

<ノート>

北潟湖における水位の変動関数について

吉田 耕一郎・宇都宮 高栄・村田 義公

Functions of the Variation of the Water Levels in Lake Kitagata

Kouichirou YOSHIDA, Takae UTSUNOMIYA, Yoshikimi MURATA

1 はじめに

平成4年度に北潟湖、三方五湖の富栄養化対策事業の一環として水質汚濁解析を行った¹⁾。解析はシミュレーションモデルにより行い、一定の精度で水質の現況再現、将来予測が可能となったが、さらに精度の向上をめざして平成5年度からモデルの改良に取り組んでいる。

湖内水の移動を表現する水理モデルでは、両湖とも感潮湖であることから潮位の変動関数を組み込んだ（日本海の潮汐とともに湖水位を変動させる）水収支式を設定している²⁾。しかし、潮位および湖水位の変動関数の算出³⁾にあたっては、気圧等の気象要因を考慮しなかったことと湖奥部に水位の連続観測地点がなかったことから、水位変動を精度良く再現するまでには至っていない。

今回、水理モデルの改良にあたり、湖全体の水位変化を把握するため北潟湖奥部の2地点に水位計を新設し、既設の水位計のデータと併せて解析を行った。さらに、気象要因も考慮して潮位および湖水位の関数化を試みた結果、実測水位を精度良く再現することができたので報告する。

2 調査方法

2.1 調査地点

潮位および北潟湖水位の調査地点を図1に示した。このうち、中湖および南湖は新設地点である。

2.2 使用データ

解析に使用した潮位および湖水位データの概要を表1に示した。また、気圧および降水量データは日本気象協会のSPDデータ（福井）1991年、1992年を使用した。

2.3 データ解析

2.3.1 フーリエ解析

潮位など周期的に変動するものはフーリエ解析することにより、固有の周期成分をsin関数として求めることが

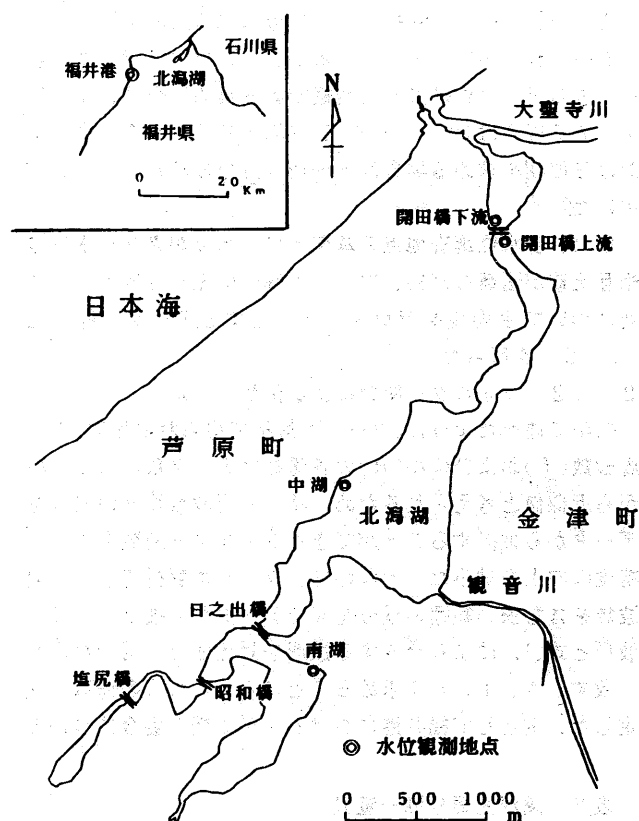


図1 調査地点

表1 潮位および湖水位データの概要

観測地点	データ解析期間	データ数	入力形態	調査機関
福井港（年変化）	1987.1.1～1992.12.31	2191	日平均系列	運輸省第一港湾建設局
“（日変化）	1991.1.1～1992.12.31	17544	時系列	“
開田橋下流（年変化）	1992.1.1～1994.12.31	1096	日平均系列	三国土木事務所
“（日変化）	1991.1.1～1992.12.31	15312	時系列	“
開田橋上流（年変化）	1992.1.1～1994.12.31	1096	日平均系列	“
“（日変化）	1991.1.1～1992.12.31	15312	時系列	“
中湖（日変化）	1995.1.11～1995.6.30	4104	時系列	環境科学センター
南湖（日変化）	1995.1.11～1995.6.30	4104	時系列	“

できる。そこで、前回の水理モデル作成時と同様に市販のソフト「活図」⁴⁾を用いて潮位および湖水位の日平均系列または時系列データをフーリエ解析し、式(1)で表されるsin関数を導いた。

$$H(T) = \mu + A \times \sin(2\pi f T + R) \quad \cdots (1)$$

$H(T)$: 周期関数

μ : 平均水位(m)

A : 振幅(m)

f : 周波数(日⁻¹)

T : 時間(日)

R : 位相(ラジアン)

ここで、フーリエ解析によって得られる周波数等の精度はデータ数が多いほどよくなるが、このソフトで一度に解析できるデータ数は最大8192個であるため、今回、年周期を求める場合は3～6年分の日平均系列データを、半日または日周期を求める場合は6～12ヵ月分の時系列データを用いた。

また、各水位調査地点の基準となる水位が異なり水位の相互比較が困難なため、フーリエ解析に先立ち各データ系列について平均値をゼロメートルとするデータの標準化($\mu = 0$)を行った。

2.3.2 フィルター関数による係数の決定

前項で述べたように、フーリエ解析で得られる振幅(A)、周波数(f)および位相(R)の各係数はデータ数による制約から近似値と考えられるため、特定の周波数範囲の成分をデータから抽出することができるフィルター関数を用いて精度の向上を試みた。すなわち、フーリエ解析で求めた周波数を含む狭い範囲の成分を実測データから抽出し、この波形と式(1)により合成する波形を対比させ、両者がより一致する A 、 f 、 R を求めることによりこれらの係数を決定した。例として福井港における一年周期の場合について

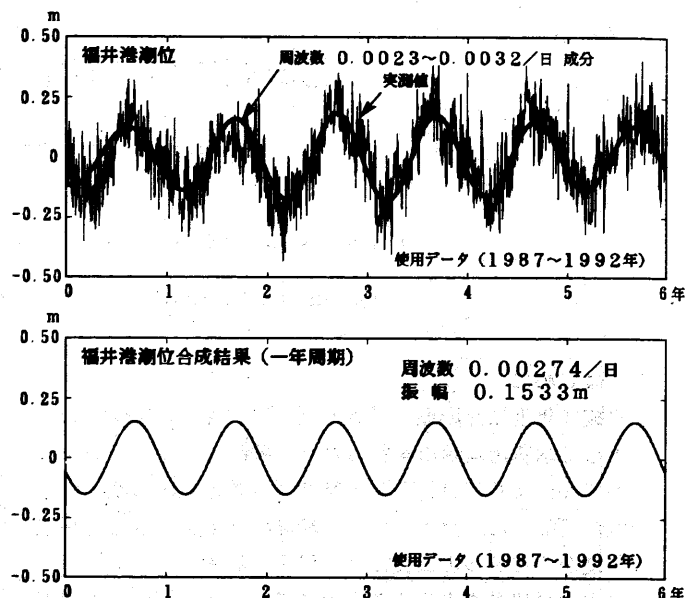


図2 フィルター関数による係数の決定(福井港一年周期)

図2に示した。上図に福井港の日平均潮位の実測値とフィルター関数により抽出した0.0023～0.0032/日の周波数成分の波形を重ね合わせたものを、下図に一年周期の合成波を示している。

2.4 水位の合成および照合

水位の合成および実測水位との照合は、周波数0.7/日以上成分(以下、「高周波成分」という。)とそれ以外の成分(以下、「低周波成分」という。)とに分けて行い、さらに、両者を加算した全成分について行った。

3 結果と考察

3.1 潮位変動の関数化について

潮汐現象は天体運動に起因する天体潮と気温、風、気圧等の気象要因に起因する気象潮に区分することができる。

表2 潮汐主要分潮一覧表

周 期	記 号	名 称	角速度(度/時)	周 期(時)	理論上の振幅の比
半 日 周 期	M_2	主太陰半日周潮	28.98410	12.42	0.45426
	S_2	主太陽半日周潮	30.00000	12.00	0.21137
	N_2	主太陰橢円潮	28.43973	12.66	0.08796
	K_2	日月合成半日周潮	30.08214	11.97	0.05752
一 日 周 期	K_1	日月合成日周潮	15.04107	23.93	0.26522
	O_1	主太陰日周潮	13.94304	25.82	0.18856
	P_1	主太陽日周潮	14.95893	24.07	0.08775
	Q_1	主太陰橢円潮	13.39867	26.87	0.03651
長 周 期	M_f	太陰半月周潮	1.09803	327.86	0.07827
	M_m	太陰月周潮	0.54437	661.30	0.04136
	S_{sa}	太陽半年周潮	0.08214	4382.76	0.03643
	S_a	太陽年周潮	0.04107	8765.52	気象潮

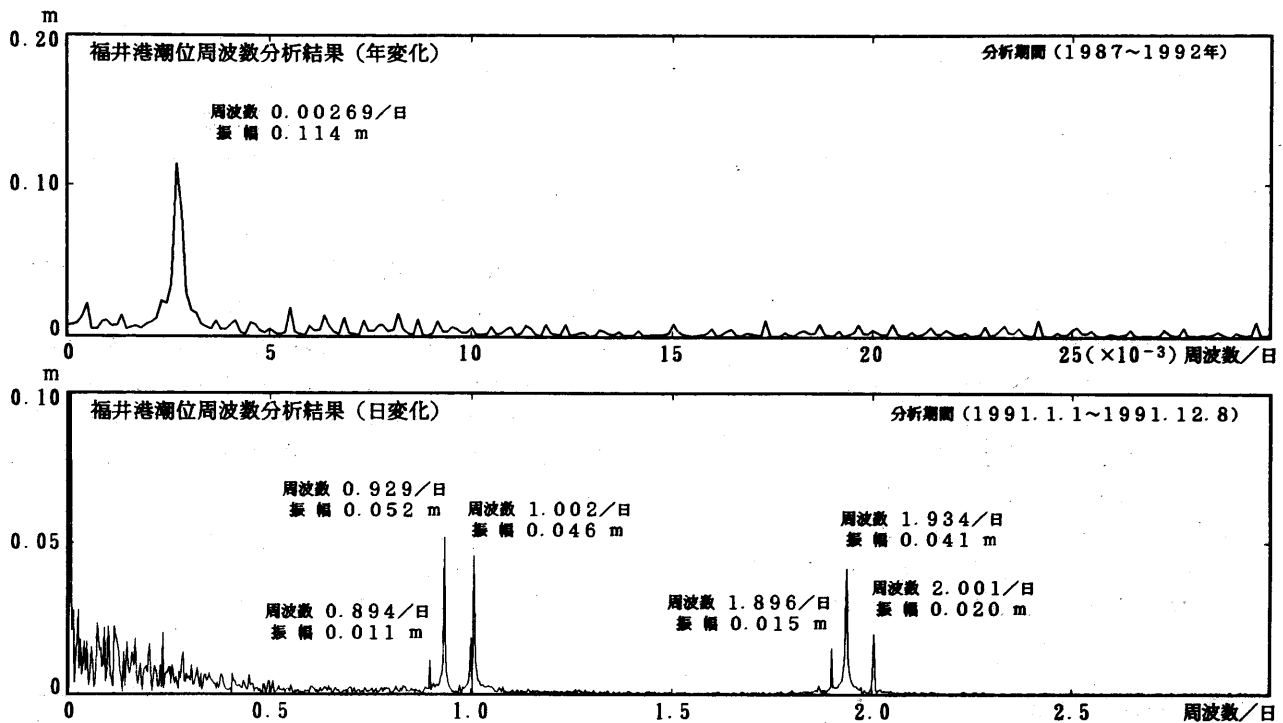


図3 福井港潮位の周波数分析結果

天体潮は主として月（太陰）および太陽の引力作用によって海面が周期的に昇降する現象をいい、表2⁵⁾に示すような半日周期から半年周期までの様々な周期成分（分潮）からなる（なお、太陽一年周期は気象潮に分類されるが、ここでは便宜上天体潮に含めることとする）。

したがって、天体潮はこれら周期成分の和として式(2)のように関数化できるが、周期成分の係数のうち一定と考えられるのは周波数（周期）だけであり、振幅および位相は観測地点および観測時期により異なってくるため、これらは地点ごとにその都度解析して求めなければならない。

なお、今回は潮位データとして北潟湖に近い福井港のデータを用いた。

$$H_a(T) = \sum_{i=1}^n A_i \times \sin(2\pi f_i T + R_i) \dots\dots(2)$$

$H_a(T)$: 天体潮

一方、気象潮は明確な周期性を有さないため関数化は容易でないが、後述するように潮位に与える影響は少ない。

3.1.1 福井港潮位の周期成分の解析

フーリエ解析による福井港の周波数分析結果を図3に示した。また、フィルター関数により決定した各周期成分の係数を表3に示したが、周波数については表2の数値とよく一致している。

表3 福井港潮位の周期成分

周期成分 (i)	周波数(日 ⁻¹) (f)	振 幅(m) (A)	位 相(度) (D*)	表2との対応	
				記 号	周 期(時)
1	0.00274	0.1533	205	S _a	8759.12
2	0.930	0.0574	76	O ₁	25.81
3	1.003	0.0590	127	K ₁	23.93
4	1.933	0.0616	346	M ₂	12.42
5	2.000	0.0231	350	S ₂	12.00
6	0.888	0.0126	222	Q ₁	27.03
7	1.892	0.0152	145	N ₂	12.68

* : $D \times \pi / 180 = R$ (ラジアン)

位相は1991年1月1日0時における値

3.1.2 福井港における高周波成分の合成

福井港潮位の高周波成分の合成は、表3の周期成分のうち振幅の大きい $i = 2 \sim 5$ の4成分を加算して行った。

図4に実測潮位データから抽出した高周波成分と合成結果を対比して示したが、両者の波形はよく一致している。また、約12時間ごとに満潮に、約14日ごとに大潮になっていることがわかる。

3.1.3 福井港における低周波成分の合成

低周波成分は気象潮にほぼ相当する。福井港の実測潮位データから抽出した低周波成分を図5に細い実線で示しているが、その変動はかなり大きい。

そこで、気象要因の中で最も影響が大きいと思われる気圧について低周波成分との比較により検討した結果、1ヘクトパスカルの気圧変化が1cmの潮位変動をもたらし、その変動は気圧変化から約10時間後に現れることがわかった。これを関数式で表すと式(3)のようになる。

$$H p_T = -0.01 \times (P_{T-10} - 1015.1) \quad \cdots \cdots (3)$$

$H p$: 気圧による潮位変動 (m)

P : 標高0m (海面) における気圧 (ヘクトパスカル)

1015.1 : 福井県における1961年～1990年の平均気圧^{*)}
(ヘクトパスカル)

図5に合成太陽一年周期成分(表3の $i = 1$ 成分: 図2の下図参照)にこの気圧による潮位変動成分(以下、「気圧成分」という。)を加算したものと低周波成分とを重ねて示した。一部大きくかけ離れているのは風波によるものと思われるが、両者の傾向はおおむね一致していた。そこで、低周波成分の合成は太陽一年周期成分と気圧成分を加算して行うこととした。

3.1.4 福井港における潮位変動関数

以上のことから、潮位変動関数は式(2)と式(3)により式(4)として表すことができる。

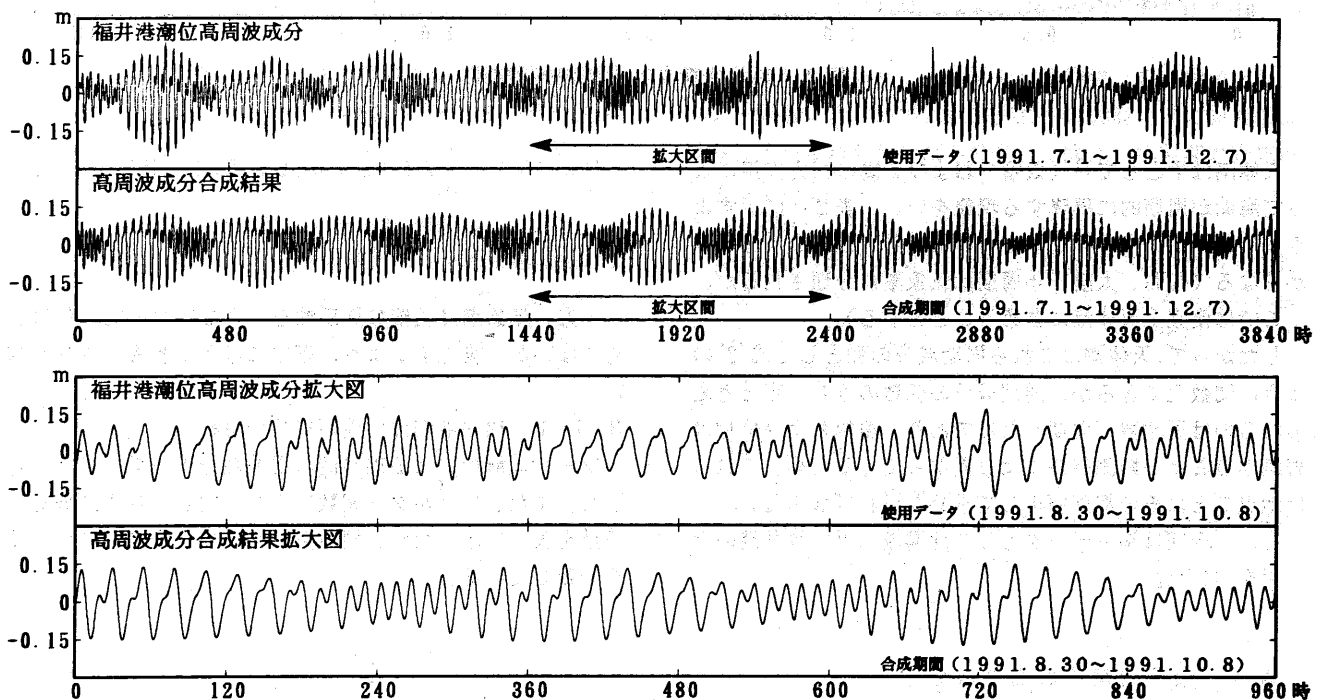


図4 福井港潮位の高周波成分とその合成図

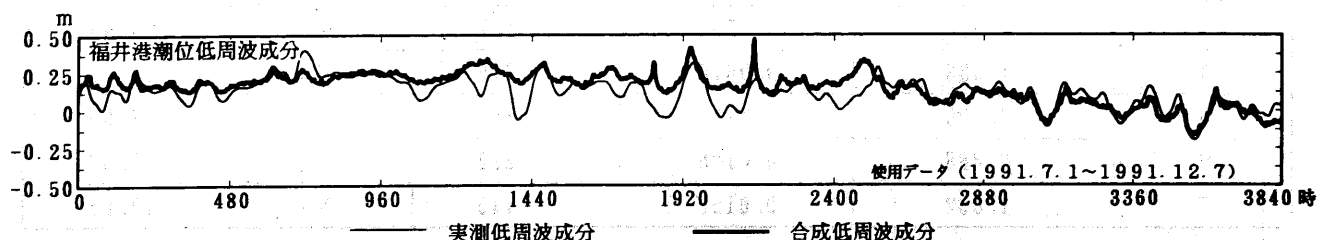


図5 福井港潮位の低周波成分とその合成図

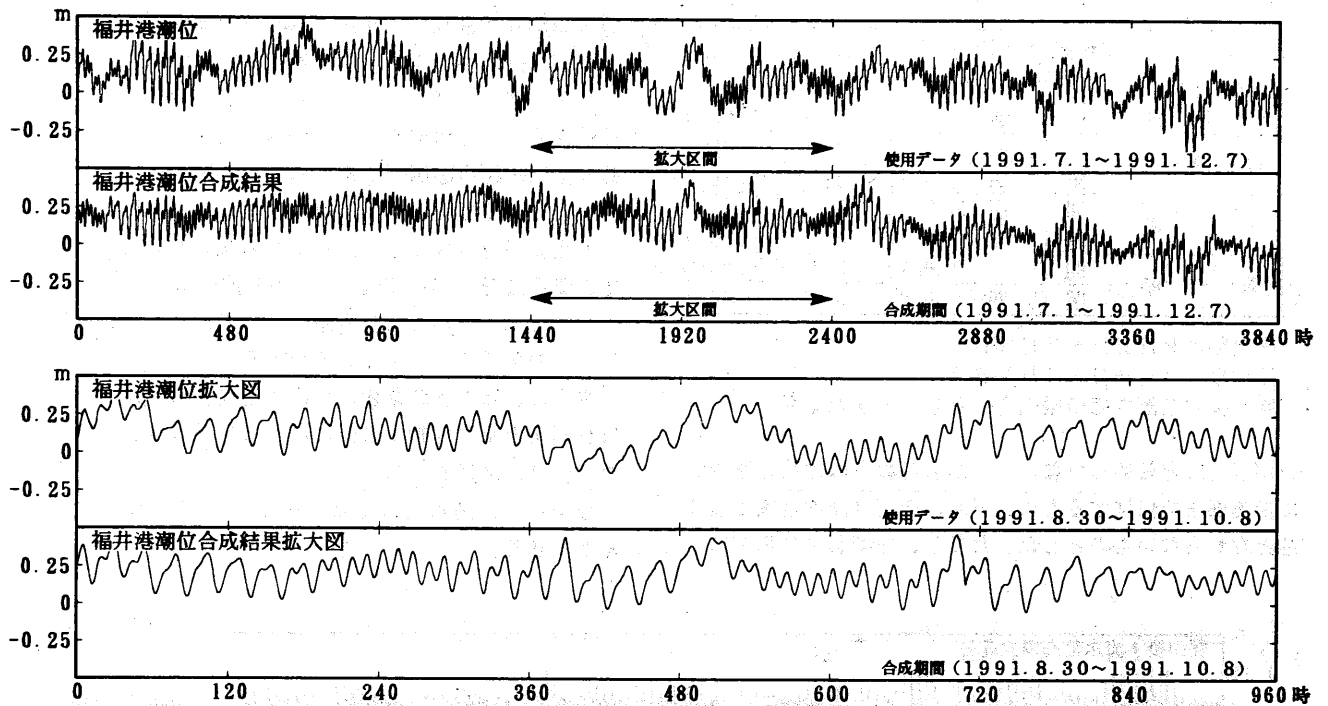


図6 福井港潮位とその合成図

$$H_g(T) = H_a(T) + H_p \quad \dots\dots (4)$$

$H_g(T)$: 潮位変動関数

$$\text{ただし、} H_a(T) = \sum_{i=1}^5 A_i \times \sin(2\pi f_i T + R_i)$$

図6に福井港の実測潮位と式(4)により作成した全成分の合成結果を対比して示したが、両者の波形は再現性よく一致している。

3.2 北潟湖における水位変動の関数化について

潮汐の影響を受ける感潮湖の水位変動についても潮位と同様に関数化が可能と考えられる。

そこで、北潟湖の各水位データについてフーリエ解析したところ全データ系列で福井港と同じ周波数成分が認められ、潮汐の影響が湖の末端まで及んでいることが確認でき

た。例として図7に開田橋上流地点における日変化の周波数分析結果を示した。

また、表4に各水位調査地点における周波数成分の振幅について福井港潮位の振幅に対する比率を示した。この表から、湖奥部にいくほど振幅の減衰が認められるとともに、開田橋上流から奥部では閉門期の変動幅が開門期の約1/3に小さくなっていることがわかる(図8、図11、図14、図16参照)。これは、開田橋に設置されている水門が農業用水の取水のため春から秋にかけて自動開閉方式をとっていることによる。なお、前回のモデルではこの水門の影響による振幅の減衰率を1/10と見積もっており、今回得られた減衰率より約3倍大きい。

位相については、福井港と開田橋で各周波数成分ともズ

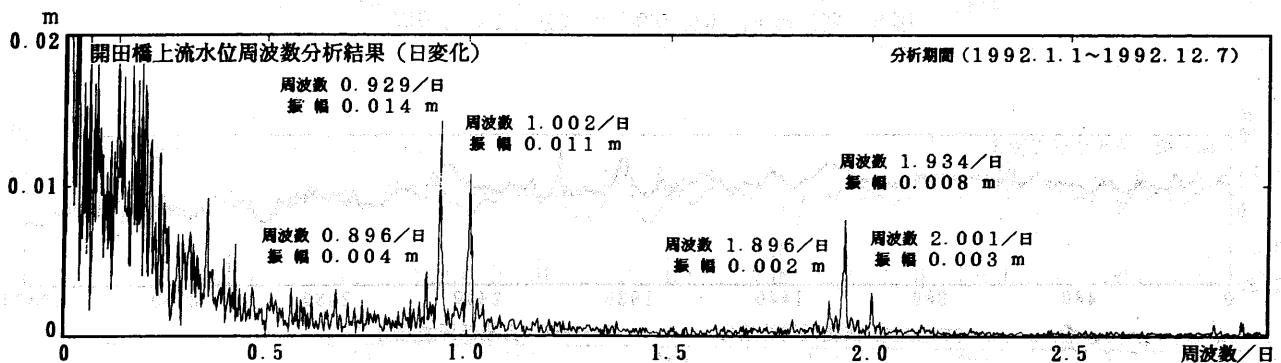


図7 開田橋上流水位の周波数分析結果(日変化)

表4 北潟湖水位の潮位に対する振幅係数*

周波数成分 (i)		1	2, 3	4, 5
地 点	年 間			
開田橋下流	年 間	0.80	0.80	0.80
	開 門 期	0.77	0.60	0.30
開田橋上流	閉 門 期	0.25	0.20	0.10
	開 門 期	0.75	0.51	0.25
中 湖	閉 門 期	0.24	0.17	0.08
	開 門 期	0.73	0.46	0.23
南 湖	閉 門 期	0.23	0.15	0.08

開門期：9月21日～3月15日

閉門期：3月16日～9月20日

*：福井港潮位での振幅を1としたときの比率

レがほとんど認められないことからこれらは比較的速やかに湖奥部まで伝播するものと考え、今回は湖内全域で福井港と変わらないものとした。ただし、中湖および南湖につ

いては、今後、他地点の同時期データと比較したとき位相のズレが確認されれば修正する必要がある。

気圧成分については、福井港と開田橋でほとんど一致している（図5、図9、図12参照）ことと中湖と南湖では低周波成分による水位変化の幅が福井港と同程度を示している（図15、図17参照）ことから、天体潮成分のように伝播するのではなく気圧の湖面に対する直接的な影響によるものと考え、湖内全域で福井港と変わらないものとした。よって、気圧成分については式(3)が湖内全域で適用できるものとしたが、中湖および南湖については、今後、同時期の気圧との関係を確認する必要がある。

さらに、降水量の影響についても検討したが、開田橋では日雨量と水位変動との間に明かな関係は見いだせなかった（図9、図12参照）。

以上から、湖水位の変動は式(5)のように関数化することができる。

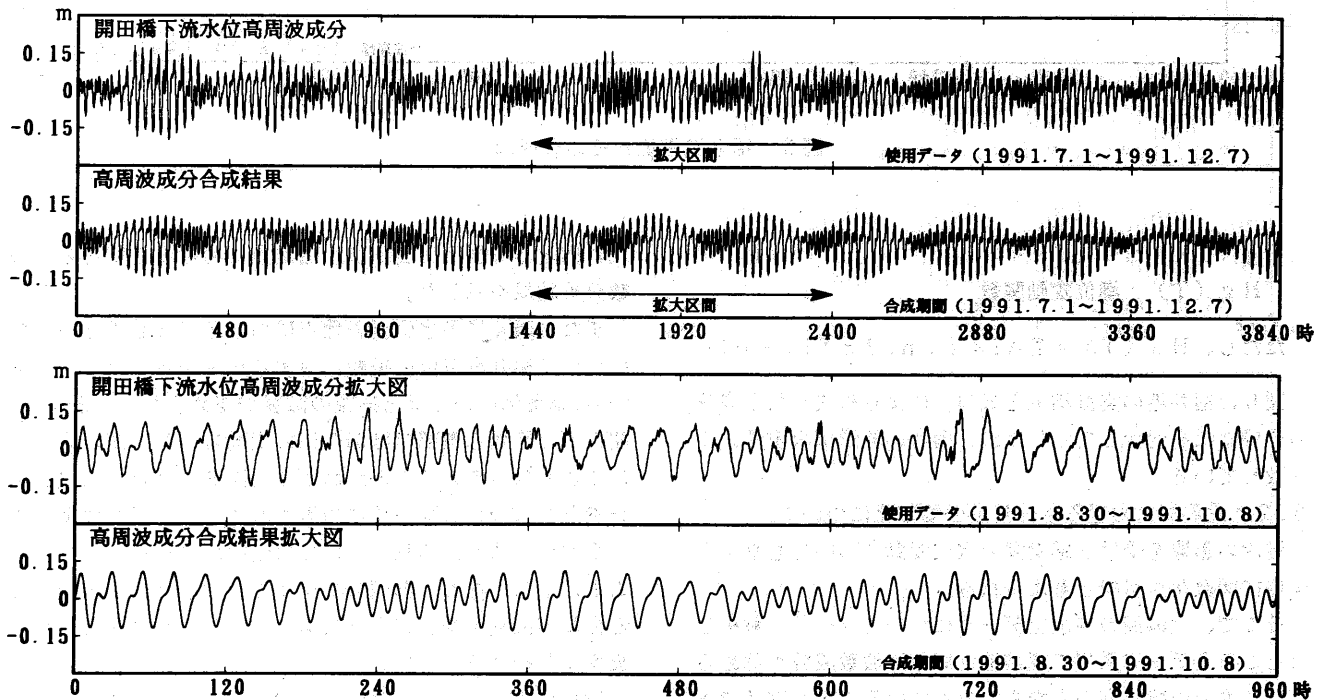


図8 開田橋下流水位の高周波成分とその合成図

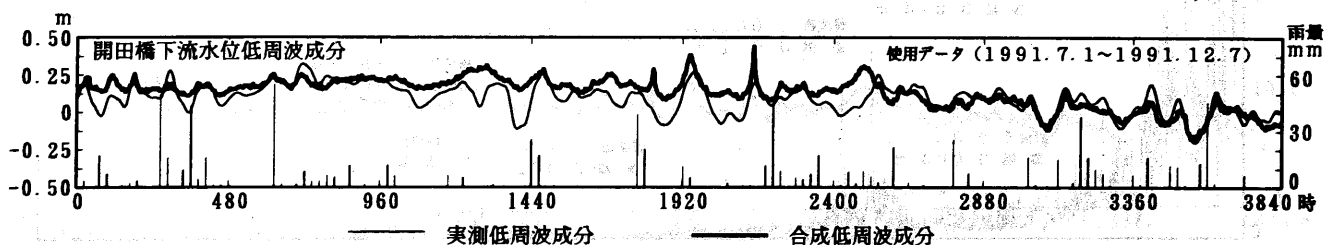


図9 開田橋下流水位の低周波成分とその合成図

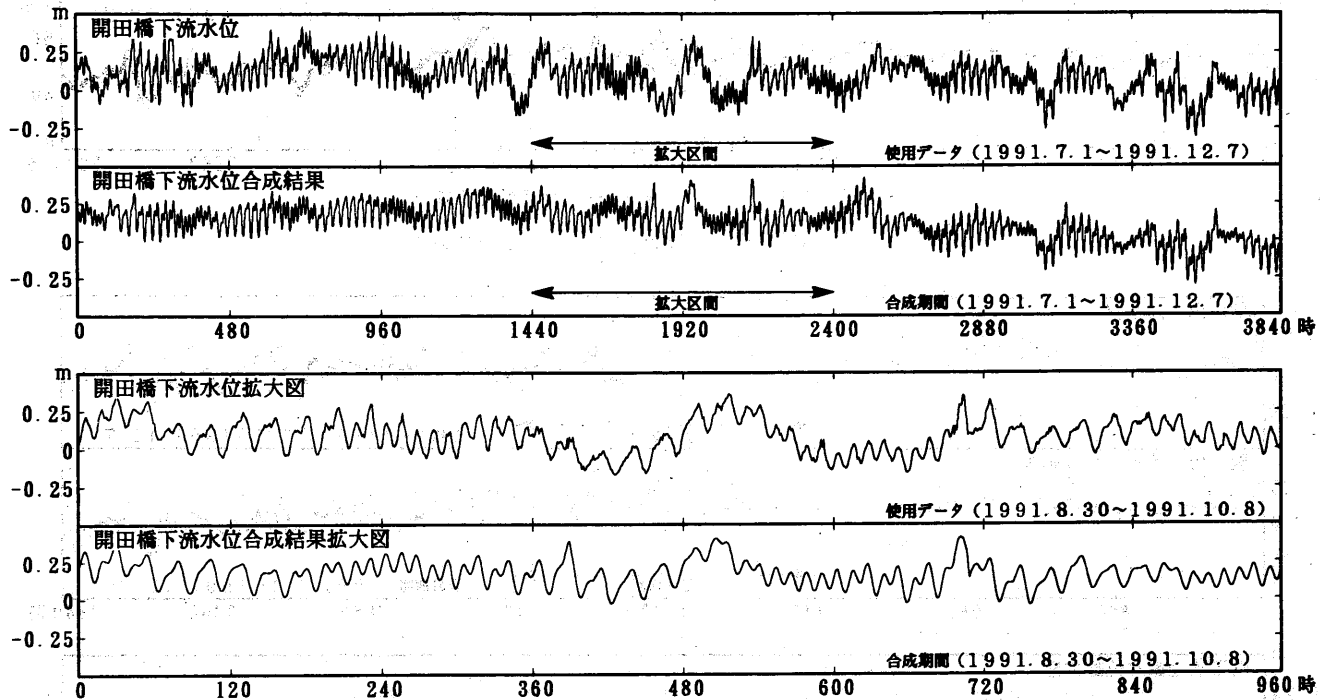


図10 開田橋下流水位とその合成図

$$H_g(T) = \alpha H_a(T) + H_p \quad \dots\dots(5)$$

$H_g(T)$: 水位変動関数

α : 福井港潮位に対する振幅係数

ただし、 $H_a(T) = \sum_{i=1}^5 A_i \times \sin(2\pi f_i T + R_i)$

ここで、 $\alpha = 1$ とした場合は式(4)と等しくなる。よってこの式は潮位変動関数をも含めた水位変動関数といえる。

3. 2. 1 湖水位の合成および照合結果

図8~10に開田橋下流、図11~13に開田橋上流について高周波成分、低周波成分および全成分の順に実測成分と合成結果とをそれぞれ対比して示した。また、図14~15に中湖、図16~17に南湖について実測高周波成分とその合成結果の対比図および実測水位と低周波成分の対比図の順にそれぞれ示した。

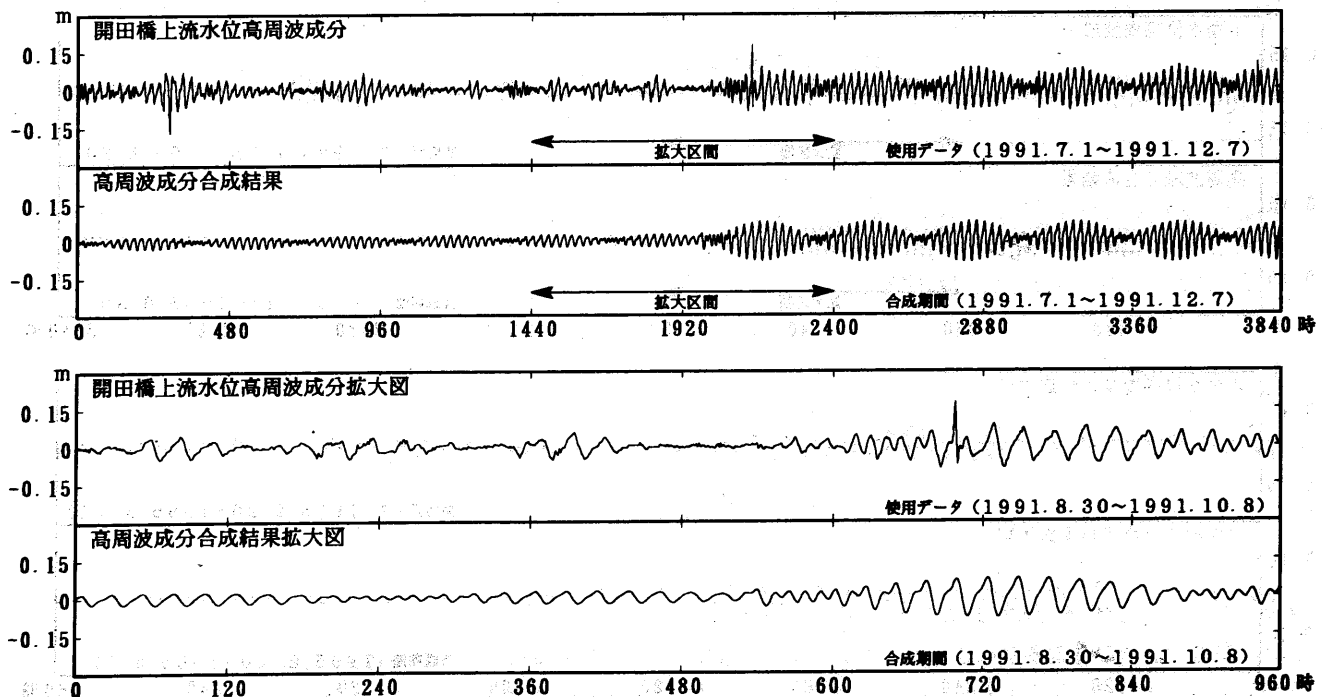


図11 開田橋上流水位の高周波成分とその合成図

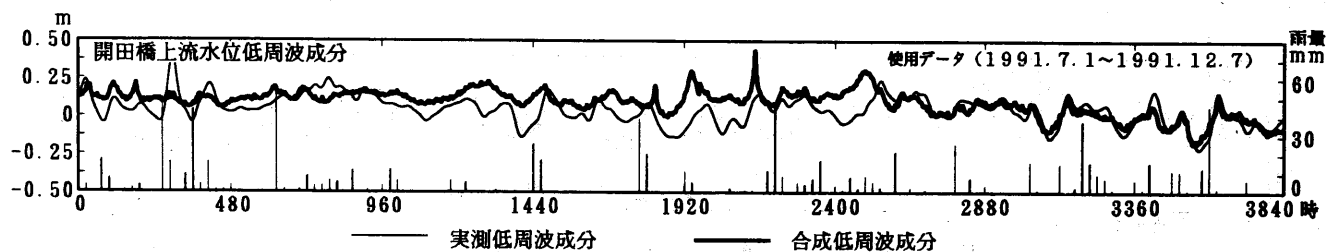


図12 開田橋上流水位の低周波成分とその合成図

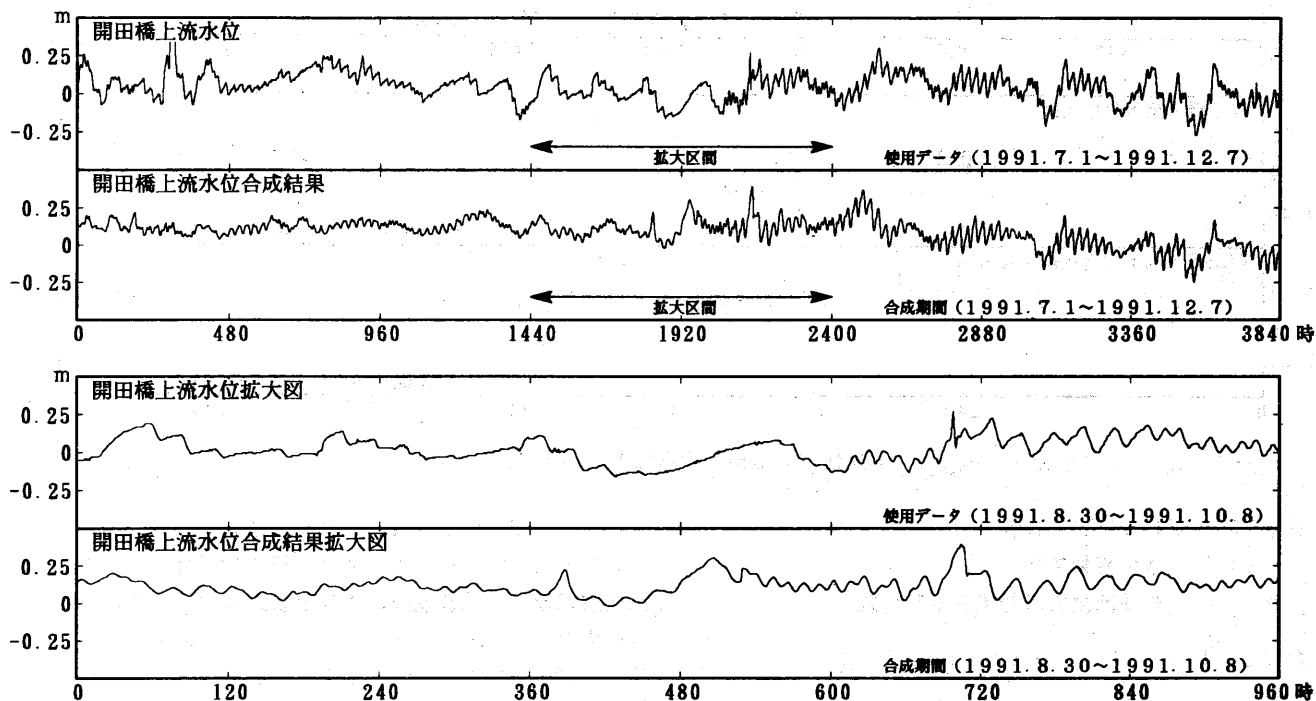


図13 開田橋上流水位とその合成図

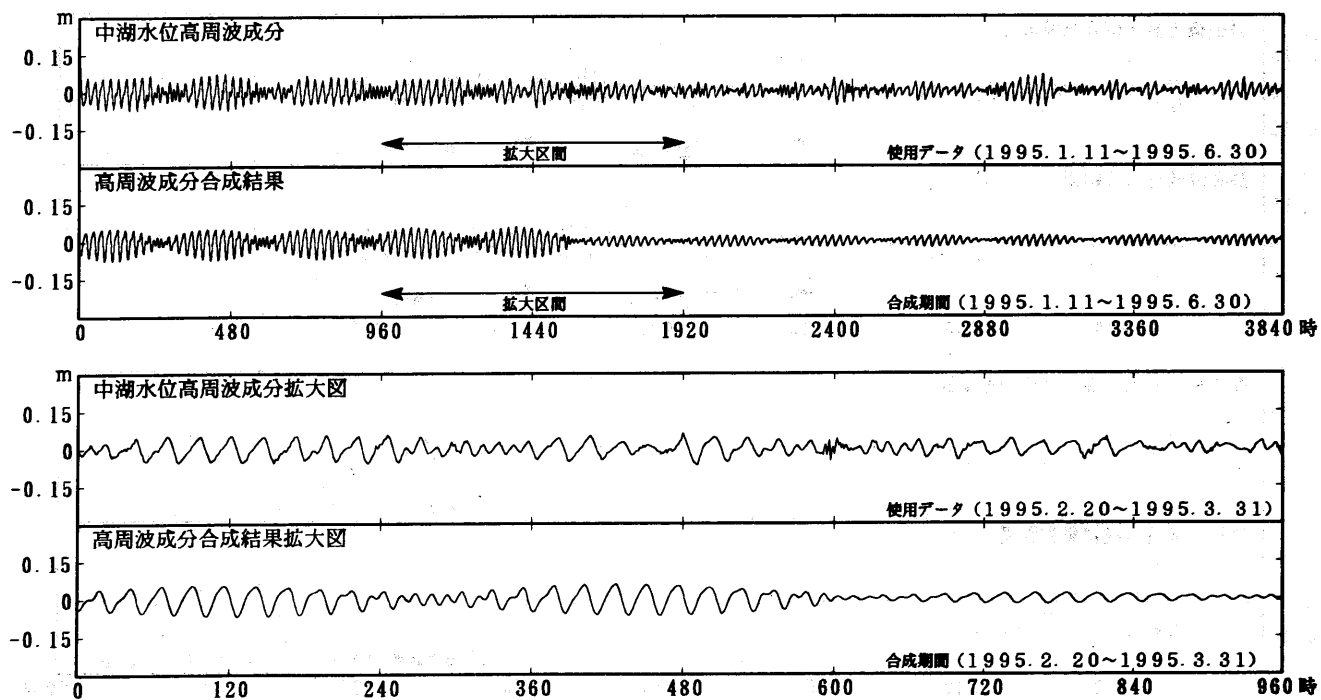


図14 中潮水位の高周波成分とその合成図

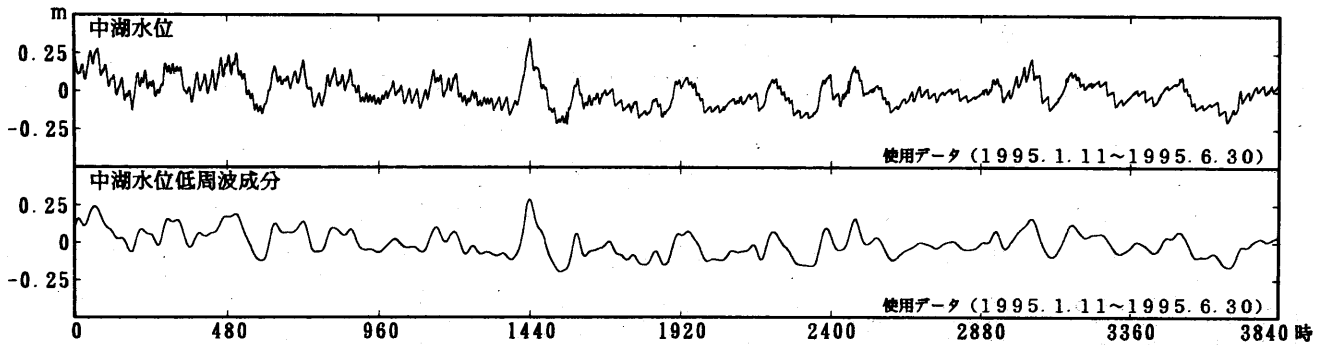


図15 中湖水位と低周波成分

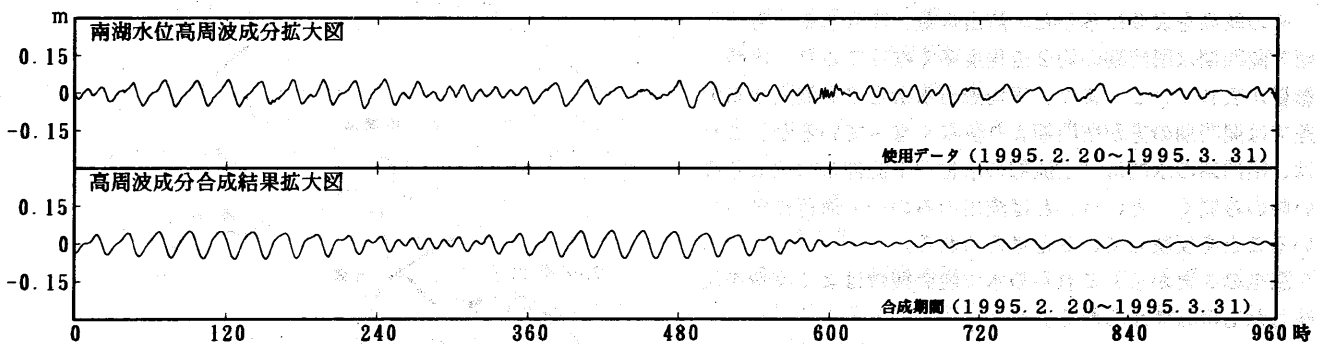
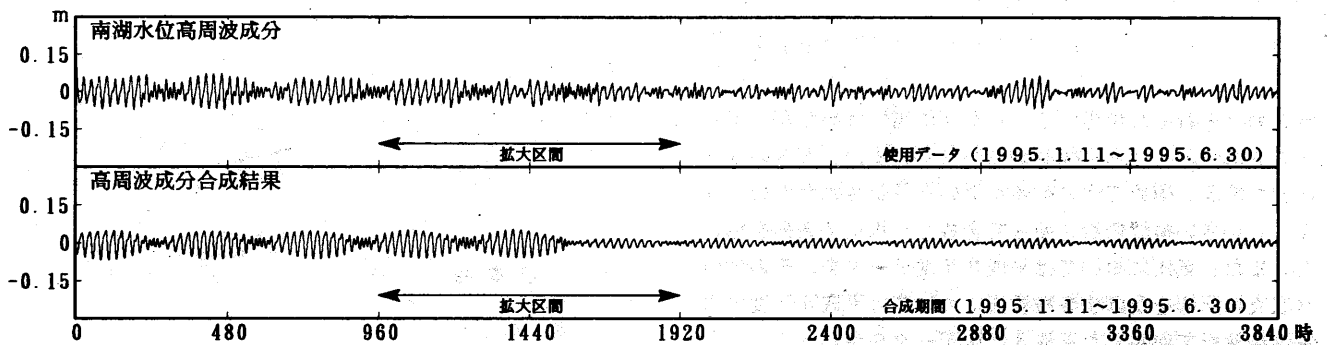


図16 南湖水位と高周波成分とその合成図

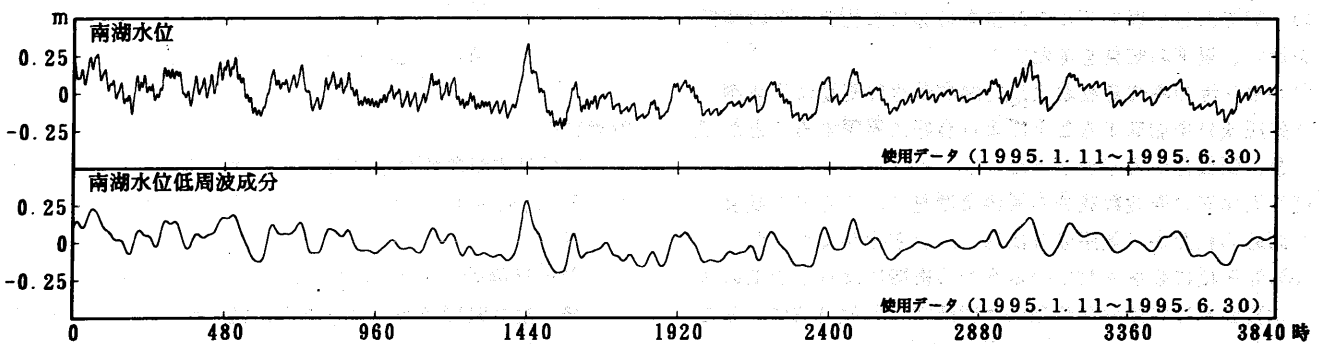


図17 南湖水位と低周波成分

3.3 移流水量の算出

平成4年度に実施した水質汚濁解析では、水域を複数ボックスに分割するボックスモデルにより水理モデルを作成している。北潟湖のボックス分割図を図18に示す。

ここで、式(4)の潮位変動関数および式(5)の湖水位変動関数が実情を反映したものを確認するため、合成した各水位時系列の水位差から平成4年度モデルの水収支式を用いてボックス間の移流水量の算出を試みた。各合成水位

表5 ボックス間の移流量

(m³/s)

	開 門 期					閉 門 期				
	流 出 水 量		流 入 水 量		流出入差 (平均)	流 出 水 量		流 入 水 量		流出入差 (平均)
	範 囲	平均	範 囲	平均		範 囲	平均	範 囲	平均	
0-1*	0~37.2	6.15	0~32.5	5.72	0.43	0~30.3	3.96	0~17.9	2.91	1.05
1-2	0~33.3	5.26	0~30.9	5.28	-0.02	0~28.1	3.20	0~16.4	2.41	0.79
2-3	0~28.3	4.52	0~26.3	4.29	0.23	0~26.7	2.85	0~13.5	1.99	0.86
3-4	0~6.6	0.99	0~6.2	1.09	-0.10	0~5.3	0.60	0~3.8	0.47	0.13
3-5	0~4.4	0.39	0~3.6	0.29	0.10	0~4.2	0.36	0~1.4	0.19	0.17

*: ボックス0とボックス1との間の移流を示す。

時系列はそれぞれ相当するボックスに当てはめたが、ボックス5については水位観測地点がなく、また、葦等の水性植物が繁茂し極めて水の交換が悪いと予想されたため、南湖より小さい振幅係数を使って合成した水位時系列を用いた。また、気圧については平成3年度データを、その他の水収支に影響を及ぼす各種要素については平成4年度の水質汚濁解析で使用した平成3年度データを用いた。

その結果を表5に示した。流出水量、流入水量とも平均値で開門期は閉門期の約2倍程度多くなっており、水門の影響が表れている。また、平均流出水量と平均流入水量の差では開門期の方が閉門期より少なくなっているが、これは、閉門期の水門は“上流部の水位が下流部の水位より高い時のみ開く”といういわば流出のみの一方通行になっていることを反映していると考えられる。

以上のことから、これらの水位変動関数はよく実情を反映したものと考えられる。

4 ま と め

平成4年度に開発した湖沼水質シミュレーションモデルの一部である水理モデルの改良を目的に水位データの解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 福井港の潮位変動および北潟湖の水位変動は天体潮に気圧成分を加算することにより良好に再現することができ、関数化が可能となった。
- (2) 天体潮の周波数成分の振幅は湖奥部にいくほど減衰が認められたが、気圧成分はほとんど変化がなかった。
- (3) 開田橋に設置されている水門の影響により上流部の水位変動幅は自動開閉時期には開門時期の約1/3になることが判明した。
- (4) 水位変動関数を用いて合成した水位時系列により算出した移流量は北潟湖の実状をよく反映していた。

以上のことから、湖奥部についてはデータの蓄積を待ち係数の改良をする必要があると思われるが、今後、この水位変動関数を水理モデルに組み込むことによりシミュレーションモデル全体の精度向上が期待できるものと考えられる。

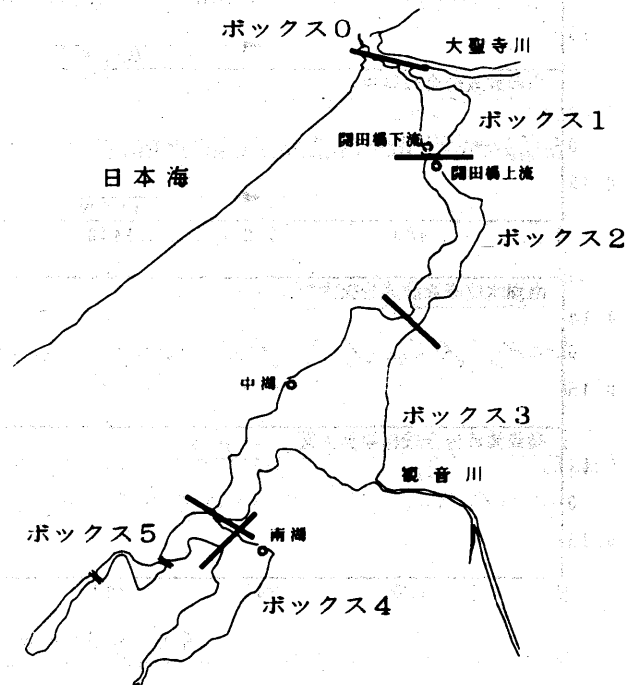


図18 北潟湖のボックス分割図

参考文献

- 1) (財)日本気象協会福井支部:「水質汚濁解析業務報告書(北潟湖および三方五湖の水質汚濁解析調査)」, 1992.
- 2) 吉川昌範他: 湖沼水質シミュレーションモデルの開発, 福井県環境センター年報, 22, pp. 61-71, 1992.
- 3) 加藤賢二他: 福井県の気水湖における湖水面の変動関数について, 福井県環境センター年報, 22, pp. 56-60, 1992.
- 4) 川上満夫:「活図」,(株)エバ・グリーンソフト開発部編, 東京, 1991.
- 5) 彦坂繁雄:「海洋物理Ⅲ, 海洋科学基礎講座3」, p. 129, 東海大学出版会, 1971.
- 6) 東京天文台:「理科年表」, p. 196, 丸善, 東京, 1992.