴流幅の狭まりにより噴流幅の外にあるものとなったことを示している。その後、全体的な周囲水の上昇により再び水温の上昇を呈することとなる。

上記の現象を軸上、横断および鉛直方向に対して検討したものが図-4から図-6である。まず、図-4は軸上表面水温の時間的変化を比較したものである。この図から、放出口に近い程時間的変化が少く、 $x=150\text{ cm}$ まではほとんど時間的に隔たりはないようであるが、それ以遠は時間による違いが表われる。放出口から離れた地域では、放出後3~5分は温水到達直後のことであり急激に温度上昇が起こる。その後、8~10分に至り安定した状態となるが、この状態に達するのは放出口からの距離に従って時間がかかるものと考えられる。また、そのような安定状態に達して後も徐々に温度上昇を示すが、時間スケールが違うことでも判る通り前者に比べ緩慢である。次に、横断方向の表面水温の時間的変化を比較したものが図-5である。この図からも時間とともに水温が上昇していくことは明らかであり、その変化の割合は初期において大きいものであるが、分布形がきれいな形に安定する8~10分以降は穏やかに変化する。また、図-6は $x=80\text{ cm}$ における鉛直方向の水温分布の時間的変化を示したものである。放出口に近い地点であるため放出初期に定常的な状態に達するが、放出40分経過すると明らかに異った形状を示すことがわかる。

以上に示した時間的変化に対して次のようなことが考えられる。温水のない静止した場に温水を放出すると、放出初期においては変動が激しく、ある経過時間の後安定した分布形状を示し、それは放出口からの距離に従う。その後、さらに放出経過時間がたつと温噴流両側にできる大スケールの渦が発達し、その影響が著しくなり明らかに水槽内の2次流(既述の細長い平面渦)の影響を受けた拡がり方を示し、水温等の水理量も徐々に変化していく。そこで、測定範囲をだいたい $x=3.5\text{ m}$, $y=1.5\text{ m}$ とした時、この範囲内での定常

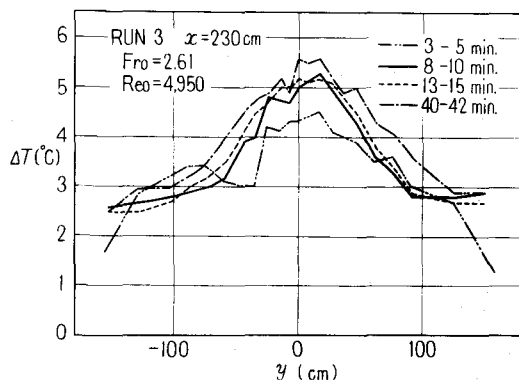


図-5 横断表面温度分布の時間的変化

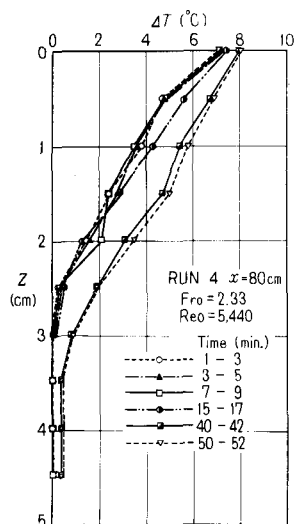


図-6 鉛直方向温度分布の時間的変化

的な状態は流況の可視化，水温分布などによって，およそ放出後4，5分から15分程度までと考えられる。

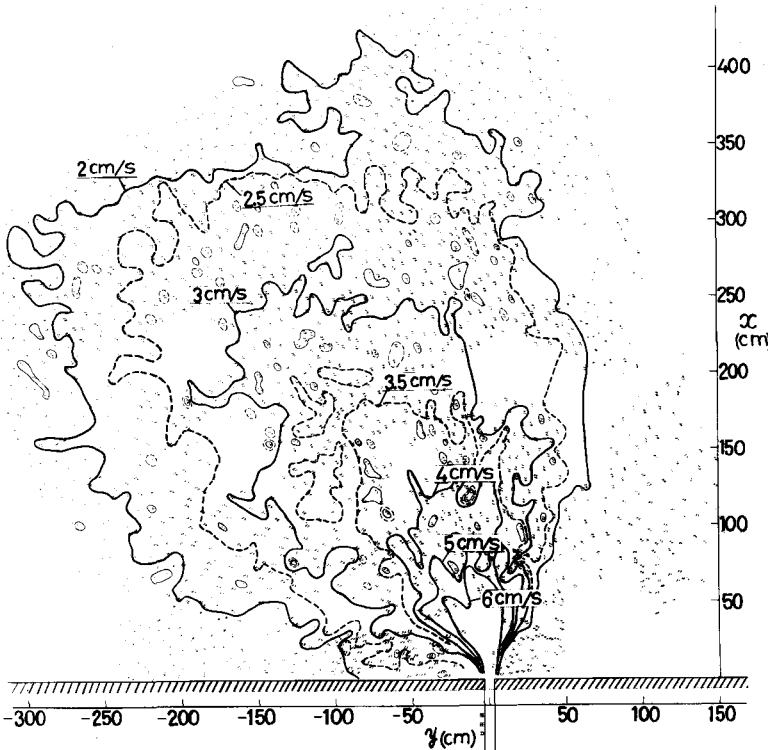


図-7
cross-flow がある場
における水表面内流速の
等流速線図
(RUN 12,
Fro = 2.43
Reo = 4,860
 $V/u_o = 0.14$
ステレオ・カメラにより
解析したもの)

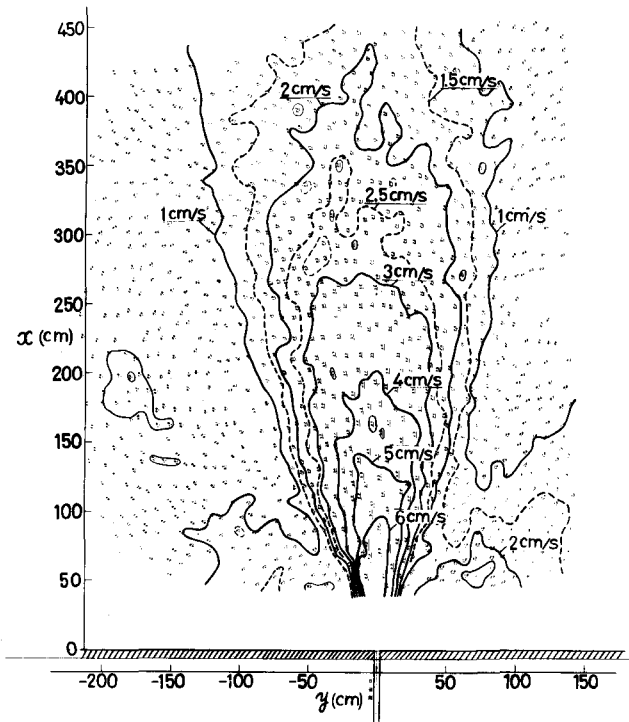


図-8
cross-flow がない場における
水表面内流速の等流速線図
(RUN 5,
Fro = 2.33, Reo = 7,600
放出後4分30秒の写真を解析し
たもの)

(2) 表面内流速分布

表面内流速分布の測定は前述のように、ステレオ・カメラを使用し、カメロン効果を応用することによって行われた。図-7および図-8はこの手法で得られた表面流速約2000点から等流速線図を画いたものである。図-7は cross-flow のある場における実験において測定した結果であり、図-8は cross-flow のない場合の実験の測定結果である。ステレオ・カメラによって流速分布を測定する最大の利点は平面内のあらゆる地点の流速を同時測定できることであり、平面内の全体的な拡がりを読述するには大変有効なものと考えられる。

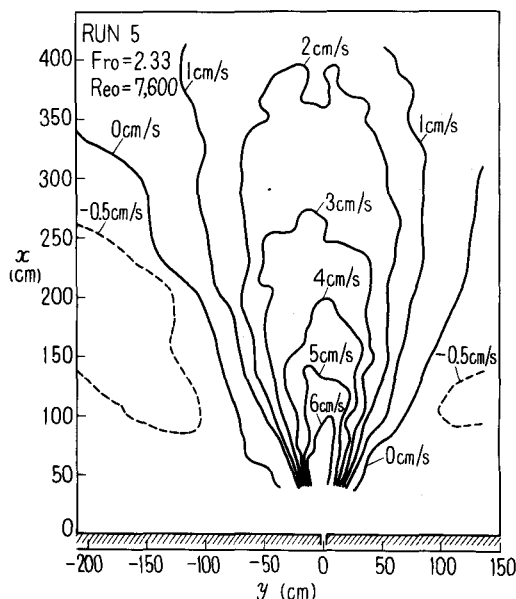


図-9 u の等流速線図

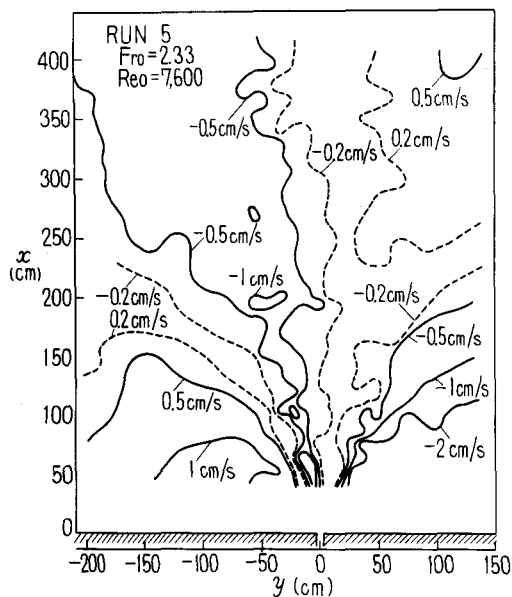


図-10 v の等流速線図

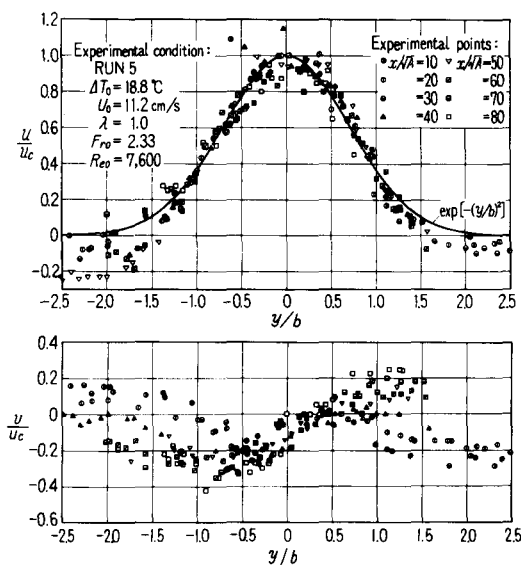


図-11 u および v の横断表面流速分布

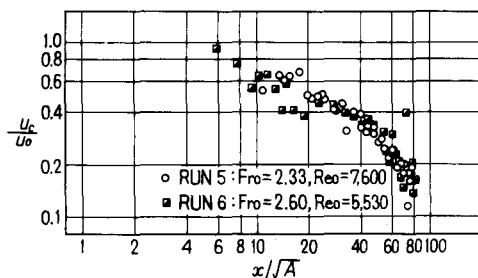


図-12 軸上表面流速分布

(RUN 5 はステレオ・カメラより)

RUN 6 は放出後4分15秒～6分30秒間で染料追跡より得られたもの)

Figure 1 is a log-log plot showing the normalized temperature difference $\frac{\Delta T_c}{\Delta T_o}$ on the y-axis (ranging from 0.1 to 1.0) versus the normalized axial distance $x/\sqrt{A}$ on the x-axis (ranging from 1 to 100). The data points, represented by open circles, show a decreasing trend. The plot is labeled 'RUN 3', 'Fro = 2.61', and 'Reo = 4.950'.

Figure 1 is a plot of the normalized temperature difference $\frac{\Delta T}{\Delta T_c}$ on the y-axis (ranging from 0 to 1.0) against the normalized axial distance y/b on the x-axis (ranging from -5 to 5). The plot is for Run 7, with $Fro = 2.60$ and $Re_o = 6,180$. Experimental data points are plotted for three different values of x/Δ : 6 (circles), 14 (squares), and 30 (triangles). A solid curve represents the theoretical prediction $\exp[-\frac{1}{2}(y/b)^2]$. The data points generally follow the curve, with some scatter at higher y/b values.

-411-

域で2つの曲線を接続することによって近似できるように見える。また、躍層厚については確立領域から遷移領域に至りほぼ一定厚を示し、その後、浮力効果のためしだいに薄くなっていく過程をたどる。

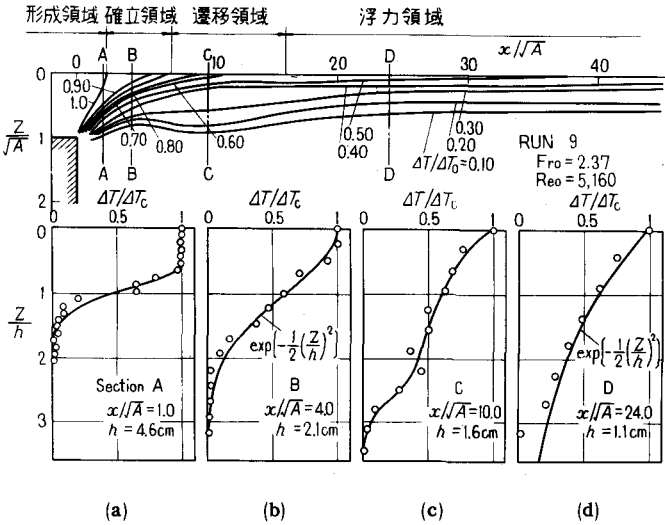


図-16 軸上縦断面等温線図
(放出後3～15分)

図-17 (a)～(d)
A～D断面の各鉛直温度分布
(放出後3～15分)

(4) 乱流測定

前節で述べたような手法で hot-film により、温度および流速分布の同時測定を行った。図-18は噴流軸面内の流速と上昇水温の鉛直分布を示し、ガウス分布と比較したものである。流速分布はよく一致していると考えられるが上昇水温の分布は z/h が大きくなるにつれてガウス分布から離れ、流速のない深さのところでも温度上昇があることが判る。また、図-19は噴流軸面内の流速とその乱れ強度の鉛直分布を示したものである。同図中には、non-buoyant 平面噴流についての Bradburyの実験結果を併せて記入しているが、筆者等の実験とむしろ意外に思われる程良く合っている。さらに、図-20は上昇水温とその乱れ強度との比較であるが、乱れは流速の乱れに比べ鉛直方向の変化は緩やかである。図-21は x 方向移流熱量 $u \Delta T$ と乱流熱輸送フラックス $\overline{u' \Delta T'}$ を示したもので、同図より $\overline{u' \Delta T'}$ は $u \Delta T$ に比べ1割程度で

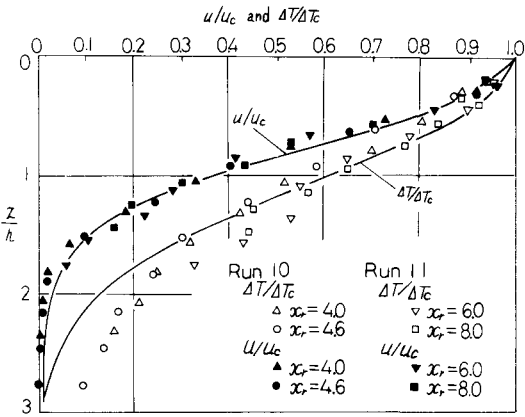


図-18 軸上鉛直方向の流速と温度分布

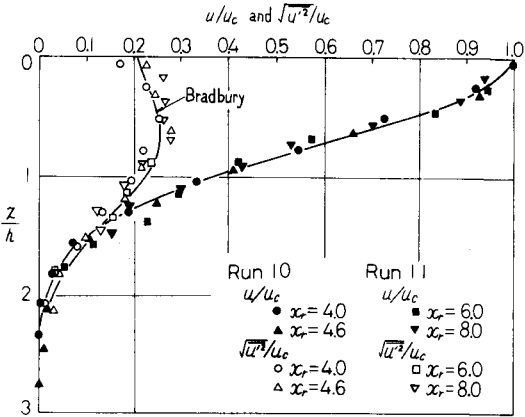


図-19 軸上鉛直方向の x 方向流速と乱れ

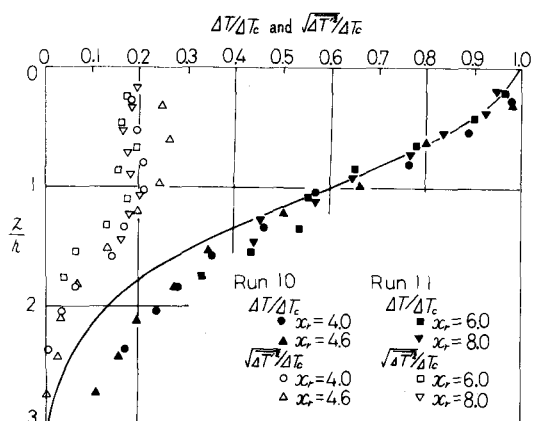


図-20 軸上鉛直方向の上昇水温と乱れ

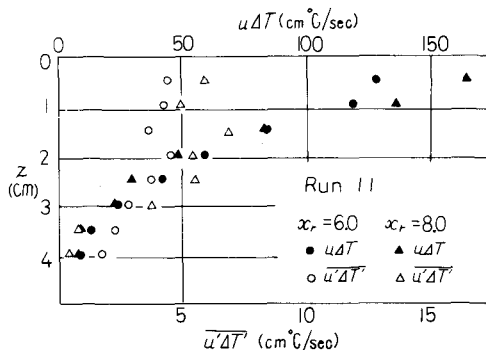


図-21 軸上鉛直方向の x 方向移流温度量と乱流温度フラックス

(RUN 10, $Fr_o = 2.76$, $Re_o = 6,900$,
RUN 11, $Fr_o = 243$, $Re_o = 5,420$)

あり、十分無視できることがわかる。

なお、鉛直乱流熱輸送はその値が小さいにもかかわらず拡がりを大きく支配するもので理論的研究に不可欠のものであり、他の乱流諸量とともに測定を行ってゆくつもりである。

4. 結び

放出フルード数 2.5 前後において各種実験を行い、温噴流の拡がりに関して種々の知見が得られたと考える。今回は放出フルード数を変化させた実験については触れなかったが、放出フルード数を変化させた実験も加え、また、温度および流速のスペクトル解析など内部機構の把握も平行しながら、温噴流の拡散機構をより総合的に解明していくつもりである。さらに、理論的研究との比較検討により、モデルの妥当性を明らかにするとともに、拡散過程の認識を深めていくつもりである。

付記

本研究の遂行にあたって、昭和 51・52 年度文部省科学研究費一般研究「噴流型温度密度水流の拡がり」と乱れ特性に関する基礎的研究」の補助を受けた。また、ステレオ・カメラによる流速測定に際し、自由学園の木下良作博士、アジア航測の石上晋氏より多大のご援助を戴いた。ともに記して、ここに深甚なる謝意を表す。また、種々討議をよせられた中央大学大学院後期博士課程有田正光君および実験を遂行するにあたり熱心に協力せられた同大学学部学生安部文唯、菊地雅夫、関野邦彦、松場一、真鍋三象の 5 君にも深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) K. D. Stolzenbach and D. R. F. Harleman : An analytical and experimental investigation of surface discharge of heated water, MIT Ralph M. Parsons Lab Rep. No. 135, Feb. 1971.
- 2) E. A. Prych : A warm water effluent analyzed as a buoyant surface jet, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Series Hydroli, Nr. 21, 1972.
- 3) M. A. Shirazi and L. R. Davis : Workbook of thermal plume prediction Vol. 2—surface discharged of heated water, Environmental Protection Technology Series, U. S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, Report No. EPA—R2—72—0056, 1974.
- 4) N. Tamai : Surface discharge of horizontal buoyant jets, Coastal Engineering in Japan, Vol. 12, PP159—177, 1969.
- 5) A. Wada : Numerical analysis of distribution of flow and thermal diffusion caused by outfall of cooling water, Coastal Engineering in Japan, Vol. 11, 1968.
- 6) 林泰造・有田正光 : 海面上に放出された温排水の拡がりについての数値解析—第2報, 第19回水講, PP173—182, 1975.
- 7) 林泰造・有田正光 : 温排水の拡散に関する予測モデルと実測結果の比較, 第22回海講, PP185—189, 1975.
- 8) F. Engelund : Hydraulics of surface buoyant jet, Journal of the Hydraulics Division, Proc. A SCE, Vol. 102, No. HY9, PP1315—1325, 1976.
- 9) T. Hayashi and N. Shuto : Diffusion of warm water jets discharged horizontally at the water surface, Proc. IAHR, Fort Collins, Colorado, 1967.
- 10) H. Stefan, N. Hayakawa and F. R. Schiebe : Surface discharge of heated water, St. A. Falls Hyd. Lab. Proj. No. 16130 FSU, 1971.
- 11) N. E. Kotsovinos : A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. KH—R—32, 1975.
- 12) R. Wiuff : Experimental on the surface buoyant jet, Technical University of Denmark, Series Paper No. 16, 1977.
- 13) N. Tamai, R. L. Wiegel and G. F. Tornberg : Horizontal surface discharge of warm water jets, Journal of Power Division, ASCE, No. P02, Proc. Paper 6847, PP253—276, Oct. 1969.
- 14) A. A. Frigo, D. E. Prye and J. V. Tokar : Field investigations of heated discharges from nuclear power plant on Lake Michigan 1972, Argonne National Laboratory Rep. ANL/ES—32, 1974.
- 15) A. A. Frigo and D. E. Frye : Physical measurements of thermal discharges into Lake Michigan 1971, Argonne National Laboratory Rep. ANL/ES—16, 1972.
- 16) R. A. Paddock, A. J. Policastro, W. E. Dune and J. M. Kyser : Application of prominent near-field models for heated surface discharges to prototype field data on Lake Michigan, U. S. — Japan Seminar on Engineering and Environmental Aspects of Waste Heat Disposal, PP1—49, Apr. 1974.
- 17) L. J. S. Bradbury : The structure of a self-preserving turbulent plane jet, JFM, Vol. 23, PP 31—64, 1965.
- 18) 林泰造・有田正光・首藤啓 : Cross-flowがある場における温度密度流の拡がりに関する実験的研究, 第32回水講, PP370—371, 1977.
- 19) 林泰造・有田正光・首藤啓 : 噴流型三次元温度密度流の拡がりに関する実験的研究, 第33回水講, PP407—408, 1978.
- 20) 林泰造・有田正光・首藤啓 : 温度密度流の乱流構造に関する研究, 第33回水講, PP409—410, 1978.