

横流れがある場に放出された表面温噴流の拡がりの内部構造 INTERNAL STRUCTURE OF HEATED WATER SURFACE JET DISCHARGED INTO A CROSS CURRENT

中央大学理工学部 正 員 林 泰 造
中央大学大学院 学生員 大 橋 正 和
中央大学大学院 学生員 朱 雀 和 彦
中央大学大学院 学生員 関 口 与 津 男

1. 結 言

横流れがある場に放出された表面噴流の表面温度分布や表面流速分布は従来かなり数多く測定されているが、流軸を曲げられた温噴流の断面形状、横流れと温噴流との境界面における混合の状況、温噴流が横流れ中を横切るために生ずるウエークとその中の乱れによる周囲水との混合の割合の増加の度合、等については未だあまり研究がなされていない。本研究は実験を行ってこれらにつき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に示すような長辺12 m, 短辺5.4 m, 深さ0.5 mの平面水槽であり、長辺に放出口を取り付ける。また、一方の短辺の側には給水系を接続し、そこから長辺に平行な方向に一樣流れを流すことができるように設備されている。この流れが放出口の前を通過する横流れを形成する。この横流れは下流側の短辺の壁の直前に設けられた水槽幅いっぱいの越流堰を越流して水槽外に排出される。このため、温噴流の放出を長時間続けていつも水槽内の温度

分布は定常的に保たれ、いくらでも時間をかけ

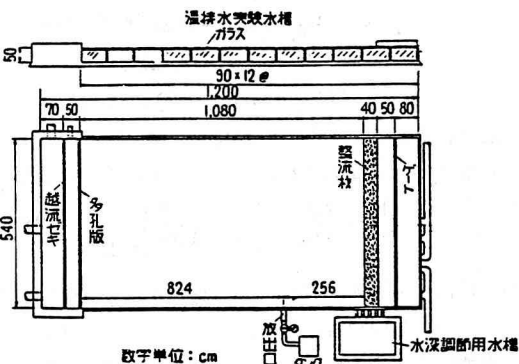


図-1 実験装置全体図

て、いくらでも多数点の温度計測を行うことができる。

温水は3台のボイラーを通して供給され、流量を検定しつつ、5 cm × 5 cmの矩形断面放出口より cross-flow に垂角に表面放出される。

水温測定には宝工業社製のサーミスターを用い、データは同社製のA-D変換器内蔵、プリンターつきで最高99点のほぼ同時測定ができるデータ集録装置K-700を使用して自動記録させた。このサーミスターは、ダイオードをビニールによって被覆したもので、点測定に適している。このサーミスター10本を9 mm間隔にクシ型に鉛直に配置したもの(写真-1)を3セットつくり、これらを1本の水平フレームにとりつけ、これにより長辺の方向には10 cmないし25 cm間隔で20断面、短辺の方向には25 cmないし50 cm間隔で16断面をそれぞれトラバースすることにより、 $20 \times 16 \times 10 = 3,200$ 点における水温を測定した。この各測点においては各5回の測定を行い、その平均値をもって、その点の水温とした。

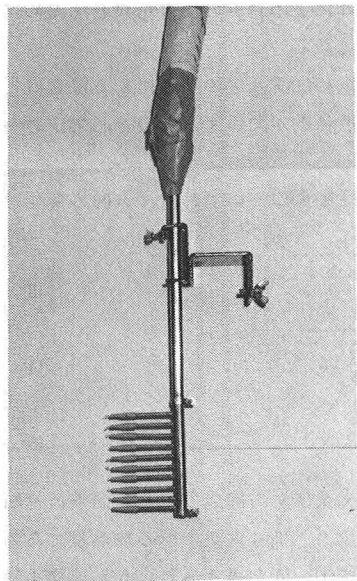


写真-1 クシ形サーミスター

3. 実験と比較のために使用する Shirazi & Davis のモデルの摘要

横流れのある場の中に放出された表面温排水の拡がりについての数値計算モデルとしては、既にかかなりの数のものが発表されているが、ここでは次節に記述する本研究の実験結果と比較する1つのベースを提供するものとして、Stolzenbach & Harleman (1971) のモデルがはじめた“積分モデル”の手法の枠内でこのモデルを部分的に改良した Prych (1972) のモデルをさらに部分的に改良し、現在米国において環境アセスメントのためによく使用されている Shirazi & Davis のモデル (1974)¹⁾ をとり上げることとする。そのモデルの摘要を以下に記す。

図-2の座標系をとるとき、s軸に垂直な鉛直面内における流速及び上昇水温について、つぎの相似性の仮定を使用する。

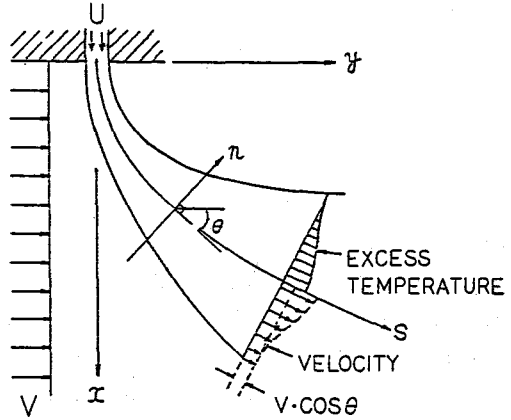


図-2 cross-flow と座標系

$$\left. \begin{aligned} u &= u_c f(\zeta_n) f(\zeta_z) + V \cos \theta \\ \Delta T &= \Delta T_c t(\zeta_n) t(\zeta_z) \\ f(\zeta) &= \exp(-\zeta^2), \quad t(\zeta) = \exp(-\zeta^2/2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\zeta_n = n/b$ 、 $\zeta_z = z/h$ 、添字 c : s 軸上の値であることを示す添字。

温噴流の s 方向の流量の増加はつぎのようにおく。

$$\frac{dQ}{ds} = \left(\frac{dQ}{ds} \right)_{j,v} + \left(\frac{dQ}{ds} \right)_{j,h} + \left(\frac{dQ}{ds} \right)_{a,v} + \left(\frac{dQ}{ds} \right)_{a,h} \quad (2)$$

ここに、Q : 噴流内流量、 $(dQ/ds)_{j,v}$ 及び $(dQ/ds)_{j,h}$: 噴流のそれぞれ鉛直連行及び水平連行による流量の増加の割合、 $(dQ/ds)_{a,v}$ 及び $(dQ/ds)_{a,h}$: 周囲水の乱れによる希釈の効果を表わすために便宜的に考えるそれぞれ鉛直連行及び水平連行による流量の増加の割合である。

噴流の連行による流量増加の割合は Ellison & Turner 式を準用して定め、また場の乱れによる混合はこれを便宜的に連行による流量増加の割合と考え、これには放出場の渦拡散係数が関係するものとして定められている。

また s 方向の温噴流の移流熱量 J、温噴流の x 方向運動量及び y 方向運動量の、いずれも s 方向の変化は、それぞれ次式で表わされるものとしている。

$$\frac{dJ}{ds} = -T_E \quad (3)$$

$$\frac{d}{ds} (M \cos \theta) = -\frac{d}{ds} (P \cos \theta) + S_{Fx} + F_D \sin \theta + V \frac{dQ}{ds} \quad (4)$$

$$\frac{d}{ds} (M \sin \theta) = -\frac{d}{ds} (P \sin \theta) + S_{Fy} - F_D \cos \theta \quad (5)$$

ただし、 S_{Fx} 及び S_{Fy} : 温噴流底面に作用する単位幅当りのせん断力の x 及び y 方向成分、P : 温噴流横断面内の静水圧の合力、 F_D : 温噴流軸に垂直方向に作用する横流れからの抗力、 T_E : 大気中への放熱量である。

これら(5)式の中の Q、J、M、 T_E 、 S_F 、P、 F_D に具体的な式を入れて(1)~(5)を書き直し、5元連立1階常微分方程式群とし、Runge-Kutta-Gill の方法により数値積分を行う。

4. 実験結果と考察

図-3, 5, 6は実験結果のうち典型的な例を示すものである。この実験条件はつぎの通りである。

Run-2

放出場の水温 $T_a = 13.7^\circ\text{C}$, 放出温水の温度 $T_0 = 27.2^\circ\text{C}$, 同上昇温度 $\Delta T_0 = 13.5^\circ\text{C}$

放出温水流量 $Q = 0.237\text{ l/s}$, 放出温水の流速 $U = 9.5\text{ cm/s}$, 放出口寸法: $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$,

放出温水の内部Froude数 $Fr = 2.50$, 同Reynolds数 $Re = 5,260$,

放出場の流速 $V = 2.84\text{ cm/s}$, クロスカレント比 $V/U = 0.30$

図-3はx軸に垂直に切った鉛直面内の上昇水温の等温線図を示す。x/ $\sqrt{A} = 1$ の断面では温噴流の背面側には大きな界面波が2山起きている。これは温噴流の脊面側に発先する大規模の渦によるものであると考えられる。同様の傾向はx/ $\sqrt{A}$ の値が大きい断面でも見られ、温噴流の温度低下には噴流が自己の流速のために周囲水を自己の体内に引きこむ連行作用の他に、噴流の背面に形成される大規模な渦による周囲水との混合作用がかなり影響をもつものであると考えられる。図-3の(c)の中にはShirazi & Davisのモデルによる巾 $\sqrt{2}b$ 、厚さ $\sqrt{2}h$ (ただしb, hは式(1)に用いられている値)の噴流境界線(図-4)をy軸に平行に切った曲線を破線で記入してある。しかしこれは等温線ではないので、これについて図の実験結果と直接の比較を行うことはできないが、モデルにおいては噴流脊面の渦による混合作用の影響はとり入れられていないから、実験とは十分には一致しえないのは当然である。

図-5は同じRun-2の実験結果からy軸に垂直に切った鉛直面内の上昇水温の等温線図を示す。図-5の(b)~(f)から、水面では比較的温度的の高い部分は噴流軸付近に集中してみられるが、水面下では下からの連行水により躍層面は押し上げられて左右の2山に分けられ、水温はかなりx方向に一様化される。すなわち、噴流領域内でx方向に大規模な混合作用が行われている。このためx=0の境界にも上昇水温の水が接している。

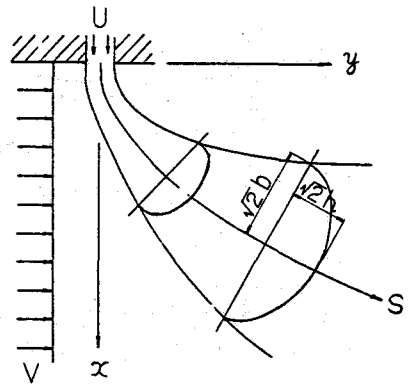


図-4

図-6は同じ実験の結果から水平断面内の上昇水温の等温度線図を深さ別に示したものである。図-6の(a)は水面での等温線図である。温噴流と横流れの上流側の境界線は顕著でそこでは横流れは噴流の下にもぐり、その境界線は潮目のような状態を形成していることが流れの可視化により明瞭に認められる。図の(a)及び(b)では上昇温度の山を連ねた噴流軸は明瞭に認められるが、(c)以下では殆ど認められなくなる。これはz/ $\sqrt{A} = 0.6$ より下部では上昇水温はy方向にもx方向にも渦によりばらまかれて一様化が行われているからであると考ええる。

図-7以降の図面はS-Dのモデルによる計算値である。これと比較すると実験の方が水面下ではcross flowにより温水はより下方に引きこまれ水平方向にはより一様化が行われ、その代り表層は薄く広く拡がっていることが見られる。

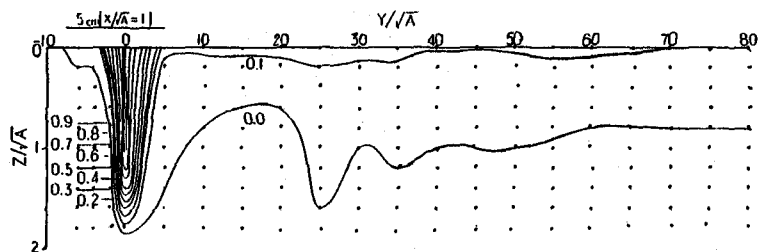
5. 結 び

温排水の表面温度分布のみならず水面下の温度分布の測定を行って、躍層下面及び温噴流脊面側に存在する大規模な渦構造の乱れとこれによる水平混合作用の現象の存在をかなり明らかにすることができた。この点を温排水の理論モデルにとり入れて行くことが今後の課題であると考ええる。

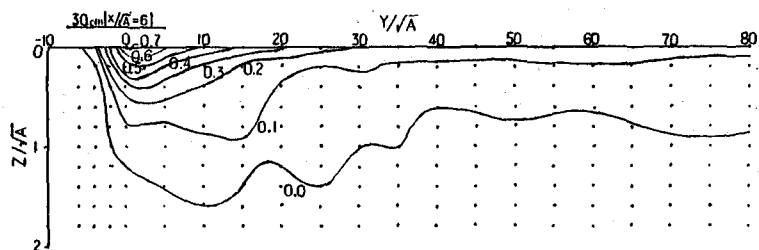
本研究の遂行に当り熱心に協力された中央大学土木学科柴原哲也、秋山大一、杉橋 潔、の3君は深甚な謝意を表する。

6. 引 用 文 献

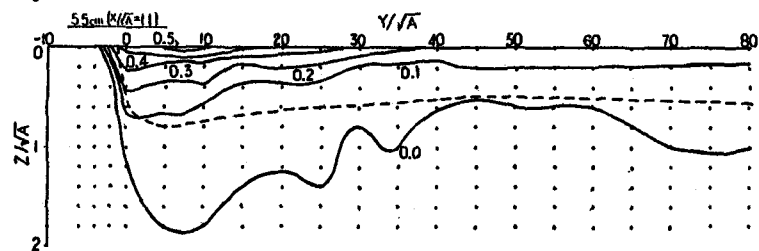
- 1) Shirazi, M.A. & Davis, L.R., Workbook of thermal plume prediction-Vol.2, US Environm. Protection Agency, Rep. No. EPA-R2-72-0056.



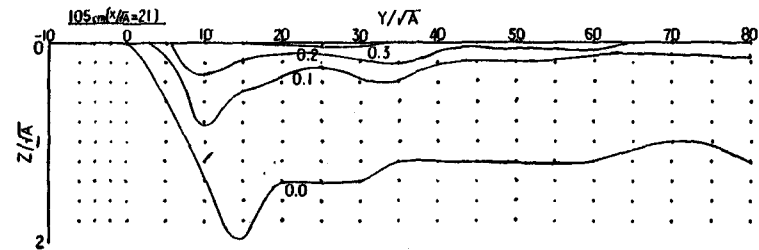
(a) $x/\sqrt{A} = 1$
の断面内の分布



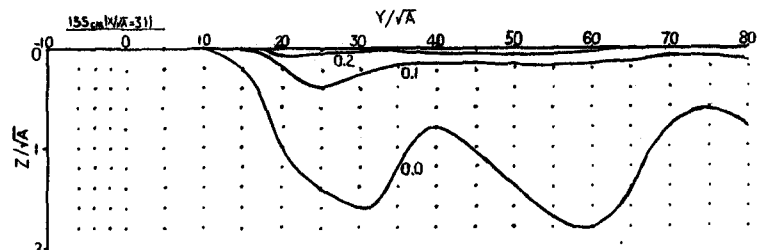
(b) $x/\sqrt{A} = 6$
の断面内の分布



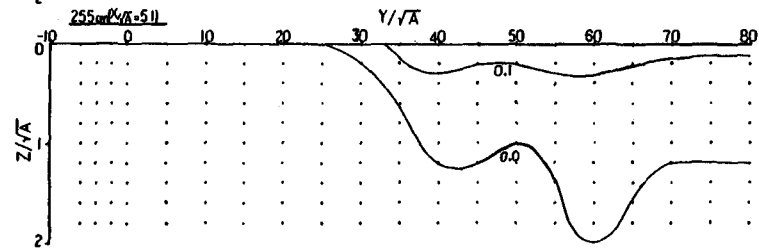
(c) $x/\sqrt{A} = 11$
の断面内の分布



(d) $x/\sqrt{A} = 21$
の断面内の分布

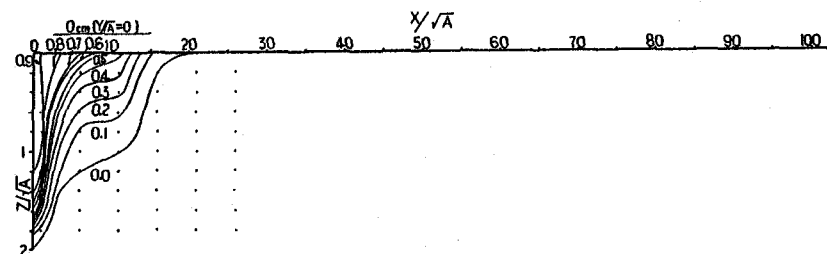


(e) $x/\sqrt{A} = 31$
の断面内の分布

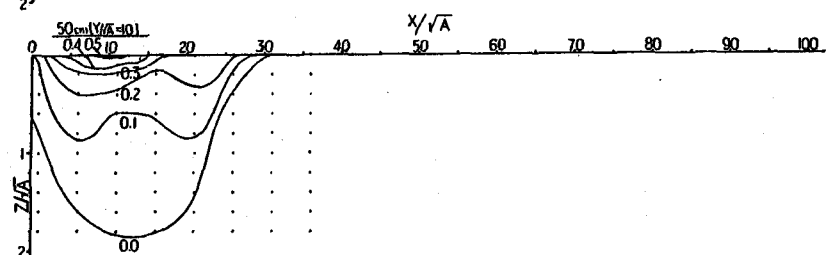


(f) $x/\sqrt{A} = 51$
の断面内の分布

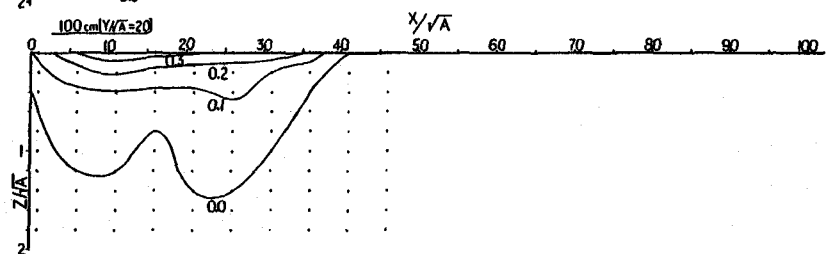
図-3 y 軸に平行な鉛直断面内の上昇水温分布 ($\Delta T/\Delta T_0$) (Run-2)



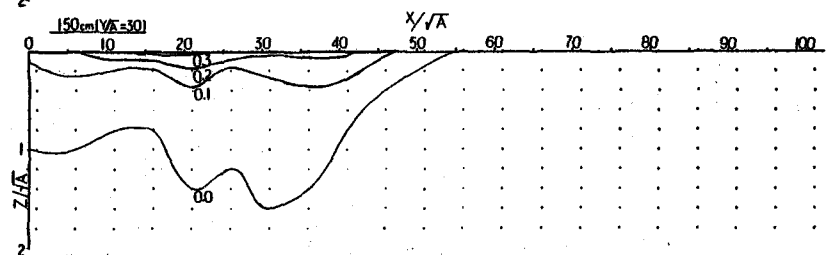
(a) $y/\sqrt{A} = 0$
の断面内の分布



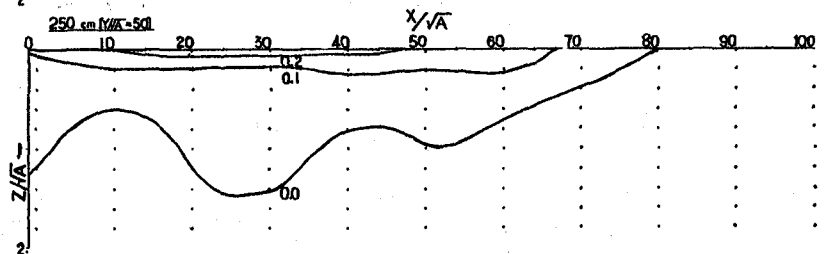
(b) $y/\sqrt{A} = 1.0$
の断面内の分布



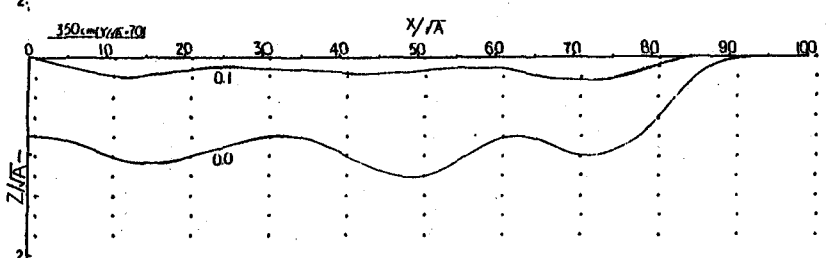
(c) $y/\sqrt{A} = 2.0$
の断面内の分布



(d) $y/\sqrt{A} = 3.0$
の断面内の分布

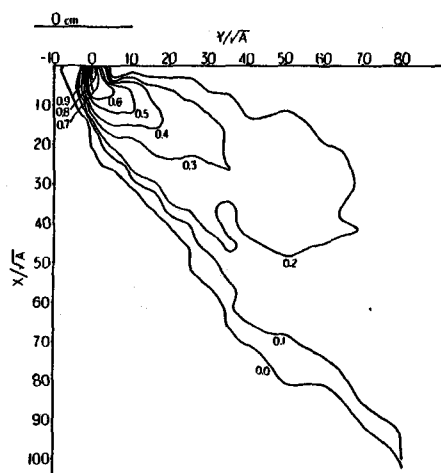


(e) $y/\sqrt{A} = 5.0$
の断面内の分布

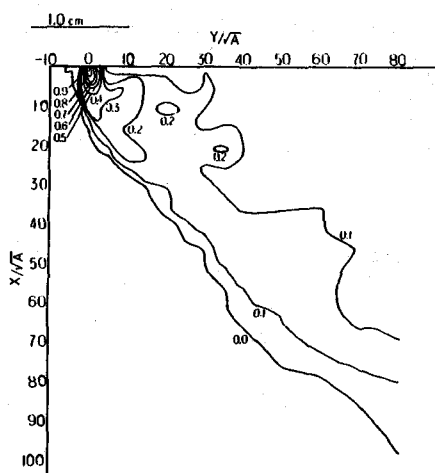


(f) $y/\sqrt{A} = 7.0$
の断面内の分布

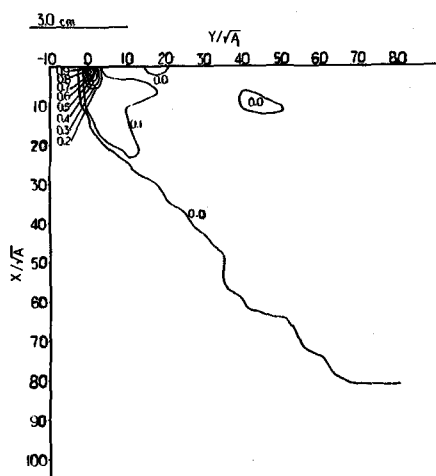
図-5 x 軸に平行な鉛直断面内の上昇水温分布 ($\Delta T/\Delta T_0$) (Run-2)



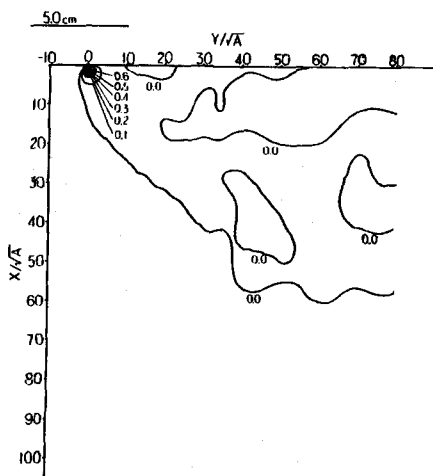
(a) $z/\sqrt{A} = 0$ における分布



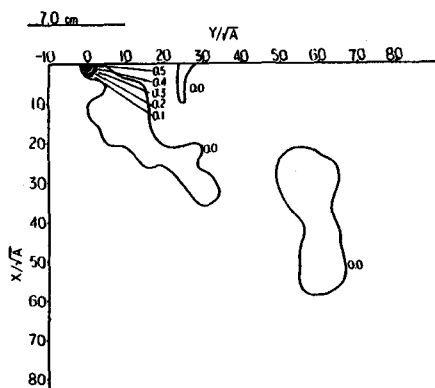
(b) $z/\sqrt{A} = 0.2$ における分布



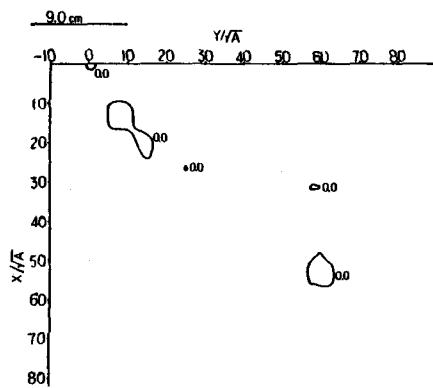
(c) $z/\sqrt{A} = 0.6$ における分布



(d) $z/\sqrt{A} = 1.0$ における分布



(e) $z/\sqrt{A} = 1.4$ における分布



(f) $z/\sqrt{A} = 1.8$ における分布

図-6 水平面上昇水温分布 ($\Delta T/\Delta T_0$) (Run-2)

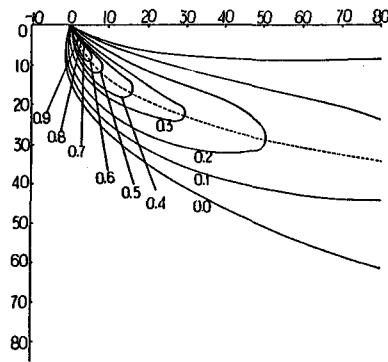


図-7 S-Dモデルによる
表面上昇水温計算値
(Run-2 と同一条件)

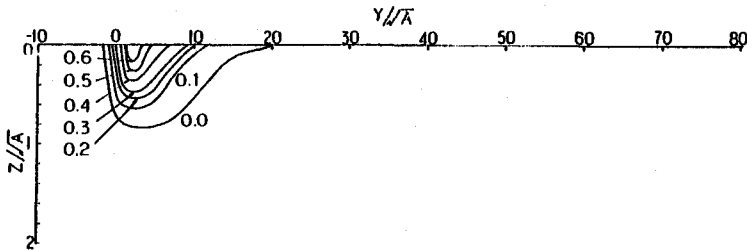


図-8 S-Dモデルによる上昇水温分布の計算値 (Run-2 と同一条件) ($x/\sqrt{A}=6$)

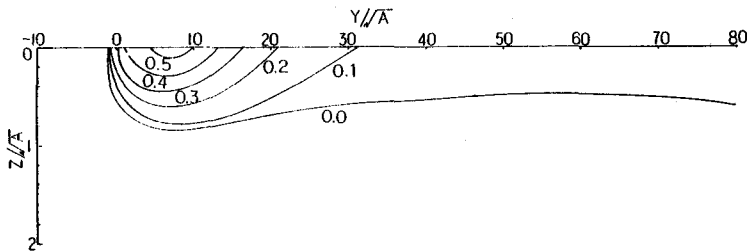


図-9 S-Dモデルによる上昇水温分布の計算値 (Run-2 と同一条件) ($x/\sqrt{A}=11$)

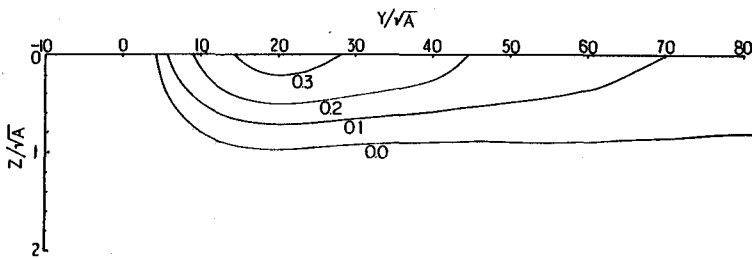


図-10 S-Dモデルによる上昇水温分布の計算値 (Run-2 と同一条件) ($x/\sqrt{A}=21$)

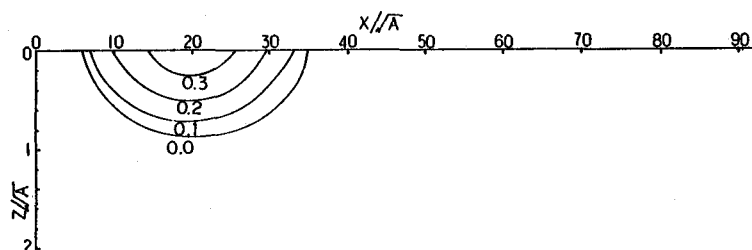


図-11 S-Dモデルによる上昇水温分布の計算値 (Run-2 と同一条件) ($y/\sqrt{A}=20$)