

熱映像による砕波帯の熱拡散係数の測定法

橋 本 宏*・宇 多 高 明**・田 中 邦 一***

1. ま え が き

近年、リモートセンシング (R.S.) 技術が多くの分野で利用され、その有効性が認められつつあるが、海岸調査においては通常測量範囲が広域となるために、広範囲をほぼ同時刻に測定できるという特徴を有する R.S. 技術の応用は相当大きなメリットがあると考えられる。このため著者らは昭和 52 年度より R.S. による沿岸海域の新しい調査法を開発することを目的として研究¹⁾を開始した。ただし R.S. 技術といっても応用範囲は相当広く、例えば可視光を利用した浮遊砂濃度分布の測定や海底地形測量、マイクロ波による波浪観測、熱映像による温度分布調査などが考えられるが、ここでは熱映像を利用した調査について検討を加えることにした。

さて、砕波帯付近の海浜流や波浪特性の把握は沿岸防災を検討する際、最も重要な問題であるが、広範囲の測定は測定法が十分確立していないため観測に際して困難に直面することが多い。ここではその測定手段の開発を目ざしたものであるが、現在までの検討の結果、熱映像を利用すれば砕波帯における熱拡散係数の算定が行える場合があることが明らかになった。

2. 観 測 方 法

熱映像の測定は、図-1 に示すように茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦より日立港に至る延長約 13 km、幅 2 km の

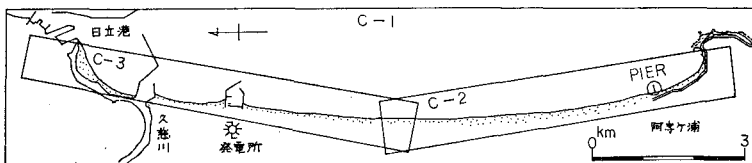


図-1 撮影コース

海域を対象として選び、図示するように C-1, 2, 3 で示されたコースに沿って航空機によって熱映像の撮影を行った。撮影は赤外線映像装置を用いて昭和 53 年 8 月 15

表-1 撮影時刻と縮尺

コース名	撮影時刻	撮影高度	撮影縮尺	温度レンジ
C-1a	15:28~15:32	1500 m	1/50,000	5°C
C-1b	15:39~15:44	1500	1/50,000	10
C-3a	16:13~16:27	500	1/16,000	15
C-2a	16:13~16:27	500	1/16,000	15
C-3b	16:37~16:40	500	1/16,000	3
C-2b	16:49~16:51	500	1/16,000	3

日 15 時 28 分より 16 時 51 分の間に行った。ただしこれらの測定時刻と縮尺は表-1 にまとめられている。なお航空機に積載した赤外線映像装置は物体が自然に放射している $8\sim 14\mu$ の電磁波エネルギーの分布を回転鏡によってとらえる装置である。

一方、sea-truth としては、漂砂観測用棧橋、日立港、久慈河口、流入小河川においてサーミスタ温度計と水銀温度計を用いて測温した。特に棧橋上においては、岸沖方向の温度分布の時間的変化を調べるために 2 時間間隔で測温した。

3. 観測データの処理法

熱映像の解析は海面より放射された電磁波エネルギーを電気信号に変え、フィルム上に記録する機上処理と、フィルムを現像し等温度分布図を作成する地上処理とに分けられる。機上処理については航空機の動揺に起因する歪みを補正するためのローリング補正、タンジェント補正、偏流補正などを行う。また地上処理については記録が 70 mm フィルム上にとられているので、これを自動現像機で現像し、必要に応じて印画紙上に焼付ける。更に、現像されたフィルムの濃度と現地での温度との関係を求め、写真濃度計によって測線に沿う温度を測定すればその測線に沿う温度分布を求めることができる。

4. 観測結果と考察

(1) 熱映像の測定

リモートセンシングによる測定を行う場合、航空機による測定自体は気象条件さえ良ければ比較的容易に行う

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室
 *** 正会員 アジア航測株式会社

ことができる。このため映像を得ることはそれほど困難ではないが、多くの場合困難は撮影結果の物理的解釈にある。すなわち、海上においては広範囲・同時刻の検証データを得ることが難しく、また非常に短い時間で測定が完了するために、対象とする現象の時間的変化過程を明らかにすることが難しいことなどが原因と考えられる。

以上の点より、ここでは R.S. による観測期間中、空間的に広い測定はできる限り綿密に行うことにしたが、それに劣らず経時変化について詳細な観測を実施した。勿論、このような測定は空間的に広い領域で行うことはできないので、この測定は阿字ヶ浦の棧橋で行うことにした。その第一は水温と気温の経時変化を調べ、ど

のような条件のもとで測定を行っているかを明らかにすることであり、第二の点は日射の変化すなわち日変化を明らかにすることである。第二の点は後に考察するとして第一の点に関して、まず 図-2 は昭和51年5月より54年3月まで約3年間の水温と気温の経時変化を示すものである。図中の●印は水温を、○印は気温を示す。これらのデータは毎週1回棧橋直下の汀線付近で測定されたものである。両者とも年変化があり、また水温と気温の位相差が存在する。また、全体的に右上りの傾向があり、少なくとも3年間では気温・水温が上昇傾向にあったことを示している。ところで、R.S. の観測は図中の点線で示された、年間のほぼ最高温度となる時期を選んで行われた。

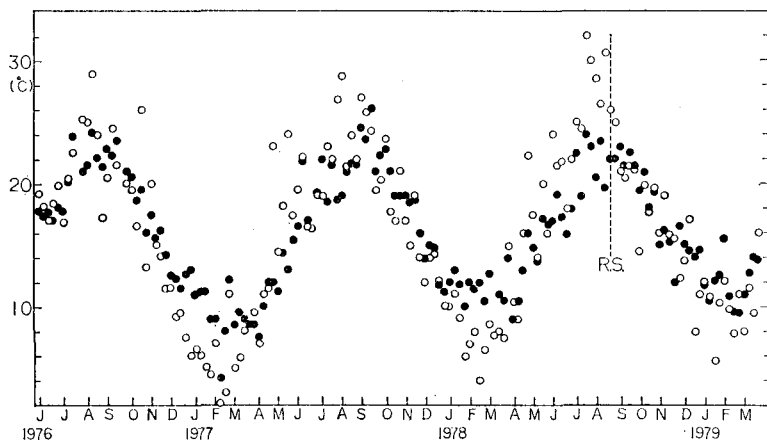


図-2 水温と気温の経時変化 (●: 水温, ○: 気温)

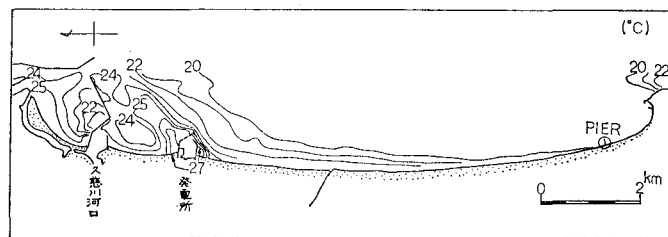


図-3 阿字ヶ浦～東海海岸水温分布図

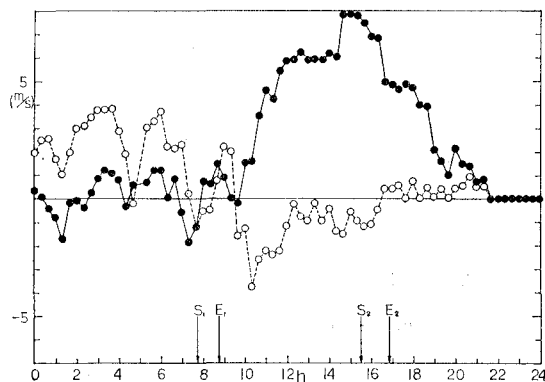


図-4 沿岸及び岸沖方向風速の経時変化

さてまず最初に 図-3 は8月23日に高度 1500 m, 温度レンジ 10°C で撮像した熱映像を示している。図によると南端の阿字ヶ浦の棧橋 (pier) 付近より海岸に沿って北へ海岸で温められた高温の沿岸水が拡散しつつある状態が認められる。ただし、この映像の撮影時刻はほぼ 15 時 40 分であった。撮影を行った時期、この海岸においては夏期の典型的状態として日中に南風が卓越した。観測当日においても 図-4 に示す通り、典型的特性が表われていた。図-4 は

8月23日0時より24時までの風速の変化を示したものであり、実線は南北方向、破線は東西方向の毎20分ごとの風速を示している。ただし南北成分は正值が北向き、東西成分は正值が東向きを表わす。南北(沿岸)成分はほぼ9時40分より南風が発達し、15時頃最大値となり、夕刻には再び小さくなっている。一方、東西成分は日中

は海より陸方向へ、夜間はその逆となっている。また図中の S_2 より E_2 までは熱映像による観測を行った時期を示し、 S_1 より E_1 は航空機を利用した海浜流観測²⁾の時間を示している。時刻 $S_1 \sim E_1$ では棧橋付近では沿岸流は北流であった。午後の時刻 $S_2 \sim E_2$ においても棧橋付近では波浪条件は午前中と同様に碎破波高で 20~30 cm 程度であり、また棧橋付近は北流であった。また沿岸方向の風は、図-4 に示したようにほぼ午前中も午後とも南風であったことを考慮すると、先に述べた 図-3 のほぼ全域で北向きの沿岸流が発達していたと考えられよう。

ところで、以上に述べた気象・海象条件が観測当日偶

表-2 南北風速の発達状況

日 時	開始時刻	終了時刻	最大風速時刻	風 速	風 向	日 時	開始時刻	終了時刻	最大風速時刻	風 速	風 向
7月20日	—	—	—	—	—	8月11日	8:00	16:00	15:00	4.0 m/s	SE
21	14:40	19:40	11:50	5.5 m/s	S	12	—	—	—	—	—
22	5:20	22:00	15:20	5.3	SE	13	14:40	20:00	16:00	6.0	S
23	6:00	15:00	12:20	4.1	SE	14	6:00	18:00	15:00	6.2	SSE
24	—	—	—	—	—	15	6:40	20:20	14:30	5.0	SSE
25	9:00	19:00	15:40	6.2	S	16	8:00	19:00	17:40	5.0	N
26	6:00	20:00	16:00	6.0	S	17	6:00	18:20	14:00	6.0	SSW
27	6:00	21:00	14:40	6.0	SSE	18	低気圧	—	—	—	—
28	—	—	—	—	SSE	19	8:00	20:00	17:50	6.0	S
29	6:30	22:00	14:50	8.4	SSE	20	7:00	20:00	15:00	6.0	S
30	6:20	21:00	14:50	8.5	SSE	21	6:00	19:00	11:20	6.0	SSW
31	—	—	—	—	—	22	9:20	18:20	15:30	8.0	SSE
8月1日	低気圧 通 過	—	—	—	—	23	9:00	19:20	15:20	8.0	S
2		—	—	—	—	24	—	—	—	—	—
3		—	—	—	—	25	—	—	—	—	—
4		—	—	—	—	26	10:30	19:20	15:30	4.5	SE
5	9:00	20:00	13:00	6.0	SSE	27	9:20	17:00	13:40	4.0	SE
6	8:40	22:00	15:40	5.6	SSE	28	9:00	17:20	15:00	5.0	SE
7	7:20	19:00	15:00	6.0	SSE	29	9:00	21:00	14:00	8.0	SE
8	7:20	19:00	14:40	5.0	S	30	低気圧	—	—	—	—
9	12:00	20:40	19:00	7.0	NNE	31	—	—	—	—	—
10	10:00	18:00	15:40	5.0	S						

然表われたものとする、後述するような熱拡散係数の算定法を一般化するのは相当困難である。このため、観測当日に表われた気象特性が夏期にどの程度発生するかを調べることにした。表-2 は7月20日より8月31日に至る期間で南風の発達状況をまとめたものであり、図-5 に示された南風の開始時刻と終了時刻、最大風速とそのときの風向と時刻が示されている。表-2 によれば、南風は6時～9時頃吹き始め、15時頃 S 方向より約 6 m/sec に達し、日没とともに終息する特性を有し、またこのような経時変化がこの海岸では相当一般的であったことがわかる。

ところで先に述べた図-3 の結果は海岸線において陸より海洋へ熱が供給され、沿岸流の流下方向に拡散しているパターンを示しており、その分布形より、熱拡散係数の算定が可能と考えられるが、その前に、このような温度分布の発生した理由を棧橋で測定した大気と海水の温度の経時変化より検討してみる。まず図-5 は橋脚の各位置 (P₂, P₄, P₆, P₈)* の水温と気温の24時間の経時変化を示している。気温は1日間の周期的変化を示すが、水温も同じ周期性を有するものの、最低温度に達する時刻が約4時間ほど早い。また詳細にみると、ほぼ13時より18時頃までの間には陸に近いP₂はP₈よりも高温となり、岸沖方向に温度勾配が発生している。以上の点より、海水は大気より直接熱を供給されるが、同時に日中において陸より海へ向けての熱の拡散が起こることが明らかである。ただし熱映像は表面数 mm の平均温度を測定しており、急激な鉛直勾配が存在する場合は熱

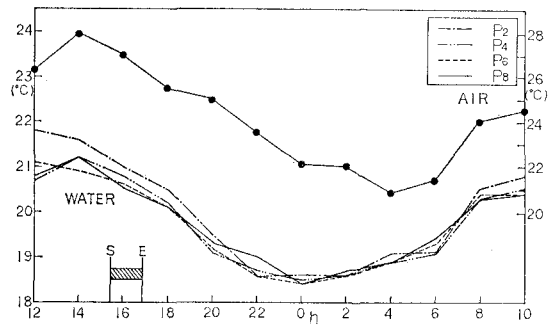


図-5 水温気温の24時間の経時変化

表-3 水温の鉛直分布 (P₈ 地点)

時刻	水深	~0.2 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
8/23		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
12:00		20.8	20.8	20.6	20.5
14:00		21.2	21.2	21.1	21.1
15:30		20.4	20.4	20.4	20.4
8/24					
6:00		19.4	19.4	19.4	19.1
10:00		20.4	20.4	20.3	20.3

収支をとることは相当難しくなる。このため棧橋の先端 (P₈) で水温の鉛直分布を測定した。この結果が表-3 である。碎波帯近傍のため相当一様化しているようである。ただし、棧橋付近では、図-3 で示された熱拡散の分布はそれほど発達していなかったため、直接の検証データとして利用することはできず、このため明確な結論を出すには至らなかった。

(2) 沿岸流による熱拡散のモデル

本節では沿岸流による熱拡散のモデル化を行う。まず

* 起点からの岸沖距離は P₂=27 m, P₄=81 m, P₆=126 m, P₈=174 m.

現象は日変化に比較すればほぼ定常状態と考えられるから、汀線より沖向きに x 軸、汀線方向に y 軸、鉛直上方に z 軸をとり、水温を T とおけば、基礎式は式(1)となる。

$$V \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし V は沿岸流流速、 k_x, k_y, k_z は x, y, z 方向の熱拡散係数とする。式(1)の右辺第2項は左辺の移流項に対して無視できると仮定し、更に式(1)を水深方向に積分すると式(2)が得られる。

$$V_0 \int_{-h}^0 \frac{\partial T}{\partial y} dz = k \int_{-h}^0 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dz + k_z \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{-h}^0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、岸沖方向の熱拡散係数や沿岸流流速 V は x の関数として表わされることが考えられるが、ここでは平均的な値を求めることとして $k_x = k$ (定数)、 $V = V_0$ (定数) と置いた。式(2)の右辺第2項は水面及び水底における熱の移動を表わしているが、夏期の日射の強い場合には陸と海水の温度差の方が、大気と海水の温度差よりはるかに高くなると考えられるため、第1近似としては式(2)の右辺第1項は他の項に対して省略しても良いであろう。更に、式(2)の左辺第1項はライブニッツの公式によって変形できるが、その際に海底勾配の変化率の入る項は無視できるとすれば、最終的に式(3)が得られる。

$$V_0 \frac{\partial}{\partial y} (\bar{T}h) = k \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\bar{T}h) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし $\bar{T}h = \int_{-h}^0 T dz$ と定義する。式(3)を解く際、観測では水深方向の温度勾配については精密な測定を行うことができなかったため、まず h が定数とおいて計算を行うこととし、この点は後に再検討することにする。

さて、式(3)の境界条件は式(4)で与えられる。

$$x=0: T=T_0, \quad x \rightarrow \infty: T=0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(3)、(4)の解は Ames³⁾ によれば、similarity variable $\zeta = xy^{-1/2}$ を導入すれば容易に求められる。すなわち変数 ζ を用いて式(4)を常微分方程式に変換し、式(4)を満足するように係数を定めると解は式(5)となる。

$$T = T_0 \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\alpha} e^{-t^2} dt \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし $\alpha = x / 2\sqrt{\frac{k}{V_0}} y$ である。また $h \neq \text{const.}$ のときは、式(5)のカッコの外に係数として h_0/h を乗ずれば良い。

(3) 観測値によるモデルの検証

モデルの検証を行うには実際の温度分布と式(5)とを比較する必要があるが、これには図-3の温度分布は

撮影高度が高く精度が悪いので、温度分布の測定には高度 500 m の画像 (C-2b) を用いることにした。この画像より代表的等温度線 (21.6°C) の分布形を描き、 $\Delta y = 250$ m 間隔で y_1 より y_{21} まで汀線に直角な測線を設け、測線上で汀線とこの等温度線の距離を測定した。また Y_1 より Y_7 まで原点より各々 1.13, 2.5, 3.8, 4.05, 4.45, 4.9, 5.25 km 離れた地点で岸沖方向の温度分布を測定した。ただし原点は一応棧橋に置いた。

図-6 は以上の検討の結果得られた拡散幅の変化を示

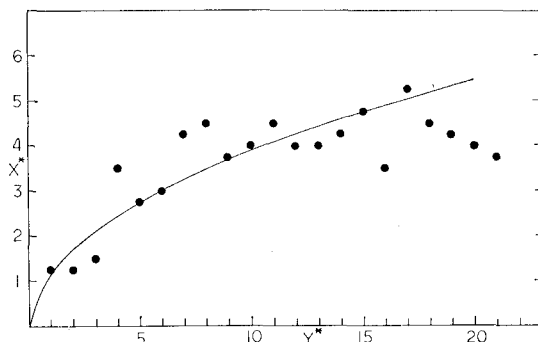


図-6 拡散幅の場所的变化

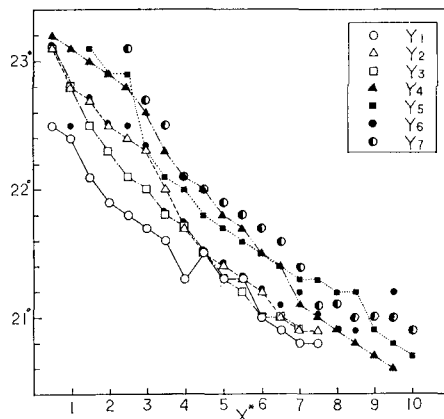


図-7 汀線と直角方向の温度分布

している。ただし幅 x は原点における幅 ($x_0 = 33$ m) によって、また y は測定間隔 ($\Delta y = 250$ m) によって無次元化し、新しく変数を x^*, y^* とおいた。図-6 によると、 x^* と y^* の間には実線で示されるようにほぼ $x^* = 1.23\sqrt{y^*}$ という関係が成立する。

次に、汀と直角方向の温度分布を示すのが図-7である。図-7 によれば、最高温度は $T_{\max} = 23.2^\circ\text{C}$ であり、また最低温度は $T_{\min} = 20.6^\circ\text{C}$ である。一方、先に図示した図-6の分布図は $T = 21.6^\circ\text{C}$ の等温度線を示すものであったから、相対温度 T/T_0 を式(6)によって計算すると、

$$T/T_0 = (T - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$T/T_0 = 0.62$ となる。この T/T_0 に対して α を式(5)

より逆算して求めると、 $\alpha=0.73$ となる。したがって α の定義より、

$$x^* = \frac{1.46}{x_0} \sqrt{\frac{k}{V_0}} y_0 \cdot \sqrt{y^*} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる関係が成立する。一方、図-6 によれば、 $x^*=1.23 \cdot \sqrt{y^*}$ の関係が成立するから、両式の等値関係より k が算定できる。ただし計算を行うには V_0 を定めなければならないが、これには、約7時間前に行った海浜流観測²⁾で得られた流速の最大値を用いることとし、 $V_0=50$ cm/sec とおいたところ、熱拡散係数として $k=1.54 \times 10^4$ cm²/sec という値が得られた。

この結果、温度分布は無次元化が可能になるから、式(5)の妥当性を検討するために岸沖方向の温度分布を無次元化して図示

したのが図-8である。図中の実線は解析解を示している。解析解の形状は測定値と対応しているが、データの下限値に近い。水深変化の効果を考慮すると温度の通減は更に急

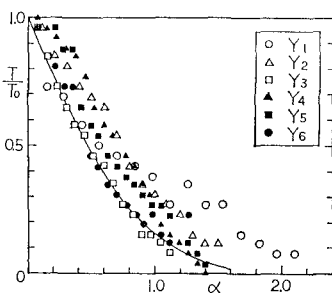


図-8 無次元化された岸沖方向温度分布

激になる。この点からすれば、水深はそれほど変化しないという条件に近い訳であるが、詳細な点については更に検討が必要であろう。

なお、ここで得られた熱拡散係数に対して Longuet-Higgins⁴⁾ による渦動粘性係数 (L) と比較すると、まず Longuet-Higgins の式は式(8)のように与えられるが、

$$L = \rho N x \sqrt{gh} \quad \dots\dots\dots (8)$$

仮に $\rho=1$, $N=0.01$, $x \sim 10^4$ cm, $g=980$ cm/sec², $h=100$ cm とおけば、 $L=3.1 \times 10^4$ cm²/sec となり、その比は約 1/2 ということになる。また熱拡散の時間スケール (t) を調べると、代表長さを $l \sim 10^4$ cm とおけば、 $t \sim l^2 k^{-1} = 1.9$ 時間 となり、日変化に比較すると確かに時間スケールは短くなっている。

(4) 河川水の拡散

久慈川の河口に關しては、今回得られた映像は河川流量が小さかったため特長的なパターンは示さなかった。このため河川水の拡散解析には冬期に行った観測結果を利用すこ

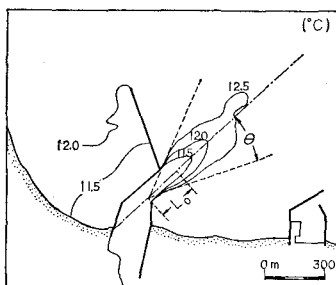


図-9 河川水の拡散

とにした。この観測は昭和53年1月12日の14時36分～14時分に行ったものであり、その結果が図-9である。

ここではこの分布を利用し、Lagrange 流に拡散係数の概算を行い、前節の値と比較することにする。まず、湧源近くの拡散は、Lagrange 流に記述すると、例えば日野⁵⁾によれば次のように表わされる。

$$K = \bar{v}_i^2 \cdot T \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sqrt{\bar{Y}^2} = \sqrt{\bar{v}_i^2} \cdot T \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 K : 乱流拡散係数、 $\bar{v}_i^2$, $\bar{Y}^2$: 流体粒子の速度及び広がり の2乗平均、 T : トラベルタイムであり、 T は一般流の流速 U と距離 X の間に $X=U \cdot T$ の関係が成立する。式(10)は拡散角度を θ とおけば式(11)のように変形される。

$$\frac{\sqrt{\bar{v}_i^2}}{U} = \frac{\sqrt{\bar{Y}^2}}{X} = \tan \theta \quad \dots\dots\dots (11)$$

測定時の河川流量は約 23.7 m³/sec, 河口幅 275 m, 水深約 5 m であったため、平均流速は $U \doteq 1.7$ cm/sec となる。また拡散角は図より $\theta=23.5^\circ$, 代表距離は $X=375$ m であった。したがって乱流拡散係数は $K=1.2 \times 10^4$ cm²/sec となる。測定時期が異なるために、この値と前節の結果を直接比較することはできないが、オーダー的には等しい値となっている。

5. あとがき

本論文では熱映像の海岸調査への応用法について述べた。すなわち、熱映像によって天然状態で陸-海水-大気の間 に存在する温度差による熱拡散について検討し、熱拡散が沿岸流によって支配されている場合には、熱拡散係数の算定を行うことが可能なことを明らかにした。また、河川水の拡散については Lagrange 流の拡散として検討を加え、乱流拡散係数の概算を行った。

以上の点より、海岸調査への熱映像の利用は相当有効性があると考えられる。勿論、本報で述べた方法を一般化するためには、水温の時空間変化や、特に鉛直分布などに関して更に詳細な検討を必要とすることは言うまでもないであろう。

参考文献

- 1) 橋本 宏・宇多高明: リモートセンシングによる碎波帯の水温分布の測定, 第34回年講, 1979.
- 2) 橋本 宏・宇多高明: リモートセンシングによる海底地形・海浜流の同時観測, 第24回水講投稿予定.
- 3) Ames, W. F.: Nonlinear Partial Differential Equations in Engineering, pp. 133~134, Academic Press, 1965.
- 4) Longuet-Higgins, M. S.: Progress in the study of longshore currents, pp. 203~248, Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, edited by R. E. Meyer, Academic Press, 1972.
- 5) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, pp. 235~240, 1974.