

干潟域における水温変動に関する検討
Water Temperature Variation in Tidal Flat Area

(財) 電力中央研究所 正員 水鳥雅文
(財) 電力中央研究所 正員 角湯正剛
(財) 電力中央研究所 正員 加藤正進
(財) 電力中央研究所 正員 和田 明

1. はじめに

海域の自然環境水温は、その海域の地形・流動および気象条件などにより時間的・空間的に変動する。特に干潟域のあるような非常に浅い海域ではその水温変動が激しいことが経験的に知られている。このような水温の変動特性とその形成機構を明らかにすることは、干潟域の環境あるいは生態に関する諸問題を解明する上で重要な課題であると共に、大気・海面間の熱交換作用のメカニズムを定性的・定量的にとらえて、大気と海域の両者の関係を解明していく上にも重要な問題であると考えられる。

本研究は、このような干潟域における自然水温の実態を把握するため、実際の海域で行なった水温、流動および水温に関する因子の実測結果について検討すると共に、干潟を考慮した数理モデルによる流動および水温シミュレーションを実施し、その変動特性と形成機構について検討したものである。

2. 現地観測

(1) 調査内容の概要

対象海域は半日周潮流の卓越した内海域であり、観測項目として海域水温、流動、泥温、河川水温および気象要素等を取り上げ、昭和56年9月から約1ヶ月間現地観測を実施した。

本海域は水深が比較的浅く、干潮時には沿岸沿いに干

潟域が広がる。この区域に8つの観測塔を設置し、水温・流動および泥温について連続観測を行なった。また、海域における水温、塩分の空間分布特性を把握するため、船舶による曳航式測定ならびに航空機からの赤外線写真撮影による測定を同時に実施した。

(2) 調査結果の検討

本海域では半日周潮流が卓越し、その潮流振幅は沖合で20～30cm/sであり、浅海域においては図-1に示すように河口域の測点では10～25cm/s、沿岸域

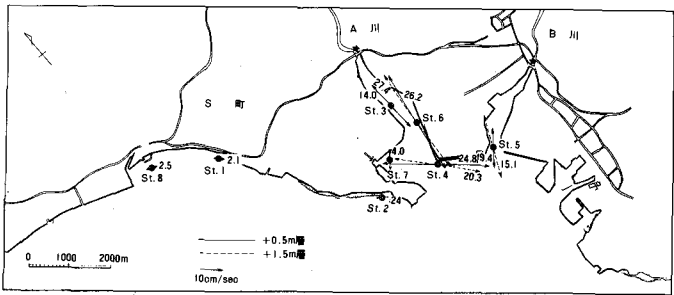


図-1 潮流楕円長軸方向のベクトル

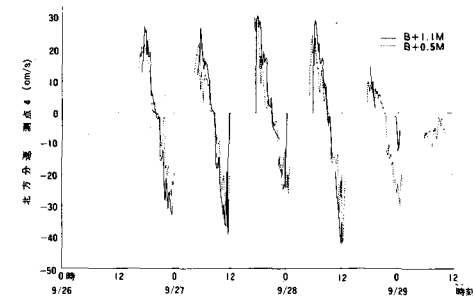


図-2 干潟域の流速記録

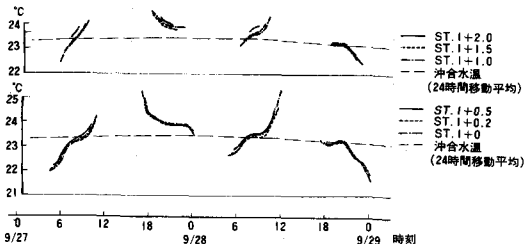


図-3 干潟域の水温変化

ST1, 2, 8では 2cm/s 程度と小さく、流向はいつも地形に沿っている。浅海域での流速の経時変化の一例を図-2に示す。干潟域においては潮位の低下に伴って流速計が空中に露出し、流速測定が不能となるため、最大流速が出現する時刻付近の流速値を得ることが困難である。

図-3は、浅海域における2時間以上の周期を有する水温変動成分の時間変化である。変動パターンは潮時との関係で一定ではないが、水温の変化は観測中断中の前後、すなわち水深の浅い時期に大きく、満潮時付近では小さい。

図-4には赤外線写真撮影による本海域の水温水平分布の観測結果の一例を示す。これらの結果より、水温の水平分布の特徴も各時刻により変化することがわかる。例えば、早朝時には浅海域、特に河口部付近に沖合海域よりも $1\sim 2^\circ\text{C}$ 程度低い低温域が形成され、逆に14時から16時にかけては浅海域に沖合海域より $1\sim 2^\circ\text{C}$ 高い高温域が形成される。この間、沖合海域では浅海域に比べ大きい水温の日変動はみられない。

次に水温変動とこれに関与する因子、気象要素との相関関係について検討した。その一例として図-5に気温と沖合水温および浅海水温との相互相関関数を示す。気温と水温の間には1日周期の相関関係がみられ、この相関関係は沖合水温よりも浅海水温の方が高い傾向が認められる。また、両者の間には約3時間の遅れが存在する。

次に水温変動とこれに関与する因子、気象要素との相関関係について検討した。その一例として図-5に気温と沖合水温および浅海水温との相互相関関数を示す。

気温と水温の間には1日周期の相関関係がみられ、この相関関係は沖合水温よりも浅海水温の方が高い傾向が認められる。また、両者の間には約3時間の遅れが存在する。

3. 数値モデルによる水温シミュレーション解析

浅海域における自然水温の変動に関与する因子としては、気象要素、潮流、陸水の流入など様々なものが挙げられるが、そのうち主要な因子と考えられる気象要素と潮流に注目して、浅海域の水温変動を数値モデルを用いてシミュレーション解析する。海域の水温変動現象は、三次元的空間スケールの問題であるが、三次元的に数値モデルで取り扱うのは容易ではない。そこで、まず鉛直二次元モデルを作成し、気象要素による日単位の水温変動に及ぼす水深の影響ならびに気象要素の算定法の適合性について検討する。その結果に基づいて気象要素および潮流を考慮した平面二次元モデルを構築し、今回の調査海域を対象に水温シミュレーション解析を実施し、モデルの適合性、問題点について検討する。

(1) 鉛直二次元モデルによる水温解析

(a) モデルの内容

海域における鉛直二次元方向の熱拡散方程式は、次式で示される。ただし、本モデルでは気象要素と水深の影響を主に考え、移流項は省略している。

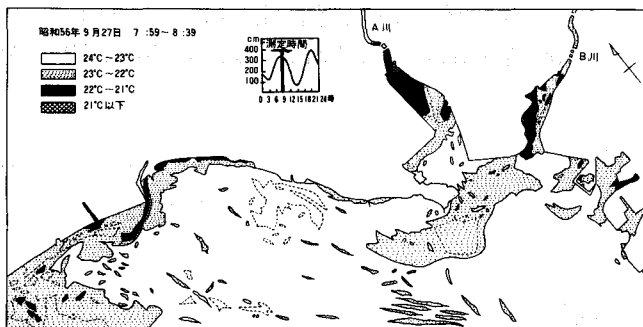


図-4-1 水温水平分布(実測値)

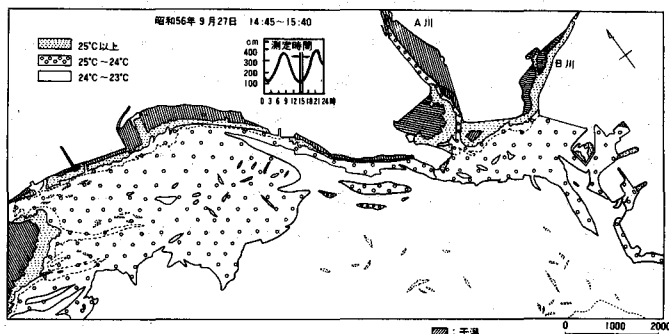


図-4-2 水温水平分布(実測値)

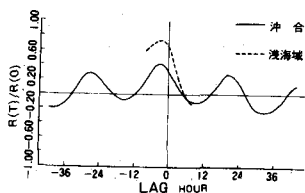


図-5 水温と気温の相互相関関数

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{c\rho} \frac{\partial}{\partial z} \{ Q_s(z) \} \dots\dots (1)$$

ここに、 T ：水温、 t ：時間、 x, z ：水平方向および鉛直方向の座標軸、 K_x, K_z ： x, z 方向の渦動拡散係数、 c, ρ ：海水の比熱および密度、 $Q_s(z)$ ：水深 z に達する日射量。 $Q_s(z)$ は次式で与えられる。^{1), 2)}

$$Q_s(z) = (1 - \beta) Q_{s0} \exp(1 - \eta z) \dots\dots (2)$$

ここに、 Q_{s0} ：水中に吸収される全日射量、 $\beta = Q_{s0}$ のうち水面部分で吸収される熱量の割合、 η ：バルク減衰係数。本モデルでは $\beta = 0.69$ 、 $\eta = 0.425 (1/m)$ を用いた。²⁾

境界条件は、汀線側(境界Ⅰ)で $\partial T / \partial x = 0$ 、沖合側(境界Ⅱ)で $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ 、海底では $\partial T / \partial z = 0$ 、海面では、次式を適用する。¹⁾

$$-c\rho K_z \frac{\partial T}{\partial z} = \beta Q_{s0} - (Q_b + Q_c + Q_e) \dots\dots (3)$$

ここに、 Q_b ：有効長波放射量、 Q_c ：海表面と大気との熱伝達量、 Q_e ：海水の相変化に対する潜熱量。これらの算定式としては、 Q_b ：ステファン・ボルツマンおよび修正 Swinbank 式を合成した式、 Q_c, Q_e ：近藤のバルク輸送式を用いた式、 Q_{s0} ：全日射量から水面反射分をさし引いた値、を用いた。³⁾ただし、 Q_b, Q_c, Q_e は海面を冷却する方向に働く量を正とする。

(b) 数値計算結果の検討

前述した数理モデルを用いて数値解析を行った。計算モデルとしては図-6に示すような内湾域を想定し、気象条件として気温および日射量は日変動を考え図-7、8に示すような条件で、温度、雲量および風速はそれぞれ70%、0、2m/sと一定値を与え、初期値として水温は全域23℃とした。渦動拡散係数は $K_x = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $K_z = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ を与えた。

図-9は、沖合側での水温鉛直分布の経時変化の計算結果を示したものである。分布形状は指数関数形を示し、上・下層間の温度差が最大で±1℃程度存在する。

図-10は、水面水温の水平分布を示したものである。これより、6時頃には水深の浅い汀線側で水温は低く、16時頃は逆に汀線側ほど水温は高く、その差はどちらの場合も1.5℃程度であり、この値は観測された浅海域と沖合海域との水温差とほぼ一致する。

図-11は、表層における

図-9 水温鉛直分布

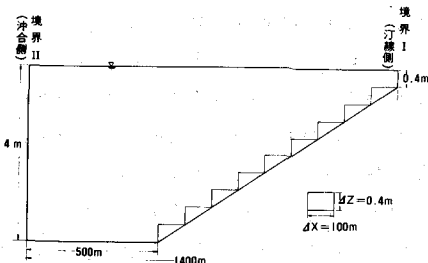


図-6 鉛直二次元モデル

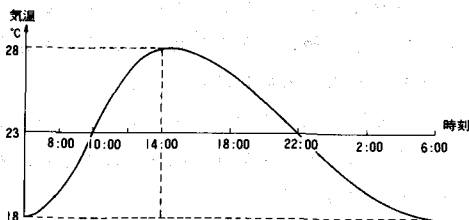


図-7 気温の日変化

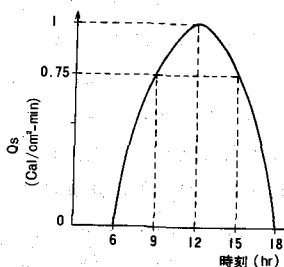


図-8 日射量の日変化

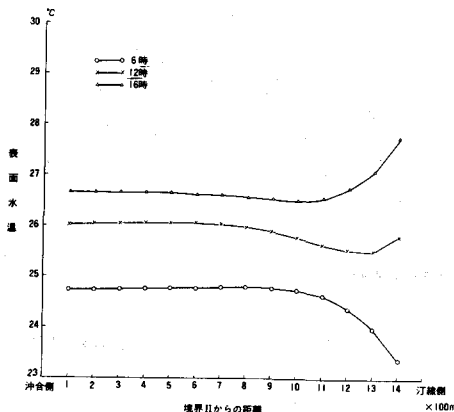
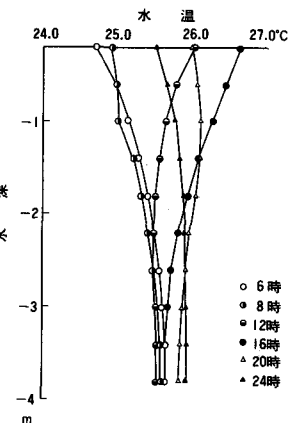


図-10 表面水温の水平分布

大気と海面間の熱交換量に関する各項の値の経時変化を示したものである。日中においては、日射による加熱項が他の項に比べかなり大きく、海水は加熱される傾向にあり、夜間は Q_b , Q_c , Q_e が正であるから海面から大気へ熱逸散していることがわかる。

以上のように、鉛直二次元モデルによって得られた水温の水温の水平および鉛直構造ならびに変動特性は概ね調査結果と一致しており、気象要素の算定法は妥当であると判断できる。また、計算結果から判断すれば、海域における水温構造とその変動特性に及ぼす水深の影響は大であるものと考えられる。

(2) 平面二次元モデルによるシミュレーション解析

平面二次元モデルでは、浅海域における比較的短い周期の平面的な水温変動現象をシミュレートすることを目的とする。

本海域の特徴は前述のように、非常に干潟部の面積が広いことが挙げられる。これまでの潮流シミュレーションでは干潟部のように汀線が移動する場合はその取り扱いが難しく、ほとんどの場合考慮していないが今回のように浅海域の水温分布をシミュレートする場合には、干潟部は重要な役割を果たすと考えられ、これを無視することはできない。それ故、汀線が時間的に変動し得るモデルを構築し、干潟部を考慮した潮流シミュレーションを実施し、その結果を用いて、本海域の水温変動現象をシミュレートする。

(a) モデルの内容

干潟部を考慮した潮流シミュレーション手法については、既に文献(4)において発表しているので本報では省略する。熱拡散の基礎式は、海域の熱拡散方程式を鉛直方向に積分した次式を用いる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=b} - K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-s} \right) \quad \dots\dots (4)$$

ここで海底での熱逸散は小さいと考え無視し、海表面での熱逸散を次式で表わす。

$$K_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{-s} = \frac{Q_0 - (Q_b + Q_e + Q_c)}{c \rho} \quad \dots\dots (5)$$

ただし、 Q_b , Q_e , Q_c は前述の鉛直二次モデルで用いたものと同じである。 Q_0 は、水面から海底面に到達するまでに吸収される全日射量を考え、(2)式をもとに、次式のように与えた。

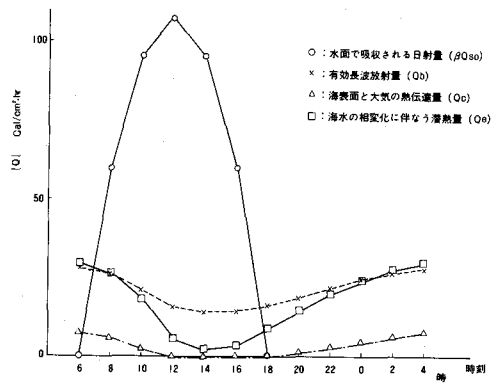


図-11 大気・海面間の熱交換量の変化

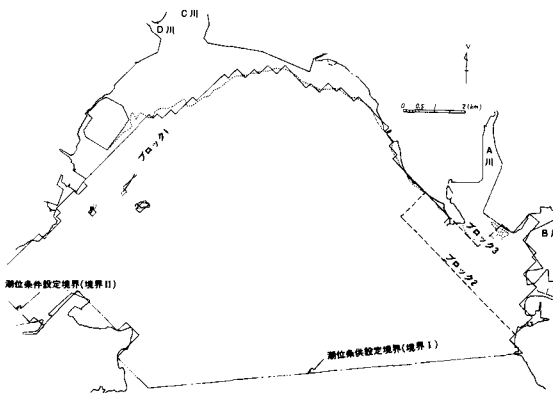


図-12-1 平面二次元モデル(広域)

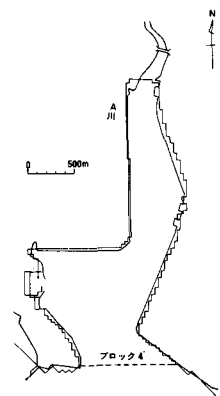


図-12-2 平面二次元モデル(狭域)

$$Q_0 = Q_{so} \{ 1 - (1 - \beta) \exp(-\eta \beta) \} \dots\dots\dots (6)$$

Q_{so} , β , η は鉛直二次元モデルの場合と同様である。

(b) 数値計算の条件

数値計算に当っては図-12に示す海域を200 mから35.4 m間隔の格子網に分割する。潮流計算においては、図中の潮位設定境界において半日周期の潮位条件を与えた。水温計算における潮位設定境界上での条件としては、流れが計算領域へ流入する場合 $\partial T / \partial n = 0$ ，流出する場合 $\partial^2 T / \partial n^2 = 0$ (n : 境界に対する法線方向) とする。渦動粘性係数および渦動拡散係数それぞれ $5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。

(c) シミュレーション結果の検討

本海域の潮流を再現するために、前述の数理モデルを用いて流動シミュレーションを行なった。図-13は、1周期にわたる流動シミュレーション結果の内、上げ潮最強時の流動ベクトル図である。図中のA川河口部の空白部は干潟となっている所である。各測点における潮流楕円の観測値と計算値とを比較した結果から判断すれば、流向、

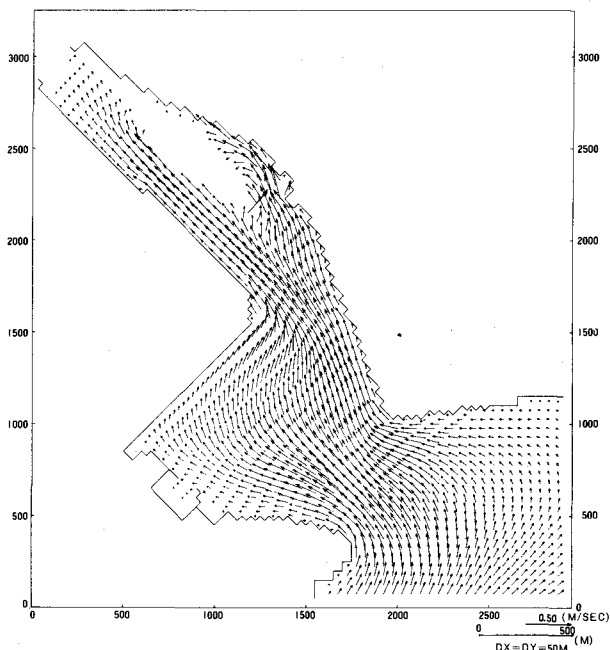


図-13 潮流シミュレーション結果

潮流振幅とも良く合致しており、このモデルにより本海域の流動を再現することができたものと考えられる。

次に、本海域における水温変動を再現するため、前述の潮流シミュレーション結果および実測された気象条件を用いて水温シミュレーションを行った。用いた気象条件は、図-14に示すとおりである。

このシミュレーション結果を赤外線写真撮影により観測した水温調査結果と比較する。図-4-1および図-15-1より8時の実測値と計算値とを比較すると、A川河口前面海域の低温域を除けば、両者はほぼ一致している。同様に図-4-2および図-15-2より14時の両者を比較すると、ほとんどの海域において水温値、水温分布とも計算値は、実測値を良く再現している。

図-16は、計算値の水温の経時変化を示したものである。沖合海域では、水温の日較差は約0.4℃となっており、

実測では約0.7℃であり多少小さい。最高水温は、17時頃出現しており、気温のピークが14時であることから約3時間の遅れを有している。この結果は観測結果と良好な一致を示している。また、浅海域における日較差は、A川河口の奥部で約4℃である。変動傾向としては、水深が浅くなる干潮時付近で水温変動が大きく、満潮時付近では小さくなっており、これは実測結果と良く一致している。浅

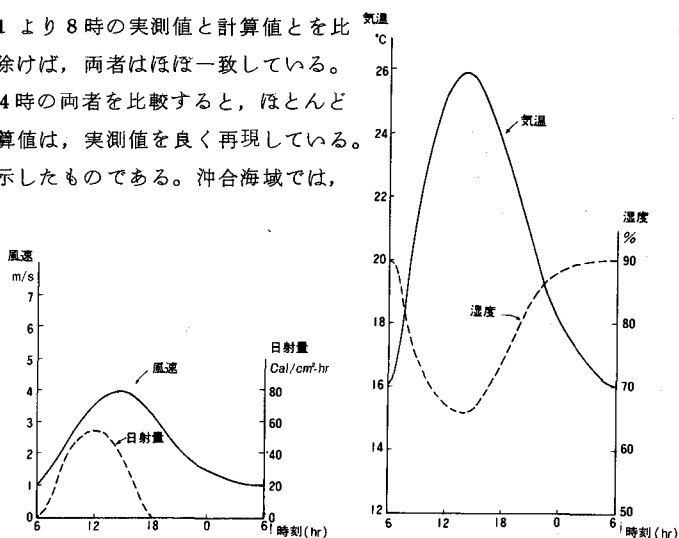


図-14 平面二次元モデルの気象条件

海域の水温と沖合海域の水温とを比較すると、浅海域では日中で約1～2℃高く、夜間では1～2℃低くなっており、この点においても観測結果との適合性は良好である。

これらの結果から判断すれば浅海域における比較的短周期の水温分布とその経時変化は、潮汐流とそれに伴う干潟域の水深変化ならびに熱収支に關与する気象要素の経時変化を考慮した平面二次元モデルにより、再現することが可能であるものと考えられる。

4. おわりに

今後は、さらに詳細な現地観測を実施して干潟域の水温変動の実態を把握すると共に、鉛直方向の水温分布形状、河川水の影響、海底と海水との熱交換過程等を考慮に入れた数値モデルの開発を実施する予定である。

参考文献

- 1) 和田 明・宮池克人：熱収支量から見た内湾の水環境変化 第24回水理講演会論文集，1980.
- 2) T.V.A Div. of Water Control Planning Engineering Laboratory：Heat and mass transfer between a water surface and the atomosphere, Rep. No. O-683 1972.
- 3) 片野尚明：海面からの蒸発と熱交換係数に關する検討と新しい熱交換計算表の提案，電力中央研究所報告，376008, 1977.
- 4) 水鳥雅文・角湯正剛：干潟を有する海域の潮流解析法について，第36回年次学術講演会概要集，1981.

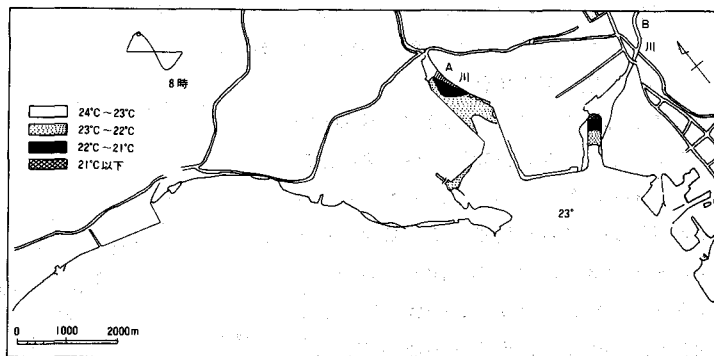


図-15-1 水温水平分布(計算値)

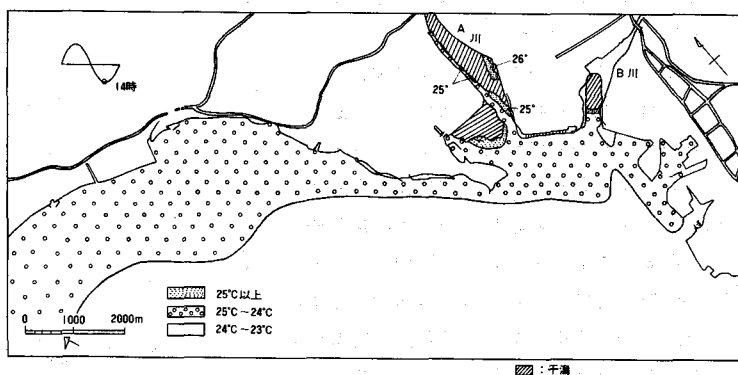


図-15-2 水温水平分布(計算値)

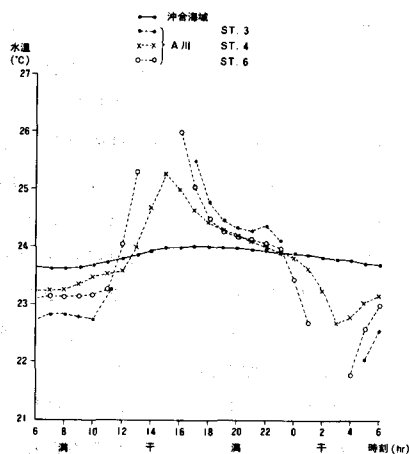


図-16 水温経時変化