

直線状海岸における多成分潮流の計算

今村文彦*・後藤智明**・首藤伸夫***

1. はじめに

対象とする現象の時間スケールにもよるが、沿岸海域における温排水や濁質物の拡散予測には潮流と拡散を組み合わせた数値シミュレーションがよく用いられる。しかし、その基本となる潮流計算を精度良く実施できるのは東京湾あるいは伊勢湾といった閉鎖性内湾の場合か開放性沿岸域で潮流が一方向入射の場合に限られていた。これは、潮流計算の沖側境界条件の設定法、特に反射波の処理法に問題が残されていたためである。

従来の潮流計算における境界条件を簡単に説明する。

閉鎖性内湾を対称とした計算では、湾口の実測値を直接境界条件に適用するのが普通である¹⁾。

開放性沿岸域を対象としたものでは、沿岸に平行な潮流が卓越するときに境界の両側で位相差のある水位を与える方法²⁾、沿岸に平行な潮流ではないが各分潮の入射方向がほぼ同じであるとき入射波条件を与え反射波を特性曲線法を用いて処理する方法³⁾、計算領域内に数多くの実測値があるとき境界条件をこの実測値から補間などを行なって定める方法の3種類がある。しかしながら、これらの方法で取り扱い得るものはそれほど多くはない。通常の海域では境界値に利用できる実測値は少なく、多成分の潮流を考える必要があるからである。

本研究では、開放性沿岸域の多成分潮流の計算を対象とした境界条件設定法（以下、仮想汀線法と呼ぶ）を新たに提案する。汀線を直線に近似し、反射波を入射波の鏡像として定める方法である。これによれば、境界値の計算は非常に簡単なものとなるが、仮定した地形と現実の地形との違いにより誤差が発生する可能性があるため、この点の検討も行なっている。最後に、福島県いわき市鮫川河口沿岸を対象とした潮流計算にこの方法を適用し、実用上の諸問題に関しても検討する。

2. 仮想汀線法とその誤差

(1) 仮想汀線法

一様水深で汀線が直線であるような理想的な海域を考える。この海域で潮流の実測値および各分潮ごとの潮流楕円が得られたものと仮定する。この潮流楕円から入射波の諸元を求める。すなわち、楕円の長軸、短軸の寸法から入射波の振幅と方向を定める。入射方向が求まると図-1のように潮流計算の境界上の任意の点に到達する入射波と反射波の経路が定まる。図-1において $\overline{ORP}$ を入射波の波峰線と平行な直線とすると、境界線上の任意の点Aへの入射波の経路は直線 $\overline{PA}$ 、反射波の経路は直線 $\overline{RQA}$ で表わされる。ここで、直線 $\overline{ORP}$ で位相角が零とおくと点Aの入射波、反射波の位相がそれぞれの経路の距離だけズレることを利用する。点Aの座標を (x, y) とおくと、直線 $\overline{ORP}$ からの入射波、反射波の伝播距離 d_i, d_r はそれぞれ

$$d_i = x \sin \theta - y \cos \theta, \quad d_r = x \sin \theta + y \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられ、このことから合成波の水位 η は

$$\eta = \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_i}{\sqrt{gh}} \right) + \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_r}{\sqrt{gh}} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となることがわかる。ここで、 H, σ, θ は入射波の振幅、角周波数および入射角であり、 g は重力加速度、 h は水深である。また、 $\sum$ は各分潮の和を意味する。

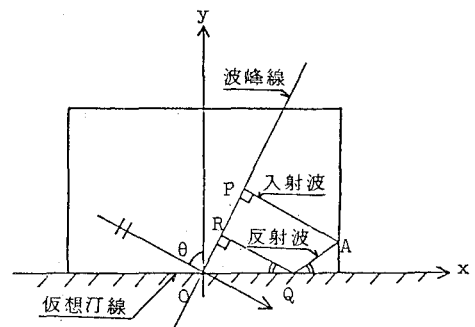


図-1 仮想汀線法概念図

* 学生員 東北大学大学院 工学研究科
 ** 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

潮流計算の境界条件の与え方は水位制御方式と流速制御方式の2種類があり、潮流に恒流成分が含まれる場合には流速制御方式を用いる必要があることを堀江ら⁴が報告しているが、ここでも恒流成分がある場合には式(2)を書き換えなければならない。すなわち、恒流成分を $(\bar{u}, \bar{v})$ で表わすと、 y 軸と平行な境界線上では

$$u = \bar{u} + \sqrt{\frac{g}{h}} \left[\sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_i}{\sqrt{gh}} \right) + \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_r}{\sqrt{gh}} \right) \right] \sin \theta \quad (3)$$

x 軸と平行な境界線では

$$v = \bar{v} - \sqrt{\frac{g}{h}} \left[\sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_i}{\sqrt{gh}} \right) - \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_r}{\sqrt{gh}} \right) \right] \cos \theta \quad (4)$$

である。また、潮流計算の初期条件としては静水面を与えるのが普通であり、この場合、反射波が境界線に到達する以前は反射波成分の値を零にする必要がある。

(2) 仮想汀線法の誤差

a) 仮想汀線が任意の角度ズレている場合

ここでは、現実の汀線は直線であるが仮想汀線と微小角度 δ だけズレている場合の誤差について検討する。他の条件は仮想汀線法と同一とする。

仮想汀線が $y=0$ であるのに比べ、現実のものが $y=\tan \delta \cdot x$ の場合、入射波の経路は変わらないが反射波の経路は多少変化する。このとき、汀線 $y=\tan \delta \cdot x$ による反射波の伝播距離は式(2)に比べ

$$d'_i = (x \cos 2\delta - y \sin 2\delta) \sin \theta + (x \sin 2\delta + y \cos 2\delta) \cos \theta \quad (5)$$

となる。したがって、この場合の合成波 η' は

$$\eta' = \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_i}{\sqrt{gh}} \right) + \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d'_r}{\sqrt{gh}} \right) \quad (6)$$

と表わされる。

両者の誤差を分潮の最大水位 $\eta_{\max}$ 、 $\eta'_{\max}$ を用いて

$$\frac{\eta_{\max} - \eta'_{\max}}{\eta_{\max}}$$

と定義すると誤差の分布は図-2および図-3のようになる。図-2は $h=25$ m, $\tan \delta=0.04$, $\theta=0^\circ$ 入射波周期 12 時間の成分を考えた場合の誤差の平面分布を表わす。図-3は図-2に示した 15×7.5 kmの領域中の誤差の最大値を入射波周期と汀線の傾きに関して調べたものである。入射波が2時間以下のものに関しては、誤差が比較的大きいものになるが、潮流のように周期が12時間以上のものに関しては 10^{-3} 以下の誤差におさまっていることが分かる。

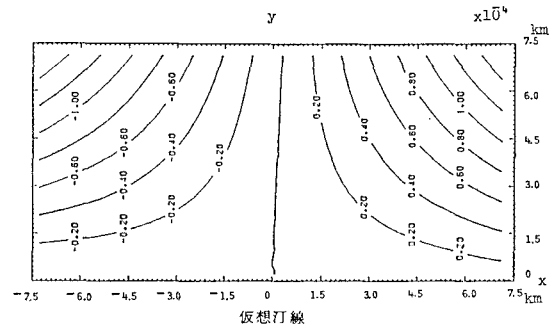


図-2 誤差の空間分布 ($y=0$ と $y=\tan \delta \cdot x$)

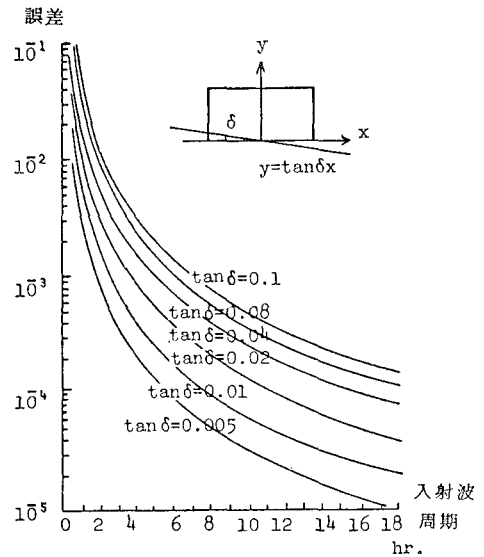


図-3 誤差値の変化 ($\tan \delta$ と周期に対する)

b) 汀線が放物線で表わされる場合

ここでは汀線が $y=ax^2$ の放物線を呈している場合との誤差を検討する。この場合も a) のときと同様に反射波の伝播距離 d'_r だけが変わり

$$d'_r = [(x-x_0) \cos 2\beta - (y-y_0) \sin 2\beta] \sin \theta + [(x-x_0) \sin 2\beta + (y-y_0) \cos 2\beta] \cos \theta \quad (7)$$

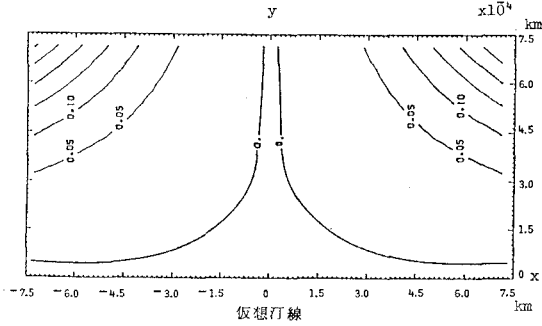
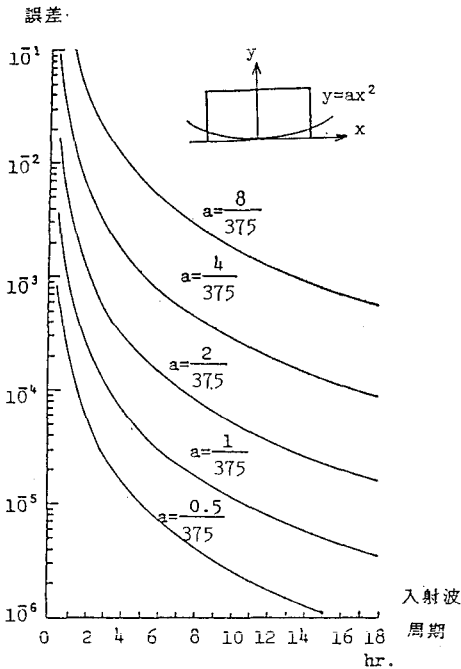
となる。ここで、 (x_0, y_0) は汀線すなわち $y=ax^2$ の曲線上の反射点の位置を、 β はその点での接線の傾き角度を表わす。 (x_0, y_0) , (x, y) , β の間には

$$y_0 = ax_0^2, \quad ax_0^2 - y = \tan(\theta + 2\beta)(x - x_0) \\ \beta = \tan^{-1} 2ax_0$$

の関係がある。

$h=25$ m, $a=2/375$ km, $\theta=0^\circ$, 入射波周期 12 時間のときの誤差の空間分布を図-4に示す。図-5は誤差の最大値を入射波周期および a に関して調べた結果である。

この場合も周期 12 時間以上の潮流を考えるのであれ

図-4 誤差の空間分布 ($y=0$ と $y=ax^2$)図-5 誤差値の変化 (a と周期に対する)

ば誤差は 10^{-3} 以下となり仮想汀線法を用いて境界条件を定めても良いことがわかる。

c) 水底勾配の影響による誤差

ここでは斜面勾配を考慮した場合の誤差を検討する。汀線は $y=0$ で表わされる直線とする。この場合は水平床を仮定した仮想汀線法に比べ、入射波および反射波の伝播経路は変わらないが、水深が変化するため伝播速度が変わり位相が両者共にズレてくる。水底形状を汀線に h_0 それから沖に向かって勾配 S のような斜面を考えると、入射波の伝播経路に沿った平均水深 $\bar{h}_i$ は

$$\bar{h}_i = h_0 + Sy + \frac{S}{2}(x \sin \theta - y \cos \theta) \cos \theta \quad \dots (8)$$

となり、一方、反射波の伝播経路に沿った平均水深 $\bar{h}_r$ は

$$\bar{h}_r = h_0 + \frac{S[y^2 + \{y - (x \sin \theta + y \cos \theta) \cos \theta\}^2]}{2(x \sin \theta + y \cos \theta) \cos \theta} \quad \dots (9)$$

で表わされる。したがって、合成波高 η'' は

$$\eta'' = \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_i}{\sqrt{g \bar{h}_i}} \right) + \sum H \sin \sigma \left(t - \frac{d_r}{\sqrt{g \bar{h}_r}} \right) \quad \dots (10)$$

となる。

図-6 は先のものと同様に、 $h_0=5$ m, $S=2/75$, $\theta=0^\circ$ 入射波周期 12 時間の誤差の空間分布を表わしたものである。誤差は汀線から離れるにつれて大きくなるが、その極値は 5.4×10^{-4} 程度である。したがって、仮想汀線法では考えた領域の平均水深を用いると、水底勾配の影響は無視できる大きさであることがわかる。

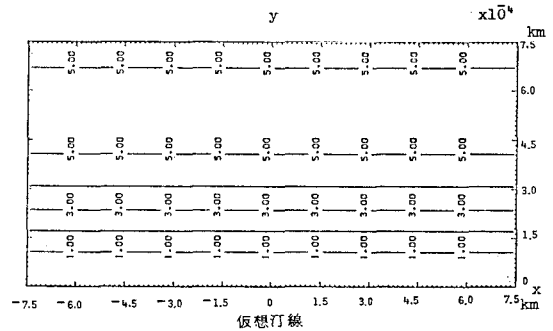


図-6 誤差の空間分布 (水平床と一様勾配)

d) 攪乱波の影響

沖側から岸に向かって進行する波は、汀線に河川や湾などの水路がなければ、大部分汀線で反射し重複波を形成する。ところが、水路が存在すれば波の一部は汀線で反射せず水路内に透過するため、水路から攪乱波が沿岸域に伝播し、重複波に重なる。したがって、河川や湾などを伴った海域での重複波を考える場合、この攪乱波の大きさについて評価しなければならない。合田⁵⁾はフーリエ変換によってこの攪乱波を求めている。水路が矩形の場合に、攪乱波の波高 f は

$$f = H \cdot k \frac{B}{\sqrt{(\cot kL - \phi_2)^2 + \phi_1^2}} \frac{2}{\pi} \times \left[\int_0^{kB} \frac{\sin \beta}{\beta \sqrt{(kB)^2 - \beta^2}} \cos \left(\frac{kx}{kB} \beta \right) \times \sin \left(\sqrt{(kB)^2 - \beta^2} \frac{ky}{kB} \right) d\beta - \int_{kB}^{\infty} \frac{\sin \beta}{\beta \sqrt{\beta^2 - (kB)^2}} \cos \left(\frac{kx}{kB} \beta \right) \times \exp \left(-\sqrt{\beta^2 - (kB)^2} \frac{ky}{kB} \right) d\beta \right] \quad \dots (11)$$

$$\phi_1 = kB, \quad \phi_2 = \frac{B}{\pi} (kB) \left[\frac{3}{2} - \gamma + \ln (kB) \right]$$

で与えられる。ここで、 B は水路幅、 L は水路長さ、 k は波数、 γ はガンマ数である。攪乱波波高の入射波高 H に対する比の空間分布を図-7に示す。水路口を中心と同心円状に広がっている。図-8には水路口での攪乱波

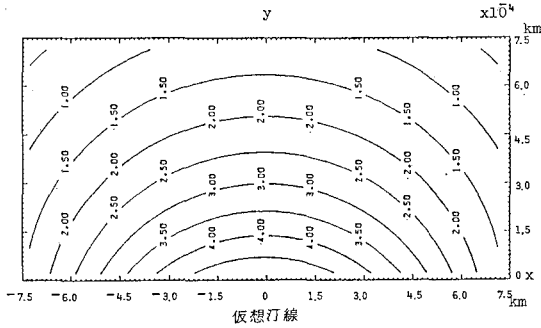


図-7 攪乱波の空間分布

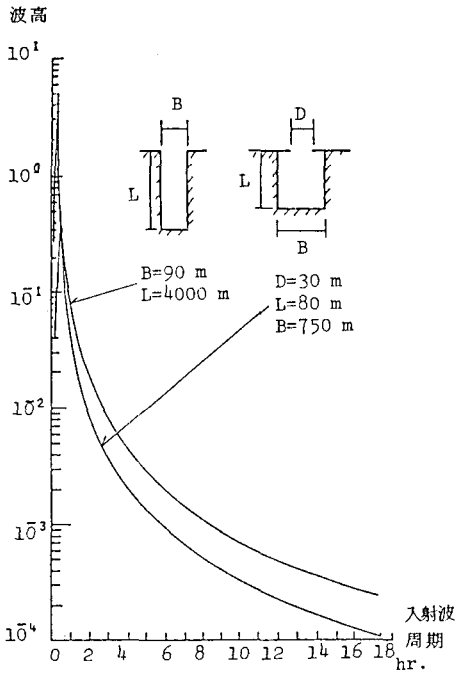


図-8 攪乱波高の変化(周期に対する)

の大きさを周期に関して求めた。図中に示す矩形の水路と水路口が狭いものについて示す。1時間前後の周期でピークが形成され、この水路の固有周期に近いことを示す。周期が長くなるにつれ攪乱波は小さくなり、潮流などの長い周期を持つ波に対しては影響が非常に小さい。

3. 数値計算例

本研究で提案した仮想汀線法を福島県いわき市鮫川河口近海の潮流計算に応用することにより実用上の問題点を検討する。基礎式としては浅水理論を用い、リーブ・フロッグ法により差分化を行なった。計算領域を図-9に示す。沿岸域をA領域($\Delta x=150$ m), B領域($\Delta x=50$ m)の二段階にし、河道部には感潮面積を考慮するために次元不定領域を設けた。境界条件としては沖側境界条件の他に鮫川の河川流量、発電所からの温排水が

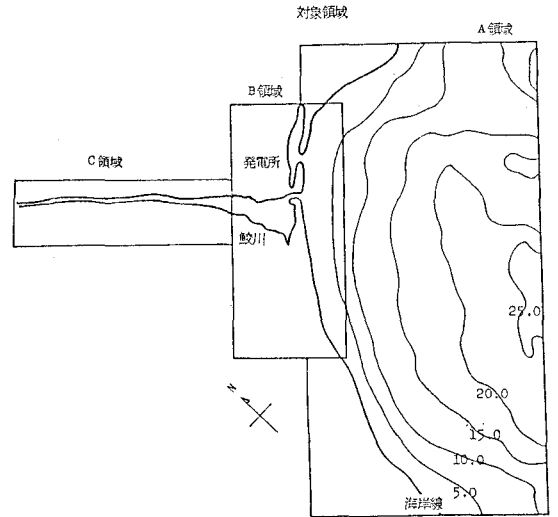


図-9 計算対称領域

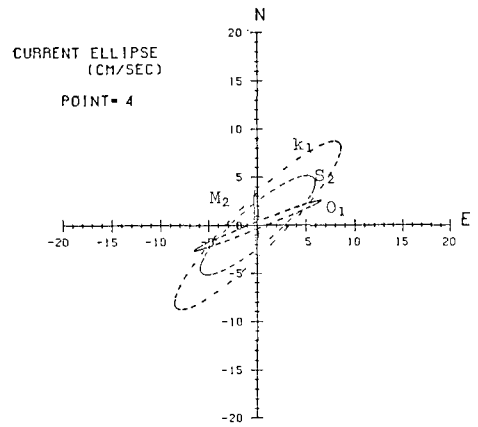


図-10 潮流楕円

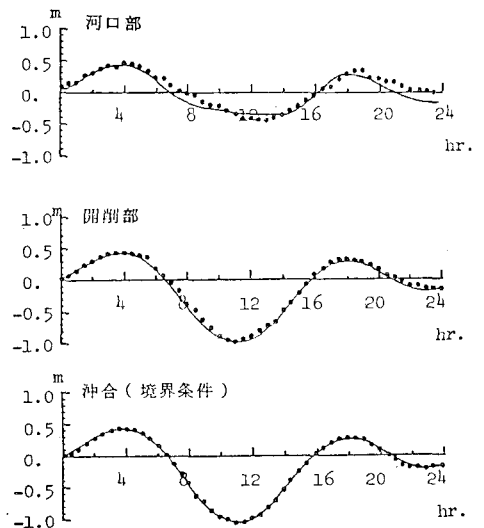


図-11 水位経時変化(実線・計算値, 黒丸・実測値)

ある。今回の計算では河川流量を $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温排水量を $65.6 \text{ m}^3/\text{s}$ と与えた。沖側境界条件設定に用いた潮流楕円を図-10に示す。 k_1 潮が卓越しているものの他の3成分も無視することは出来ない。

図-11には鮫川河口部、発電所放水口前面に位置する開削部および沖側境界付近における水位経時変化を示す。実線が計算結果、黒丸印が昭和59年2月16, 17日に行なった実測結果を示す。沖合での値は小名浜港での実測潮位を用いた。河口部で下げ潮時に若干実測値の方が高い値をとる他は良好な一致を示している。沖側境界で反射波の適切でない計算領域内において、湾や湖などで生じる副振動と同じ現象が見られる。本計算領域は $9.0 \times 5.25 \text{ km}$ の矩形であり、平均水深 15 m であるので約 12.4 分、 7.2 分の基本モードの周期を持つ固有振動が生じる。計算結果にはこのような振動は見られず安定した結果が得られている。

図-12, 13には計算開始6, 18時間後のB領域での流速ベクトル図を示す。図中には開削部での水位経時変化と沿岸域での潮流楕円を併わせて示す。図-12は下げ潮時の流況である。河口部および開削部から強い噴流が海域に流れ込み、渦を形成している。また、汀線に沿って左から右へ向かう潮流が再現されている。図-13は満潮時での流況である。開削部からは依然として発電所

放流水が海域に流れ込んでいるが、河口部での流速はほとんど零に近い。この河口部では、上げ潮時に流向が逆転し河道内へ流れ込むが、図-13の時点では満潮時のため流れは小さい。この後、流れはまた海域に向かうものとなる。汀線に沿った潮流は流向を変え、右から左へ流れている。

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下まとめる。

① 沖側境界条件に本研究で提案した仮想汀線法を用いることにより、多成分潮からなる潮流の計算を安定に行うことができる。

② 仮想汀線法を比較的簡単な仮定を用いて決めたことによる誤差は、反射波の水位、伝播経路、伝播速度の違いで表現できる。この誤差は i) 仮想汀線の形状 ii) 水底勾配 iii) 攪乱波などの影響によるものである。

i)~iii)の影響を検討した結果、潮汐など非常に長い周期の流れに対しては誤差が小さいことがわかった。したがって、仮想汀線法で用いた仮定を行なっても十分所定の精度を得ることができる。

③ 最後に、鮫川河口近海の潮流計算を行ない、安定な計算結果を得た。また、実線値との比較を行なった結果、良好な一致を得られ、十分実用に供し得るものと判断できる。

謝 辞： 本研究を進めるにあたって御協力をいただいた建設省土木研究所 小川由信氏に謝意を表わす。また、本研究の一部は文部省科学研究費（代表 東北大・理学部 栗原康教授）によって行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 市原正史・大村哲夫・福代倫男・野澤良一： 東京湾の潮流観測とシミュレーション，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 448~452, 1980.
- 和田 明： 沿岸海域における工業用水取排水問題のシミュレーション，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 373~378, 1970.
- 岩崎敏夫・真野 明・清水 保： 沿岸海域での物質移動に及ぼす移流と拡散の影響評価，第36回年次学術講演会講演概要集，pp. 739~740, 1981.
- 堀江 毅・金子安雄・村上和男： 潮流計算における水位制御と流速制御，第23回海岸工学講演会講演会，pp. 493~497, 1976.
- Ippen, A. T. and Goda, Y.: Wave Induced Oscillations in Harbors, Report No. 59, Hydrodynamics Lab., M.I.T., 1963.

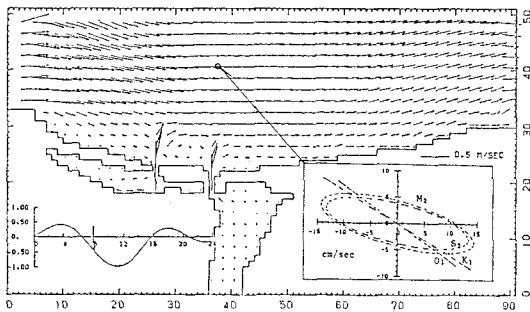


図-12 流速ベクトル図

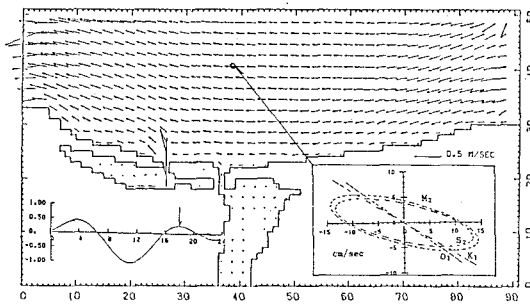


図-13 流速ベクトル図