

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

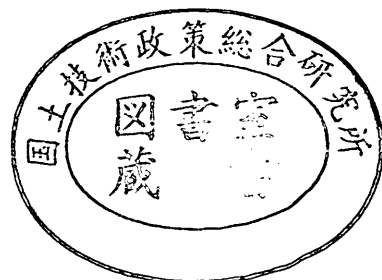
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 21

NO. 4

DEC. 1982

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 21 卷 第 4 号 (Vol. 21, No. 4), 1982 年 12 月 (Dec. 1982)

目 次 (CONTENTS)

1. 恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響
——泉南沖データ (1978~1981) による検討——
……………村上和男・森川雅行・坂口達也…………… 3
(Wind Effect and Water Discharge Effect on Constant Flow
—Discussion Using Observation Data at Off-Sennan (1978~1981)—
……………Kazuo MURAKAMI, Masayuki MORIKAWA and Tatsuya SAKAGUCHI)
2. 鋼矢板壁の透水実験……………莊司喜博・糸田政治・富田幸晴…………… 41
(Experiments on Seepage through Interlocking Joints of Sheet Pile
……………Yoshihiro SHOJI, Masaharu KUMEDA and Yukiharu TOMITA)
3. 深層混合処理工法による改良地盤の地震時挙動
……………稲富隆昌・風間基樹・今村俊博…………… 83
(Observation and Analysis of Seismic Response of Improved Ground by Deep Mixing
Method ……Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA)
4. 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験
……………奥出 律・山谷弘幸・松本 茂…………… 131
(Experimental Study on Construction of Rubble Mound by Split Hopper Barge
……………Tadasu OKUDE, Hiroyuki YAMAYA and Shigeru MATSUMOTO)

1. 恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

——泉南沖データ(1978~1981)による検討——

村上 和 男*・森川 雅 行**・坂口 達 也***

要 旨

本論文は、1978年1月から1981年11月までに大阪湾泉南沖で取得された潮流と海上風のデータおよび淀川の枚方における流量データを用いて、恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響を検討したものである。

潮流は泉南沖5kmに建設された観測塔(MT局)に固定された3台(基本水準面下3, 9, 16m)の超音波流速計により測定され、海上風は基本水準面上15mに設置された風車型自記風向風速計により測定されている。

年間データのスペクトル解析より、各層において日周潮流と半日潮流が卓越していることがわかる。表層では、東方成分について半日周潮に対する日周潮流の割合が他層よりも高くなっている。これは海上風のエネルギー分布と一致しており、表層が海上風の影響を受けている可能性があることを示している。

年間データの調和解析から得られた恒流の絶対値は、海域への淡水流入量と強い正の相関を持つ。風は年間スケールではあまり変動しないので、年間の恒流の変動に影響しないと考えられる。90, 30, 15日間データの調和解析による各層の恒流の東方、北方成分は海上風の東方、北方成分とは正の相関、淀川の流量とは負の相関を持つことが主成分分析により明らかになっている。データ期間が短くなるにつれて、恒流と流量との相関は低くなるが、風との相関はあまり変わらない。

25時間移動平均による恒流の変動は、風の24時間移動平均値を説明変数とした重回帰式によってよく表される。データ期間により差はあるが、恒流と風が強い相関を示す期間で、恒流の変動のうち、表層では58~70%、中層では38~47%、底層では12~17%が風によって説明される。表層ほど風の影響を受けている。

* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長
** 海洋水理部 海水汚染水理研究室
*** 前長岡技術科学大学学生

1. Wind Effect and Water Discharge Effect on Constant Flow

—Discussion Using Observation Data at Off-Sennan (1978~1981)—

Kazuo MURAKAMI*

Masayuki MORIKAWA**

Tatsuya SAKAGUCHI***

Synopsis

This paper reports the analysis of wind effect and water discharge effect on constant flow, using tidal current and sea wind data obtained at Off-Sennan in the south-west of Osaka Bay, and discharge data of Yodo River at Hirakata for the period from January 1978 to November 1981. Yodo River is the biggest of all rivers flowing into Osaka Bay. Tidal currents were measured by three ultra-sonic current meters, which were set at 3, 9, 16 meters below the datum level for soundings and fixed to the observation tower. Sea wind was measured by windmill type anemometer, fixed at 15 meters above.

From the spectrum analysis of annual data, the ratio of east component of current energy at diurnal period to that at semidiurnal in surface layer is higher than that in other layer. This fact agrees with energy distribution of sea wind and shows the possibility that tidal current in surface layer is affected by sea wind.

The absolute value of constant flow, obtained from annual data harmonic analysis, shows strong positive relation to water discharge into Osaka Bay. Annual mean value of wind velocity is not changed so much for years, that it doesn't affect the variation of annual constant flow. It is found by principle component analysis that east and north components of constant flow in each layer, from 90, 30, 15-day data harmonic analysis, show positive relation to both components of sea wind and negative relation to the discharge of Yodo River. When the duration of the data is shortened, the relation between constant flow and discharge becomes weak, but one between constant flow and sea wind is unchanged.

The variation of constant flow, defined as 25-hour running mean flow vector, is well explained by the multiple regression, using 24-hour running mean vector of sea wind as the predictor variable. In the duration, which shows strong relation, the contribution ratio of sea wind to the variation of constant flow is 58~70 percent in surface layer, 38~47 percent in middle layer, and 12~17 percent in bottom layer.

* Chief of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

*** Ex-student of the Technological University of Nagaoka

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. MT 局における気象・海象観測	7
3. 流れのエネルギー分布	9
3.1 海上風のエネルギー分布	9
3.2 流れのエネルギー分布	11
4. 調和解析による恒流	15
4.1 潮流の調和解析	15
4.2 恒流の変動	21
4.3 主成分分析による風と淡水流入量の影響の検討	24
5. 25 時間移動平均による恒流	27
5.1 各層の恒流と風との相関	27
5.2 重回帰分析による風の影響の検討	31
6. 結 論	33
7. あとがき	34
参 考 文 献	35
記号一覧表	35
付 録 A	36
付 録 B	37
付 録 C	38

1. まえがき

近年、国民生活の向上にともなって環境保全の問題が盛んに取り上げられている。我が国の場合、国土が狭少で四方が海で囲まれているため、各種の産業や開発事業はどうしても臨海地域に集中しがちである。また、近年はこのような事業は、ますます大規模化している。

こうしたなかで、人間によるこれらの行為が自然海域へ及ぼす影響を事前に予測することは非常に重要なことである。そのためには、海域の流れを正確に把握する必要があり、各地で流況測定が実施されている。流況測定は、一般的には対象地点にアンカーやブイを用いて流速計を一定期間係留して実施している。測定期間は、費用や施設あるいは航行船舶等の問題からあまり長くとれず、1 昼夜か 15 日間、長くて 30 日間程度である。こうして求めた流速記録からスペクトル解析や調和解析により流況特性を調べるのである。

海域の流況特性は、ある周期成分の流れの調和定数に非周期成分の流れの恒流をたしあわせたものとして表される。物質の拡がりに対して果たす役割を考えると、周期成分の流れはその周期間で物質を実質的には移動させないが、非周期成分の流れはその周期間で物質を常に一定方向に移動させる。一般に、このような非周期成分の流れを恒流と呼び、物質の輸送・分散に対して大きな役割を果たしている。恒流の発生要因としては、風による吹送流、熱・塩分差による密度流や地形による潮流の非線形効果などが考えられる。恒流の変動や発生要因および輸送に果たす役割などは、多くの研究者により、水理模型実験^{1),2)}や数値シミュレーション^{3),4)}および現地データ^{5),6)}を用いて検討されている。しかしながら、筆者らの知る限りにおいて、現在までに恒流の変動や発生要因を現地データから系統立てて議論したものはない。これは、流況の長期に渡る測定が困難であることに起因している。

現在、大阪湾泉南沖において関西国際空港の建設が予定されている。その環境調査⁷⁾の一環として、気象・海象の観測塔（以下 MT 局と呼ぶ）が空港建設予定地点に建てられ、風や潮流などが観測されている。筆者らは、MT 局において取得された 1978 年 1 月から 1981 年 11 月まで 3 年 11 か月間に渡る三層での潮流と海上風の記録から、風が恒流に与える影響を検討した。さらに、枚方における淀川の流量データを用い、淡水流入量

が恒流に与える影響の検討も行った。昭和 46~50 年のデータによると、大阪湾に流入する主要な河川は湾奥にかたまって存在する武庫川、神崎川、淀川、木津川、大和川の 6 河川であり、年間を通して湾内に流入する全河川流量の 90% 程度を占めている。そのなかで、武庫川、大和川を除いた淀川水系の流量は全体の約 77% である。武庫川、大和川の流域は地理的に淀川の流域と近いので、両者の間には、降雨および流出流量についてはかなり高い相関があると考えられる。また、枚方の流量観測所は、淀川の河口より約 27km 上流にあり、ほぼ淀川水系の流量を観測しているといつてよい。これらのことから、枚方における淀川の流量は、大阪湾への淡水流入量を代表していると考えられる。

本文の構成は以下のとおりである。2. で MT 局で実施されている気象・海象観測の概要を説明し、3. でスペクトル解析により、風と流れのエネルギー分布構造を調べる。4. で潮流の調和解析により求めた恒流に対する風と淡水流入量の影響を調べ、5. で 25 時間移動平均により求めた恒流に対する風の影響を検討し、6. でまとめを述べる。

2. MT 局における気象・海象観測

MT 局は、図-1 に示すように、大阪湾の泉南沖約 5 km、東経 135 度 14 分 25.9 秒、北緯 34 度 25 分 48.7 秒に位置している。MT 局は、中心の鉄柱を三本の鉄柱で取

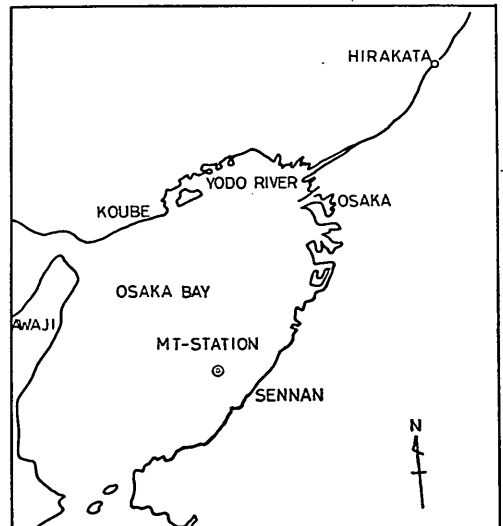


図-1 MT 局の位置

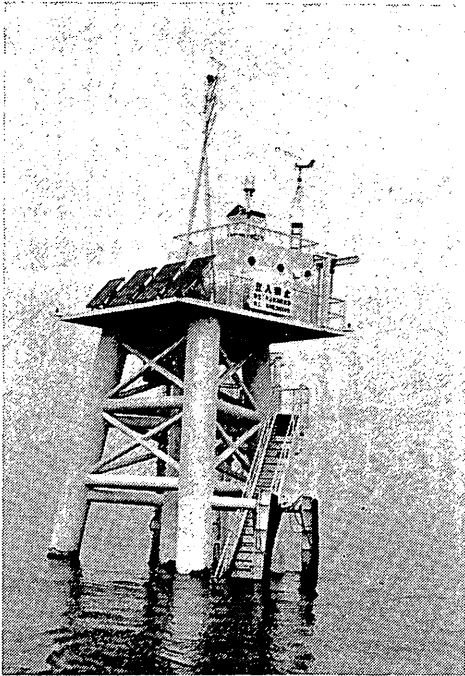


写真-1 MT 局の外観

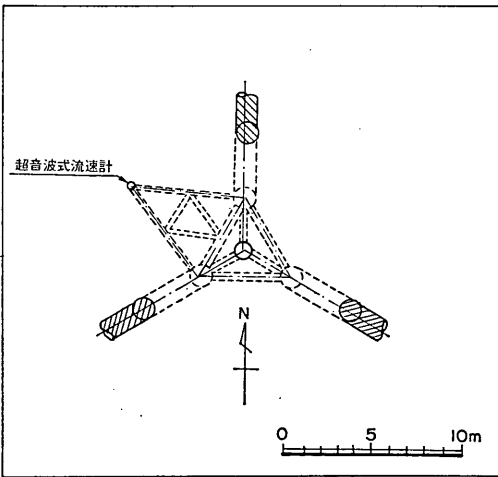


図-2 流速計の設置位置

注) ハッチング部は水面下の構造部材を示す。

り囲むように組み上げられており、その外観を写真-1に示す。超音波流速計は図-2に示すように、基本水準面下(平均水面より主要4分潮 K_1, O_1, M_2, S_2 の半潮差を引いたものより下) 3, 9, 16m に、2本の鉄柱から固定されている⁹⁾。3, 16m に設置された流速計は水平2成分を測定でき、9m に設置されたものは鉛直方向も加え

て3成分測定できるようになっている。以後、本報告では水平座標を x, y 、鉛直座標を z とし、それぞれ、東、北、上向きを正とする。また、基本水準面下 3, 9, 16m をそれぞれ表層、中層、底層と呼ぶことにする。

超音波流速計の測定原理は、水中での超音波の速度の水流に沿う場合と水流にさかのぼる場合との差を求めて、水流の速度を求める方法である。超音波を発射、受信するセンサーのスパン長は 50 cm である。

MT 局では毎正時前 10 分間の 1 秒ごとのデータを平均操作して毎正時のデータとしている。その際に、毎秒の流速データの検定として、前データからの変位がある一定幅(観測当初は 30 cm/s、その後波高、測定層により任意設定)以上のデータは使用していない。一定幅以上の異常なデータが得られた場合は前後の正常なデータから補間している。異常なデータが 15 個以上続く場合は、その間を欠測としている。

一般の流況測定^{9), 10)}においては、流速計がアンカーやブイ等により係留されているため、本来の海域の流れ以外に風や波浪などによる流速計自身の動揺をも記録してしまう問題があるが、MT 局ではこのような問題は生じない。

MT 局では潮流以外に波高・潮位・気温・湿度・水温・塩分(1981年度から取りやめ)・海上風が観測されている。今回、解析の対象としたのは1978年1月1日1時から1981年11月30日24時までの潮流および海上風のデータである。海上風は、基本水準面上 15m に設置された風車型自記風向風速計によって記録されている。

図-3は1980年4月のデータを図化したものである。上段から、風、表層の水平流、中層の水平流、中層の鉛直流、底層の水平流のベクトル図である。ベクトルはすべて流れ去る方向を示している。こうしたデータの図化

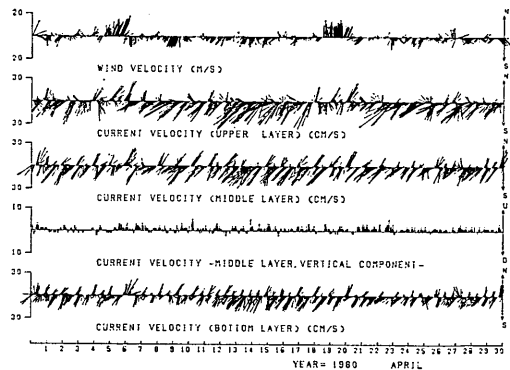


図-3 観測データ (1980年4月)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

表-1 欠測率

年	層	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	通年
1978	表層	1.1	0.3	0.8	1.3	1.1	2.6	5.5	2.3	0.7	3.4	4.9	7.7	2.7
	中層	1.1	0.3	0.8	1.3	1.1	1.7	2.3	62.9	0.8	2.8	1.4	0.7	6.5
	底層	1.1	0.3	6.2	26.5	30.8	1.8	2.7	0.9	13.1	2.8	2.4	0.9	7.5
1979	表層	11.4	12.4	5.8	3.5	4.8	1.4	19.9	2.0	2.2	45.3	0.7	1.9	9.3
	中層	6.5	2.7	0.9	1.1	3.6	48.8	8.2	1.6	1.7	19.8	1.0	2.0	8.3
	底層	7.5	1.3	0.9	0.8	3.6	2.4	10.9	6.1	8.1	4.3	1.7	2.7	4.2
1980	表層	3.6	0.4	1.3	0.0	0.0	0.3	2.8	4.3	1.7	0.5	2.2	2.8	1.7
	中層	0.7	0.3	1.3	0.0	0.1	0.3	2.7	0.3	39.3	15.6	35.1	0.2	5.2
	底層	2.0	1.1	1.8	1.7	0.8	2.1	50.3	37.4	5.6	5.8	35.1	34.7	15.0
1981	表層	0.3	0.3	0.5	0.0	0.8	1.8	7.0	2.0	20.7	0.5	1.1	—	3.2
	中層	0.3	0.3	0.9	0.0	0.8	1.7	10.1	0.9	63.1	0.7	0.3	—	7.1
	底層	47.6	0.5	0.9	0.1	2.0	7.6	30.5	11.7	5.8	7.7	7.4	—	11.2

を全期間に渡って行い、データの誤記やカードパンチミス等がないかをチェックすると同時に、欠測期間の有無やデータの傾向などデータの全体像を把握するように努めた。全体として、潮流は1日2回の転流があり、南西方向の流れが卓越していた。また、表層は風などの影響を受けて流れの周期性に、やや不安定な状況がみられたのに対し、中層や底層は安定している傾向がみられた。流速の絶対値は中層が表層より少し大きく、底層がもっとも小さくなっていた。

潮流データの欠測率を表-1に示す。この表によると、データの取得はかなり良好で各年度各層で、欠測率はほぼ10%以下である。また、欠測期間は集中する傾向がある。風のデータについては、欠測はほとんどない。

3. 流れのエネルギー分布

3.1 海上風のエネルギー分布

海上風のエネルギー分布構造を調べるために、海上風データの x, y 成分について各年度のパワースペクトルを算出した。計算は、各年1月1日1時から、1時間間隔のデータ8192個(約341日)を用いて実施した。データの欠測部分は、数が少ないので前後の値から補間した。得られた1次スペクトルに対して16個の三角形フィルター¹¹⁾をかけて平滑化しており、自由度は48である。パワースペクトルの周波数の範囲は、 $1/512 \sim 1/2$ cph である。図-4に1980年度の海上風のパワースペクトルを示す。各年度において風のパワースペクトルの分布形はあまりかわらない。パワーのピークは、周波数 1.14×10^{-5} (1/s) (周期 24.39 h) と 2.33×10^{-5} (1/s) (11.91 h) に

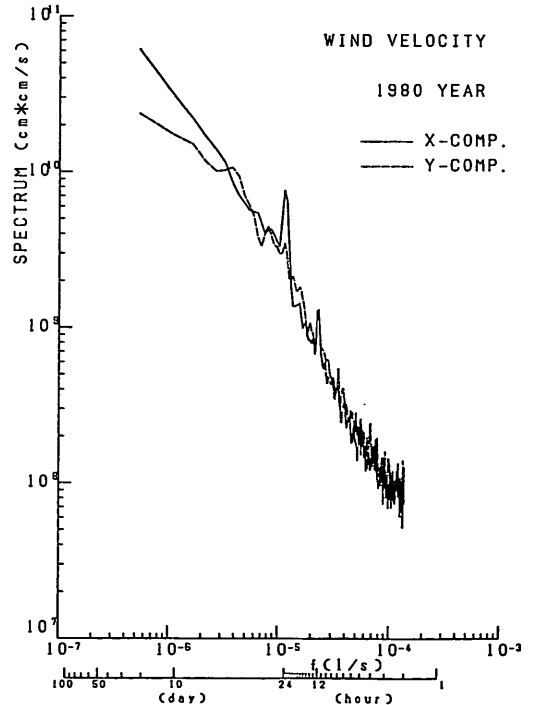


図-4 海上風のパワースペクトル (1980年)

みられ、前者のピークのほうが高い。日周期よりも長周期側では東方成分のほうがエネルギーが高い。

東方、北方成分について計算されたスペクトルは、座標系の取り方に依存し、ベクトルとして流れを評価するのに必ずしも適している量とはいえない。そこで、海洋学の分野などで用いられているロータリースペクト

ル^{13),14),15)}を用いて解析を行う(ロータリースペクトルの詳細については付録 A を参照されたい)。

いま、ベクトル時系列 $(x(t), y(t))$ を考える。ベクトル (x, y) を以下のように複素数表示する。

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (1)$$

そうすると、 $z(t)$ は反時計まわりの円運動と時計まわりの円運動を合成したもので、つまり楕円運動を各周波数成分ごとにたしあわせたものと考えられる。ロータリースペクトルとは、反時計・時計まわりの運動のエネルギーを示したものである。ロータリースペクトルやそれに関連した諸量は、平均長軸方向を除いて座標軸の回転には不変である。

海上風について求めた反時計まわりスペクトル S_+ 、時計まわりスペクトル S_- 、全スペクトル S_t を図-5 に示す。全スペクトルは各周波数成分について、時計まわりの運動エネルギーと反時計まわりの運動エネルギーをたしあわせたものである。なお、データ個数、1次スペクトルの平滑化は東方、北方成分の場合と同様である。この図から、反時計および時計まわりのスペクトルは、さきに x, y 成分について求めたスペクトルと同じ周期にピークを持つことがわかる。図-6 に回転係数 C_R を

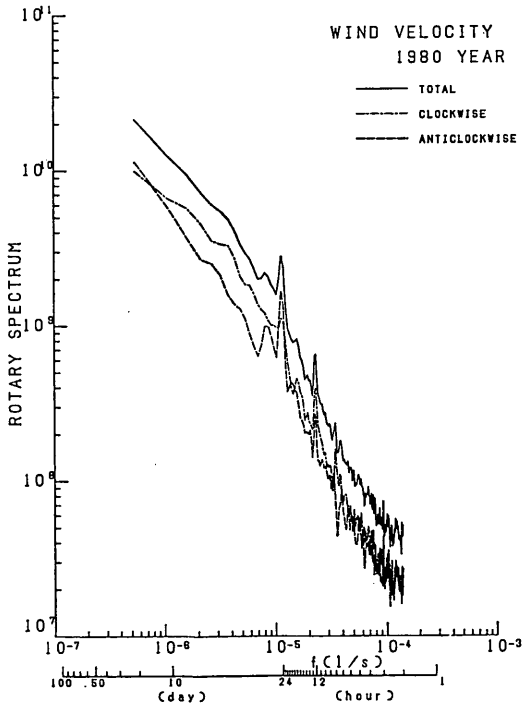


図-5 海上風のロータリースペクトル (1980年)

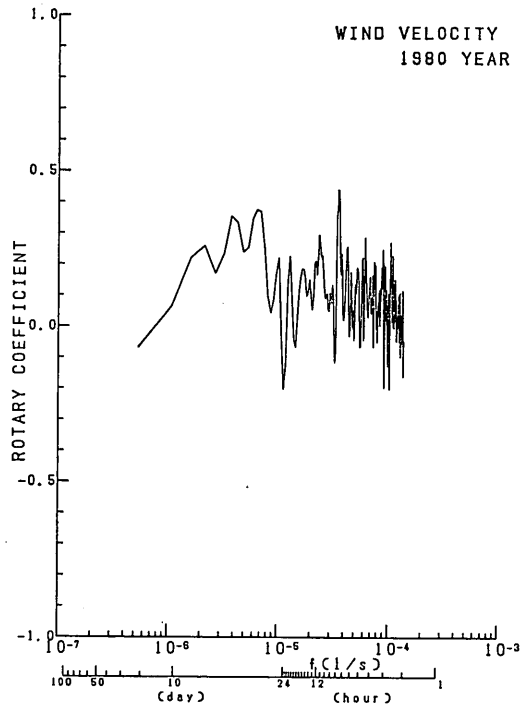


図-6 海上風の回転係数 (1980年)

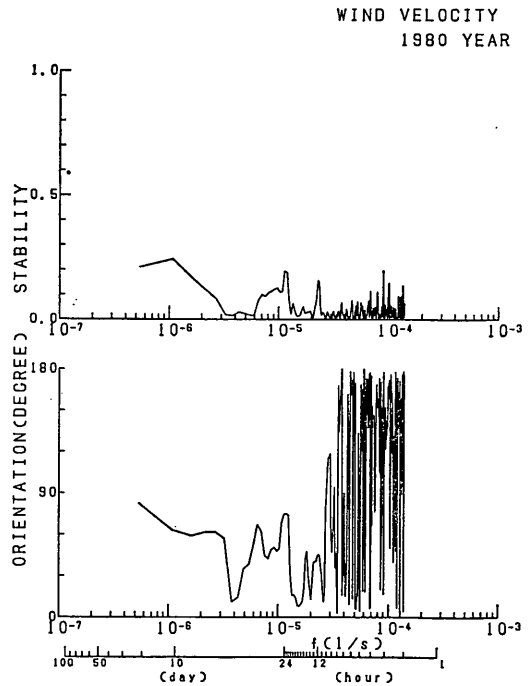


図-7 海上風の平均長軸方向と安定度 (1980年)

示す。回転係数は流れのエネルギーの時計まわりあるいは反時計まわり回転への分配比（正ならば時計まわり，負ならば反時計まわり）を表す。この図から，海上風は日周期付近を除いて，時計まわりの運動が卓越していることがわかる。式 (1) で表される $z(t)$ は楕円軌道を描くが，その楕円の平均長軸方向 ϕ （磁北から時計まわりを正にとる）と長軸の安定度 E を図-7 に示す。各周波数において，長軸の方向が安定していないことがわかる。

3.2 流れのエネルギー分布

層別に東方，北方成分について計算した 1980 年のパワースペクトルを 図-8 (a),(b),(c) に示す。データの欠測期間は，4.1 で述べる年間データの調和データ解析より求めた調和定数値を用いて補間した。各年度において，パワースペクトルの分布はほぼ同じで，表層の x 成分を除いて各層とも周波数 2.22×10^{-5} (1/s) (周期 12.49 h) に最大のピークが存在し，周波数 1.14×10^{-5} (1/s) (周期 24.39 h) にも鋭いピークが存在する。このことは，現地において潮流の半日周潮流と日周潮流が卓越していることを示している。また， 2.22×10^{-5} (1/s) よりも高周波側には， 3.37×10^{-5} (1/s) (周期 8.26 h)， 4.50×10^{-5} (1/s) (周期 6.17 h) がある。

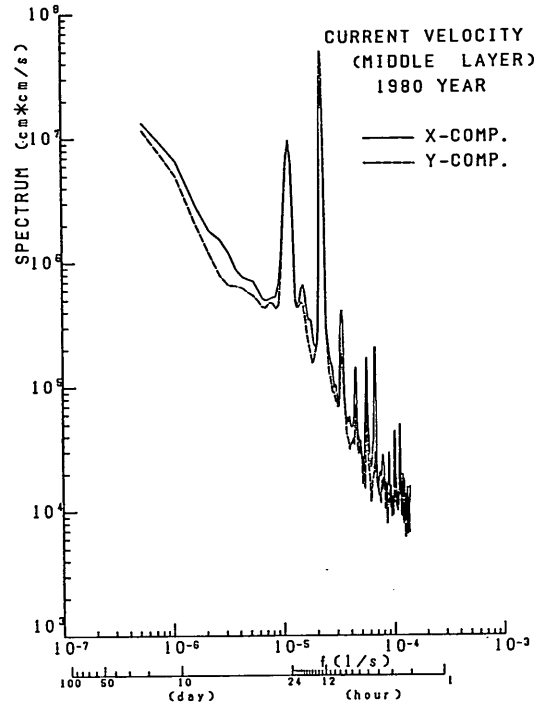


図-8 (b) 中層流のパワースペクトル (1980 年)

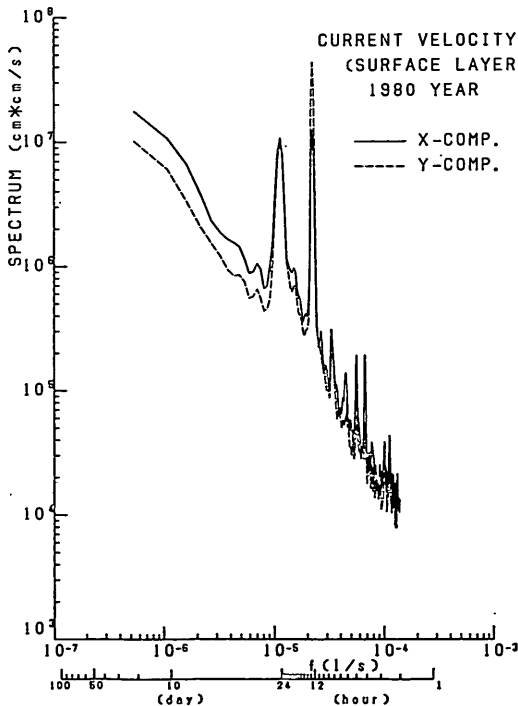


図-8 (a) 表層流のパワースペクトル (1980 年)

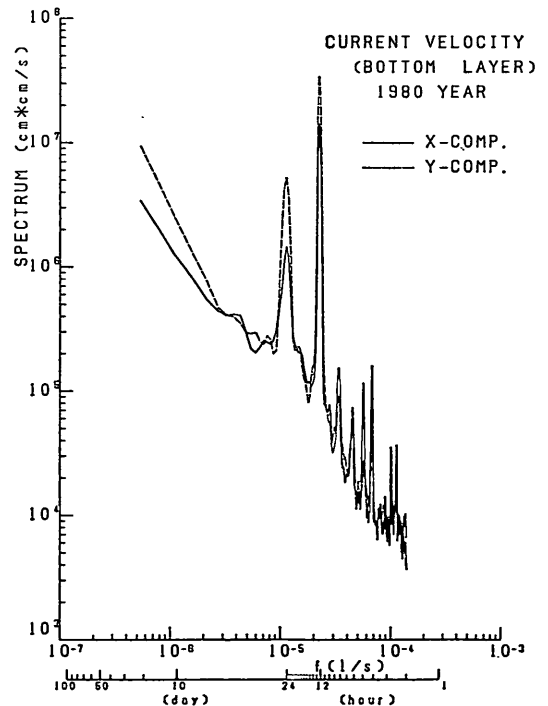


図-8 (c) 底層流のパワースペクトル (1980 年)

h), 6.73×10^{-5} (1/s) (周期 4.13 h) にピークが存在している。前二者はそれぞれ太陰 1/3, 1/4 日周潮流の周期に、最後のものは太陰 1/6 日周潮流の周期にほぼ対応している。周期 4.92 h には対応する潮流周期はないが、安芸灘の観測¹⁰⁾においても同様なピークが認められている。 1.14×10^{-5} (1/s) より低周波側ではピークは存在していない。

ここで、各層における各周波数成分のエネルギーレベルを比べてみる。ほぼ全周波数に渡って x, y 成分ともに表層がもっとも高く、中層、底層の順になっており、日周期より低周波数側ではその差ははっきりしている。しかし、パワーのピークについては中層がもっとも高くなる場合が多い。卓越している日周潮流と半日周潮流について考えると、日周潮流は x, y 成分ともに表層と中層はほぼエネルギーレベルは同じで、底層は低くなっている。特に x 成分が低い。半日周潮流は、 y 成分については中層がもっとも高く、表層、底層の順で、 x 成分については中層がもっとも高く、表層と底層はほぼ同じである。次に、各層の日周潮流と半日周潮流の大きさの関係を調べてみる。 y 成分については各層ともにほぼ同じで半日周潮流が大きいが、 x 成分については、表層は半日周潮流に対する日周潮流の割合が高くなっており、底層では低くなっている。これは、3.1 で述べた海上風(日周期にパワーのピークを持ち、 x 成分のほうがエネルギーレベルが高い)の影響を流れが受けている可能性があることを示唆している。

各層で計算したロータリースペクトルを 1980 年について、図-9 (a), (b), (c) に示す。これらの図より、反時計および時計まわりのスペクトルはともに、さきの x, y 成分について求めたスペクトルと同じ周期にピークを持つことがわかる。表層においては、ほぼ全周波数にわたって時計まわりのエネルギーが強く、特に日周期の付近で著しい。しかし、半日周期や 4 日より長い周期では反時計まわりのエネルギーのほうが強い。中層と底層においては半日周期より短い周期では運動の回転方向に一定の傾向がみられないが、半日周期より長い周期ではほぼ時計まわりのエネルギーが強くなっている。しかし、底層では日周期においては反時計まわりのエネルギーのほうが強い。

各層における流れの楕円の平均長軸方向 ϕ とその安定度 E を図-10 (a), (b), (c) 示す。これらの図より、各層において平均長軸方向はほぼ $30 \sim 60^\circ$ であることがわかる。また、長軸の安定度は 4 日より長い周期とロー

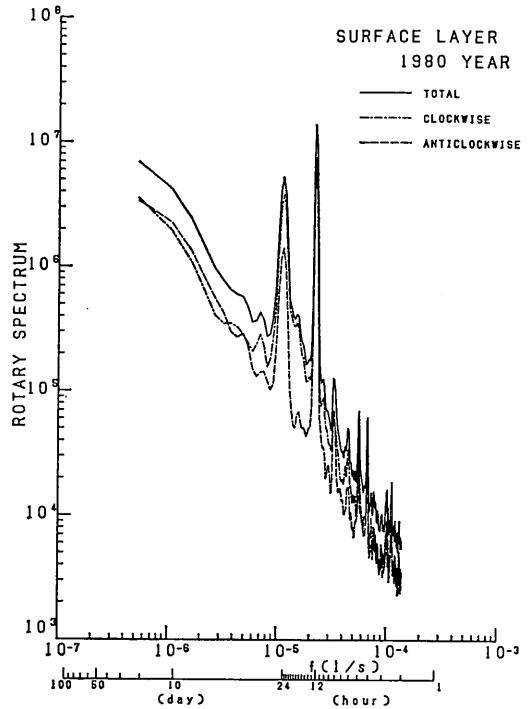


図-9 (a) 表層流のロータリースペクトル (1980 年)

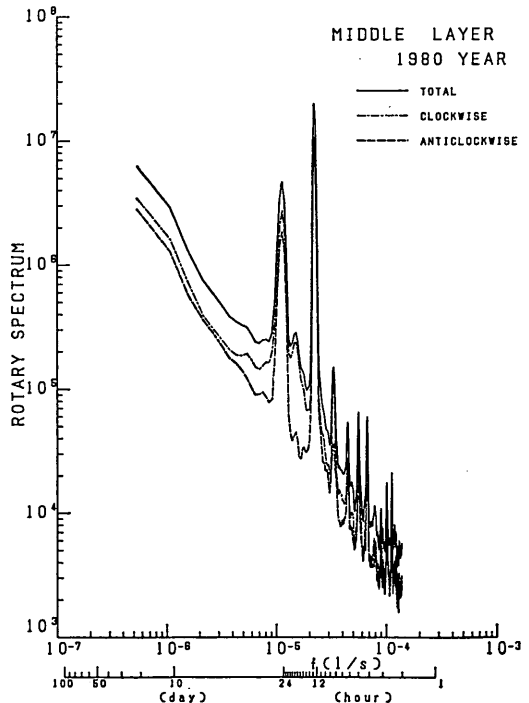


図-9 (b) 中層流のロータリースペクトル (1980 年)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

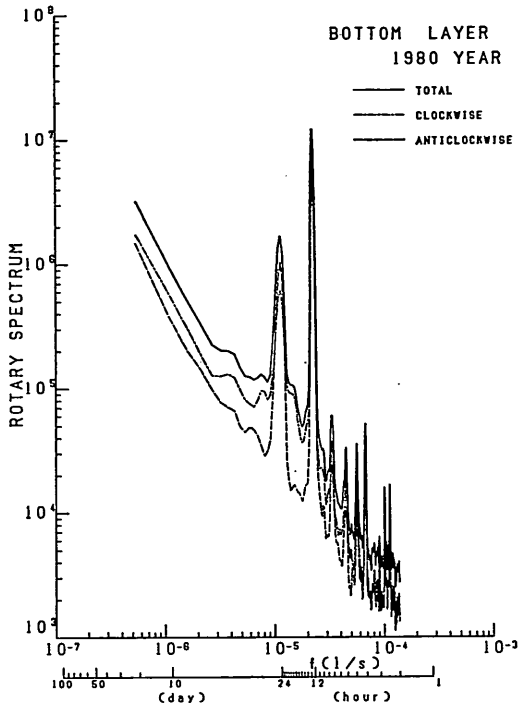


図-9 (c) 底層流のロータリースペクトル (1980年)

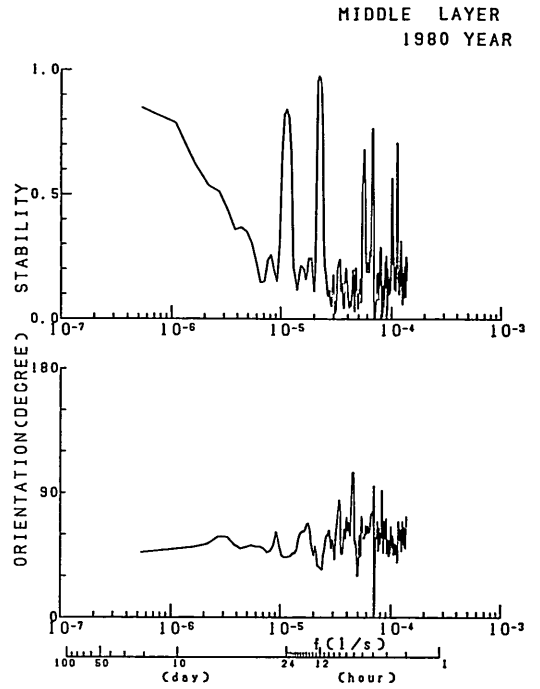


図-10 (b) 中層流の平均長軸方向と安定度

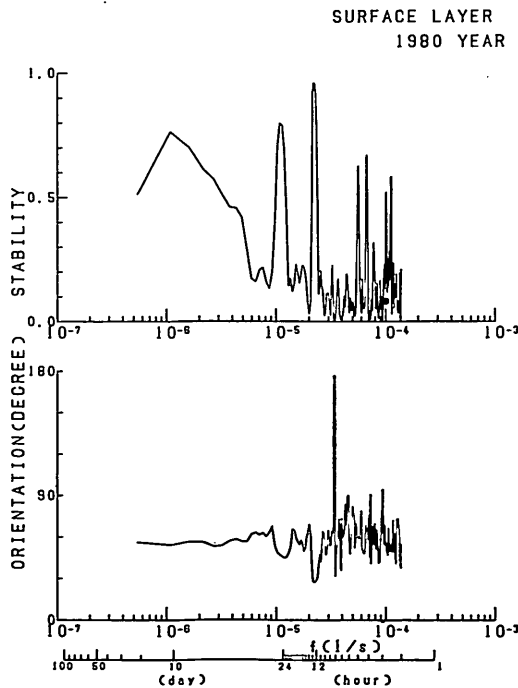


図-10 (a) 表層流の平均長軸方向と安定度

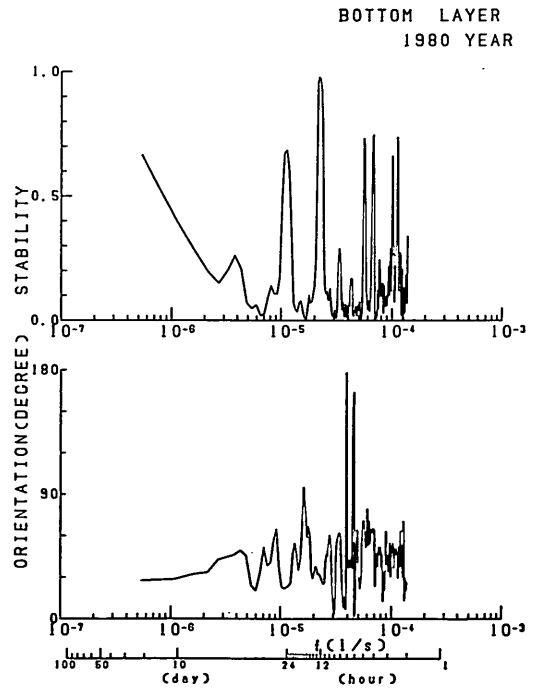


図-10 (c) 底層流の平均長軸方向と安定度

タリースペクトルのエネルギーがピークを示す周期で高くなっている。特に、半日周潮流と日周潮流の長軸方向は非常に安定していることがわかる。

次に、海上風と各層の流れとのクロススペクトルを計算し、コヒーレンス coh^2 とフェイズ θ を求めた。海上風と表層、中層、底層の流れとのコヒーレンスとフェイズを 図-11 (a), (b), (c) に示す。コヒーレンスは一般に低いのが、日周期より長い周期で各層で時計まわりの運動は比較的高いコヒーレンスを示し、また表層では反時計まわりの運動も比較的高いコヒーレンスを示す。また、反時計まわりの運動は周期 18 時間付近にも小さなピークを示す。フェイズは底層になるにつれてずれが激しくなっている。各層間の流れのコヒーレンスとフェイズを 図-12 (a), (b), (c) に示す。スペクトルがピークを持つ周波数でコヒーレンスが高く、流れの相関が高いことを示している。フェイズについては、反時計まわりの運動は各層間でほぼ同じであるのに対して、表層と中層、表層と底層とでは周期 4 日より短い周期ではかなりずれている。これは表層での流れの反時計まわりの運動の位相が他層とずれていることを示しており、この原因には各層固有の流れの性質以外に、風が表層の流れに影響を及ぼ

WIND VELOCITY
MIDDLE LAYER
1980 YEAR

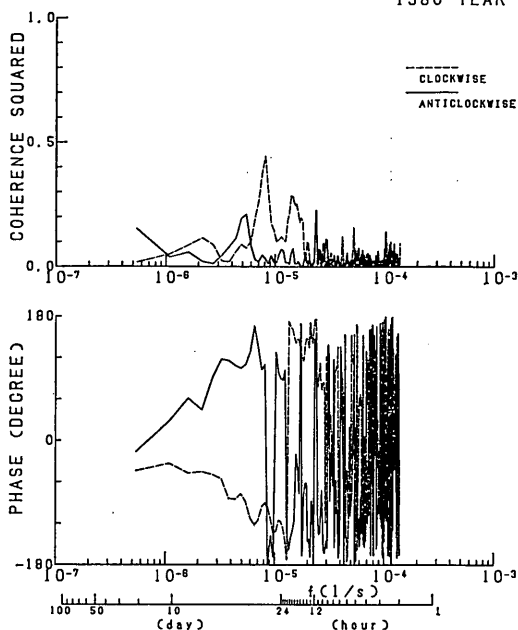


図-11 (b) コヒーレンスとフェイズ (海上風と中層流)

WIND VELOCITY
SURFACE LAYER
1980 YEAR

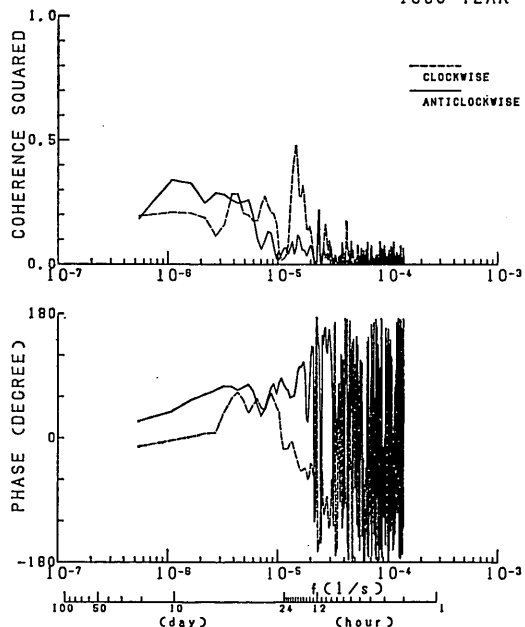


図-11 (a) コヒーレンスとフェイズ (海上風と表層流)

WIND VELOCITY
BOTTOM LAYER
1980 YEAR

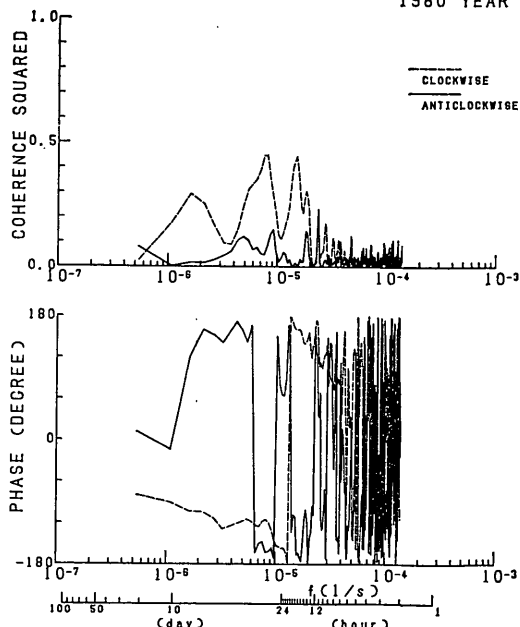


図-11 (c) コヒーレンスとフェイズ (海上風と底層流)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

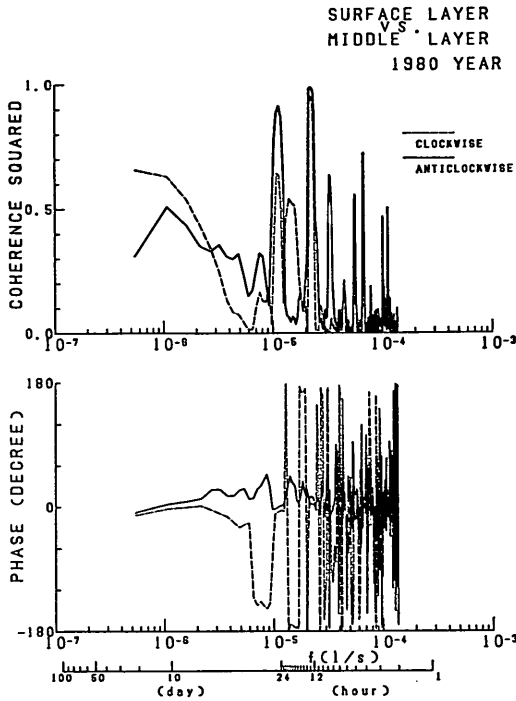


図-12(a) コヒーレンスとフェイズ(表層流と中層流)

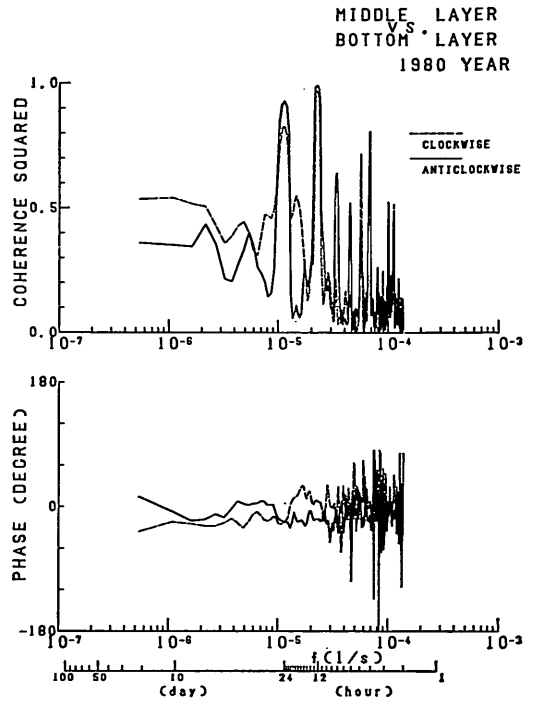


図-12(c) コヒーレンスとフェイズ(中層流と底層流)

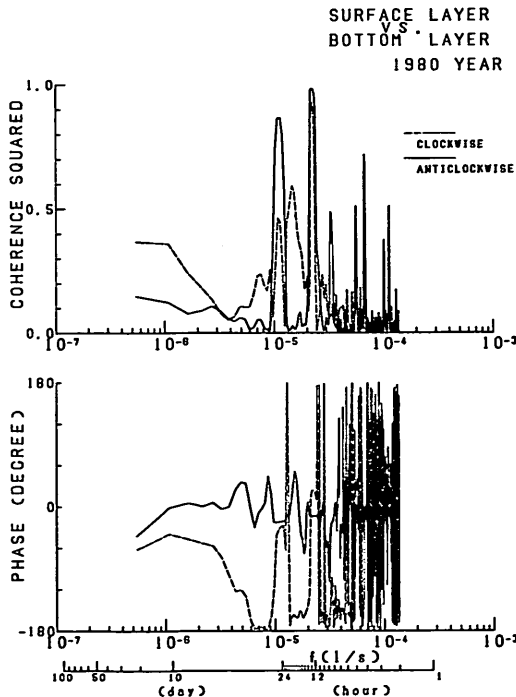


図-12(b) コヒーレンスとフェイズ(表層流と底層流)

すことなどが考えられる。

以上、海上風と各層の流れのパワースペクトルおよびクロススペクトルを計算した結果から、流れと風の間には何らかの相関があり、風の作用は流れに影響を及ぼしていると考えられる。

4. 調和解析による恒流

4.1 潮流の調和解析

これまで、流れが風に影響を受けていることがわかったが、強い潮流成分のためにこの影響を明らかにすることは難しかった。そこで、4. では流れから潮流成分を取り去った流れ、つまり恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響を検討する。

実際の潮流は東方、北方成分ともに多くの分潮の和で表すことができる¹⁵⁾。

$$U = U_0 + \sum f U_i \cos(A + B - \epsilon_{iu}) \quad (2)$$

$$V = V_0 + \sum f V_i \cos(A + B - \epsilon_{iv}) \quad (3)$$

ここで、 U, V は実際の潮流の東方、北方成分、 U_0, V_0 は恒流の東方、北方成分、 U_i, V_i は分潮 i の東方、北方成分の振幅、 $\epsilon_{iu}, \epsilon_{iv}$ は分潮 i の遅角、 f, A, B は天文学的な変数である。

実際の観測データを式 (2), (3) の形に分解するのが潮流の調和解析である。調和解析には実測値と式 (2), (3) で求められる計算値との差の最小化を行う最小自乗法¹⁶⁾による方法を用いた。この方法は、欠測期間のある場合にも対処できる。

4年間のデータを1年, 90日, 30日, 15日で区切り、調和解析を実施し、恒流の変動を検討した。年間については1月1日1時より8737個(1981年は7993個)、90日間については各年の3, 6, 9, 12月1日1時から2161個、30日間については各1月1日1時から721個、15日

間については各月1日, 16日(2月は15日)1時から361個のデータを用いて、それぞれ28, 10, 13, 10の分潮に分解した。データの長さで分離分潮の関係は、筆者らのひとりが計算機内で合成した潮汐波を用いて調和定数値の精度の検討を実施した際に、精度がよいとされたものである¹⁰⁾。

年間データの調和解析の結果を1980年について層別に表-2(a), (b), (c)に示す。この表から、各層において半日周潮流 M_2, S_2 , 日周潮流 K_1, O_1 が大きく、特に M_2 潮が卓越していることがわかる。 M_2 潮の長軸の振幅は

表-2 (a) 年間データによる調和定数値 (1980年, 表層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	$U(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$V(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$U(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$\Theta(^{\circ})$	$V(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	
1 S_a	1.16	69.7	1.97	263.9	2.27	80.3	149.9	0.25	170.3	↷
2 $S_{s,a}$	2.86	229.1	1.27	191.2	3.04	43.9	249.4	0.73	133.9	↷
3 M_m	2.01	191.9	1.77	208.3	2.65	19.1	228.8	0.38	289.1	↷
4 $M_{s,f}$	0.81	304.2	0.94	257.4	1.14	276.0	38.3	0.48	6.0	↷
5 M_f	1.87	138.9	0.92	121.3	2.07	315.6	244.5	0.25	45.6	↷
6 Q_1	0.73	137.9	0.86	120.7	1.12	307.9	220.3	0.17	37.9	↷
7 O_1	3.76	145.5	3.45	123.5	5.01	315.5	227.6	0.97	45.5	↷
8 M_1	0.22	136.8	0.34	109.5	0.40	297.4	212.2	0.09	27.4	↷
9 π_1	0.38	59.8	0.08	208.0	0.40	58.7	100.3	0.04	328.7	↷
10 P_1	1.57	165.6	1.36	134.3	2.00	332.5	229.9	0.55	62.5	↷
11 K_1	4.48	173.6	4.75	148.3	6.37	340.2	223.2	1.43	70.2	↷
12 J_1	0.02	55.9	0.62	252.0	0.62	72.0	178.3	0.01	162.0	↷
13 $2N_2$	0.21	213.1	0.13	134.3	0.21	26.2	258.8	0.13	116.2	↷
14 μ_2	0.76	79.9	0.61	78.7	0.97	79.4	51.4	0.01	169.4	↷
15 N_2	1.25	213.0	1.89	230.1	2.25	45.0	213.0	0.31	315.0	↷
16 ν_2	0.51	258.6	0.64	241.6	0.81	68.2	218.6	0.12	158.2	↷
17 M_2	5.11	237.3	9.69	244.3	10.93	62.8	207.7	0.55	332.8	↷
18 L_2	0.65	290.2	0.61	262.7	0.87	277.5	47.4	0.21	7.5	↷
19 T_2	0.27	177.0	0.49	197.5	0.56	12.9	207.8	0.08	282.9	↷
20 S_2	1.61	227.0	2.81	258.3	3.14	71.2	207.7	0.74	341.2	↷
21 K_2	0.92	212.4	0.29	271.7	0.93	34.9	260.3	0.24	304.9	↷
22 M_3	0.18	56.0	0.08	67.1	0.19	57.9	65.3	0.01	327.9	↷
23 M_4	0.28	264.7	0.12	177.3	0.28	84.2	268.7	0.11	174.2	↷
24 MS_4	0.25	300.8	0.12	173.1	0.27	307.2	108.3	0.09	37.2	↷
25 M_6	0.46	155.0	0.19	157.0	0.50	335.3	247.8	0.01	245.3	↷
26 $2MS_6$	0.34	171.0	0.14	178.3	0.37	352.0	247.7	0.02	262.0	↷
27 $2SM_6$	0.11	186.3	0.06	206.0	0.12	11.4	239.8	0.02	281.4	↷
28 M_8	0.05	90.2	0.04	62.3	0.06	78.6	50.1	0.02	168.6	↷
恒流	-6.19		-5.09							

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

表-2 (b) 年間データによる調和定数値 (1980年, 中層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	$U(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$V(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$U(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	$\Theta(^{\circ})$	$V(\text{cm/s})$	$\kappa(^{\circ})$	
1 S_a	2.01	27.4	2.05	20.2	2.87	23.7	44.4	0.18	113.7)
2 S_{sa}	1.05	271.2	1.62	204.6	1.70	36.2	200.8	0.92	126.2)
3 M_{π}	1.82	202.2	1.87	202.8	2.61	22.5	224.2	0.01	292.5)
4 M_{sf}	1.52	277.7	1.62	254.5	2.17	85.3	223.0	0.45	175.3)
5 M_f	0.91	122.8	0.50	153.6	1.01	309.4	243.2	0.23	219.4)
6 Q_1	0.66	100.7	0.57	110.1	0.87	284.7	229.2	0.07	194.7)
7 O_1	3.18	141.7	3.37	134.5	4.62	317.9	223.3	0.29	47.9)
8 M_1	0.15	90.9	0.25	171.5	0.25	346.3	188.7	0.15	256.3)
9 π_1	0.07	140.6	0.18	162.0	0.19	339.3	200.1	0.02	249.3)
10 P_1	1.62	183.7	1.54	160.1	2.19	352.6	226.6	0.46	82.6)
11 K_1	4.33	164.4	4.64	156.2	6.33	340.0	223.0	0.45	70.0)
12 J_1	0.40	172.7	0.16	245.1	0.40	355.7	262.1	0.15	265.7)
13 $2N_2$	0.06	275.1	0.10	256.1	0.11	81.6	212.4	0.02	171.6)
14 μ_2	1.30	85.0	0.82	67.7	1.52	80.1	58.2	0.21	170.1)
15 N_2	1.58	217.3	1.78	230.2	2.36	44.5	221.4	0.27	314.5)
16 ν_2	0.48	227.8	0.53	249.7	0.70	59.8	222.2	0.14	329.8)
17 M_2	7.87	234.5	10.50	239.7	13.11	57.8	216.8	0.58	327.8)
18 L_2	0.80	302.5	0.86	261.1	1.10	280.0	42.2	0.41	10.0)
19 T_2	0.43	184.0	0.33	202.1	0.54	10.6	233.1	0.08	280.6)
20 S_2	2.10	239.5	3.38	255.3	3.95	71.0	211.4	0.49	341.0)
21 K_2	0.87	253.7	0.94	257.2	1.28	75.6	222.7	0.04	345.6)
22 M_3	0.13	54.8	0.06	327.3	0.13	54.0	88.5	0.06	144.0)
23 M_4	0.40	280.1	0.20	100.3	0.44	280.1	116.7	0.001	10.1)
24 MS_4	0.25	317.4	0.15	81.1	0.26	306.1	114.1	0.12	216.1)
25 M_6	0.44	155.6	0.15	173.7	0.46	337.3	252.1	0.04	247.3)
26 $2MS_6$	0.48	174.5	0.11	209.6	0.49	356.0	258.9	0.06	266.0)
27 $2SM_6$	0.10	182.3	0.05	133.1	0.10	11.1	245.4	0.04	281.1)
28 M_8	0.05	133.1	0.05	49.6	0.05	291.1	244.9	0.05	21.1)
恒流	-5.63		-5.15							

表層で 10.3cm/s, 中層で 12.6cm/s, 底層で 10.1cm/s である。また, 太陽年周潮流 S_a もかなり大きい。年間データから求めた調和定数値は長周期の太陽年周潮流 S_a や太陽半年周潮流 S_{sa} および振幅の非常に小さい分潮を除いて各年で安定している。中層, 底層の調和定数値は表層のものより安定しており, ほとんどの分潮の振幅は中層でもっとも大きく, 次に表層で, 底層でもっとも小さくなっている。また, 北方成分のほうが東方成分よりも変動が少なく, 振幅が大きくなっている。

次に, 1980年3月1日から90日間, また1980年4月

1日から30日, 15日間のデータを用いて調和解析をした結果を表-3(a), (b), (c)に示す。これらの表から, 短い期間のデータの調和解析結果も, 主要四分潮が大きいことを示していることがわかる。

90日間データの調和解析から求めた中層の M_2 潮の変動を図-13に示す。図中の横線は年間データから求めた調和定数値で, 90日間データの結果はこの値を中心にして変動していることがわかる。各期間ごとに求めた主要四分潮の東方, 北方成分の振幅と遅角および長軸の振幅と方向, 遅角の値の平均と標準偏差 (S.D.) およ

表-2 (c) 年間データによる調和定数値 (1980年, 底層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	U(cm/s)	κ (°)	V(cm/s)	κ (°)	U(cm/s)	κ (°)	Θ (°)	V(cm/s)	κ (°)	
1 S_a	2.08	86.5	2.57	81.4	3.31	83.4	39.0	0.14	173.4	↷
2 S_{sa}	0.71	280.6	1.88	251.2	1.98	74.5	199.0	0.33	164.5	↷
3 M_m	0.72	221.7	1.44	202.6	1.59	26.3	205.9	0.21	116.3	↷
4 M_{sf}	0.52	273.2	1.04	222.5	1.09	49.7	200.0	0.38	139.7	↷
5 M_f	0.55	158.6	0.07	96.4	0.55	338.2	267.0	0.06	68.2	↷
6 Q_1	0.39	98.5	0.56	113.1	0.68	288.4	214.2	0.08	198.4	↷
7 O_1	1.11	121.1	2.70	142.4	2.90	319.4	201.4	0.38	229.4	↷
8 M_1	0.04	114.2	0.21	181.7	0.21	0.9	184.3	0.04	270.9	↷
9 π_1	0.21	153.7	0.26	119.5	0.32	312.4	217.5	0.10	42.4	↷
10 P_1	0.56	194.9	1.24	167.7	1.34	351.9	202.7	0.24	81.9	↷
11 K_1	1.68	129.8	3.40	163.6	3.70	337.8	203.6	0.86	247.8	↷
12 J_1	0.15	178.6	0.24	177.5	0.28	357.8	212.5	0.002	87.8	↷
13 $2N_2$	0.06	50.0	0.18	262.3	0.18	79.3	162.9	0.03	169.3	↷
14 μ_2	0.74	72.1	0.71	70.5	1.03	71.3	46.2	0.01	161.3	↷
15 N_2	1.07	196.9	1.36	217.6	1.70	29.8	217.7	0.30	299.8	↷
16 ν_2	0.28	216.7	0.53	240.1	0.59	55.2	206.9	0.10	325.2	↷
17 M_2	5.58	214.6	8.72	228.2	10.29	44.3	212.3	1.12	314.3	↷
18 L_2	0.34	293.2	0.81	272.4	0.87	275.4	22.1	0.11	5.4	↷
19 T_2	0.10	208.4	0.31	202.6	0.32	23.2	197.7	0.01	113.2	↷
20 S_2	1.46	216.6	2.71	244.0	3.02	58.1	206.8	0.60	328.1	↷
21 K_2	0.49	253.4	1.01	254.4	1.12	74.2	206.0	0.01	344.2	↷
22 M_3	0.13	78.3	0.04	100.2	0.13	79.7	75.4	0.01	349.7	↷
23 M_4	0.25	293.6	0.26	73.0	0.34	272.2	136.7	0.13	182.2	↷
24 MS_4	0.18	332.4	0.19	80.7	0.21	291.2	140.6	0.15	201.2	↷
25 M_6	0.39	142.3	0.22	161.8	0.45	327.0	240.7	0.07	237.0	↷
26 $2MS_6$	0.43	167.3	0.20	191.0	0.47	351.1	246.6	0.07	261.1	↷
27 $2SM_6$	0.09	171.8	0.05	219.4	0.10	359.4	248.4	0.03	269.4	↷
28 M_8	0.08	104.8	0.06	42.4	0.01	88.5	62.1	0.05	178.5	↷
恒流	-2.35		-3.18							

び振幅に関しては変動係数 (C.V.=標準偏差/平均) を中層について 表-4 に示す。欠測が全体の 1/3 を超える期間は解析の対象としていない。欠測については、観測期間の 1/4 以下であればその影響は大きくないという報告¹⁶⁾があるが、本データでは 1/3 程度の欠測があった期間でも他の期間とあまり変わらない結果を示した。また、後で述べる恒流の解析 (主成分分析) の際に、欠測の期間ができるだけ少ないほうが望ましいので、ここでは欠測の期間が全体の 1/3 以下であればその期間の値を採用することにした。表-4 から、観測期間が短くなる

につれて調和定数値の変動が大きくなることわかる。特に、日周潮流 K_1 , O_1 の遅角の変動が激しい。また、遅角の平均は各観測期間によらずほぼ一致していたが、振幅の平均については M_2 潮を除いてデータの期間が短いものほど大きくなる傾向が若干みられた。年間と 15 日間のデータの差は各分潮でたかだか 0.3cm/s 以内である。欠測期間が 10% 以下のものについて同様な解析を実施した結果、同じ傾向がみられたのでデータ期間による振幅の変化はデータの中の欠測によるものではなく、あるデータ期間の調和解析ではうまく分離できない

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

表-3 (a) 90 日間データによる調和定数値 (1980.3.1~, 中層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	U(cm/s)	κ (°)	V(cm/s)	κ (°)	U(cm/s)	κ (°)	Θ (°)	V(cm/s)	κ (°)	
1 Q_1	0.87	83.7	0.40	27.7	0.90	77.7	73.5	0.32	167.7)
2 O_1	2.86	131.4	3.08	125.0	4.20	307.9	222.8	0.23	37.9)
3 P_1	1.32	199.9	2.07	181.6	2.43	7.1	212.0	0.35	97.1)
4 K_1	4.32	156.1	3.72	155.5	5.70	335.9	229.3	0.03	65.9)
5 N_2	1.99	208.3	2.19	215.9	2.96	32.5	222.3	0.19	302.5)
6 M_2	8.20	233.1	11.03	238.0	13.73	56.3	216.6	0.56	326.3)
7 S_2	2.40	242.2	3.92	262.8	4.54	77.3	210.7	0.73	347.3)
8 K_2	0.36	209.8	1.27	231.9	1.32	50.4	194.9	0.13	320.4)
9 M_4	0.47	273.1	0.31	91.6	0.57	272.6	123.5	0.01	182.6)
10 MS_4	0.40	314.8	0.19	47.8	0.40	314.0	91.8	0.19	224.0)
恒流	-3.92		-3.92							

表-3 (b) 30 日間データによる調和定数値 (1980.4.1~, 中層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	U(cm/s)	κ (°)	V(cm/s)	κ (°)	U(cm/s)	κ (°)	Θ (°)	V(cm/s)	κ (°)	
1 Q_1	0.92	110.4	1.07	110.4	1.41	290.4	220.7	0.0003	20.4)
2 O_1	2.98	131.3	3.76	115.1	4.75	301.3	218.1	0.66	31.3)
3 K_1	5.21	152.4	5.09	139.3	7.24	326.0	225.6	0.83	56.0)
4 μ_2	0.89	99.8	1.02	71.3	1.31	83.5	40.7	0.33	173.5)
5 N_2	1.97	211.4	2.20	218.5	2.95	35.3	221.7	0.18	305.3)
6 M_2	8.15	231.4	11.05	240.2	13.69	57.1	216.3	1.00	327.1)
7 L_2	0.75	316.1	1.12	284.9	1.31	294.0	32.3	0.33	24.0)
8 S_2	2.56	243.9	4.37	256.7	5.04	73.4	210.1	0.49	343.4)
9 M_4	0.34	274.2	0.38	87.1	0.51	270.3	137.8	0.03	180.3)
10 MS_4	0.44	300.1	0.16	38.8	0.45	298.9	93.5	0.15	208.9)
11 P_1	1.72	153.2	1.69	140.0	2.40	326.8	225.6	0.28	56.8)
12 K_2	0.70	243.1	1.19	255.9	1.37	72.7	210.1	0.13	342.7)
13 ν_2	0.38	210.7	0.43	217.8	0.57	34.7	221.7	0.04	304.7)
恒流	-4.41		-4.40							

表-3 (c) 15 日間データによる調和定数値 (1980.4.1~, 中層)

No. 分潮	東方成分		北方成分		長軸方向			短軸方向		回転
	U(cm/s)	κ (°)	V(cm/s)	κ (°)	U(cm/s)	κ (°)	Θ (°)	V(cm/s)	κ (°)	
1 Q_1	2.10	50.9	0.40	249.3	2.14	51.5	100.2	0.12	141.5)
2 O_1	4.25	131.6	4.50	89.7	5.78	289.2	222.8	2.21	19.2)
3 K_1	5.02	169.6	6.92	148.0	8.42	335.3	215.3	1.52	65.3)
4 N_2	1.49	202.1	1.87	220.5	2.36	33.4	218.3	0.37	303.4)
5 M_2	8.59	226.8	11.09	235.8	13.99	52.5	217.7	1.06	322.5)
6 S_2	2.51	238.9	4.21	257.8	4.85	73.0	210.1	0.70	343.0)
7 M_4	0.51	256.2	0.51	101.9	0.71	89.0	315.0	0.16	179.0)
8 MS_4	0.49	315.3	0.26	91.7	0.53	307.7	113.2	0.16	217.7)
9 P_1	1.66	170.4	2.29	148.8	2.79	336.1	215.3	0.50	66.1)
10 K_2	0.68	238.2	1.15	257.1	1.32	72.3	210.1	0.19	342.3)
恒流	-3.93		-4.08							

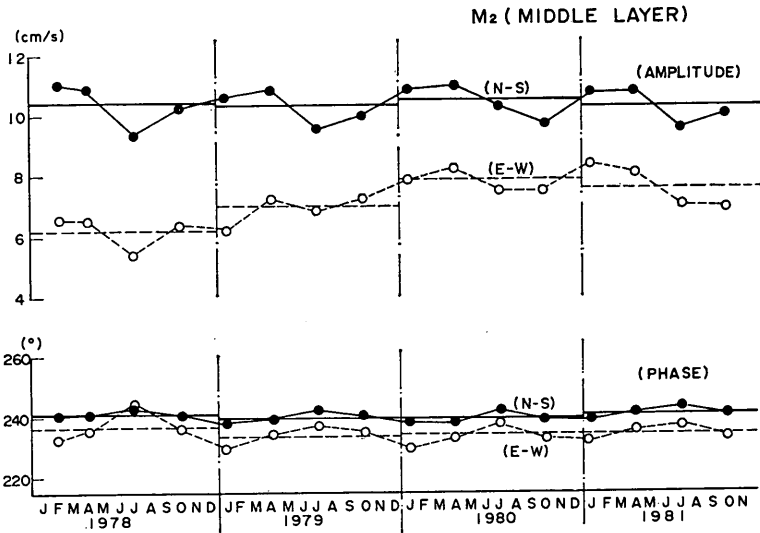


図-13 90日間データによる調和定数値(中層, M_2 潮)

表-4 調和定数値の平均と標準偏差

分 潮	東 方 成 分				北 方 成 分				長 軸 成 分									
	\bar{U}	S.D.	C.V.	$\bar{\kappa}$	S.D.	V	S.D.	C.V.	$\bar{\kappa}$	S.D.	\bar{U}	S.D.	C.V.	$\bar{\kappa}$	S.D.	$\bar{\theta}$	S.D.	
O_1	年間	2.62	0.47	0.18	138.6	5.6	3.13	0.33	0.11	133.0	3.7	4.08	0.53	0.13	315.3	4.3	221.2	5.5
	90日間	2.63	0.56	0.21	139.1	11.7	3.11	0.47	0.15	133.2	9.8	4.11	0.52	0.13	315.5	9.6	220.3	7.3
	30日間	2.70	0.67	0.25	138.7	15.1	3.20	0.67	0.21	131.1	12.7	4.18	0.76	0.18	314.5	11.7	219.8	7.5
	15日間	2.79	1.03	0.37	140.1	24.2	3.30	1.02	0.31	132.3	21.0	4.31	1.16	0.27	315.3	17.4	219.8	12.4
K_1	年間	3.94	0.33	0.08	164.5	1.1	4.62	0.25	0.05	154.7	1.6	6.06	0.21	0.03	338.7	1.1	220.4	3.5
	90日間	3.95	0.46	0.12	164.3	11.7	4.57	0.76	0.17	155.9	5.8	6.00	0.77	0.13	339.6	6.4	221.0	4.1
	30日間	4.12	0.70	0.17	162.9	15.6	4.70	1.12	0.24	153.9	9.4	6.24	0.92	0.15	337.6	10.2	221.6	8.8
	15日間	4.24	0.88	0.21	162.6	17.9	4.75	1.27	0.27	152.7	13.9	6.36	1.13	0.18	336.3	12.2	221.8	9.7
M_2	年間	7.15	0.75	0.10	234.9	1.2	10.38	0.10	0.01	240.3	0.6	12.60	0.43	0.03	58.5	0.9	214.4	2.8
	90日間	7.09	0.81	0.11	234.8	3.5	10.34	0.58	0.06	240.3	1.6	12.54	0.79	0.06	58.6	2.1	214.3	2.9
	30日間	7.15	0.82	0.11	234.8	4.4	10.42	0.69	0.07	240.4	2.4	12.63	0.84	0.07	58.6	2.7	214.3	3.0
	15日間	7.09	1.05	0.15	234.1	7.6	10.38	1.27	0.12	240.3	5.0	12.56	1.21	0.10	58.3	5.3	214.1	3.7
S_2	年間	2.10	0.14	0.07	239.4	2.2	3.29	0.08	0.02	256.1	2.0	3.87	0.07	0.02	71.4	2.4	212.1	2.3
	90日間	2.12	0.38	0.18	241.4	11.2	3.32	0.37	0.11	257.3	7.0	3.91	0.46	0.12	72.9	7.6	211.9	3.7
	30日間	2.17	0.42	0.19	241.6	13.5	3.31	0.48	0.15	256.7	5.8	3.93	0.57	0.15	72.1	7.4	212.6	4.2
	15日間	2.24	0.64	0.29	240.8	18.5	3.35	0.63	0.19	256.2	9.7	3.99	0.78	0.20	71.2	11.8	212.9	7.2

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

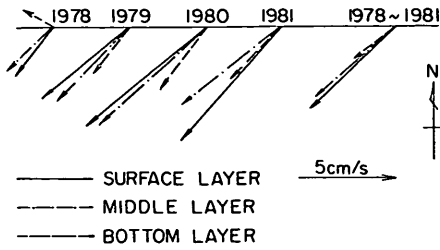


図-14 年間調和解析による恒流

他の分潮の影響ではないかと考えられる。

4.2 恒流の変動

年間データから求めた恒流を 図-14 に示す。4 年間連続のデータから求めた結果も示してある。この図から、1978 年の底層を除いて恒流はほぼ南西流であり、相対的に底層の値が小さいことがわかる。その強さは底層で 2~4 cm/s、中層で 3~7 cm/s、表層で 3~8 cm/s である。従来から、大阪湾では地形性の時計まわりの恒流の存在が指摘されており、今回の結果と一致している。ここで各年度の恒流の絶対値と淀川の年平均流量（枚方流量観測所）との関係を 図-15 に示す。この図から、明らかに両者には強い相関があることがわかる。淀川の年平均流量は泉南沖（大阪湾）への淡水流入量を代表していると考えられるので、年間スケールでの恒流の変動の原因として、海域への淡水の流入量が大きな役割を果たしているといえる。

年平均の海上風と淀川の河川流量を 表-5 に示す。この表から、河川流量に比べて風の年間の変動が少なく、風向がほぼ一定していることがわかる。また、恒流の主流方向である南西方向の年平均の海上風の成分は各年で -0.30~-0.24 cm/s 程度であり、年間スケールでの恒流の変動に風はあまり影響しないと考えられる。

次に、90 日間調和解析から求めた恒流を 図-16 に示す。上段のベクトル図は、潮流と同期間の風速ベクトルを成分ごとに算術平均して求めたものである。その期間の風を代表していると考えられる。風は各年度でよく似た季節変動を示していることがわかる。下段の棒グラフは、淀川の 90 日間平均流量を示し、全体的に流量の多い季節は恒流が強くなっている。そこで、淀川の 90 日間平均流量と恒流の絶対値との関係を各層について、図-17 (a), (b), (c) に示す。図中の 1 次直線は年間データより最小自乗法で求めた回帰式である。この図から、各層

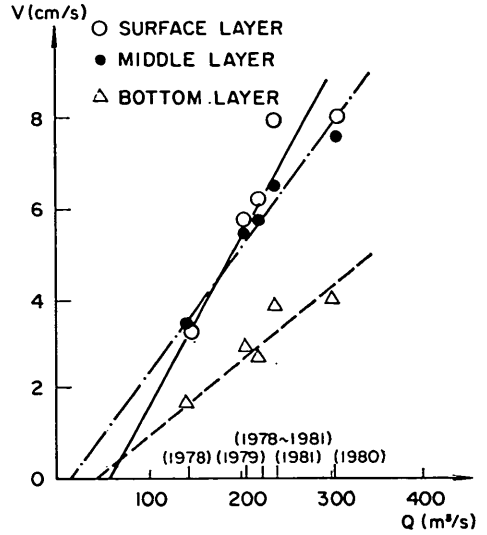


図-15 恒流の絶対値と淀川の年平均流量（年間）

表-5 年平均の海上風と淀川の河川流量

年度	海上風		河川流量 (m³/s)
	東方成分 (m/s)	北方成分 (m/s)	
1978	1.050	-0.633	145.2
1979	0.829	-0.484	205.9
1980	1.257	-0.913	306.5
1981	1.058	-0.678	244.4

においてプロットした点が回帰直線より下にあるもの、つまり恒流量が回帰式によって計算される量より小さい期間は春、夏が多く、また逆に恒流量が大きい期間は秋、冬が多くなっていることがわかる。これは季節において卓越している風が恒流に影響を及ぼしているためである。MT 局では春には北西から北、夏には南西、秋には北から北北東、冬には北西の風が卓越している。これらの風に対する MT 局での 4 年間の平均風（東方 1.05 m/s、北方 -0.68 m/s）からの偏差ベクトルが恒流と同方向になるときは恒流は強められ、逆方向のときは弱められる。夏には、この偏差ベクトルが恒流とほぼ逆方向となり、秋には同方向となるので、夏の恒流が風によりもっとも弱められ、秋の恒流がもっとも強められると考えられる。

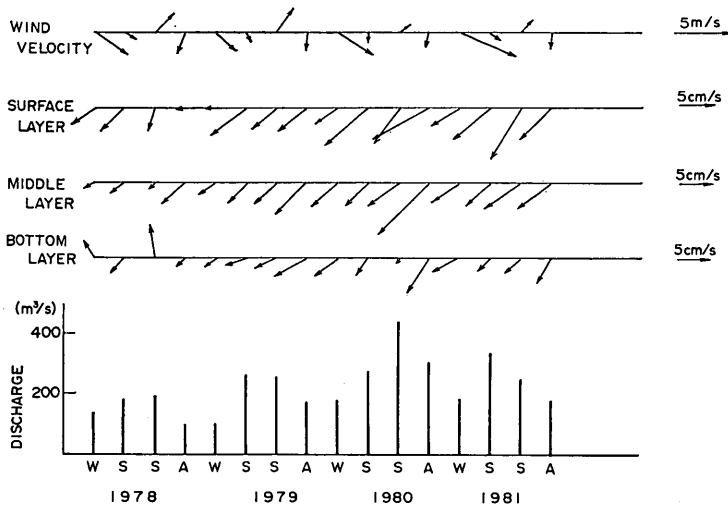


図-16 90日間調和解析による恒流

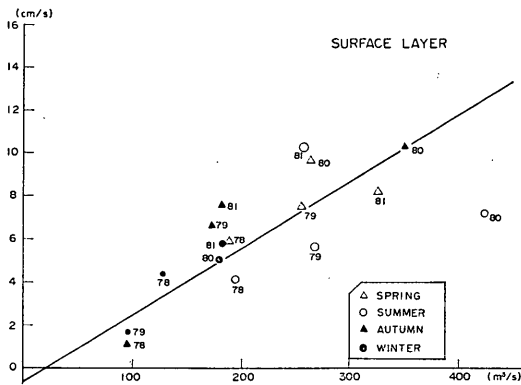


図-17 (a) 恒流の絶対値と淀川の平均流量 (90日間, 表層)

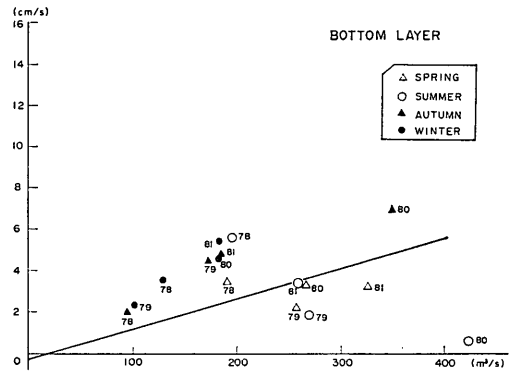


図-17 (c) 恒流の絶対値と淀川の平均流量 (90日間, 底層)

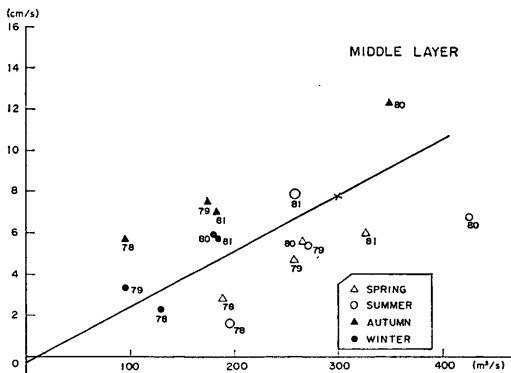


図-17 (b) 恒流の絶対値と淀川の平均流量 (90日間, 中層)

次に、30日間調和解析から求めた恒流を各年について図-18 (a), (b), (c), (d) に示す。実線の矢印が生データから求めた値である。欠測が全体の1/3を超える月は値を示していない。淀川の流量と風および恒流の関係は90日間データの場合と同じ傾向を示している。恒流の強さは表層と中層とであまり変わらず、底層で小さくなっている。特に、夏にその傾向が強い。これは、海域において夏には密度成層が発達する(同時観測の水温データから確かめられている)ために、河川の影響が底層まで及ばないためと考えられる。

ここで、90日間、30日間調和解析から求めた恒流は、観測期間以上の長周期の潮流の影響を受けており、厳密な意味で非調和成分値とはいえない。そこで、4年間

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

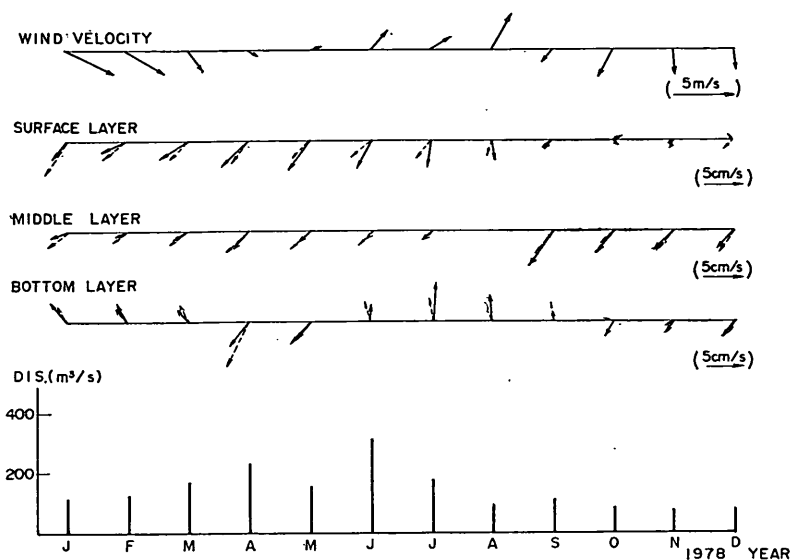


図-18 (a) 30日間調和解析による恒流 (1978年)

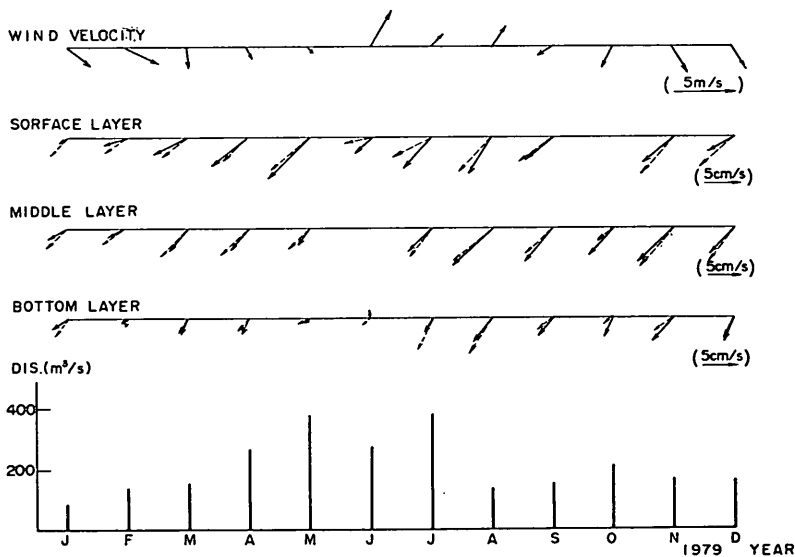


図-18 (b) 30日間調和解析による恒流 (1979年)

のデータの調和解析により太陽年周潮流 S_a 、太陽半年周潮流 S_{sa} を求め、生データからこれらの潮流成分を除去したものについて、30日間調和解析を実施した。こうして求めた恒流を破線で示してある。長周期成分の除去により、恒流はほぼ南西を向くようになる。いま、

夏場の変化をみても、年度により違いがあるものの長周期成分の除去により、表層の南西方向の恒流は若干弱められるのに対して、中層の恒流はあまり変化せず、底層の恒流は南西方向に強められる傾向がある。これは長周期成分が淡水流入量や風の影響を受けており、層に

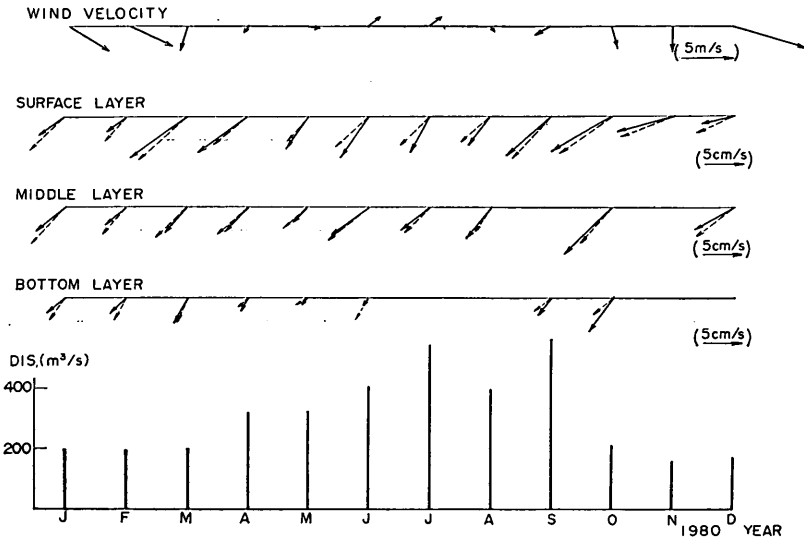


図-18 (c) 30日間調和解析による恒流 (1980年)

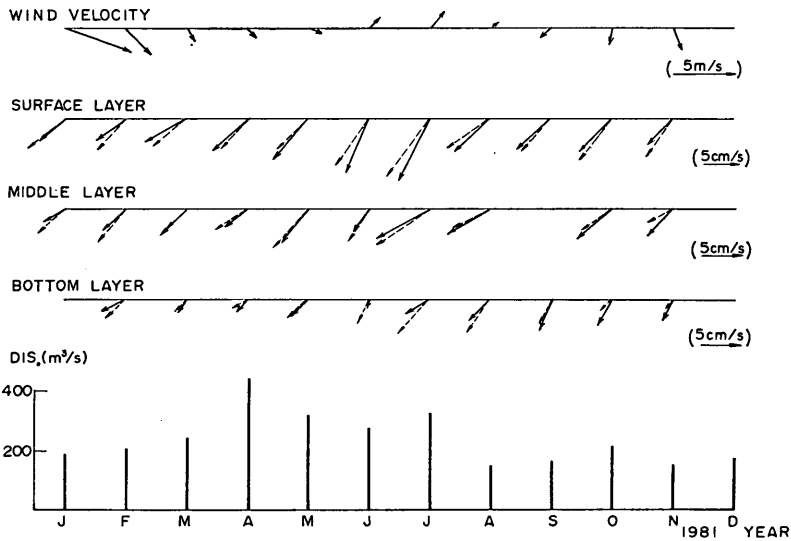


図-18 (d) 30日間調和解析による恒流 (1981年)

よりその影響が異なるためと考えられる。

4.3 主成分分析による風と淡水流入量の影響の検討

主成分分析^{17),18)}の手法を用いて各層の恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響を検討する。主成分分析は多変量解析法のひとつであり、 p 個の特性値 (p 変量)の持つ情報を互いに独立な m 個 ($m < p$)の総合特性値 Z_1, Z_2, \dots, Z_m ——これを第1, 第2, \dots , 第 m 主成分とよ

ぶ——に要約する手法である。初期は、心理学や生物学などの分野で用いられていたが、最近では各種分野で応用され、海岸工学にも環境部門を主として用いられている^{19),20)}。

p 変量を表-6のように定義する。各変量の測定単位が同一でないので、平均0, 分散1に基準化して計算を実施した。主成分分析は、90, 30, 15日間のそれぞれの

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

表-6 変数の定義

x_1, x_2	期間平均風速の東方, 北方成分
x_3, x_4	表層における恒流の東方, 北方成分
x_5, x_6	中層における恒流の東方, 北方成分
x_7, x_8	底層における恒流の東方, 北方成分
x_9	期間平均の淀川の河川流量

結果について行った。調和解析で分離できない、データ期間より長い長周期の潮流成分 (S_a, S_{Sa}) は風や河川流量の影響を強く受けているので、生データからこれらの

潮流成分を除去する操作は行わず、生データから求めた恒流を解析に用いた。計算にあたって、欠測期間が全体の 1/3 以上のときは前後の値から線形補間した。表-7 (a), (b), (c) に各変量の相関行列を示す。データの長さによらず、各変量間の相関は同じ傾向を持つ。各層における恒流の x, y 成分は相関が高く、各層間の恒流の相関も高い。風と各層の恒流との相関はおおむね正である。また、流量と各層の恒流とは負の相関があり、表層ほど高い。データの期間が短くなるにつれて、流量と恒流との相関は低くなっている。これは、時間スケールが短くなるほど、恒流に及ぼす淡水流入量の影響が少なくなることを示している。

表-7 (a) 相関行列 (90 日間調和解析)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1.00	-0.08	0.24	0.25	0.31	0.49	-0.41	0.30	-0.21
x_2	-0.08	1.00	0.18	-0.48	0.15	0.14	0.54	0.40	0.44
x_3	0.24	0.18	1.00	0.64	0.70	0.68	0.46	0.67	-0.55
x_4	0.25	-0.48	0.64	1.00	0.47	0.37	-0.01	0.23	-0.70
x_5	0.31	0.15	0.70	0.47	1.00	0.92	0.50	0.76	-0.41
x_6	0.49	0.14	0.68	0.37	0.92	1.00	0.36	0.76	-0.43
x_7	-0.41	0.54	0.46	-0.01	0.50	0.36	1.00	0.60	0.22
x_8	0.30	0.40	0.67	0.23	0.76	0.76	0.60	1.00	-0.17
x_9	-0.21	0.44	-0.55	-0.70	-0.41	-0.43	0.22	-0.17	1.00

表-7 (b) 相関行列 (30 日間調和解析)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1.00	-0.05	0.22	0.22	0.17	0.44	-0.26	0.23	-0.16
x_2	-0.05	1.00	0.19	-0.43	0.02	-0.02	0.41	0.36	0.38
x_3	0.22	0.19	1.00	0.54	0.55	0.54	0.42	0.54	-0.34
x_4	0.22	-0.43	0.54	1.00	0.41	0.39	0.09	0.19	-0.62
x_5	0.17	0.02	0.55	0.41	1.00	0.78	0.62	0.59	-0.13
x_6	0.44	-0.02	0.54	0.39	0.78	1.00	0.42	0.60	-0.20
x_7	-0.26	0.41	0.42	0.09	0.62	0.42	1.00	0.63	0.11
x_8	0.23	0.36	0.54	0.19	0.59	0.60	0.63	1.00	-0.08
x_9	-0.16	0.38	-0.34	-0.62	-0.13	-0.20	0.11	-0.08	1.00

表-7 (c) 相関行列 (15 日間調和解析)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1.00	0.02	0.30	0.23	0.20	0.43	-0.26	0.23	-0.09
x_2	0.02	1.00	0.25	-0.29	0.16	0.11	0.36	0.34	0.40
x_3	0.30	0.25	1.00	0.57	0.56	0.57	0.36	0.54	-0.26
x_4	0.23	-0.29	0.57	1.00	0.40	0.42	0.07	0.17	-0.53
x_5	0.20	0.16	0.56	0.40	1.00	0.83	0.56	0.59	-0.12
x_6	0.43	0.11	0.57	0.42	0.83	1.00	0.41	0.60	-0.18
x_7	-0.26	0.36	0.36	0.07	0.56	0.41	1.00	0.63	0.18
x_8	0.23	0.34	0.54	0.17	0.59	0.60	0.63	1.00	0.01
x_9	-0.09	0.40	-0.26	-0.53	-0.12	-0.18	0.18	0.01	1.00

表-8 主成分の分散と累積寄与率

モード	90日間		30日間		15日間	
	分散	累積寄与率	分散	累積寄与率	分散	累積寄与率
1	4.21	46.8	3.67	40.8	3.69	41.0
2	2.39	73.3	2.15	64.7	2.05	63.8
3	1.17	86.3	1.12	77.2	1.13	76.3
4	0.47	91.5	0.80	86.0	0.70	84.1
5	0.38	95.7	0.43	90.8	0.47	89.4
6	0.21	98.0	0.30	94.1	0.42	94.0
7	0.12	99.3	0.23	96.7	0.23	96.6
8	0.03	99.7	0.15	98.4	0.18	98.6
9	0.03	100.0	0.15	100.0	0.13	100.0

9 個の変量から求めた各主成分の分散と累積寄与率 λ_i を表-8 に示す。 m 個の主成分の累積寄与率は、主成分 Z_k の分散の、もとの変量の総分散 (本ケースでは 9) に対する割合を m 個までたしあわせたものである。これは、 m 個までの主成分がもとの変量もっていた情報の何パーセントを表しているかを示す。各データ期間で、主成分の分散がもとの変数の分散、1.0 以上のものは第 3 主成分までで、それぞれもとの変量もっていた情報の 86.3% (90 日間), 77.2% (30 日間), 76.3% (15 日間) を表している。30, 15 日間データの第 3 主成分の累積寄与率が 90 日間データに比べて低いのは、変量 $x_1 \sim x_9$ の変動に、取り上げた変量以外の要素がより影響するためである。第 3 主成分までに対する固有ベクトル

表-9 固有ベクトル

モード	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	
90日間	1	0.192	0.068	0.431	0.295	0.451	0.444	0.225	0.406	-0.264
	2	0.237	-0.552	0.008	0.396	-0.059	-0.024	-0.482	-0.239	-0.435
	3	0.751	0.193	-0.188	-0.307	0.021	0.220	-0.389	0.134	0.225
30日間	1	-0.173	-0.057	-0.417	-0.304	-0.446	-0.442	-0.329	-0.409	0.180
	2	0.231	-0.548	0.031	0.439	-0.065	0.035	-0.400	-0.238	-0.482
	3	0.802	0.175	-0.068	-0.248	-0.074	0.236	-0.365	0.112	0.230
15日間	1	0.187	0.131	0.421	0.285	0.452	0.455	0.314	0.408	-0.114
	2	0.224	-0.505	0.087	0.451	-0.036	0.057	-0.388	-0.219	-0.531
	3	0.788	0.248	0.026	-0.187	-0.091	0.130	-0.430	0.024	0.267

表-10 因子負荷量

モード	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
90日間 1	0.393	0.140	0.885	0.604	0.925	0.911	0.462	0.833	-0.542
2	0.367	-0.852	0.013	0.616	-0.092	-0.037	-0.744	-0.370	-0.672
3	0.812	0.208	-0.203	-0.332	0.023	0.238	-0.421	0.145	0.243
30日間 1	-0.331	-0.108	-0.798	-0.582	-0.854	-0.847	-0.630	-0.783	0.345
2	0.338	-0.802	0.046	0.644	-0.096	0.052	-0.584	-0.349	-0.705
3	0.850	0.185	-0.072	-0.263	-0.079	0.250	-0.387	0.118	0.244
15日間 1	0.359	0.251	0.808	0.548	0.869	0.874	0.604	0.783	-0.218
2	0.321	-0.723	0.125	0.645	-0.051	0.082	-0.555	-0.314	-0.759
3	0.837	0.263	0.028	-0.199	-0.097	0.138	-0.457	0.026	0.283

l_{ki} と因子負荷量 $r(k, i)$ を表-9, 表-10 に示す。固有ベクトルは主成分 Z_k を算出する際にもとの変量 x_i にかかる係数であり、因子負荷量は主成分 Z_k ともとの変量 x_i との相関を示す。この表から、各期間ともに第 1 主成分は変量 $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ の因子負荷量が大きく、恒流の強さを表す主成分と考えられる。特に、 x_3, x_6 との因子負荷量が大きいことから、中層の恒流は全層における平均的恒流を代表していると考えられる。第 1 主成分に対して、風を表す変数 x_1, x_2 は $x_3 \sim x_8$ までと同符号であり、流量 x_9 は異符号である。これは恒流の各成分に対して、風は強める方向に働き、流量は弱める方向に働くことを示している（恒流は正負を考えているので、南西方向の恒流が強まることは数学的には恒流の x, y 成分が減少することである）。また、流量 x_9 の第 1 主成分に対する因子負荷量の絶対値はデータ期間が短くなるにつれて減少している。風 x_1, x_2 の因子負荷量はデータ期間によってあまり変化していない。第 2 主成分は風の成分と流量の変動がカップリングした量、第 3 主成分は風の x 成分の変動に関する量と考えられるが、風と流量には相関があるので、第 2, 3 主成分と各層の恒流との関係は複雑になっており、物理的解釈が難しい。

5. 25 時間移動平均による恒流

5.1 各層の恒流と風との相関

いままでの議論で風および海域への淡水流入量が恒流に与える影響が大きいことがわかった。ここでは、15 日

間より短い時間スケールでの風が流れに及ぼす影響を調べる。当然、淡水流入量も流れに影響を及ぼすが、さきほどの主成分分析の結果より、時間スケールが短くなると淀川の流量は恒流の強さの変動に対して相関が低くなっている。また、手元にあるデータは枚方における淀川の日単位のデータなので、このデータが短い時間スケールでの MT 局への淡水流入をどれだけよく表しているかは疑問である。そこで、ここでは流れに及ぼす風の影響のみを対象とする。

流れ、風ともに日周期、半日周期の周期成分が卓越しているため、生データのままで両者の関係は把握しにくい。そこで、流れに 25 時間、風に 24 時間の移動平均の操作を施し、解析を行った。同様な解析^{(21), (22)}は他の海域においてもみられる。移動平均の周期を T とすると、移動平均操作により、周期 T の波動成分と同時に T を基本周期とする調和波 ($T/2$ 周期成分, $T/3$ の周期成分・・・など) も消失する⁽²³⁾。したがって、25 時間移動平均を実施した後の流れは、日周期および日周期を基本周期とする潮流成分を含まないものと考えてよく、その意味で恒流と考えてよい。風についても同様なことがいえる。

解析の対象とした区間は、1979 年 6 月 1 日 (区間 I)、1979 年 9 月 1 日 (区間 II)、1980 年 4 月 1 日 (区間 III)、1981 年 1 月 1 日 (区間 IV)、それぞれ 1 時から 1024 時間 (約 43 日間) である。これらの期間は欠測の少なさを考慮して、夏・秋・春・冬に対応させて選んだ。表-11 に、風と各層の恒流との相関を示す。() 内の数字は風

表-11 風と各層の恒流との相関

		区間 I		区間 II		区間 III		区間 IV	
		w_x	w_y	w_x	w_y	w_x	w_y	w_x	w_y
表層	u	0.425 (3)	0.631 (2)	0.190 (0)	0.342 (8)	0.436 (0)	0.833 (4)	0.273 (0)	0.432 (11)
	v	0.476 (3)	0.744 (4)	0.052 (28)	0.301 (19)	0.271 (19)	0.727 (6)	0.428 (22)	0.234 (2)
中層	u	0.425 (8)	0.700 (6)	0.001 (17)	0.287 (24)	0.471 (14)	0.640 (15)	-0.100 (0)	0.070 (15)
	v	0.503 (5)	0.698 (5)	0.040 (0)	0.305 (11)	0.458 (5)	0.572 (13)	0.695 (3)	-0.047 (0)
底層	u	0.265 (17)	0.525 (20)	-0.580 (0)	0.193 (36)	0.285 (20)	0.286 (32)	0.091 (0)	0.084 (4)
	v	0.483 (6)	0.603 (10)	0.083 (6)	0.414 (14)	0.303 (7)	0.376 (18)	0.120 (0)	-0.122 (23)

が流れに影響を及ぼすまでの遅れ時間である。両者の相互相関が最大となるずらし時間を採用した。この表によると、区間 I では風と各層の恒流とは高い相関を示し、区間 III では風と表層の恒流は高い相関を示し、底層になるに従って相関は低くなることわかる。また区間

II, IV は相関があまり高くない。

同じデータを用いて計算した、風と各層の恒流とのコヒーレンスとフェイズを 図-19 (a), (b), (c), 図-20 (a), (b), (c), 図-21 (a), (b), (c), 図-22 (a), (b), (c) に示す。区間 IV のコヒーレンスは他の区間のものに比べて低く

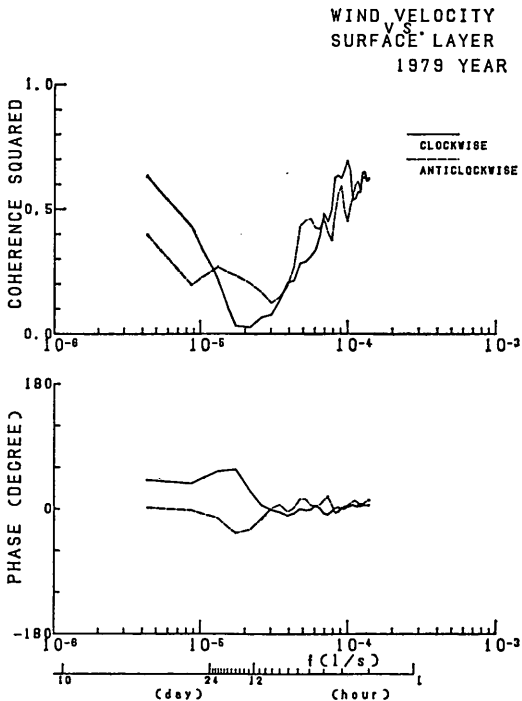


図-19 (a) コヒーレンスとフェイズ (海上風と表層流, 区間 I)

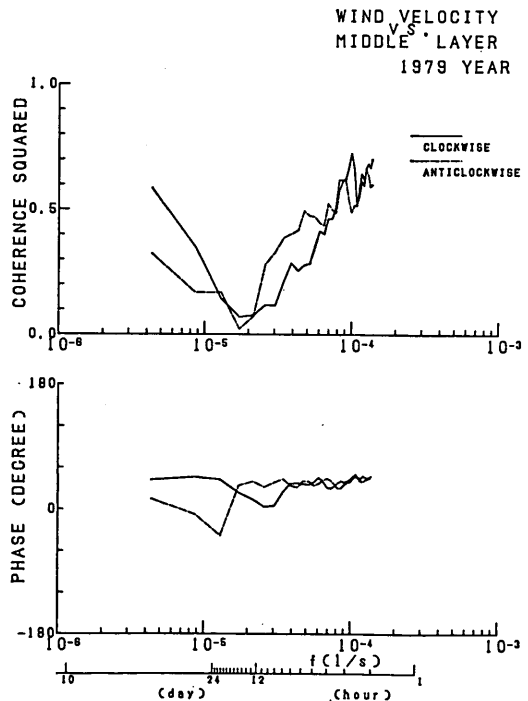


図-19 (b) コヒーレンスとフェイズ (海上風と中層流, 区間 I)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

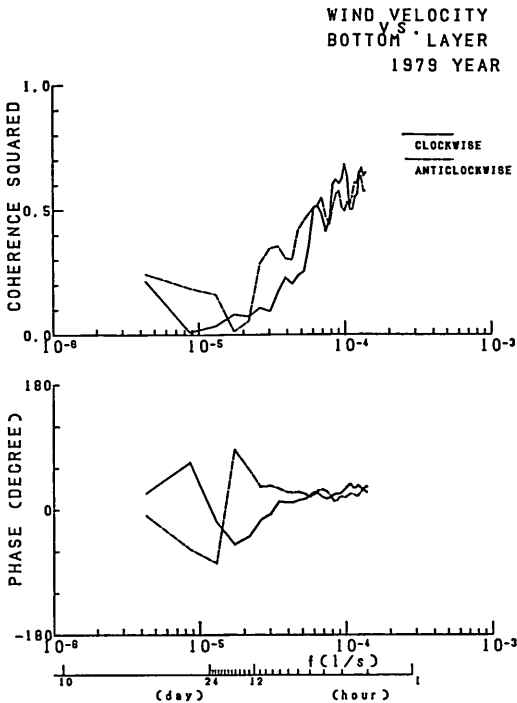


図-19(c) コヒーレンスとフェイズ (海上風と底層流, 区間 I)

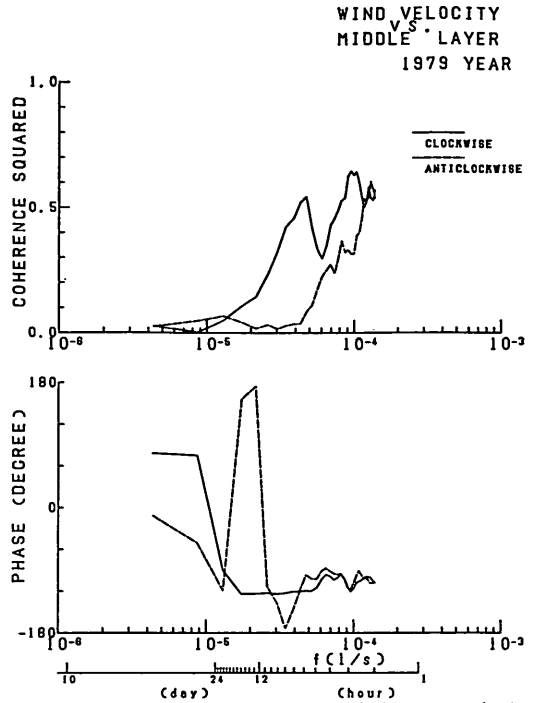


図-20(b) コヒーレンスとフェイズ (海上風と中層流, 区間 II)

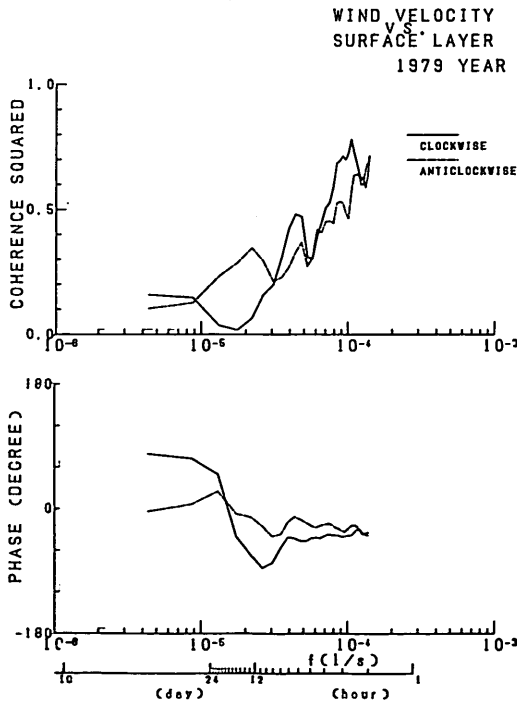


図-20(a) コヒーレンスとフェイズ (海上風と表層流, 区間 II)

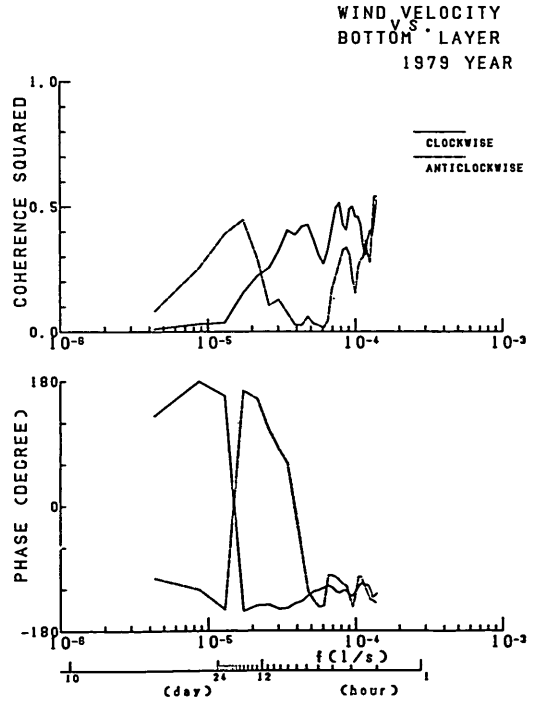


図-20(c) コヒーレンスとフェイズ (海上風と底層流, 区間 II)

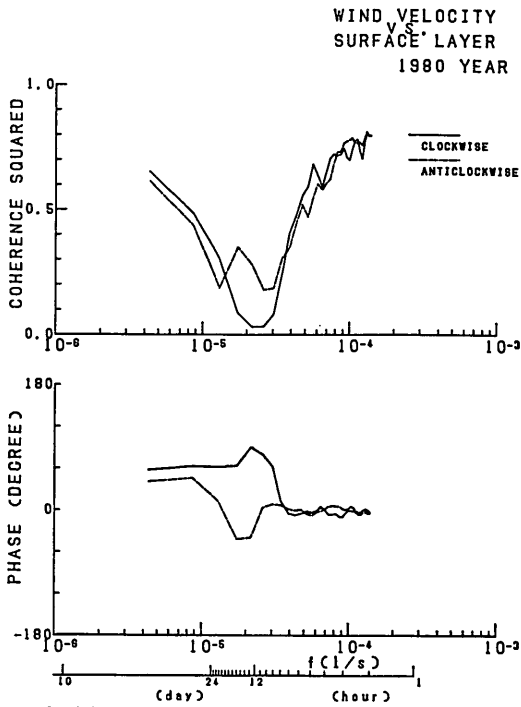


図-21 (a) コヒーレンスとフェイズ (海上風と表層流, 区間 III)

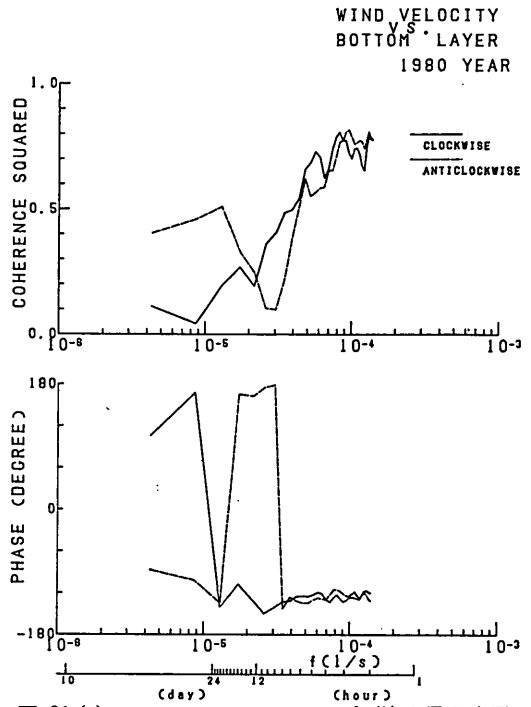


図-21 (c) コヒーレンスとフェイズ (海上風と底層流, 区間 III)

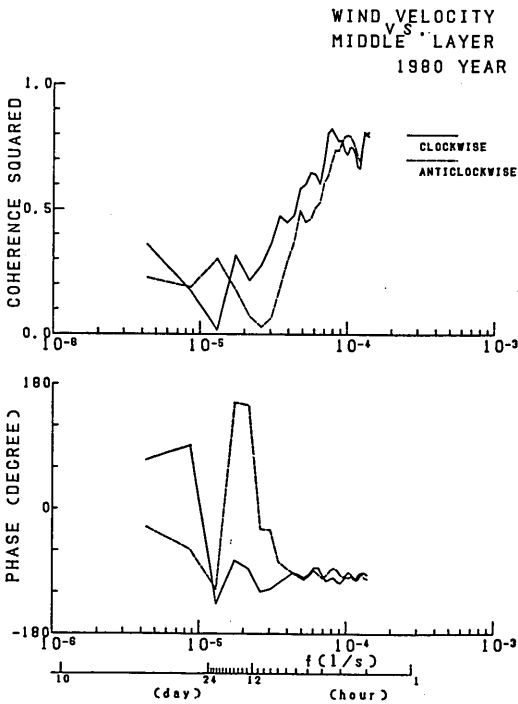


図-21 (b) コヒーレンスとフェイズ (海上風と中層流, 区間 III)

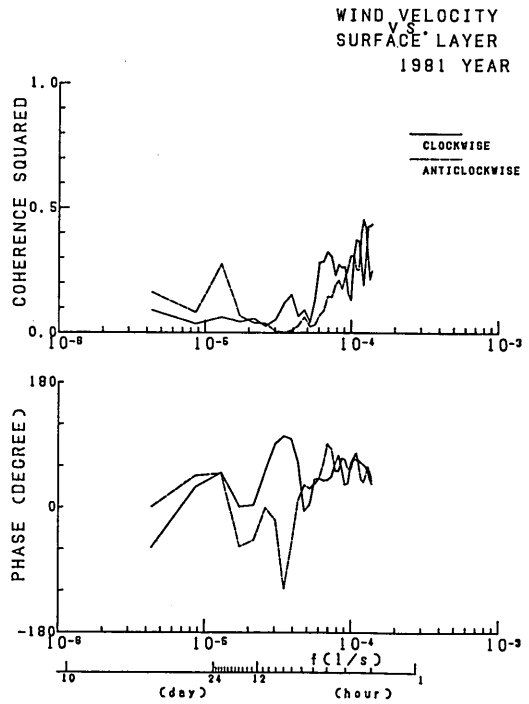


図-22 (a) コヒーレンスとフェイズ (海上風と表層流, 区間 IV)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

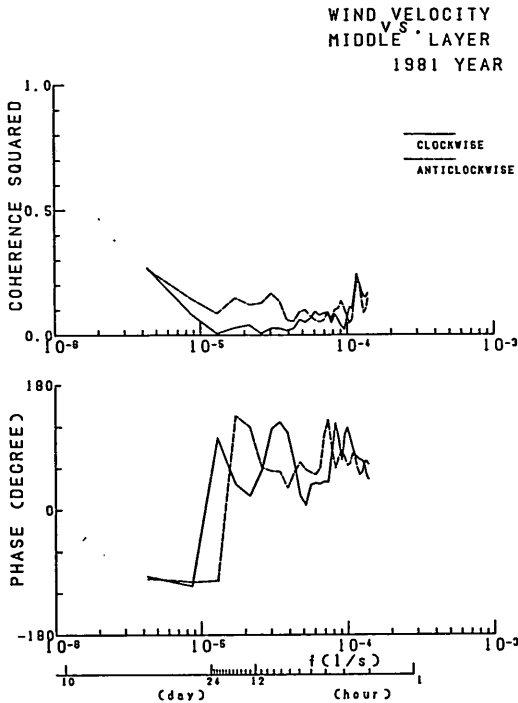


図-22 (b) コヒーレンスとフェイズ (海上風と中層流, 区間 IV)

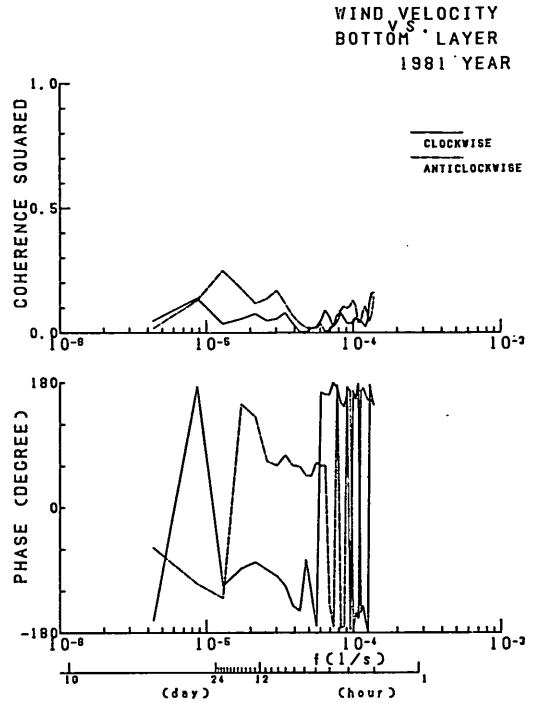


図-22 (c) コヒーレンスとフェイズ (海上風と底層流, 区間 IV)

なっている。区間 II は日周期より長周期側でコヒーレンスが低い。各区間とも底層になるにつれて位相のずれが大きくなっている。

5.2 重回帰分析による風の影響の検討

いま、風の x, y 成分を説明変数、恒流の x, y 成分をそれぞれ目的変数として以下のような重回帰式を考える。

$$u_i(t) = a_{0i} + a_{1i} \cdot w_x(t - \tau_{xi}) + a_{2i} \cdot w_y(t - \tau_{yi}) \quad i=1, 2 \quad (4)$$

ここで、 w_x, w_y は風の東方、北方成分 (m/s)、 u_1, u_2 は恒流の東方、北方成分 (cm/s)、 τ_{xi}, τ_{yi} は流れに影響を及ぼすまでの風の遅れ (h)、 a_{0i}, a_{1i}, a_{2i} は定数、 t は時間である。各データ区間に対して重回帰分析^{(13), (14)}を行った結果を表-12 (a), (b), (c), (d) に示す (重回帰分析の詳細

表-12 (a) 重回帰分析表 (区間 I)

		a_0	a_1	a_2	F	R^2
表層	u	-6.045	-0.0054 (-0.001)	1.099 (0.632)	337.6	39.8
	v	-7.154	-0.306 (-0.070)	1.517 (0.792)	639.5	55.6
中層	u	-4.543	-0.206 (-0.059)	1.131 (0.739)	495.5	49.3
	v	-4.939	0.177 (0.052)	0.994 (0.663)	488.7	48.9
底層	u	-1.568	-0.303 (-0.183)	0.482 (0.653)	214.8	29.6
	v	-1.808	0.302 (0.133)	0.511 (0.512)	303.3	37.3

表-12 (b) 重回帰分析表 (区間 II)

		a_0	a_1	a_2	F	R^2
表層	u	-4.904	0.095 (0.068)	0.368 (0.315)	70.1	12.1
	v	-4.093	-0.0024 (-0.002)	0.303 (0.301)	50.8	9.1
中層	u	-5.082	-0.184 (-0.131)	0.396 (0.338)	54.7	9.7
	v	-5.786	-0.098 (-0.079)	0.347 (0.334)	55.9	9.9
底層	u	-2.913	-0.486 (-0.565)	0.083 (0.116)	274.8	35.0
	v	-3.131	-0.096 (-0.091)	0.399 (0.449)	110.7	17.8

表-12 (c) 重回帰分析表 (区間 III)

		a_0	a_1	a_2	F	R^2
表層	u	-6.829	0.440 (0.126)	1.432 (0.783)	1230.5	70.7
	v	-6.071	0.494 (0.235)	0.795 (0.715)	715.1	58.3
中層	u	-3.733	0.416 (0.270)	0.437 (0.539)	456.4	47.2
	v	-3.865	0.378 (0.263)	0.347 (0.461)	318.6	38.4
底層	u	-1.408	0.205 (0.201)	0.110 (0.202)	66.3	11.5
	v	-2.478	0.206 (0.177)	0.185 (0.302)	102.3	16.7

表-12 (d) 重回帰分析表 (区間 IV)

		a_0	a_1	a_2	F	R^2
表層	u	-3.173	0.196 (0.228)	0.916 (0.407)	159.7	23.8
	v	-4.235	0.392 (0.486)	0.673 (0.321)	201.6	28.3
中層	u	-3.262	-0.052 (-0.118)	0.001 (0.092)	9.49	1.8
	v	-4.653	0.400 (0.703)	0.088 (0.059)	482.2	48.6
底層	u	-4.136	0.030 (0.094)	0.071 (0.087)	8.25	1.6
	v	-2.274	0.059 (0.180)	-0.155 (-0.181)	23.3	4.4

については付録 C を参照されたい)。 a_1, a_2 の () 内の値は、変数を平均 0、分散 1 に標準化したときの値である。表中の F は回帰による分散を回帰からの分散で割ったもので分散比といわれる。この F は、帰無仮説「 x_1, \dots, x_p も y の説明になんら役立つでない」ともとでは、回帰残差が正規分布に従うという条件で自由度 ($p, n-p-1$) の F 分布をするので、有意水準 α に対する F 表の値 $F(p, n-p-1; \alpha)$ と比較して有意性の検定を行うことができる。ここでは、 $p=2, n=1024$ であるから、 $\alpha=5\%$ とすれば、 F は 3.00 となる。 F が 3.00 以上であれば、回帰分析は 5% 水準で有意であると言える。また、表中の R^2 は寄与率と呼ばれ、目的変数 y の

全体の変動のうち、 x_1, x_2, \dots, x_p に対する回帰によって説明される部分の百分率を示す。 F 値と R^2 には一義的な関係がある。表-12 より、風と各層の流れとの相関が高いものほど、重回帰分析が有意で寄与率が高いことがわかる (区間 I, III)。また、底層になるほど寄与率は低くなっている。区間 II, IV では寄与率は高くない。実際に観測された恒流と式 (5) の重回帰式で求めた流速ベクトルの比較を 図-23 (a), (b), (c), (d) に示す。この図から、寄与率の高い区間 I や III は流動をよく再現していることがわかる。区間 II, IV は細部までは一致しないが全体の傾向をとらえている。

以上のことより、期間により差はあるけれども、25 時

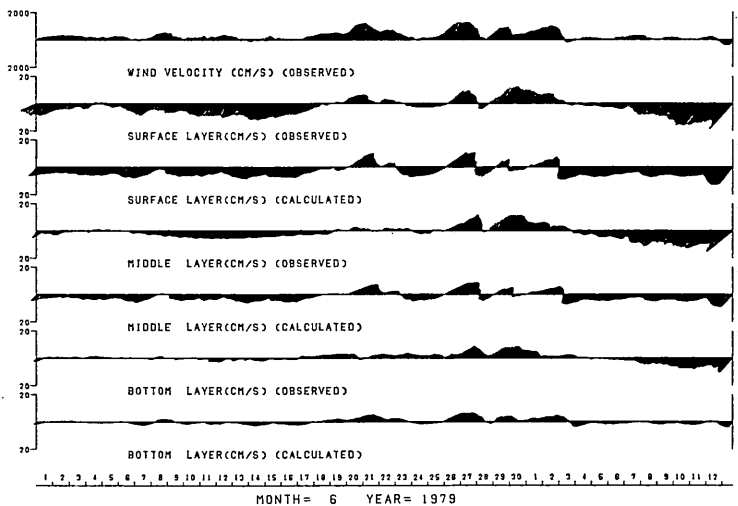


図-23 (a) 重回帰分析結果 (区間 I)

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響

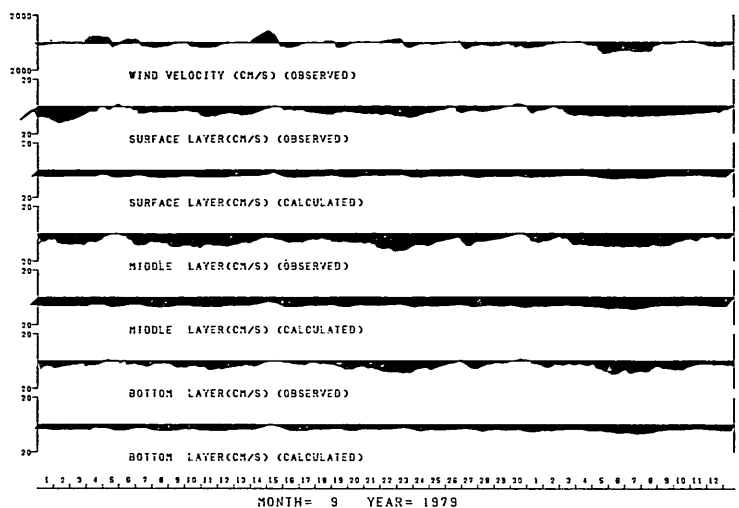


図-23 (b) 重回帰分析結果 (区間 II)

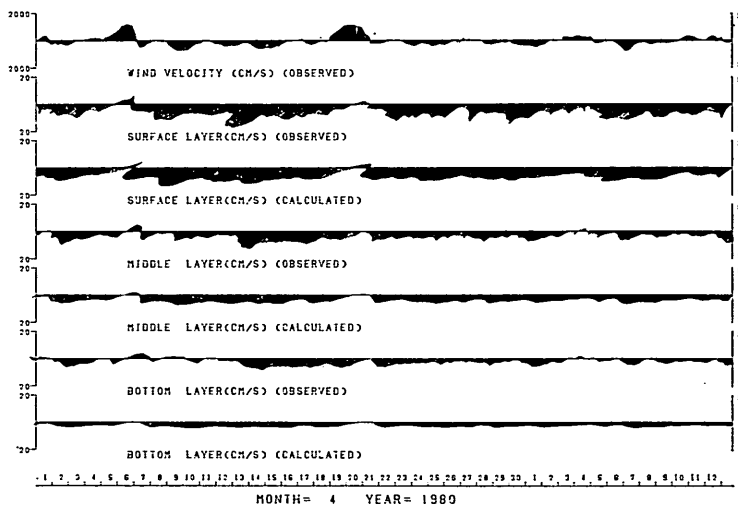


図-23 (c) 重回帰分析結果 (区間 III)

間移動平均による恒流は、風の影響を受けていることがわかる。解析を実施したなかで、もっとも影響を受けている期間では、恒流の変動のうち、表層では 58~70%、中層では 38~47%、底層では 12~17% が風の変動で説明できる。

6. 結 論

恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響を、MT局での潮流、海上風および枚方での淀川の流量データを用いて、

スペクトル解析や多変量解析により検討した。ここで、明らかになった主要な結果を以下に示す。

(1) 海上風は日周期と半日周期にエネルギーのピークを持ち、北方成分よりも東方成分のほうがエネルギーレベルが高い。また、運動の回転方向は時計まわりのほうがまさっている。各周波数において、海上風の楕円運動の長軸の安定度は低い。

(2) 各層において、日周潮流と半日周潮流が卓越している。全体的には、北方成分が東方成分よりもエネルギー

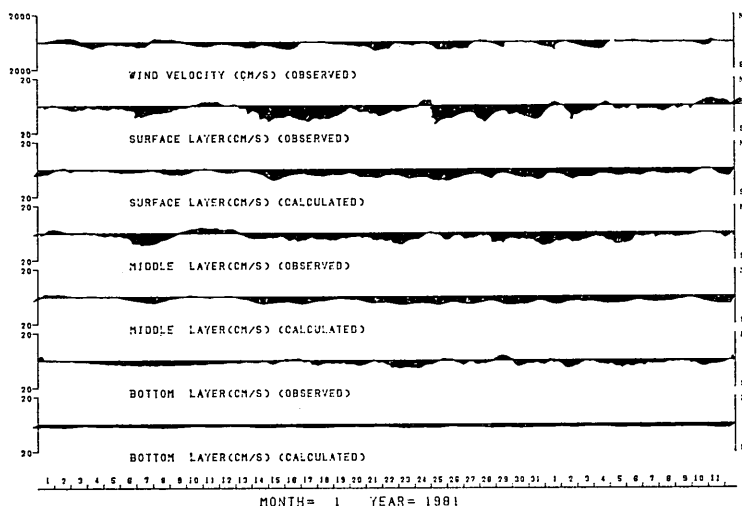


図-23 (d) 重回帰分析結果 (区間 IV)

レベルが高い。日周潮流と半日周潮流の大きさの関係は、北方成分については各層ともにほぼ同じで半日周潮流が大きいが、東方成分については表層は半日周潮流に対する日周潮流の割合が高くなっており、底層では低くなっている。表層の流れは風のエネルギー分布と合致しており、流れが海上風の影響を受けている可能性があることを示している。

(3) 各層において、流れの楕円運動の平均長軸方向は各周波数でほぼ $30\sim 60^\circ$ (磁北から時計まわりを正) である。長軸の安定度は4日より長い周期とスペクトルがピークを示す周期で高く、特に半日周潮流と日周潮流の長軸方向は非常に安定している。

(4) 海上風と各層および各層間のコヒーレンスとフェイズの計算より、流れと風の間には何らかの相関があり、風の作用は流れに影響を及ぼしていることが示される。しかし、流れの強い周期成分のため、生データのままだではこの影響を明確にすることは難しい。

(5) 年間データの調和解析より求めた恒流は、各層でほぼ南西流であり、相対的に底層の値が小さい。その強さは表層で $3\sim 8\text{ cm/s}$ 、中層で $3\sim 7\text{ cm/s}$ 、底層で $2\sim 4\text{ cm/s}$ 程度である。この恒流の強さは海域への淡水流入量と強い正の相関を持つ。風は年間スケールではあまり変動しないので、年間スケールの恒流の変動には影響が少ないと考えられる。

(6) 各層の恒流、恒流を求めた期間で平均化した海上風および淀川の平均流量を変量とした主成分分析から、

90日、30日、15日間調和解析による各層の恒流の東方、北方成分は海上風の東方、北方成分とは正の相関、淀川の流量とは負の相関を持つことがわかる。これは風が恒流に対して順風であれば恒流が強まり、逆風であれば弱まり、さらに淀川の流量が増加すれば南西方向に恒流が増加することを示している。データの期間が短くなるにつれて、風との相関はあまり変わらないが、流量との相関は低くなる。

(7) 25時間移動平均による恒流の変動は、風の24時間移動平均値を説明変数とした重回帰式によってよく表される。データ期間によって差はあるが、恒流と風との相関が強い期間で、恒流の変動のうち、表層では $58\sim 70\%$ 、中層では $38\sim 47\%$ 、底層では $12\sim 17\%$ が風によって説明される。表層ほど風の影響を受けている。

7. あとがき

本報告では、風および淡水流入量が恒流に与える影響を現地データからある程度定量的に把握することができた。同種のデータを解析する際の有効な資料として、本報告が活用されることが期待できる。

初めにも述べたように、恒流が物質の輸送、分散に果たす役割は大きなものがある。今後ますます、内湾の環境保全のためにも、恒流の発生要因については研究されるであろう。今回は現地データによる解析であったが、更に数値シミュレーションや水理模型実験により恒流について研究を重ねていく所存である。

最後に、MT局での観測に携わり、貴重なデータを提供していただいた第三港湾建設局の関係者の皆様に心から感謝いたします。研究を進めるにあたって、長岡技術科学大学助教授早川典生氏からは貴重な御指導、御助言を載いた。また、報告のとりまとめには、当所の田中則男海洋水理部長より多くの助言を載いた。ここに、記して感謝の意を表します。図面の作成には、当研究所海洋水理部海水汚染水理研究室佐藤英次技官、石川裕二学生の協力を得た。心より感謝いたします。計算は、すべて当研究所所有の電子計算機 ACOS-800 II による。また、図面の1部は自動図化機 DRASTM 9000 によるものである。(1982年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 杉本隆成・上嶋英機・安田秀一・柳 哲雄・樋口明生： 潮汐残差環流の生成機構について，中国工業技術試験所報告，No. 1, 1976, pp. 35~50.
- 2) 石川雅紀・熊谷幹郎・西村 肇・藤原建紀・早川典生： 密度成層をとり入れた大阪湾恒流の水理模型実験，第27回海岸工学講演会論文集，1980, pp. 439~442.
- 3) 大西行雄： 大阪湾の恒流に関する数値実験，第26回海工学講演会論文集，1979, pp. 514~518.
- 4) 大西行雄・国司秀明・吉松康公・秋友和典： 内湾の物質分散過程における潮流と恒流の相乗効果，京大防災研究所年報第23号B-2，昭和55年4月，pp. 319~332.
- 5) 長島秀樹・岡崎守良： 冬季における東京湾の流況と海況，沿岸海洋研究ノート，第16巻第2号，1979, pp. 76~86.
- 6) 藤原建紀： 大阪湾の恒流（日平均流）の変動について，日本海洋学会春季大会講演要旨集，1979, pp. 97~98.
- 7) 土砂による海水汚濁の予測方法—手法開発のための調査研究（通年報告書），運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所，昭和55年3月.
- 8) 海象データ解析調査報告書（第一報），第三港湾建設局関西国際空港調査室，（財）日本気象協会関西本部，昭和55年3月.
- 9) 高杉由夫・田辺弘道・肥後竹彦・宝田盛康・安田秀一： 広湾における一年間潮流観測結果について，中国工業技術試験所報告，No. 7, 1979, pp. 1~17.
- 10) 高杉由夫・肥後竹彦・壺口英昭・宝田盛康： 安芸灘における流速変動特性について，中国工業技術試験所報告，No. 17, 1982, pp. 13~31.
- 11) 力石国男・光易 恒： スペクトル計算法と有限フーリエ級数，九州大学応用力学研究所報，第39号，1973, pp. 77~104.
- 12) 日野幹雄： スペクトル解析，朝倉書店，1977, pp. 254~264.

- 13) Gonella, J.: A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series, *Deep-Sea Research*, Vol. 19, 1972, pp. 833~846.
- 14) Crew, H. and N. Plutchak: Time varying rotary spectra, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 30, 1974, pp. 61~66.
- 15) プログラムライブラリー (L024)——潮汐・潮流の調和分解，港湾技術研究所，1979.2.
- 16) 村上和男： 最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度，港湾技研資料，No. 369, Mar. 1981, p. 38.
- 17) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正： 多変量解析法，日科技連，1971, p. 430.
- 18) 奥野忠一・芳賀敏郎・矢島敬二・奥野千恵子・橋本茂司・古河陽子： 統多変量解析法，日科技連，1976, p. 299.
- 19) 鈴木正明・大内 東・小峰 淳・福岡二郎・加地郁夫： 主成分分析による水質データの解析——東京湾における栄養塩，クロロフィルなどの変動——，海と空，第56巻第4号，1981, pp. 161~169.
- 20) 藤原建紀・平野敏行： 排水拡散に及ぼす風の影響について，海と空，第56巻第1号，1980, pp. 17~27.
- 21) 俵 悟・藤原建紀： 別府湾における風による恒流の変動について，日本海洋学会春季大会講演要旨集，1980, pp. 95~96.
- 22) 油田晃三・松山優治・辻 正明： 東京湾内の流動に及ぼす風の効果，海と空，第57巻第1号，1981, pp. 31~40.
- 23) 亀田弘行・池淵周一・春名 攻： 新体系土木工学2 確率・統計解析，技報堂出版，1981, pp. 243~287.

記 号 一 覧 表

A	: 調和分解における分潮の引数
a_0	: 重回帰分析における定数項
a_1	: 恒流に対する風の東方成分の偏回帰係数
a_2	: 恒流に対する風の北方成分の偏回帰係数
B	: 調和分解における分潮の引数
coh^2	: コヒーレンス
C_R	: 回転係数
$C.V.$: 変動係数
E	: 平均長軸方向の安定度
f	: 調和分解における天文学的な変数
F	: 分散比
K_1	: 日月合成日周潮流
l_{kt}	: 主成分 Z_k に対する固有ベクトル

- m : 平均以上の分散を持つ主成分の数
- M_2 : 太陽半日周潮流
- n : 重回帰分析におけるデータ数
- O_1 : 太陽日周潮流
- p : 主成分分析におけるもとの変数の数あるいは重回帰分析における説明変数の数
- $r(k, i)$: 主成分 Z_k のもとの変量 x_i への因子負荷量
- R^2 : 重回帰分析における寄与率
- S_a : 太陽年周潮流
- S_{Sa} : 太陽半年周潮流
- S_2 : 太陽半日周潮流
- S_+ : 反時計まわりのスペクトル
- S_- : 時計まわりのスペクトル
- S_i : 全スペクトル ($=S_++S_-$)
- S.D. : 標準偏差
- T : 移動平均の周期 (h)
- U : 潮流の東方成分 (cm/s)
- U_0 : 恒流の東方成分 (cm/s)
- U_i : 分潮 i の東方成分の振幅 (cm/s)
- u_1, u_2 : 25 時間移動平均による恒流の東方・北方成分 (cm/s)
- V : 潮流の北方成分 (cm/s)
- V_0 : 恒流の北方成分 (cm/s)
- V_i : 分潮 i の北方成分の振幅 (cm/s)
- w_x, w_y : 24 時間移動平均による風の東方・北方成分 (m/s)
- x : 水平座標軸, 東方を正
- $x(t)$: 流速の x 成分の時系列
- x_i : 主成分分析におけるもとの変量
- y : 水平座標軸, 北方を正
- $y(t)$: 流速の y 成分の時系列
- z : 鉛直座標軸, 上方を正
- $z(t)$: 複素時系列 ($=x(t)+iy(t)$)
- Z_k : 第 k 主成分
- α : F 検定における有意水準
- θ : フェイズ
- κ_{iu}, κ_{iv} : 分潮 i の東方, 北方成分の遅角 ($^\circ$)
- τ_x, τ_y : 風 w_x, w_y が恒流に影響を及ぼすまでの遅れ時間 (h)
- ϕ : 平均長軸方向 ($^\circ$)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \{a_1(\sigma) \cos \sigma t + b_1(\sigma) \sin \sigma t\} d\sigma \quad (\text{A.1})$$

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \{a_2(\sigma) \cos \sigma t + b_2(\sigma) \sin \sigma t\} d\sigma \quad (\text{A.2})$$

ここで, σ は正值のみをとる角周波数である。いま, ベクトル (x, y) を複素数表示すると

$$\begin{aligned} z(t) &= x(t) + iy(t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \{Z_+(\sigma)e^{+i\sigma t} + Z_-(\sigma)e^{-i\sigma t}\} d\sigma \quad (\text{A.3}) \end{aligned}$$

となる。ここで,

$$Z_+(\sigma) = \frac{1}{2} \{(a_{1\sigma} + b_{2\sigma}) + i(a_{2\sigma} - b_{1\sigma})\} \quad (\text{A.4})$$

$$Z_-(\sigma) = \frac{1}{2} \{(a_{1\sigma} - b_{2\sigma}) + i(a_{2\sigma} + b_{1\sigma})\} \quad (\text{A.5})$$

である。いま, 正負領域で定義される角周波数 ω を用いると,

$$z(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty Z(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{A.6})$$

$$Z(\omega) = \int_{-\infty}^\infty z(t)e^{-i\omega t} d\omega \quad (\text{A.7})$$

ここで,

$$Z(\omega) = \begin{cases} Z_+(\sigma) & (\sigma = \omega, \omega \geq 0) \\ Z_-(\sigma) & (\sigma = -\omega, \omega \leq 0) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

いま, 式 (A.3) より $z(t)$ は半径 $|Z_+(\sigma)|$ の角周波数 σ の反時計まわりの円運動と半径 $|Z_-(\sigma)|$ の時計まわりの円運動を合成したもの (楕円運動) を各周波数成分について重ね合わせたものである。

以上のことより, ロータリースペクトルを以下のように定義する ($\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す)。

・反時計まわりスペクトル

$$S_+(\sigma) = \frac{2\pi \langle Z_+^*(\sigma) Z_+(\sigma) \rangle}{T} \quad (\text{A.9})$$

・時計まわりスペクトル

$$S_-(\sigma) = \frac{2\pi \langle Z_-^*(\sigma) Z_-(\sigma) \rangle}{T} \quad (\text{A.10})$$

・全スペクトル

$$S_i(\sigma) = S_+(\sigma) + S_-(\sigma) \quad (\text{A.11})$$

ここで, $*$ は共役複素数を表す。

S_- と S_+ の差は楕円の平均面積に比例するので, $(S_- - S_+)$ と S_i との比は全エネルギーの左まわり, 右まわり回転への分配比 (正ならば時計まわり, 負ならば反時計まわり) を表し, 回転係数と呼ばれる。

$$C_{R\sigma} = \frac{S_- - S_+}{S_i} \quad (\text{A.12})$$

付録 A ロータリースペクトル¹²⁾

いま, 2 組のベクトル時系列 $(x(t), y(t))$ を考える。

いま, Z_+ と Z_- の積をつくると

無相関なあらゆる 1 次式のなかで最大である。以下同様にして、 Z_m の分散は、 Z_1, Z_2, \dots, Z_{m-1} のすべてと無相関な 1 次式の中で最大である。

この第 2 の性質は、主成分 Z_1, Z_2, \dots, Z_m はもとの特性値 x_1, x_2, \dots, x_p のもつ情報の損失（ロス）が最小になるように要約した結果であると考えることができ、幾何学的に言えば p 次元空間の n 個の点を、その情報のロスを最小にして、 m 次元の超空間に投影することである。

m 個の主成分を求める係数 $\{l_{ki}\}$ ($k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, p$) は、もとの変数の相関行列 R の固有方程式

$$|R - \lambda I| = 0 \quad (B.3)$$

を満たす固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ の大きいほうから順に m 個 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ とり、対応する固有ベクトル ($\{l_{1i}\}, \{l_{2i}\}, \dots, \{l_{mi}\}; i=1, 2, \dots, p$) として求まる。

ただし、

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

$$r_{ii'} = V_{ii'} / \sqrt{V_{ii}V_{i'i'}}, \quad V_{ii'} = S_{ii'} / (n-1)$$

$$S_{ii'} = \sum_{\alpha=1}^n (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\alpha i'} - \bar{x}_{i'})$$

ここで、取り上げた特性値の測定単位が質的に異なるときは、いずれも平均 0、分散 1 になるように以下の式で基準化するのがよい。

$$x_{\alpha i'} = (x_{\alpha i} - \bar{x}_i) / \sqrt{V_{ii}} \quad (B.4)$$

こうすると、 $x_{\alpha i'}$ は無名数となり、その分散・共分散行列はもとの変数 $x_{\alpha i}$ の相関行列に一致する。なお、測定単位が同一の場合ももとの変数の分散・共分散行列から主成分を求めてもよいが、その場合は以下の記述が少し変わってくる。ここでは、主成分は相関行列から求めるものとする。

こうして求めた主成分 Z_k の分散は固有値 λ_k に等しい。 x_i' の分散は 1 であるので、変数の総分散は p となる。主成分 Z_k の分散のこの総分散に対する割合（これを寄与率と呼ぶ）は λ_k/p で、 m 個の主成分の累積寄与率は

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k / p \quad (B.4)$$

で与えられる。主成分 Z_k ともとの特性値 x_i' との相関は、因子負荷量から検討され、因子負荷量は以下のように定義される。

$$r(Z_k, x_i') = \sqrt{\lambda_k} l_{ki} \quad (k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, p) \quad (B.5)$$

因子負荷量は 2 乗して、 i について加えると λ_k になる。

$$\sum_{i=1}^p r^2(Z_k, x_i') = \sum_{i=1}^p \lambda_k l_{ki}^2 = \lambda_k \quad (B.6)$$

また、 m 個の主成分のもとの変数 x_i' に対する寄与率 ν_i は次式で与えられる。

$$\nu_i = \sum_{k=1}^m r^2(Z_k, x_i') = \sum_{k=1}^m \lambda_k l_{ki}^2 \quad (B.7)$$

ここで、 $m=p$ までとると、 ν_i の値は 1 となる。

上述の式を用いれば、一連のデータから主成分の係数、各主成分の寄与率が計算されるわけであるが、問題はその解釈である。その際、特に重要なのは主成分の数 m をいくつまでとるかである。奥野らは、経験的に以下のように答えを与えている。

1) m 個までの主成分の累積寄与率が 60 ないし 80% を超えること。どちらを取るかは解析の目的による。非常に大まかな情報だけを取り出せばよいときは 60% 前後でよいし、情報のロスを小さくしたければ 80% 以上でなければならない。

2) 第 m 番目の主成分の寄与率が平均以上であること。この基準は、固有値 λ_m が 1 以上でなければならないことを示している。

3) m 個の主成分の各変数 x_i に対する寄与率 ν_i がどの x_i に対しても 50% 以上になるようにすること。この基準はかなりきびしい基準である。

付録 C 重回帰分析^{17), 18)}

重回帰分析とは、目的変数 y の値を最もよく推定するために、一組の説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p の線形結合を求める手法である。線形結合は

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (C.1)$$

で表され、重回帰式と呼ばれる。ここで、 b_0 は定数項、 b_i は y の x_i に対する偏回帰係数、 \hat{y} は回帰推定値である。式 (C.1) における定数 b_0 と偏回帰係数 b_i は、 n 組の観測データ $\{y_\alpha; x_{\alpha 1}, x_{\alpha 2}, \dots, x_{\alpha p}\}$ ($\alpha=1, 2, \dots, n$) を用いて、

$$Q = \sum_{\alpha=1}^n (y_\alpha - \hat{y}_\alpha)^2 \quad (C.2)$$

を最小にするという規準に従って計算される。この規準は y_α と \hat{y}_α の相関を最大にすることと同等である。

式 (C.2) の規準は

$$Q = \sum_{\alpha=1}^n (y_\alpha - b_0 - \sum_{i=1}^p b_i x_{\alpha i})^2 \implies \min \quad (C.3)$$

となり, $\frac{\partial Q}{\partial b_0}=0, \frac{\partial Q}{\partial b_i}=0$ より

$$b_i = \sum_{j=1}^p S^{ij} d_j \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (C.4)$$

$$b_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^p b_j \bar{x}_j \quad (C.5)$$

となる。ここで、 d_j は x と y との偏差相関、 S^{ij} は、 x の偏差平方和・積和行列 S の逆行列 S^{-1} の (i, j) 要素で、

$$d_j = \sum_{\alpha} (x_{\alpha j} - \bar{x}_j)(y_{\alpha} - \bar{y}) \quad (C.6)$$

$$S_{ij} = \sum_{\alpha} (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\alpha j} - \bar{x}_j) \quad (C.7)$$

であらわされる。

ここで、回帰係数の大きさを測定単位によって左右されないようにするためには各変数 x_i を平均 0、分散 1 に基準化 (x_i') すればよい。こうして求めた係数を標準偏回帰係数 b_i' と呼び、式 (C.4) で求められる普通の偏回帰係数との間には

$$b_i' = b_i \sqrt{\frac{S_{ii}}{S_{yy}}} \quad (C.8)$$

の関係がある。この標準偏回帰係数 b_i' は、 x_i 以外の説明変数の値を一定にしたままで、 x_i' を 1 動かしたときの y_i' の変化量を示す。しかし、実際には変数どうしに相関があるので、他の変数の値を固定したまま、 x_i だけを動かすのは困難であるので、この解釈を適用するには注意を要する。

いま、観測値 y_{α} ($\alpha=1, 2, \dots, n$) の全変動 (偏差平方和) S_{yy} を説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p に対する回帰による変動と回帰からの残差の変動の 2 つの部分に分解する。

$$\begin{aligned} S_{yy} &= \sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - \bar{y})^2 = \sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - Y_{\alpha} + Y_{\alpha} - \bar{Y})^2 \\ &= \sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - Y_{\alpha})^2 + \sum_{\alpha=1}^n (Y_{\alpha} - \bar{Y})^2 \\ &\quad + 2 \sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - Y_{\alpha})(Y_{\alpha} - \bar{Y}) \end{aligned} \quad (C.9)$$

ここで、 Y_{α} は x_1, x_2, \dots, x_p の回帰推定式

$$Y_{\alpha} = b_0 + b_1 x_{\alpha 1} + b_2 x_{\alpha 2} + \dots + b_p x_{\alpha p}$$

であり、 \bar{Y} はこれを α について平均したものである。ここで、式 (C.9) の右辺第 1 項は回帰からの残差を示し、残差平方和と呼ばれ、 S_e と表される。第 2 項は回帰推定値 Y_{α} の変動を表しているから、回帰による変動または回帰平方和と呼ばれ、 S_R と表される。

ここで、各変動因に対する自由度は、全体の自由度 $f_T = n-1$ 、回帰による自由度 $f_R = p$ 、回帰からの自由度 $f_e = n-p-1$ となる。いま、個々の観測値 y_{α} と回帰推定値との差つまり残差 e_{α} が正規分布に従うと仮定するならば、分散比 (F 値)

$$F = V_R / V_e \quad (C.10)$$

は、帰無仮説 H_0 : 「 $b_1 = b_2 = \dots = b_p = 0$ 、すなわち x_1, x_2, \dots, x_p も y の説明になんら役立たない」のもとでは、 F は自由度 $(p, n-p-1)$ の F 分布をするので有意水準 α に対する F 表の値 $F(p, n-p-1; \alpha)$ と比較して有意性の検定を行うことができる。

重相関係数を実測値 y_{α} とその回帰推定値 Y_{α} ($\alpha=1, 2, \dots, p$) との相関係数とし、 R で表す。

$$R = \frac{\sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - \bar{y})(Y_{\alpha} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - \bar{y})^2 \sum_{\alpha=1}^n (Y_{\alpha} - \bar{Y})^2}} \quad (C.11)$$

この R の 2 乗 (R^2) を決定係数あるいは寄与率とよび、 y の全体の変動 S_{yy} のうち x_1, x_2, \dots, x_p に対する回帰によって説明される部分 S_R の割合を示す。

$$S_R = R^2 S_{yy}, \quad S_e = (1 - R^2) S_{yy} \quad (C.12)$$

であるので、式 (C.10) の F 値は

$$F = \frac{V_R}{V_e} = \frac{S_R/p}{S_e/(n-p-1)} = \frac{R^2/p}{(1-R^2)/(n-p-1)} \quad (C.13)$$

となり、 R^2 だけの関数になる。したがって、分散分析の F 検定が重相関係数 R^2 の有意性検定と一致する。