

間隙水圧モニタリング結果の スペクトル解析によるデータ処理作業

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年3月

株式会社 ダイヤコンサルタント

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122 (代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Nak-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

2004年3月

間隙水圧モニタリング結果のスペクトル解析によるデータ処理作業

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

細谷真一*

要旨

間隙水圧モニタリング結果に含まれる気圧変動や地球潮汐による応答を分離する方法として、BAYTAP-Gを利用する方法が用いられてきた。しかし、最近、BAYTAP-Gでは考慮していない周波数特性を考慮するスペクトル解析による方法が提案されており、この方法を利用すると、岩盤の水理特性を推定することも可能である。そこで、本業務では、岩盤の水理特性の推定とBAYTAP-Gによるデータ処理方法との比較を目的として、間隙水圧モニタリング結果に対してスペクトル解析を実施した。

スペクトル解析はMSB-1号孔とDH-2号孔の10区間を対象として実施し、各種のスペクトル図を作成し、以下の知見を得た。

- 1) スペクトル図上で間隙水圧が気圧変動と地球潮汐に応答していることを明らかにし、岩盤の比貯留係数と鉛直方向の透水係数を一部の区間で推定した。
- 2) スペクトル図上で気圧変動と地球潮汐による応答を分離して、BAYTAP-Gによって分離された結果と比較した結果、BAYTAP-Gでは気圧変動による間隙水圧応答を適切に分離できない場合があることを示した。

本報告書は、株式会社ダイヤコンサルタントが核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室および担当者：東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所
超深地層研究グループ

*株式会社ダイヤコンサルタント

March, 2004

Spectral Analysis of Monitoring Data of Pore Pressure

Shinichi Hosoya*

Abstract

BAYTAP-G has been used to decompose atmospheric and tidal response from monitoring data of pore pressure. However, a spectral analysis appeared as an alternative in the recent literature. It has advantage of covering frequency-dependency of response and estimating hydraulic properties of rocks. Therefore, spectral analysis is performed in this contract using the monitoring data of pore pressure, in order to estimate hydraulic properties of rocks and compare component responses with ones decomposed by BAYTAP-G.

Ten measuring sections in MSB-1 and DH-2 were analyzed. The results shown as various spectral diagrams lead to the following findings.

- 1) It is proven that pore pressure at all sections responds to atmospheric pressure fluctuation and earth tide. Specific storage at all sections and vertical hydraulic conductivity at one section can be estimated from relationships between atmospheric and tidal signals and component responses.
- 2) It is shown that atmospheric response decomposed by BAYTAP-G is worse in some cases compared to one decomposed by spectral analysis.

This work performed by DIA Consultants Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Underground Research Group, Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center

* DIA Consultants Co., Ltd.

目次

1. はじめに	1
1.1 業務名	1
1.2 業務目的	1
1.3 作業内容	1
1.4 履行期間	2
1.5 発注機関	2
1.6 受注機関	2
2. スペクトル解析の方法	3
2.1 作業対象	3
2.2 時間領域における作業方法	6
2.3 スペクトル解析結果の解釈	10
2.4 周波数領域における作業方法	15
3. スペクトル解析の結果	18
3.1 フーリエスペクトル	18
3.2 位相差	24
3.3 気圧変動に対するゲイン	30
3.4 面積ひずみに対するゲイン	35
4. BAYTAP-G 解析結果との比較方法	40
4.1 周波数領域における比較	40
4.2 時間領域における比較	43
5. BAYTAP-G 解析結果との比較検討結果	46
5.1 周波数領域における比較結果	46
5.2 時間領域における比較結果	51
6. 考察	61
6.1 スペクトル解析結果の考察	61
6.2 BAYTAP-G との比較	68
6.3 今後の課題・提案	72
7. おわりに	73
参考文献	75

1. はじめに

1.1 業務名

間隙水圧モニタリング結果のスペクトル解析によるデータ処理作業

1.2 業務目的

東濃地科学センターでは、地下深部における地下水の間隙水圧の長期モニタリングデータを取得するために、大深度試錐孔に対し MP システム*やピエゾシステム**を設置し、観測を実施している。これらの装置で取得されるデータには、観測区間の間隙水圧変動に加え、バックグラウンドとしての潮汐変動や気圧変化等による変動が含まれている。

これらの間隙水圧の観測データから気圧や潮汐の影響を分離するためには、BAYTAP-G***を利用する方法が便利である。しかし、最近の研究によれば、気圧変動や潮汐による間隙水圧の変動特性はその周波数によって異なることが示されており、BAYTAP-G ではこれを完全に考慮することができない。周波数特性を考慮するためには、気圧変動と地球潮汐という異なる周波数信号を考慮したスペクトル解析を行う必要がある。本件では、長期間隙水圧モニタリング装置により取得されたデータに対して周波数特性を考慮したデータ処理を行い、BAYTAP-G を用いたデータ処理方法との比較を行うことを目的とする。

1.3 作業内容

間隙水圧モニタリング結果のスペクトル解析作業

- ・ スペクトル解析作業
- ・ BAYTAP-G 解析結果との比較

作業の流れを図 1-1 に示す。

* MP システム：MP システムとは、カナダの Westbay 社が開発した多深度間隙水圧測定システムである。

** ピエゾシステム：ピエゾシステムとは、株式会社ダイヤコンサルタントが開発した多深度間隙水圧測定システムである。

*** BAYTAP-G：BAYTAP-G(Bayesian Tidal Analysis Program・Grouping Model)と、統計数理研究所と緯度観測所が共同で開発した潮汐解析プログラムである (Tamura et al.(1991))。現在、このプログラムは、地球潮汐データの解析をはじめ、地殻変動連続観測データの解析にも広く使われている。

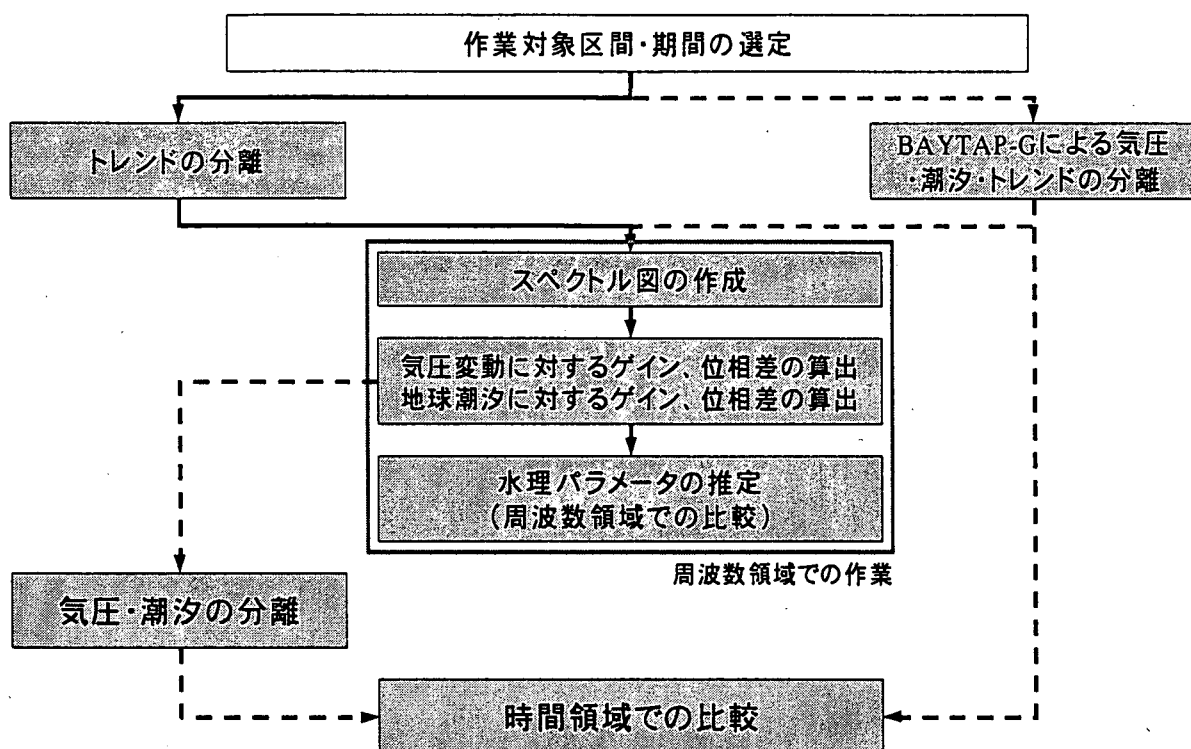


図 1-1 本業務の作業の流れ

実線はスペクトル解析作業（第 2 章，第 3 章）における作業の流れを示し，
点線は BAYTAP-G 解析結果との比較（第 4 章，第 5 章）における作業の流れを示す。

1.4 履行期間

平成 15 年 1 月 7 日～平成 16 年 3 月 12 日

1.5 発注機関

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

1.6 受注機関

株式会社 ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業部
埼玉県さいたま市北区吉野町 2-272-3
主任技術者 細谷真一

2. スペクトル解析の方法

2.1 作業対象

正馬様用地，研究所用地の試錐孔に設置した間隙水圧モニタリングシステムによって観測された間隙水圧データのうち，表 2-1 に示す 10 区間のデータを作業対象とする。

表 2-1 作業対象区間一覧表

孔名	区間 番号	区間深度		区間長 (m)	センサー設置深度		地質
		G.L.(-m)	EL.(m)		G.L.(-m)	EL.(m)	
MSB-1	1	66.4 ~ 116.3	186.7 ~ 136.8	49.9	69.80	183.28	明世累層
	2	117.2 ~ 131.6	135.9 ~ 121.5	14.4	120.50	132.58	明世累層(基底礫岩)
	3	132.5 ~ 176.3	120.6 ~ 76.8	43.8	135.80	117.28	土岐夾炭累層
	4	177.2 ~ 195.1	75.9 ~ 58.0	17.9	180.50	72.58	土岐夾炭累層(基底礫岩)
	5	196.0 ~ 201.0	57.1 ~ 52.1	5.0	196.30	56.78	土岐花崗岩(風化部)
DH-2	1	176.0 ~ 226.0	17.6 ~ -32.4	50.0	50.69	142.94	土岐花崗岩
	2	227.0 ~ 292.0	-33.4 ~ -98.4	65.0	50.44	143.19	土岐花崗岩
	3	293.0 ~ 308.7	-99.4 ~ -115.1	15.7	50.47	143.16	土岐花崗岩
	4	309.7 ~ 343.9	-116.1 ~ -150.3	34.2	50.61	143.02	土岐花崗岩
	5	344.9 ~ 414.0	-151.3 ~ -220.4	69.1	50.47	143.16	土岐花崗岩

MSB-1 号孔では間隙水圧モニタリングシステムとして MP システムが設置されており，間隙水圧が直接測定されている。測定区間の深度は 66.4~201.0m の範囲にあり，主に新第三紀の堆積岩を測定対象としている。

これに対して DH-2 号孔ではピエゾシステムが設置されており，間隙水圧はピエゾメータ内の水位として測定されている。7つの測定区間の深度は 176.0~501.0m の範囲であり，堆積岩の下位の花崗岩を測定対象としている。ただし，本業務の作業対象は深度 176.0~414.0m の範囲の 5 区間とした。

表 2-1 に示した 10 区間の 2003 年の間隙水圧の経時変化を図 2-1 に示す。図 2-1 では，気圧変動や地球潮汐によって生じる周期変動以外に，次のような間隙水圧変動が認められている。

- ① 2月~3月：MSB-4 孔における揚水試験の影響（MSB-1 区間番号 2）
- ② 4月：MIZ-1 孔における逸水の影響（DH-2 全区間）
- ③ 5月：MIZ-1 孔における掘削の影響（MSB-1 区間番号 3~5）
- ④ 9月~10月：釧路沖地震の影響と考えられる変動（DH-2 全区間）
- ⑤ 9月~10月：MSB-4 孔における揚水試験の影響（MSB-1 区間番号 2）

スペクトル解析は，周期変動を対象とした解析方法であるため，周期変動以外の変動を除外することが望ましい。そこで，周期変動以外の変動が認められる上述の期間を除き，さらに欠測が無い期間として次の期間をデータ処理対象期間とすることとした。

データ処理期間：2003 年 1 月 9 日 0:00~ 2003 年 1 月 30 日 7:00

なお，スペクトル解析では，取り扱う時系列データの個数が 2 の整数乗であることが必

要とされる。したがって、1時間間隔のデータ個数が512データとなるように、上述のデータ処理期間の長さを決めた。

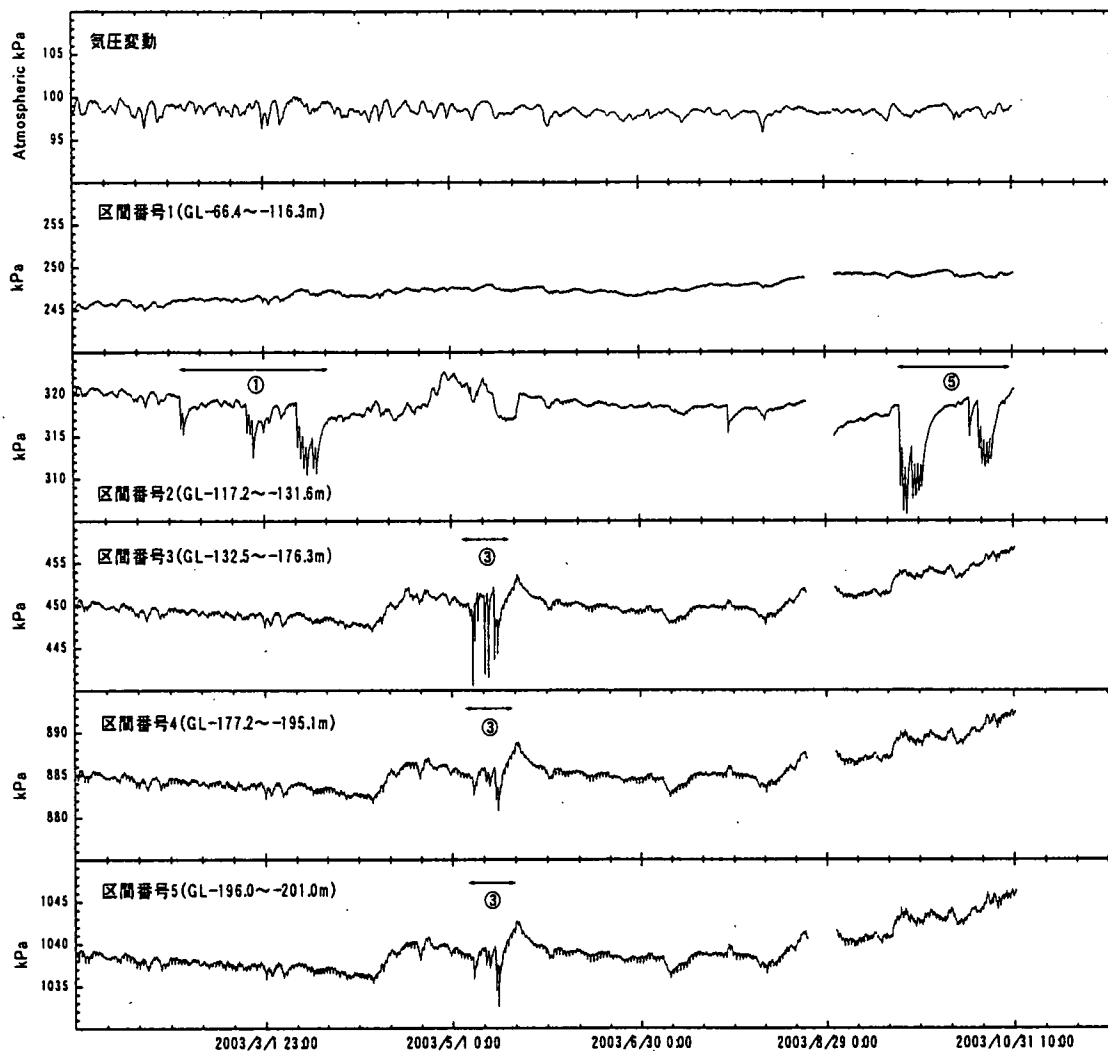


図 2-1(a) MSB-1 号孔の間隙水圧経時変化
 図中の丸数字は本文 3 ページの記述に対応

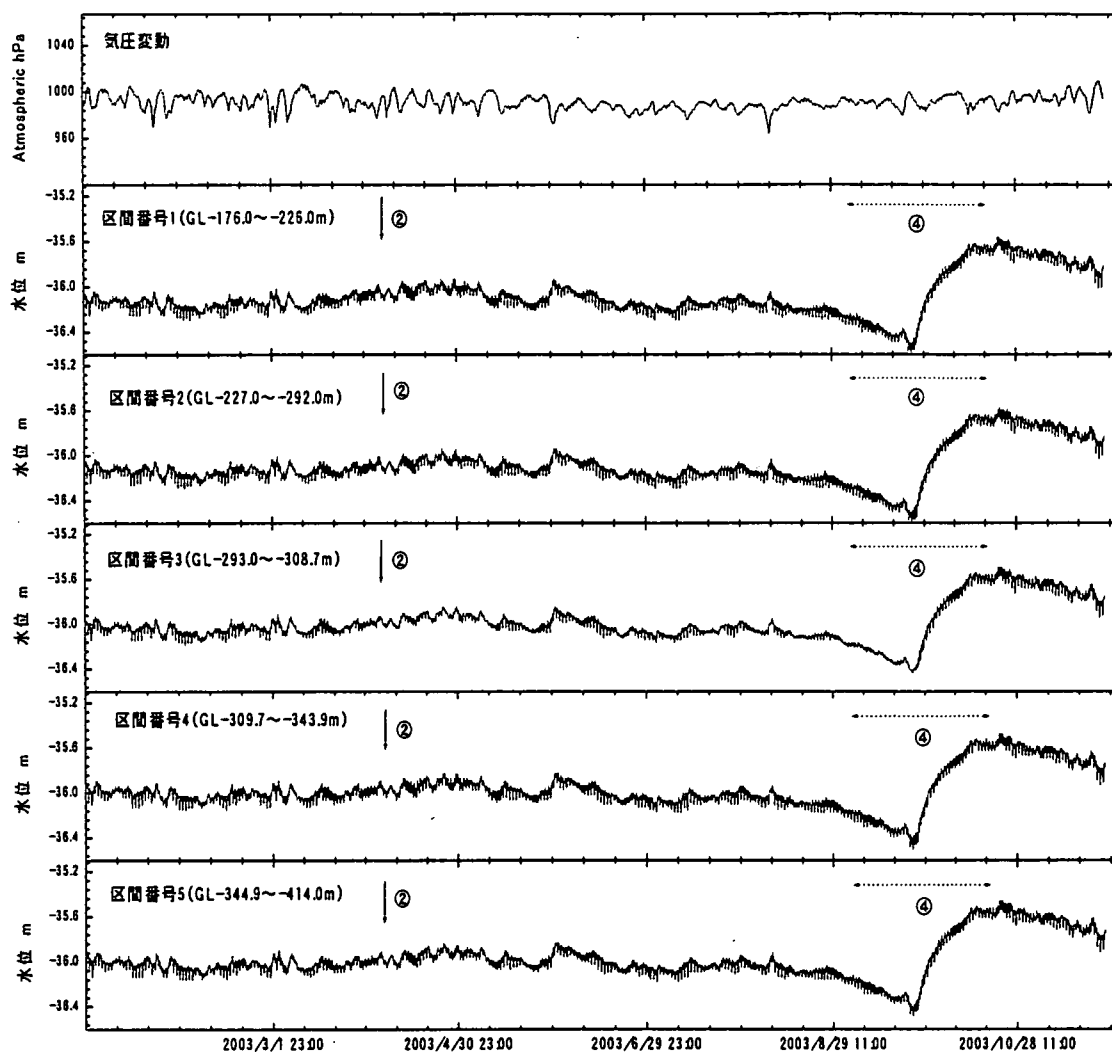


図 2-1(b) DH-2 号孔の水位経時変化
 図中の丸数字は本文 3 ページの記述に対応

2.2 時間領域における作業方法

データ処理方法を DH-2 号孔の区間番号 1 を例として説明する。

(1) 水位から間隙水圧への変換

DH-2 号孔では、ピエゾシステムを用いてピエゾメータ内の水位として、間隙水圧が測定されている。これに対して、MSB-1 号孔では、MP システムを用いて間隙水圧が測定されている。両者を同等に扱うために、ここでは DH-2 号孔で測定されているピエゾメータ内の水位を間隙水圧に換算する。なお、MSB-1 号孔の間隙水圧を水位に換算して比較を行うことも可能である。

間隙水圧 p は、測定区間上端位置 z (地表面をゼロ、鉛直上向きを正とする) において、真空をゼロとして定義されるものとする、次式によってピエゾメータ内の水位 W から換算することができる (図 2-2 参照)。

$$p = p_a + \rho g(W - z) \quad (2.1)$$

ただし、 ρ はピエゾメータ内の水の密度、 g は重力加速度、 p_a は気圧である。

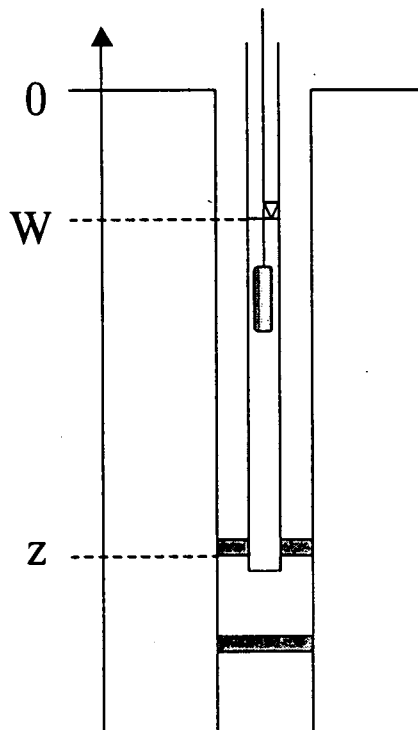


図 2-2 間隙水圧と水位の関係図

DH-2 号孔の区間番号 1 における水位から間隙水圧への変換例を図 2-3~2-5 に示す。図 2-3 は水位 W の経時変化、図 2-4 は気圧 p_a の経時変化、図 2-5 は(2.1)式によって換算した間隙水圧 p の経時変化である。

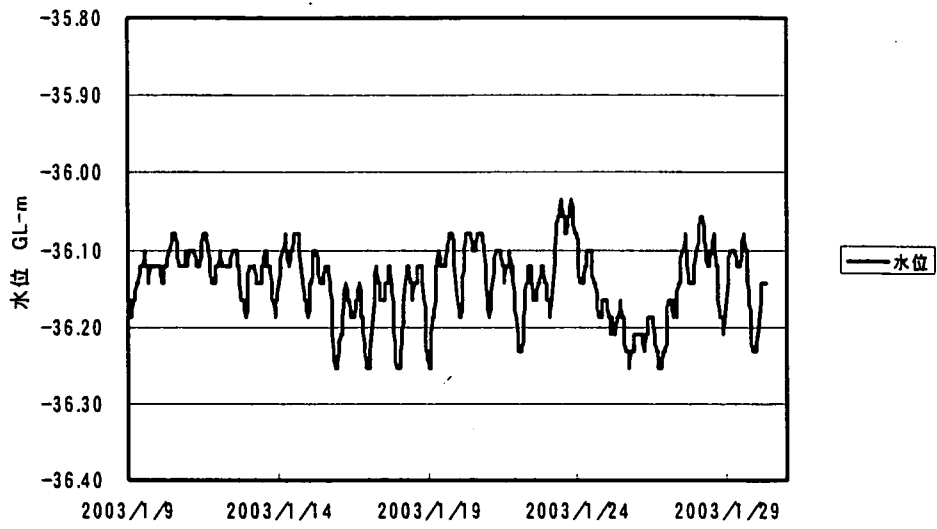


図 2-3 DH-2 号孔の区間番号 1 における水位 W の経時変化

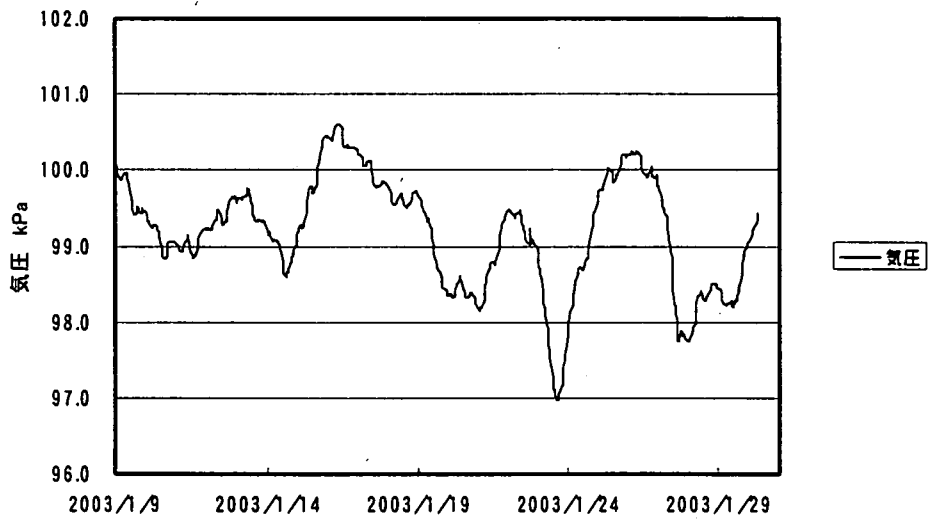


図 2-4 気圧 p_a の経時変化

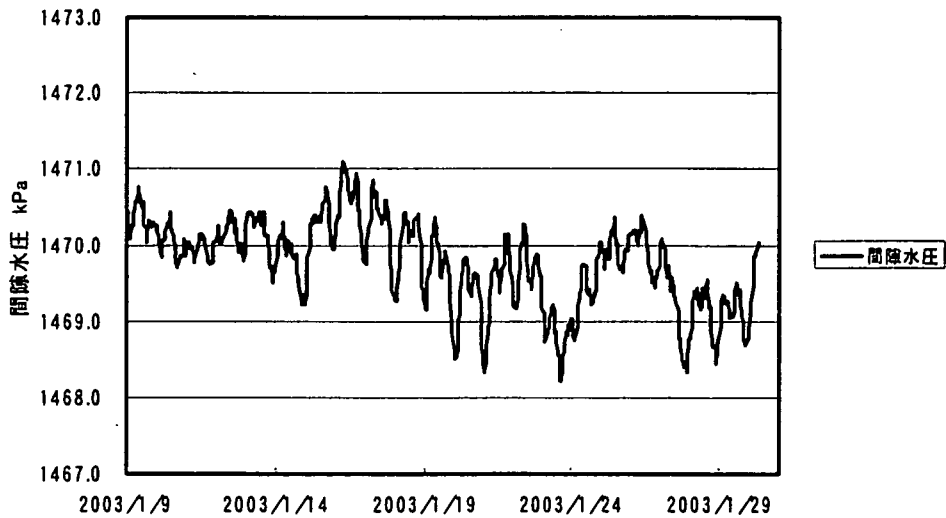


図 2-5 DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧 p の経時変化

図 2-3 と図 2-4 から、水位 W は気圧が上昇すると低下する。一方、図 2-4 と図 2-5 から、間隙水圧 p は気圧が上昇すると上昇することがわかる。

(2) トレンドの除去

スペクトル解析とは、周期変動を対象とした解析方法であり、周期変動でない場合にはトレンド（長期間傾向）を除去する作業が必要になる。本検討では、間隙水圧と気圧の時系列データについてトレンドを除去する必要がある。

トレンドを除去するためには、トレンドを何らかの関数として仮定し、フィッティングによってパラメータを求める方法が一般的である。このとき、トレンドとして複雑な関数を仮定すると、本来ある周波数に対応する成分まで除去してしまい、トレンド除去後の時系列データをゆがめるおそれがある(Bendat and Piersol(2000), p.397)。これを防ぐために、トレンドとしては一次関数を仮定することが多い。本検討でも、(2.2)式のようにトレンドを一次関数と仮定して、最小二乗法によって適切なパラメータ α 、 β を求めて、(2.3)式を用いてトレンドの除去を行った。

$$p_{trend} = \alpha t + \beta \quad (2.2)$$

$$p_{detrend} = p - p_{trend} = p - (\alpha t + \beta) \quad (2.3)$$

ここに、 t は時間、 p は間隙水圧、 p_{trend} はトレンド、 $p_{detrend}$ はトレンド除去後の間隙水圧である。

実際の作業では、図 2-6 に示すように平均値がゼロになるように、図 2-4 および図 2-5 に示した時系列データを平行移動させ、その図上で最小二乗法によってトレンドとして仮定した一次関数の 2 つのパラメータ α と β を求めた。次に、図 2-6 に示した時系列データからトレンドとして求めた一次関数を引くことによって、トレンドを除去した時系列データである図 2-7 を得た。

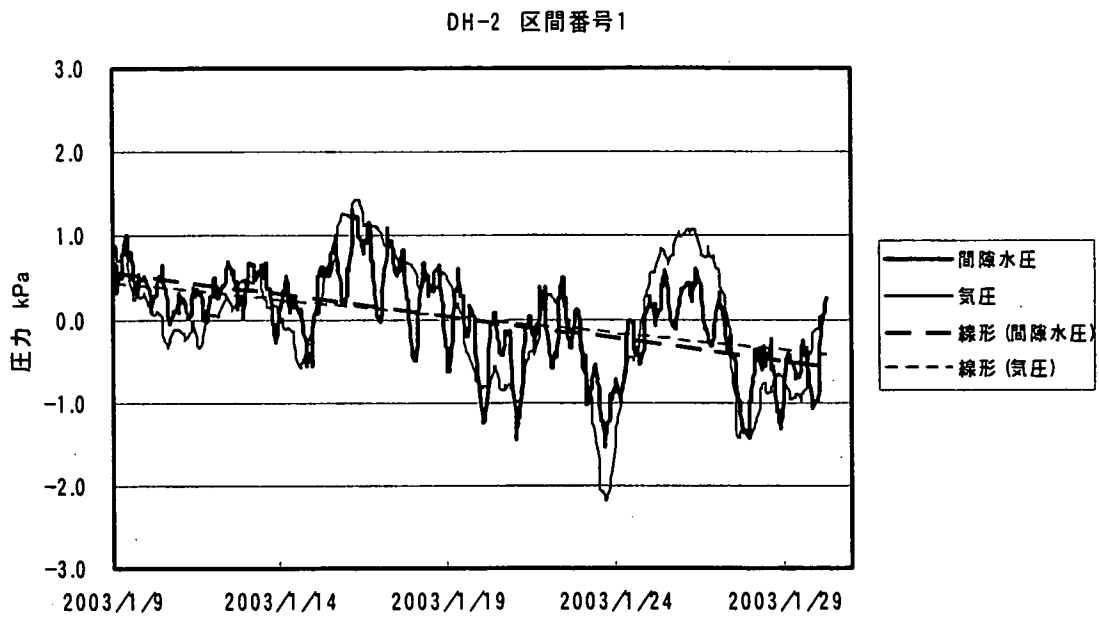


図 2-6 DH-2 号孔の区間番号 1 におけるトレンドの推定

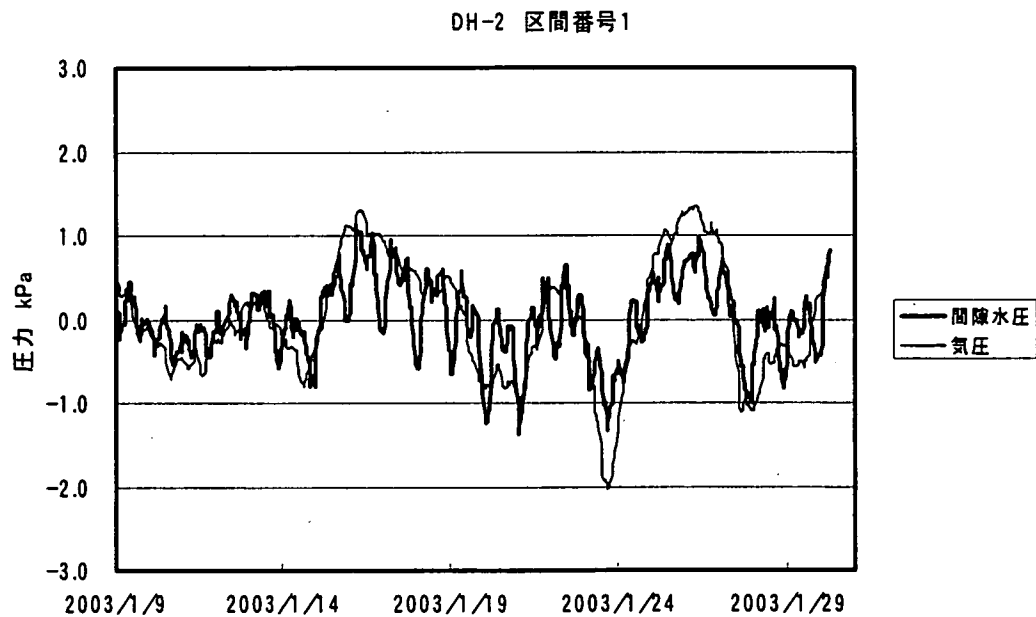


図 2-7 DH-2 号孔の区間番号 1 におけるトレンド除去後の時系列データ

(3) 面積ひずみの計算

気圧によって間隙水圧が変動する現象は、変動の原因である気圧の時系列データと変動の結果である間隙水圧の時系列データを比較することによって、その因果関係が明瞭になる。

地球潮汐については、間隙水圧変動の原因は面積ひずみとなるが、DH-2 号孔、MSB-1

号孔近傍では、面積ひずみは測定されていないので、ここでは地球を弾性体と仮定した理論から面積ひずみの時系列データを求めた。

中川他(1986)に準拠して計算した面積ひずみの時系列データを図 2-8 に示す。なお、潮汐力から面積ひずみを求めるために必要なラブ数、志田数はそれぞれ $h_2 = 0.609$, $l_2 = 0.0852$ を用いた (中川他(1986), p.264)。

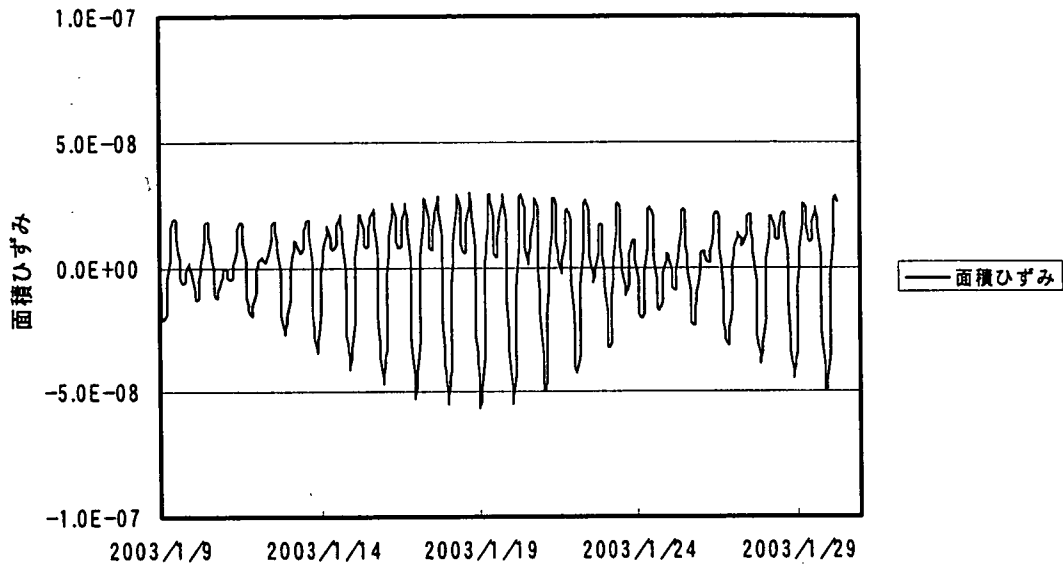


図 2-8 面積ひずみの時系列データ

2.3 周波数領域における作業方法

前節同様に、DH-2 号孔の区間番号 1 を例として説明する。

(1) フーリエスペクトルの計算

時系列データをフーリエ変換することによって、フーリエスペクトルを求めることができる。時間間隔 Δt で取得されている N 個の離散データ x_n の場合には、次式 (Bendat and Piersol(2000), p.404) によってフーリエ変換を行う。

$$X_k = \frac{X(f_k)}{\Delta t} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left[-i \frac{2\pi kn}{N}\right] \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.4)$$

離散データのフーリエ変換を効率的に行うアルゴリズムである FFT*では、取り扱うことができるデータ数は 2 の整数乗個に限定される (大崎(1994)) ので、本検討では、2003 年 1 月 9 日 0:00 から 2003 年 1 月 30 日 7:00 までについて、1 時間ごとの 512 データをフーリエ変換の対象とした。

フーリエ変換されたデータは、各周波数 (あるいは周期) 成分について、複素数として得られる。本報告書では、この複素数の絶対値を縦軸として各周期について図化している。

* FFT: FFT (Fast Fourier Transform) とは、Cooley and Tukey(1965)によって開発された、フーリエ変換のアルゴリズムである。従来の方法に比べて計算時間を大幅に短縮できるため、高速フーリエ変換とも呼ばれている。

なお、スペクトルはパワースペクトルとして表示されることが一般的である。フーリエスペクトルと比較すると、パワースペクトルの方がピークが明瞭なため、問題としている周波数成分を特定しやすい。しかし、パワースペクトル図上では、入力と出力の比が二乗で表現されるため、ゲインが視覚的に分かりにくい。本報告書では、周波数成分を特定するよりも、入力と出力の関係に着目するため、パワースペクトルではなくフーリエスペクトルを図化している。また、スペクトルを表現する図では、通常は横軸を周波数で表すが、本報告書では物理的意味が理解しやすい周期で表すこととする。

間隙水圧と気圧の時系列データ（図 2-7）から得られたフーリエスペクトルを図 2-9 に、面積ひずみの時系列データ（図 2-8）から得られたフーリエスペクトルを図 2-10 に示す。

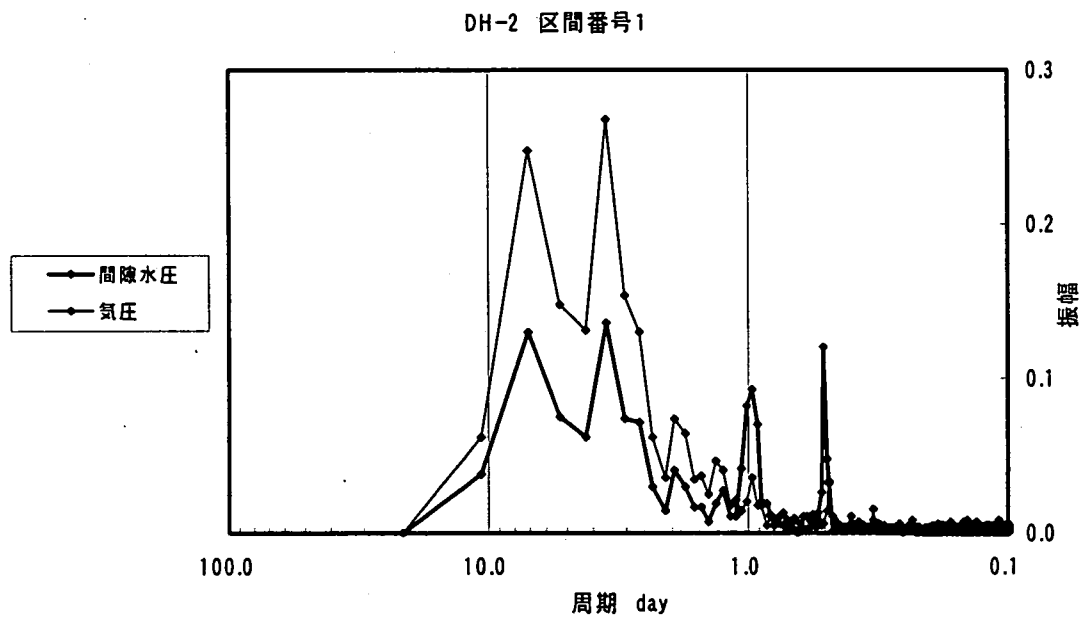


図 2-9 DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

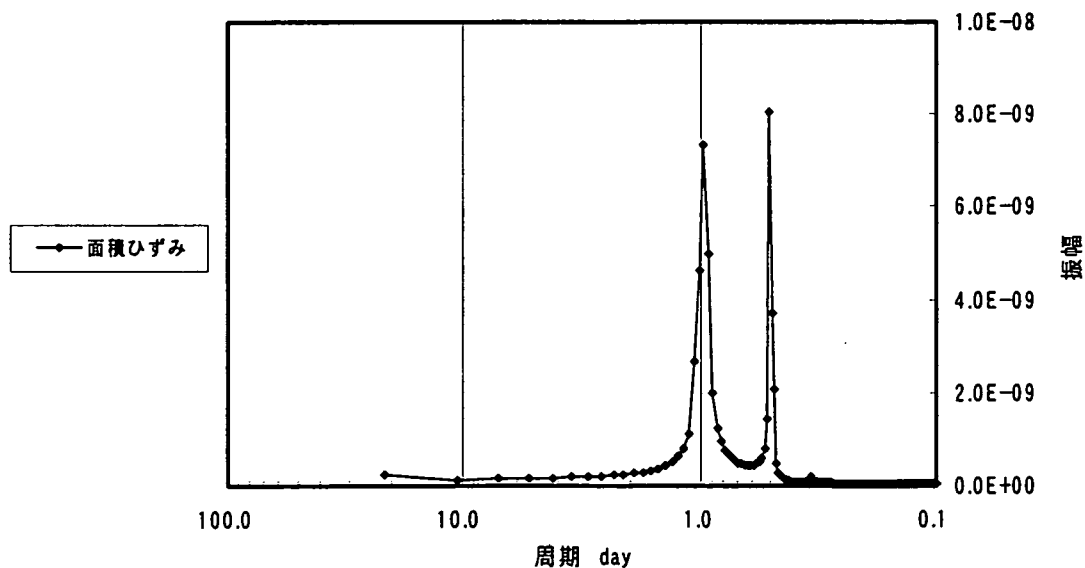


図 2-10 面積ひずみのフーリエスペクトル

(2) クロススペクトルの計算

時間間隔 Δt で取得されている N 個の離散データ x_n と y_n の場合、クロススペクトル $S_{xy}(f_k)$ は、以下の式で求めることができる (Bendat and Piersol(2000), p.445)。

$$S_{xy}(f_k) = \frac{1}{N\Delta t} [X_k^*(f_k)Y_k(f_k)] \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.5)$$

ここで、 X^* は X の共役複素数を示す。

(3) ゲインの計算

周波数領域では、線形システムの入力 $X(f_k)$ と出力 $Y(f_k)$ の関係は周波数応答関数 (伝達関数と呼ばれることもある) $H(f_k)$ を用いて、次式のように表される (Bendat and Piersol(2000), p.191)。

$$Y(f_k) = H(f_k)X(f_k) \quad (2.6)$$

この関係は、入力のパワースペクトル $S_{xx}(f_k)$ とクロススペクトル $S_{xy}(f_k)$ を用いて、次式のように書くこともできる。

$$S_{xy}(f_k) = H(f_k)S_{xx}(f_k) \quad (2.7)$$

クロススペクトル $S_{xy}(f_k)$ は複素数であるため、以下のように実部と虚部で表現することができる。

$$S_{xy}(f_k) = C_{xy}(f_k) + iQ_{xy}(f_k) \quad (2.8)$$

したがって、ゲイン $|H(f_k)|$ は次式から求めることができる。

$$|H(f_k)| = \frac{|S_{xy}(f_k)|}{S_{xx}(f_k)} = \frac{\sqrt{C_{xy}^2(f_k) + Q_{xy}^2(f_k)}}{S_{xx}(f_k)} \quad (2.9)$$

本検討では、気圧変動に対する間隙水圧変動のゲインと、面積ひずみに対する間隙水圧変動のゲインを考える。このとき、図 2-9 および図 2-10 を参考にすると、一部の周期を除くと、入力信号である気圧変動および面積ひずみのスペクトルが非常に小さいことがわかる。このような小さな入力信号に対するゲインを求めることの物理的意味は明瞭ではないので、ここでは以下の周期範囲に限定してゲインを求めるものとする。

気圧変動 : 周期範囲 1.94~7.11 日

面積ひずみ : 周期範囲 0.970 日 および 0.508 日

なお、図 2-11 に示すように、気圧変動の周期範囲では、面積ひずみのスペクトルが無視できるほど小さく、面積ひずみの周期範囲では、気圧変動のスペクトルが無視できるほど小さい。したがって、それぞれの影響を独立に検討することが可能であると判断した。図

2-11 は気圧変動の大きさと面積ひずみの大きさを相対的に比較するために、両者のパワーが等しくなるように作図されている。

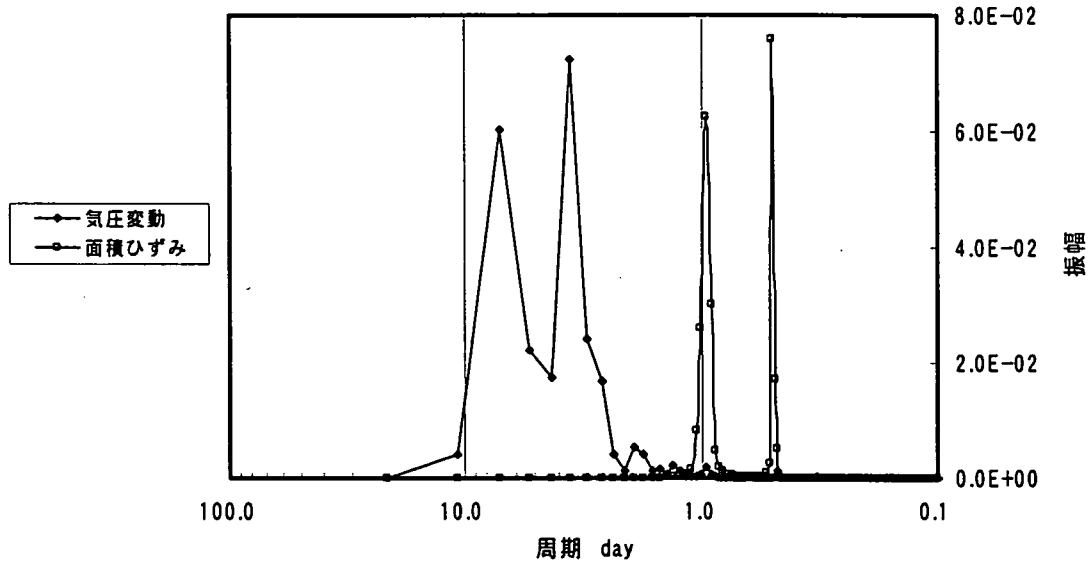


図 2-11 気圧変動と面積ひずみのパワースペクトルの相対比較図

(2.9)式を用いて求めた気圧変動に対するゲインを図 2-12 に、面積ひずみに対して求めたゲインを図 2-13 に示す。

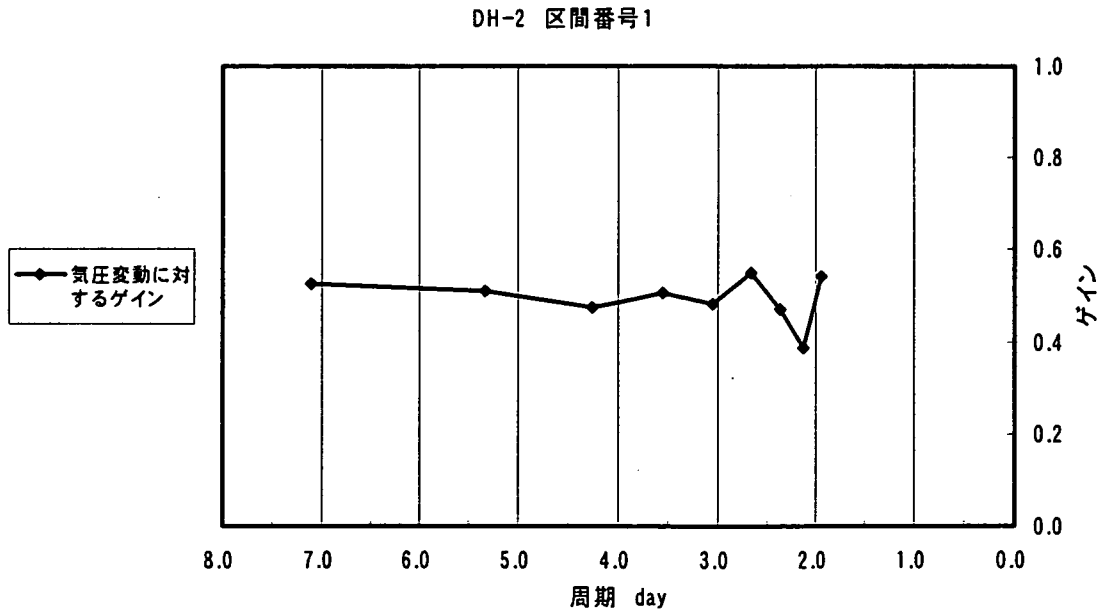


図 2-12 DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

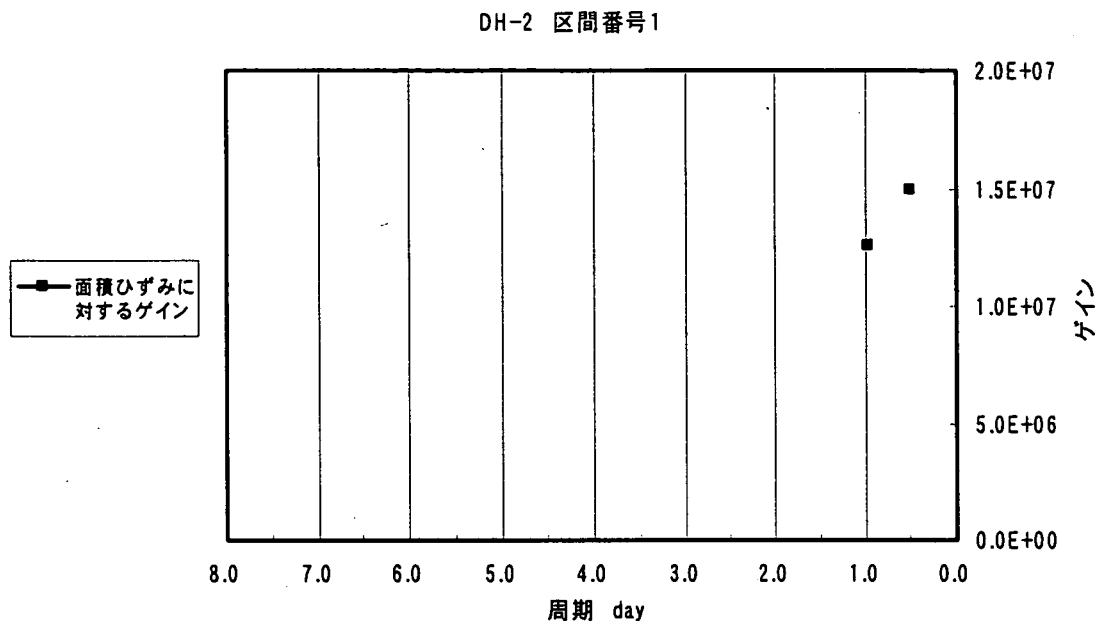


図 2-13 DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

図 2-12 から、気圧変動に対するゲインは周波数によらず 0.5 程度であることがわかる。これに対して、面積ひずみに対するゲインは $1.3 \sim 1.5 \times 10^7$ 程度である。ゲインの物理的意味については、2.4 で述べる。

(4) 位相差の計算

位相差とは、周波数領域における入力信号に対する出力信号の遅れを位相で表した値で、周波数 f_k の関数として表される。具体的には、(2.7)および(2.8)式から導かれる次式を用いて得られる。

$$\phi(f_k) = \arg[H(f_k)] = \tan^{-1} [Q_{xy}(f_k) / C_{xy}(f_k)] \quad (2.10)$$

気圧変動および面積ひずみに対する間隙水圧の位相差を図 2-14 に示す。

DH-2 区間番号1

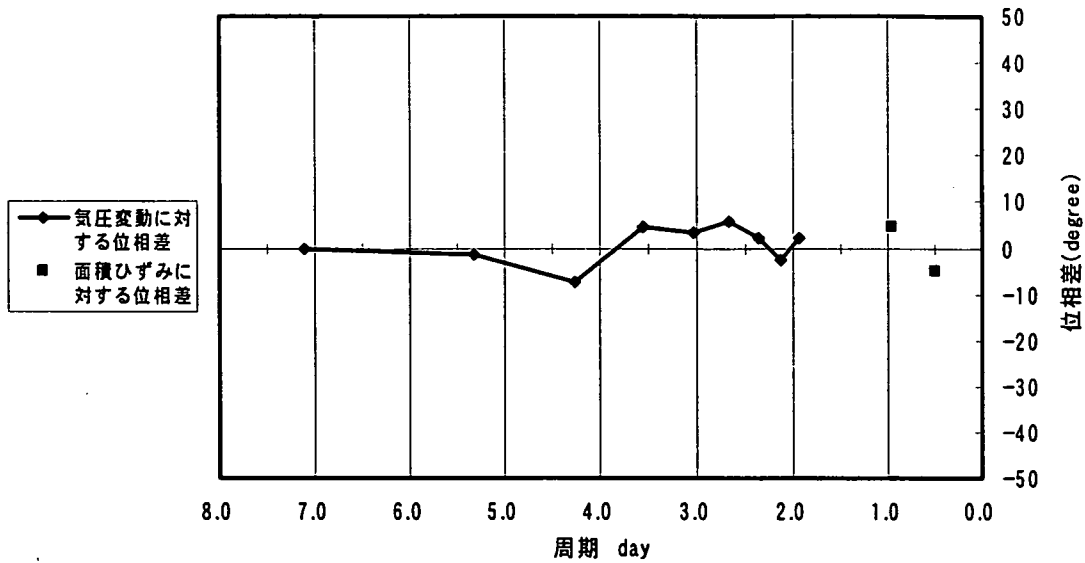


図 2-14 DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の
気圧変動および面積ひずみに対する位相差

図 2-14 から、この区間では気圧変動に対しても、面積ひずみに対しても位相差が小さいことがわかる。

2.4 スペクトル解析結果の解釈

スペクトル解析結果を解釈するためには、はじめに間隙水圧変動が気圧変動および地球潮汐（面積ひずみ）に対して非排水応答であるか否かを確認することが必要である。

非排水応答であるか否かを確認するためには、以下の検討を行う。

- 1) 位相差がゼロである場合には非排水応答であり、ゼロでない場合には非排水応答ではない
- 2) ゲインが変動の周期によらず一定であれば非排水応答であり、一定でなければ非排水応答ではない

ただし、実際には、時系列データの長さ、時系列データに含まれるノイズ・トレンドの影響、FFT の有する周波数分解能などの影響によって非排水応答であっても厳密に位相差がゼロである、ゲインが一定であるとは限らない。例えば、図 2-12 および図 2-13 にゲイン、図 2-14 に位相差を示した DH-2 号孔の区間番号 1 の場合には、1.5~2.0 日程度のフーリエスペクトルの小さい気圧変動に対してゲインや位相差が一定していないものの、数日周期の気圧変動に対しては、非排水応答の条件を満たしているため、非排水応答と解釈することができる。すなわち、フーリエスペクトルが相対的に大きな周期、すなわち気圧変動の卓越周期に重み付けして、位相差およびゲインの周波数特性を解釈することができる。

応答が非排水応答であると判断した場合には、ゲインのデータから測定区間近傍の変形特性を推定することが可能である。多孔質媒体の弾性理論（多孔質弾性論）に従えば、非排水応答のとき、気圧変動および面積ひずみに対して間隙水圧は次式のように応答する（例えば、細谷・徳永(2003), Wang(2000)など）。

$$p = \gamma p_a \quad (2.11)$$

$$p = 2G\gamma\varepsilon_a \quad (2.12)$$

ここに、 γ は载荷効率（Loading efficiency）と呼ばれるパラメータで、 G は剛性率（Shear modulus）、 ε_a は面積ひずみである。すなわち、間隙水圧の気圧変動に対するゲインから γ が、面積ひずみに対するゲインから $2G\gamma$ が推定できる。

G は弾性理論によって（例えば、Jeager and Cook(1969)）弾性係数などに換算することが可能であり、一般的に値が大きいほど変形量が小さく、硬い岩盤であることを示唆している。一方、 γ も岩盤の変形に関するパラメータであり、細谷・徳永(2004)が述べているように、間隙率の影響が大きい、硬い岩盤ほど小さな値となる傾向がある。なお、これらのパラメータは、非定常な地下水流動を考えるとときに変形特性を表すパラメータである比貯留係数とも関係付けることができる。

ただし、このように物性を定量的に推定する場合には、面積ひずみを理論値で仮定している影響を考慮する必要がある。海洋潮汐や地形、不均質性の影響によって実際の面積ひずみは理論値とは大きく異なる場合があることが述べられており（Beaumont and Berger(1975)）、(2.12)式を利用して得られる $2G\gamma$ の値には面積ひずみを仮定した誤差が含まれていることに留意が必要である。

応答が非排水応答ではない場合、ゲインと位相差は非排水応答について述べた変形特性だけではなく、透水特性の影響も受けることになる。細谷・徳永(2003)は飽和地盤の上位に水平な不飽和帯が広がっているときの気圧変動による間隙水圧変化を以下のように示している。

$$p(z,t) = \sigma_B (A_B + iB_B) \exp(i\omega t) \quad (2.13)$$

このとき、気圧変動を次式のように与えている。

$$p_a(0,t) = \sigma_B \exp(i\omega t) \quad (2.14)$$

ここで、 ω は気圧変動の角周波数、 σ_B は振幅である。また、 A_B および B_B は以下のように表される。

$$A_B = \gamma + \exp(-\sqrt{Q}) \left(-\gamma \cos(-\sqrt{Q}) + M \cos(-\sqrt{Q}) + N \sin(-\sqrt{Q}) \right) \quad (2.15)$$

$$B_B = \exp(-\sqrt{Q}) \left(\gamma \sin(-\sqrt{Q}) + M \sin(-\sqrt{Q}) - N \cos(-\sqrt{Q}) \right) \quad (2.16)$$

$$M = \frac{2 \cosh(\sqrt{R}) \cos(\sqrt{R})}{\cosh(2\sqrt{R}) + \cos(2\sqrt{R})} \quad (2.17)$$

$$N = \frac{2 \sinh(\sqrt{R}) \sin(\sqrt{R})}{\cosh(2\sqrt{R}) + \cos(2\sqrt{R})} \quad (2.18)$$

$$Q = \frac{z^2 \omega}{2c_2} \quad (2.19)$$

$$R = \frac{z_1^2 \omega}{2c_1} \quad (2.20)$$

ここに、 z は測定区間の深度、 z_1 は地下水面、 c_1 は不飽和帯の気体拡散率、 c_2 は飽和帯の水頭拡散率である。すなわち、地下水流動を伴う場合の気圧変動に対する間隙水圧の応答は、 z 、 z_1 、 z_2 、 γ 、 ω 、 σ_B の7つのパラメータで表現される。

3. スペクトル解析の結果

本章では、前章で述べた方法に従って実施したスペクトル解析作業の結果を示す。

3.1 フーリエスペクトル

作業対象とした全区間の間隙水圧のフーリエスペクトルを、気圧のフーリエスペクトルと併せて図 3-1 に示す。また、面積ひずみのフーリエスペクトルを図 3-2 に示す。

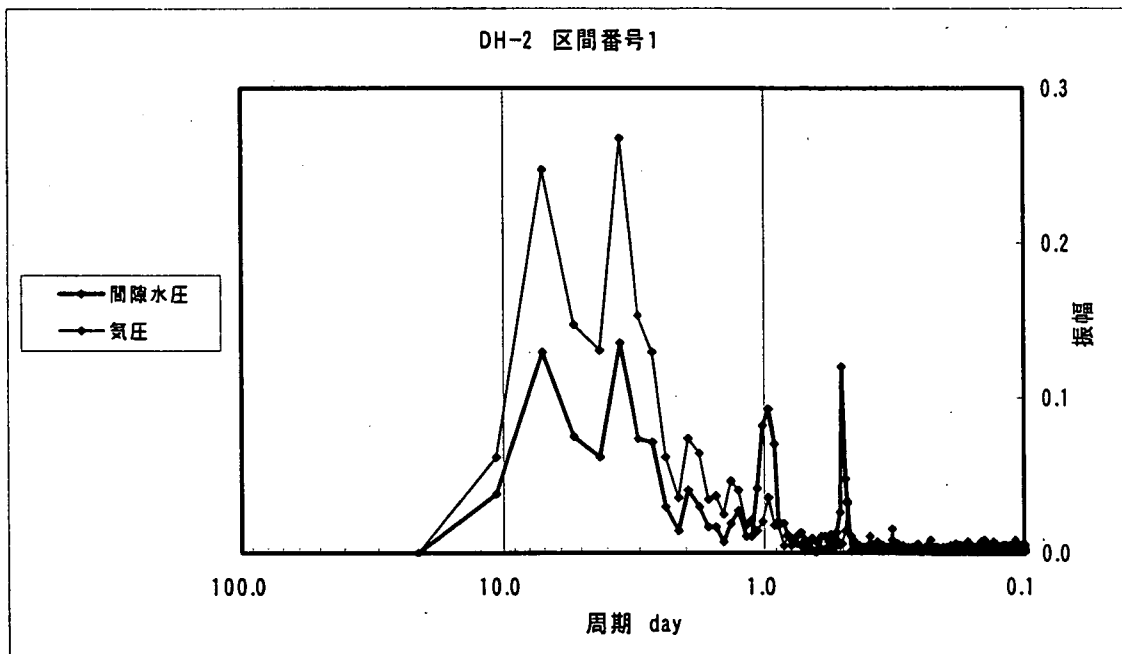


図 3-1(a) DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

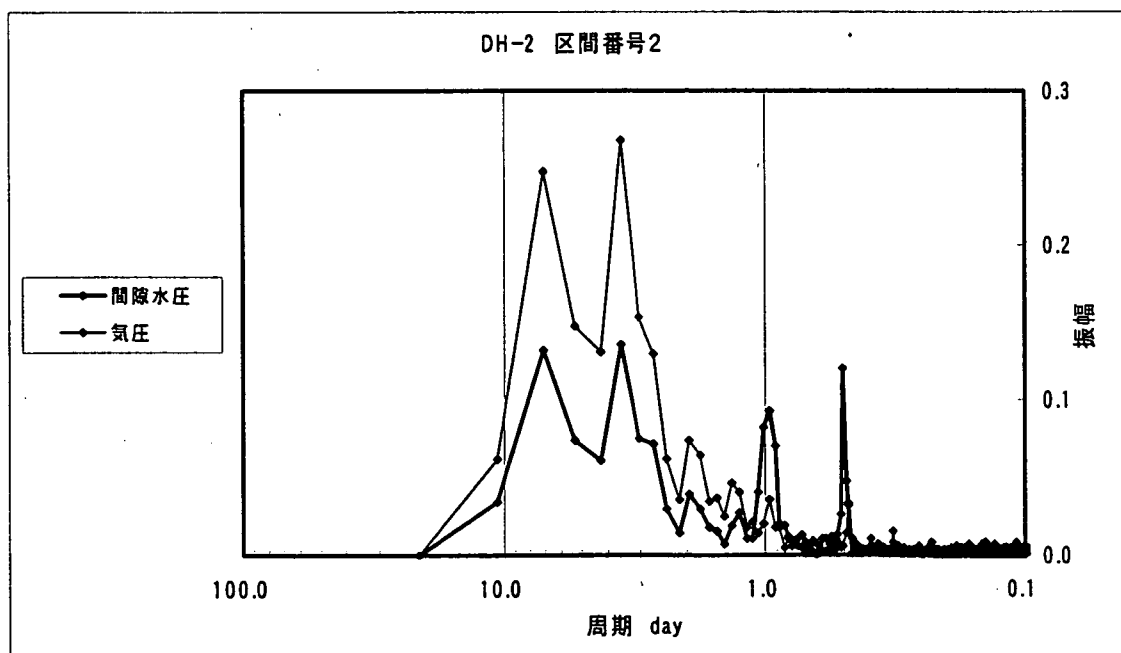


図 3-1(b) DH-2 号孔の区間番号 2 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

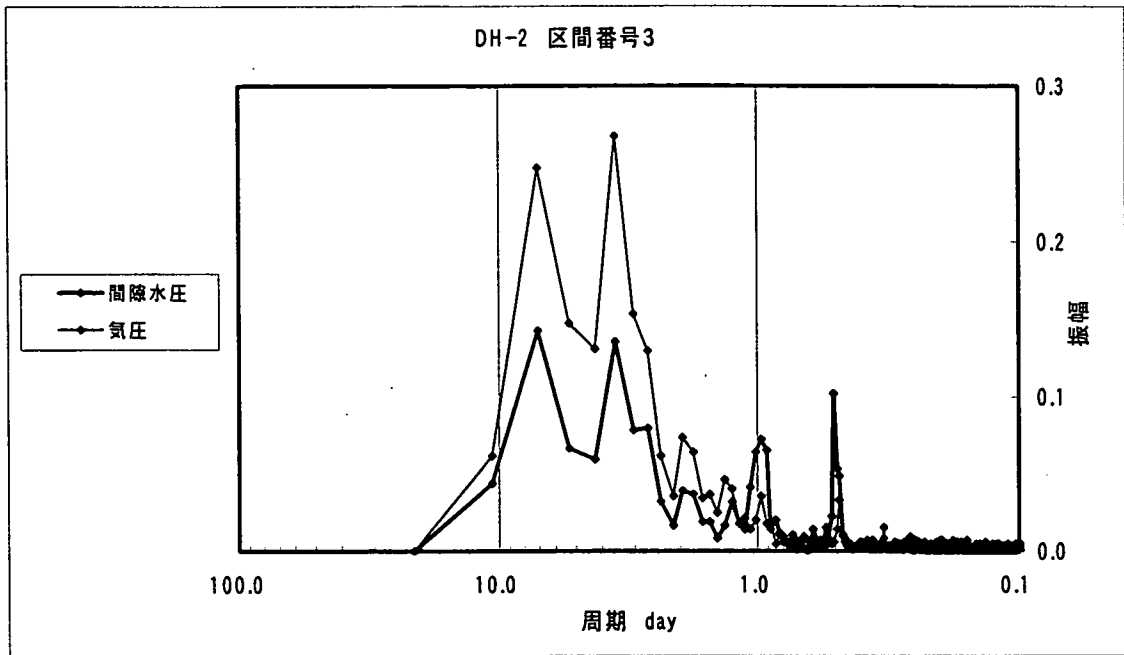


図 3-1(c) DH-2 号孔の区間番号 3 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

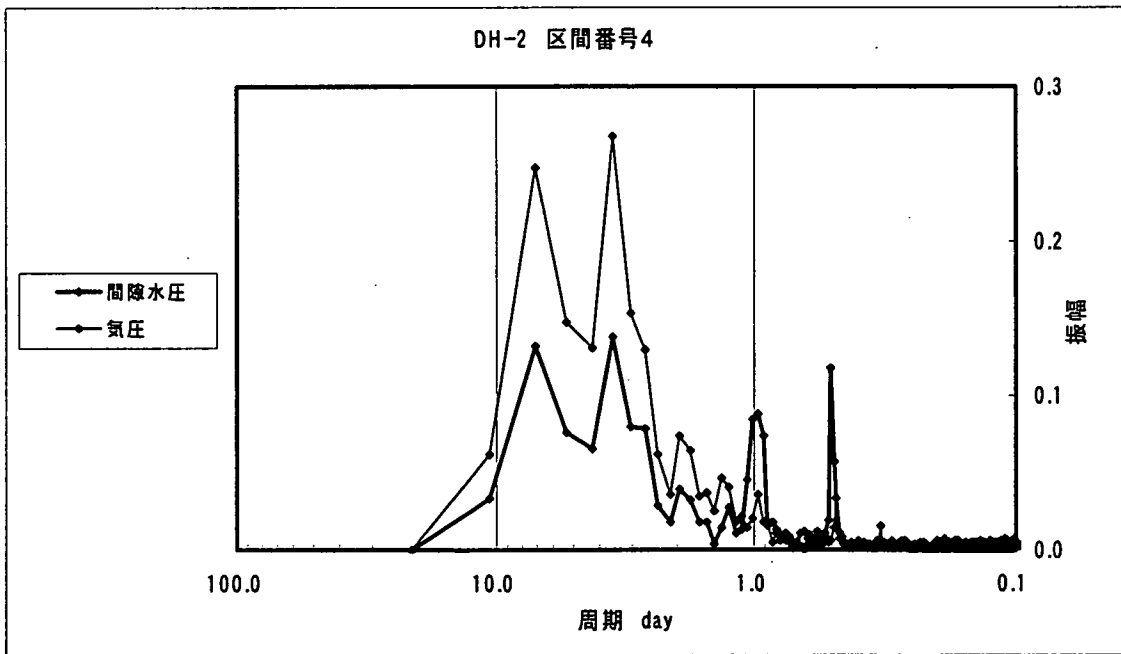


図 3-1(d) DH-2 号孔の区間番号 4 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

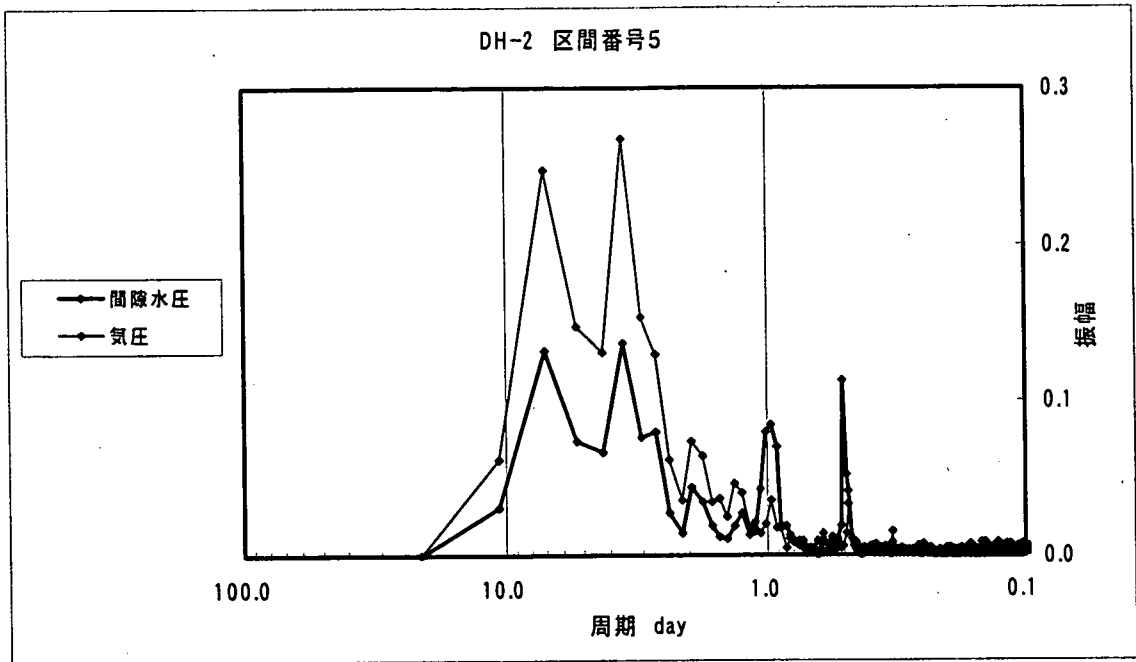


図 3-1(e) DH-2 号孔の区間番号 5 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

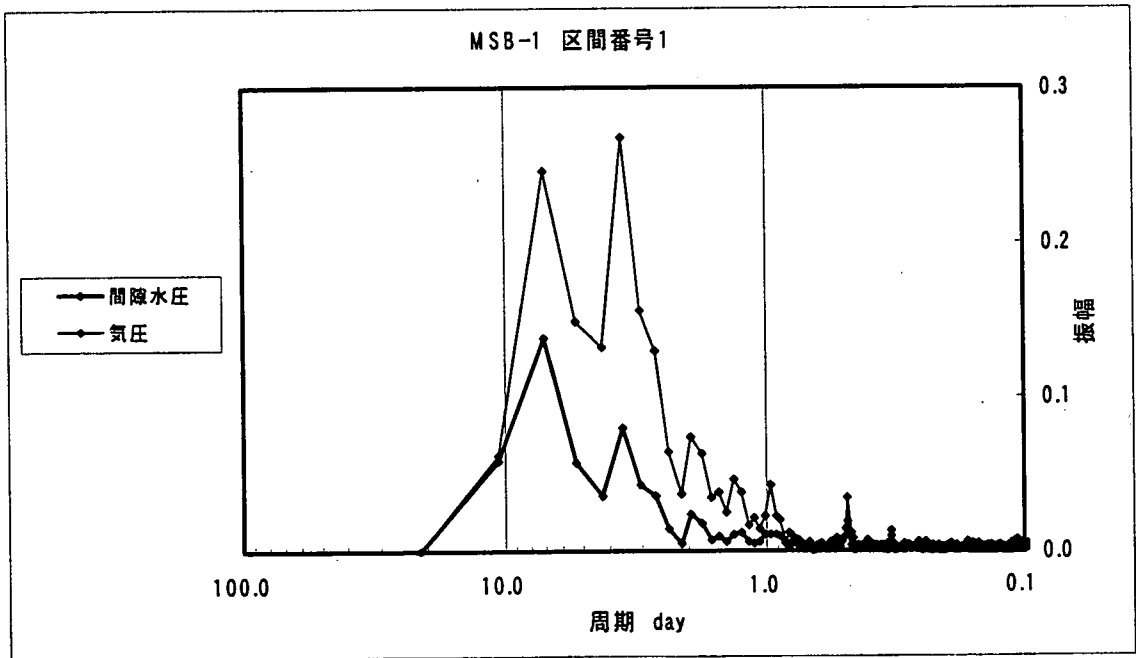


図 3-1(f) MSB-1 号孔の区間番号 1 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

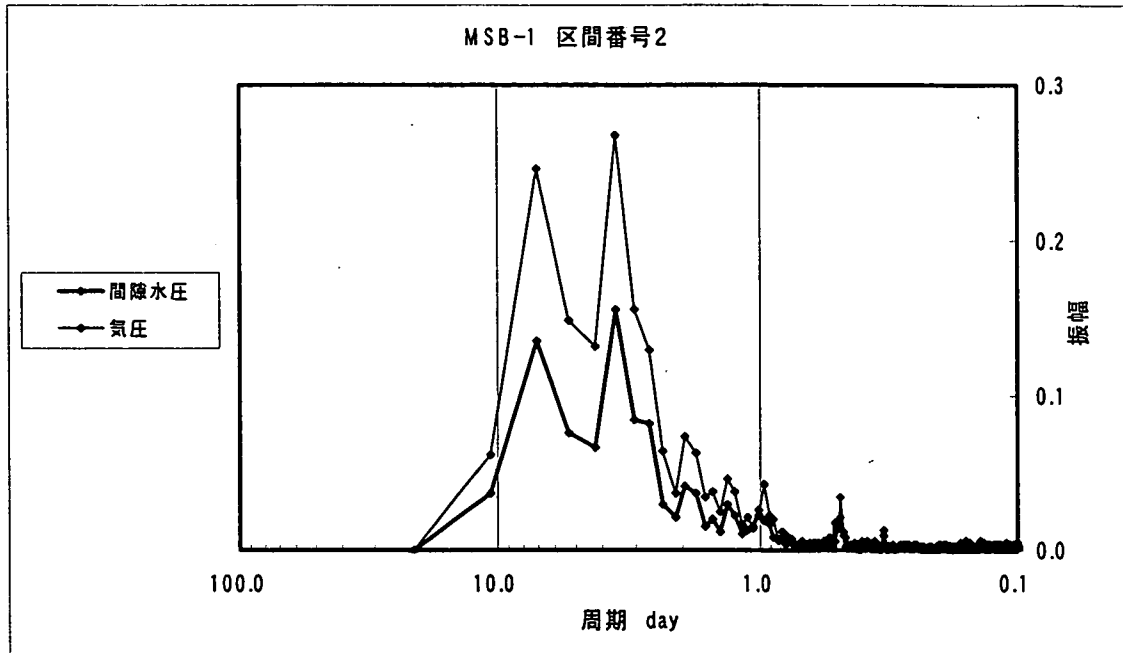


図 3-1(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

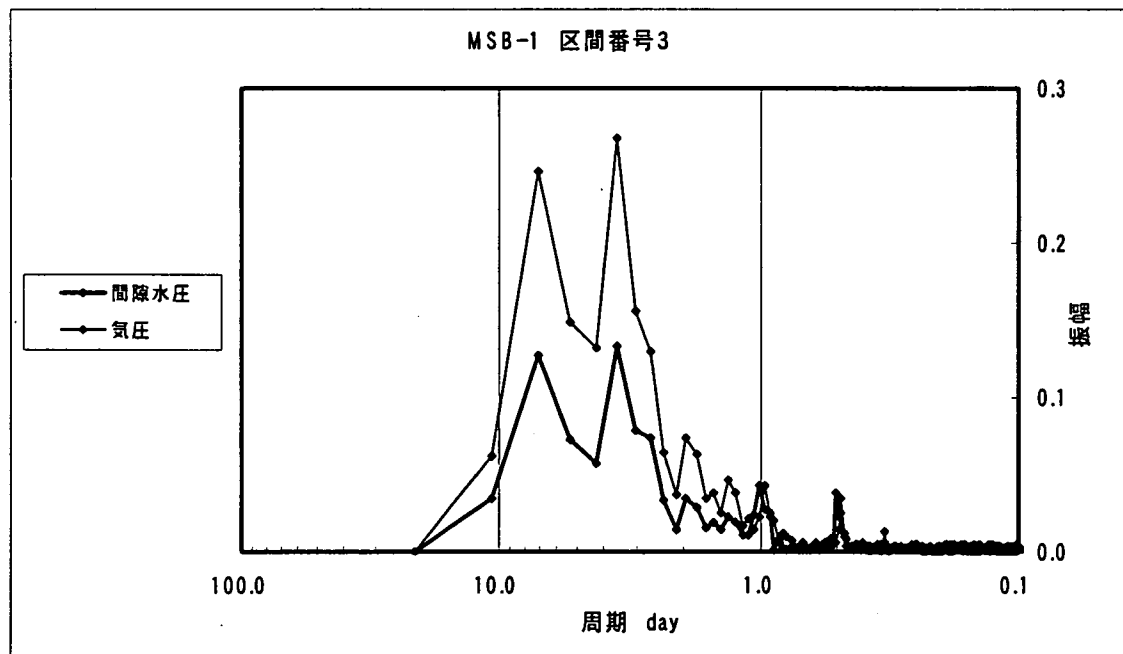


図 3-1(h) MSB-1 号孔の区間番号 3 における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

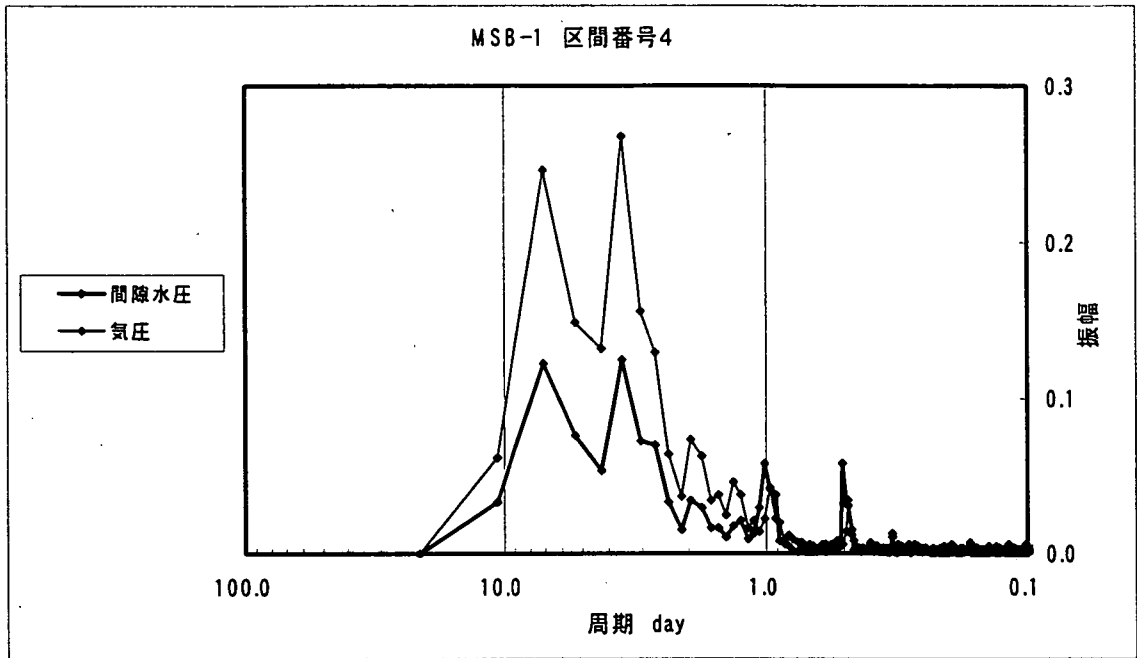


図 3-1(i) MSB-1 号孔の区間番号4における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

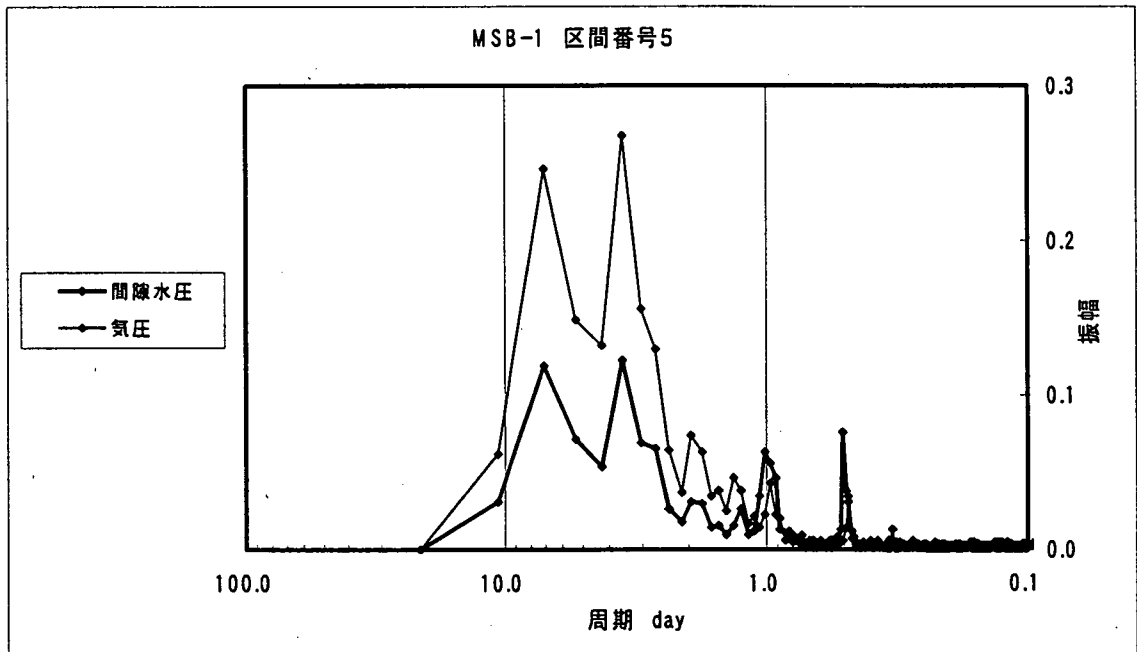


図 3-1(j) MSB-1 号孔の区間番号5における間隙水圧と気圧のフーリエスペクトル

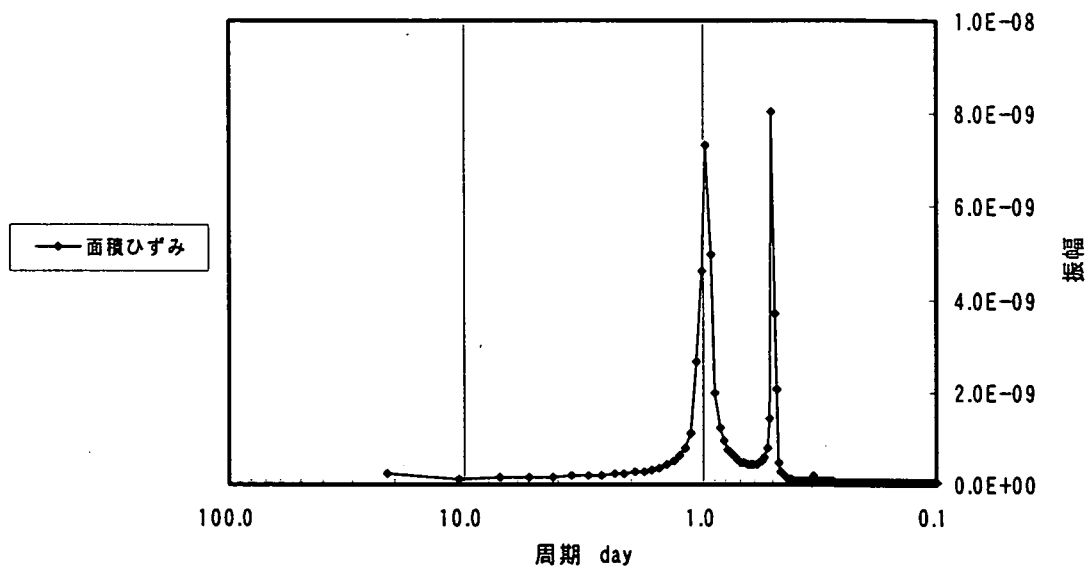


図 3-2 面積ひずみのフーリエスペクトル

図 3-1 では、気圧変動の卓越周期（ピーク）が 7.11 日および 3.56 日であることが示されている。間隙水圧のスペクトルも気圧のピークに対応したピークがすべての区間で確認でき、間隙水圧が気圧変動に反応していることがわかる。ただし、MSB-1 号孔の区間番号 1 では、周期 3.56 日に対応したピークが他の区間と比べると小さい。

図 3-2 では、面積ひずみの卓越周期（ピーク）は 0.970 日、0.508 日であり、0.339 日のところにもごく小さなピークが認められる。潮汐力は多くの成分（分潮）から構成されているが、間隙水圧を変動させ物性評価に利用されているのは以下の 2 成分である（例えば、Roeloffs(1995), Hsieh et al.(1987)）。

O_1 : 23.44 時間 (0.997 日) 周期

M_2 : 12.42 時間 (0.518 日) 周期

図 3-2 における面積ひずみのピークは、それぞれの分潮に対応するものと判断できる。

なお、図 3-2 と図 3-1 を比較すると、多くの区間で面積ひずみのピークの周期に対応して、間隙水圧のピークが認められ、間隙水圧は面積ひずみ（地球潮汐）にも反応していることがわかる。ただし、MSB-1 号孔の区間番号 1~3 ではこの周期の間隙水圧のピークが他の区間に比べると小さいことが特徴的である。

気圧変動、面積ひずみに対する間隙水圧応答の相対的な大きさは、3.3 で述べるゲインによって定量的に表される。

3.2 位相差

作業対象とした全区間の間隙水圧変動の気圧変動および面積ひずみに対する位相差を図3-3に示す。

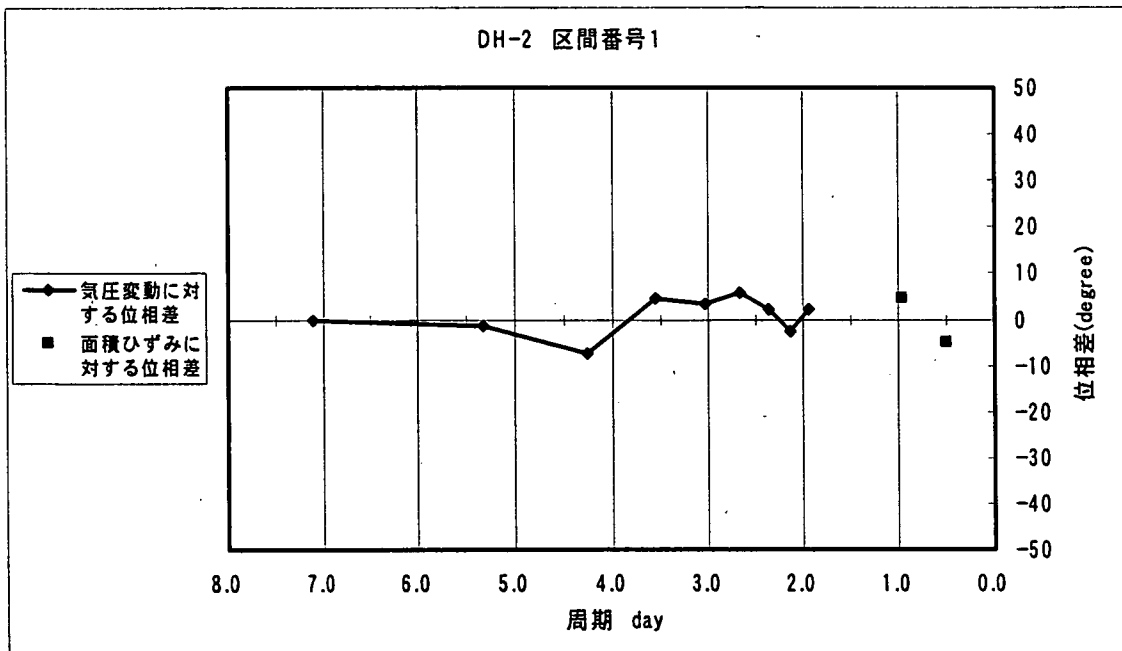


図 3-3(a) DH-2号孔の区間番号1における間隙水圧変動の位相差

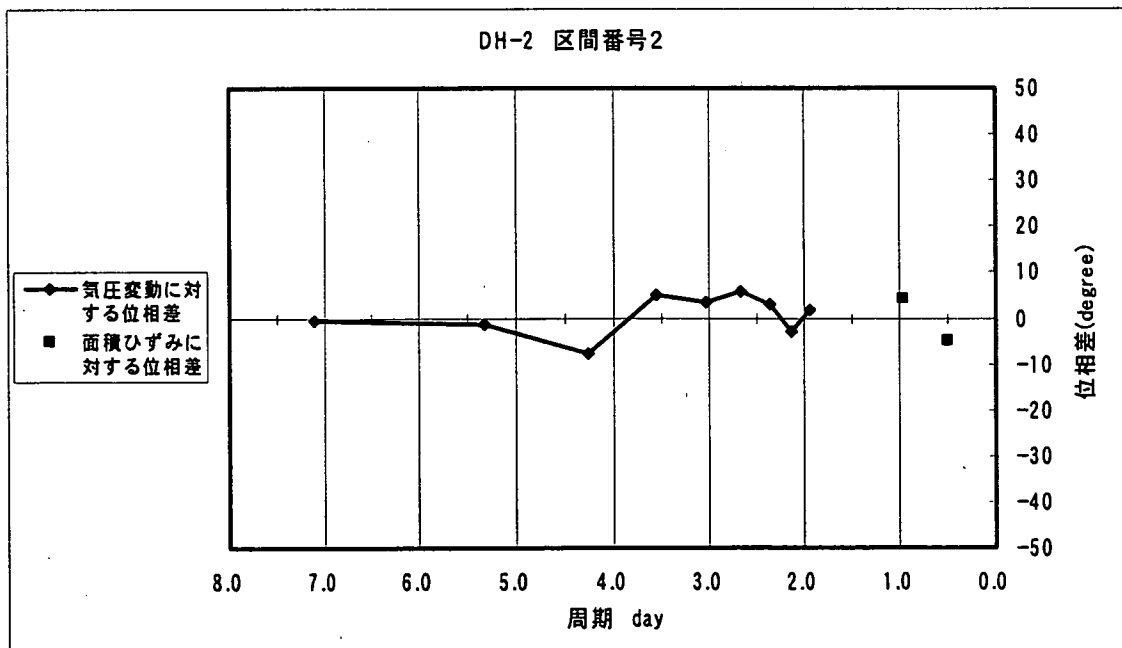


図 3-3(b) DH-2号孔の区間番号2における間隙水圧変動の位相差

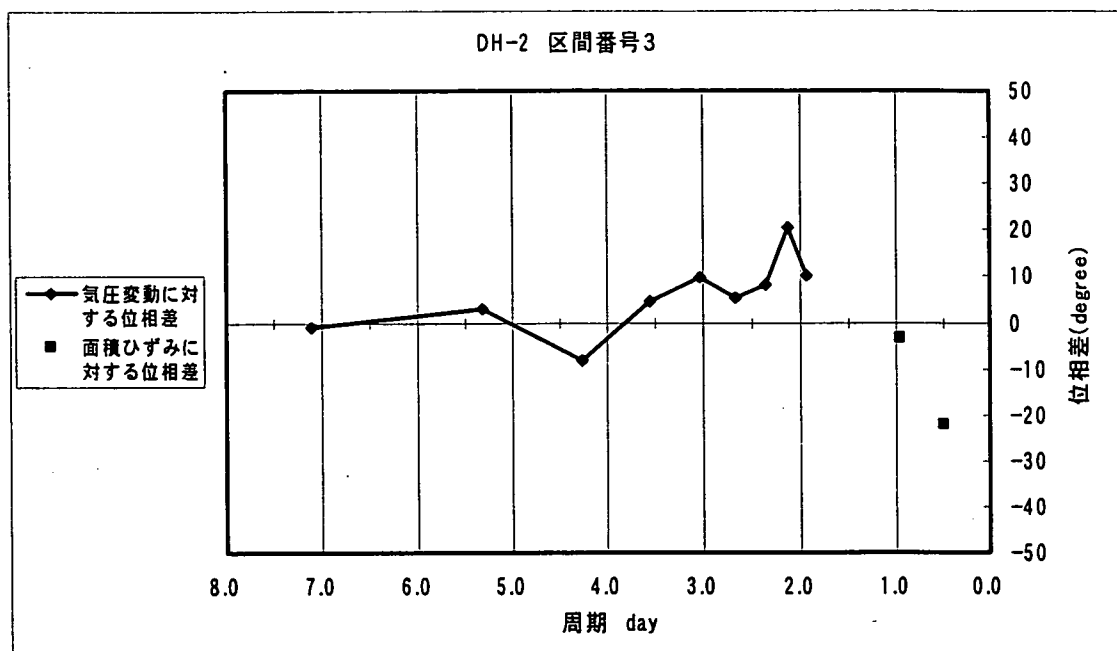


図 3-3(c) DH-2 号孔の区間番号3における間隙水圧変動の位相差

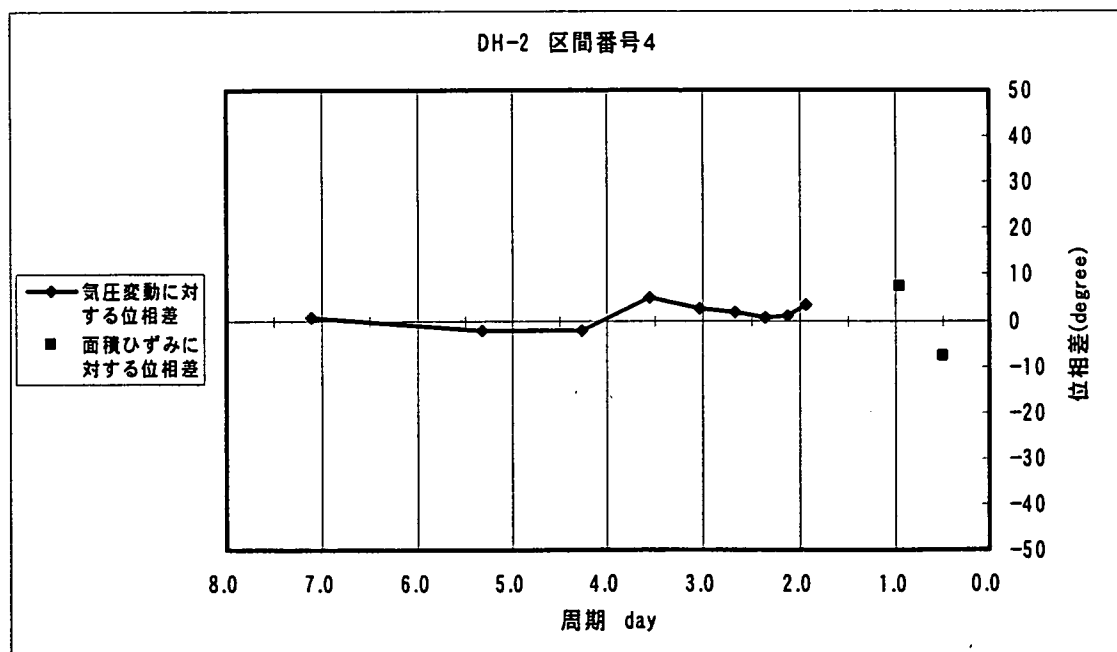


図 3-3(d) DH-2 号孔の区間番号4における間隙水圧変動の位相差

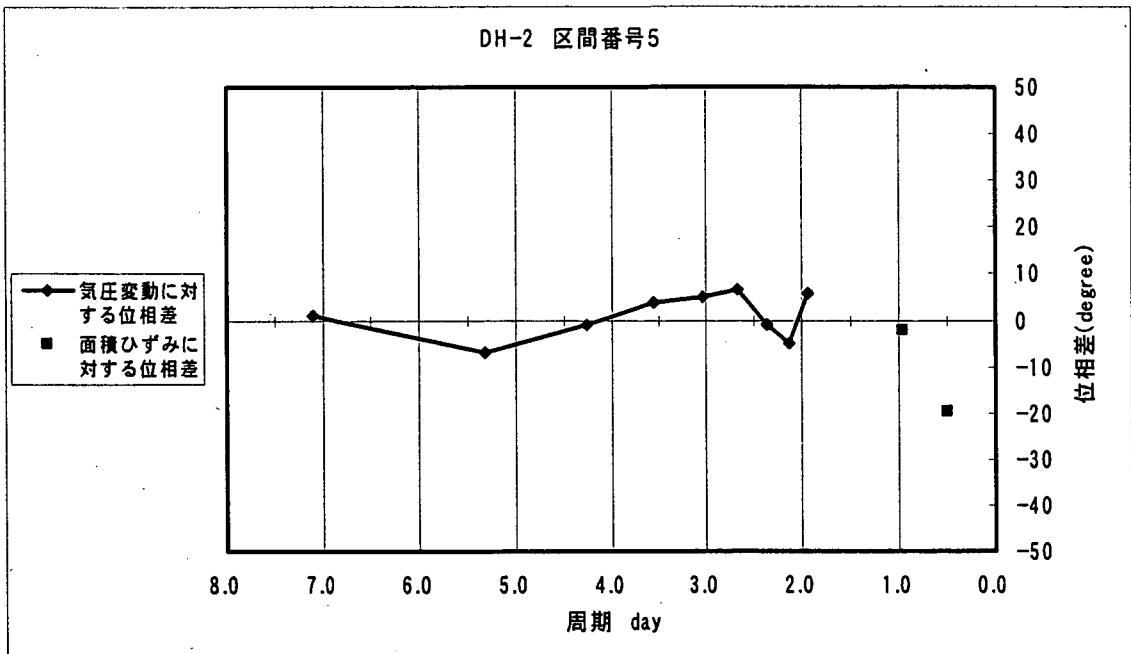


図 3-3(e) DH-2 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の位相差

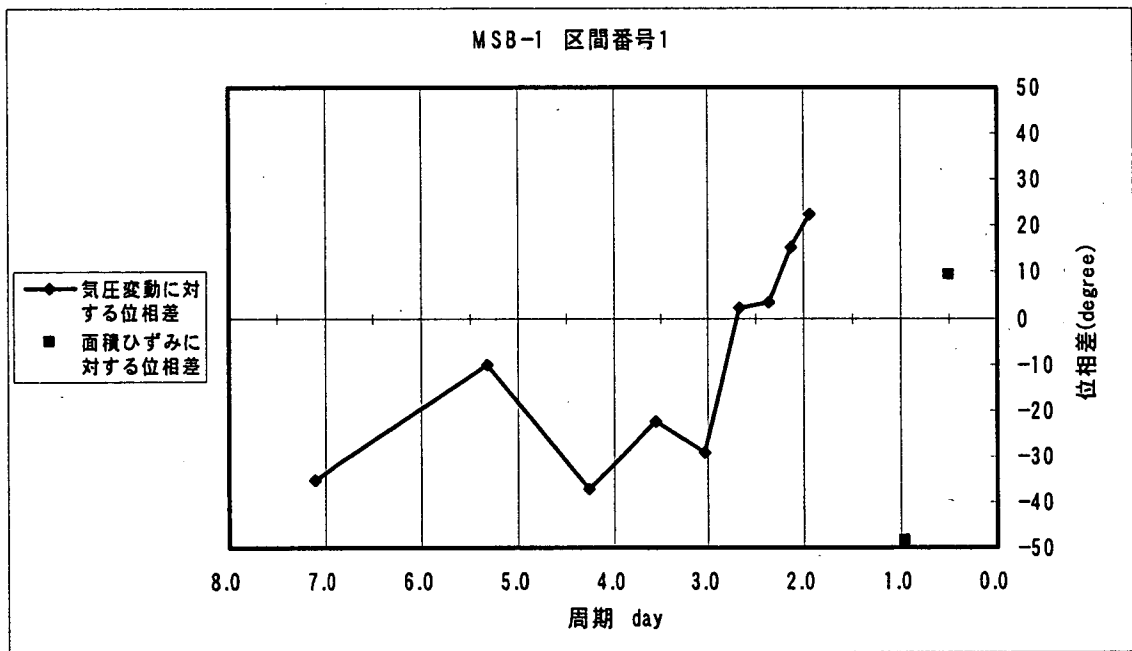


図 3-3(f) MSB-1 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の位相差

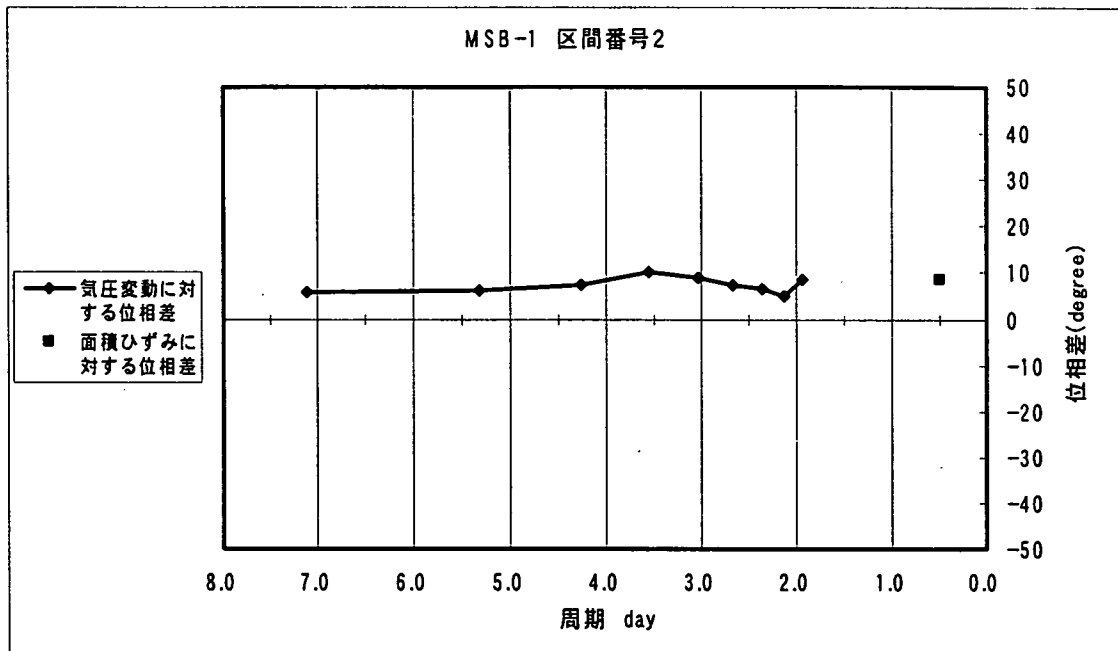


図 3-3(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 における間隙水圧変動の位相差

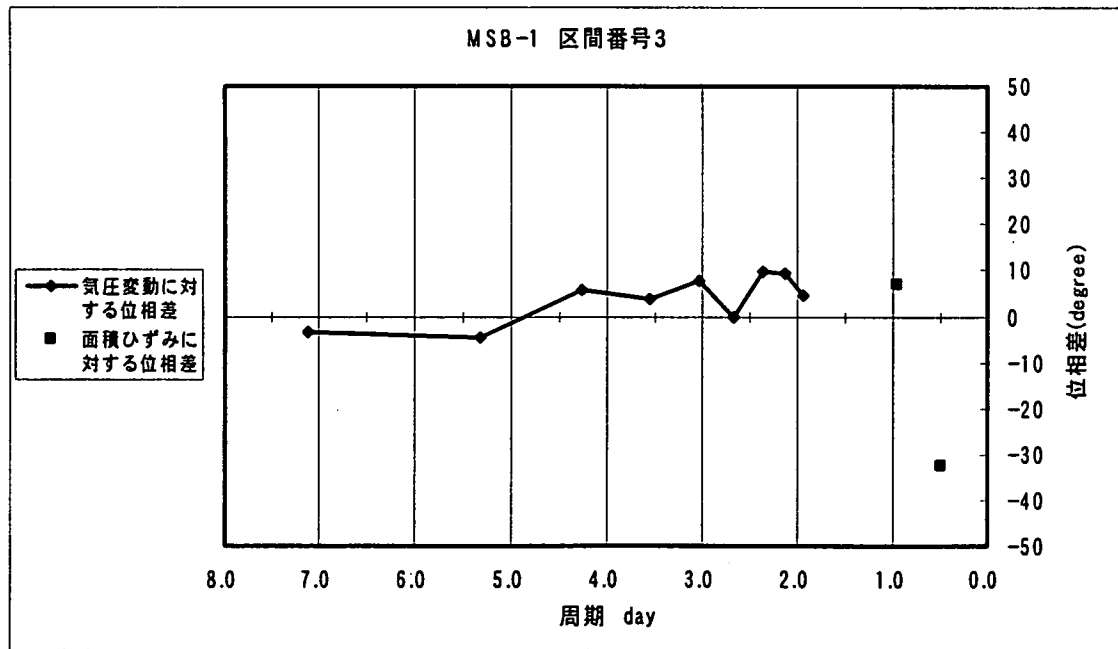


図 3-3(h) MSB-1 号孔の区間番号 3 における間隙水圧変動の位相差

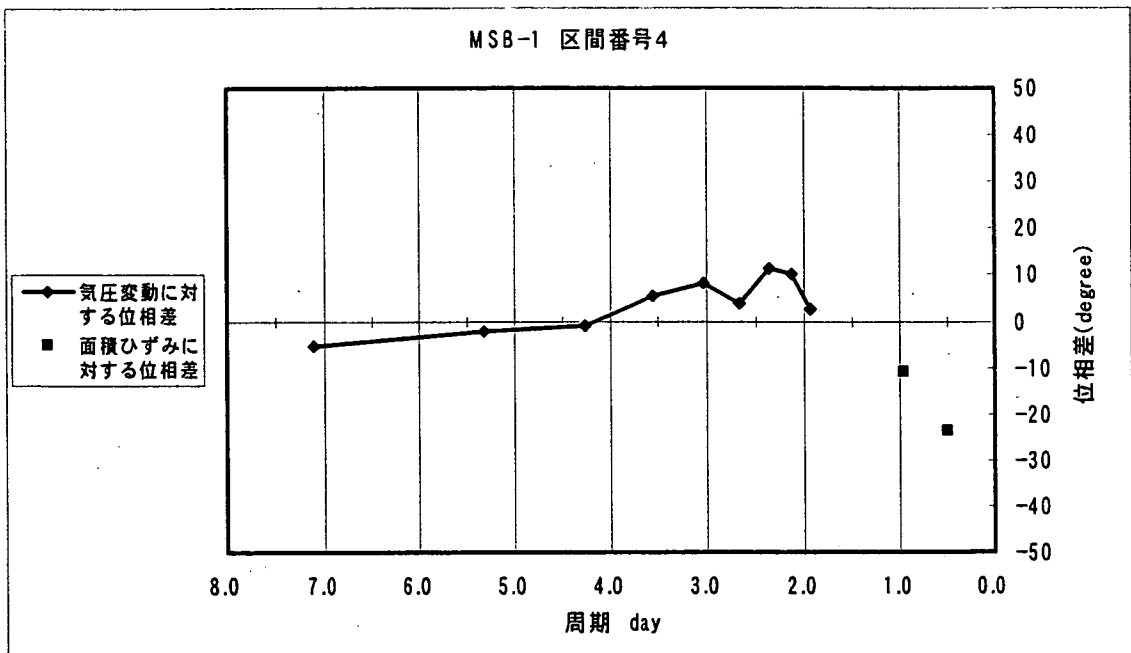


図 3-3(i) MSB-1 号孔の区間番号 4 における間隙水圧変動の位相差

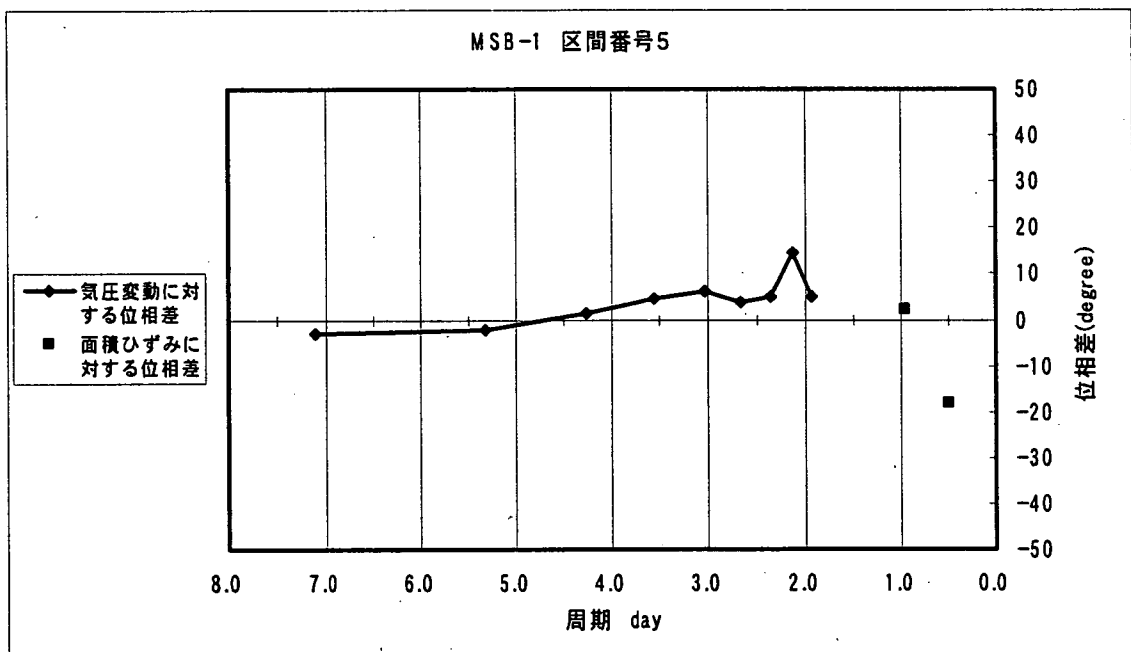


図 3-3(j) MSB-1 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の位相差

DH-2 号孔では、区間番号 3 および 5 を除くと、すべての周期において位相差がほぼゼロであるため、間隙水圧は気圧変動と地球潮汐に対して非排水状態で応答しているものと

* 本検討では、周波数領域での検討結果を時間領域に逆変換するため、スペクトルの平滑化を行っていない。このため、計算された位相差にはやや大きな誤差が含まれている。ここでは 10° 程度の位相差は誤差とみなすこととした。なお、位相差が周期によって不規則に変動することは物理的にも説明できないため、誤差と解釈することが適切である。

判断できる。区間番号 3, 5 では, 0.508 日周期の面積ひずみに対して約 20 度 (約 40 分) の位相遅れが認められる。しかしながら, 1 時間間隔のデータを処理していることと, より排水し易い 0.918 日周期の面積ひずみに対しては位相差が認められないことを考慮すると, データ処理による誤差の可能性が高いものと考えられる。

MSB-1 号孔も, 同様の考察によって, 区間番号 2 から 5 では気圧変動に対してほぼ非排水応答であるものと判断できる。これに対して, 区間番号 1 では, 気圧変動に対して位相差が認められ, 長周期の変動ほど位相差が大きい。このことは, 地下水流動による間隙水圧の消散を示している。すなわち, MSB-1 号孔の区間番号 1 のみが非排水応答ではないと判断できる。

3.3 気圧変動に対するゲイン

作業対象とした全区間の間隙水圧変動の気圧変動に対するゲインを図 3-4 に示す。

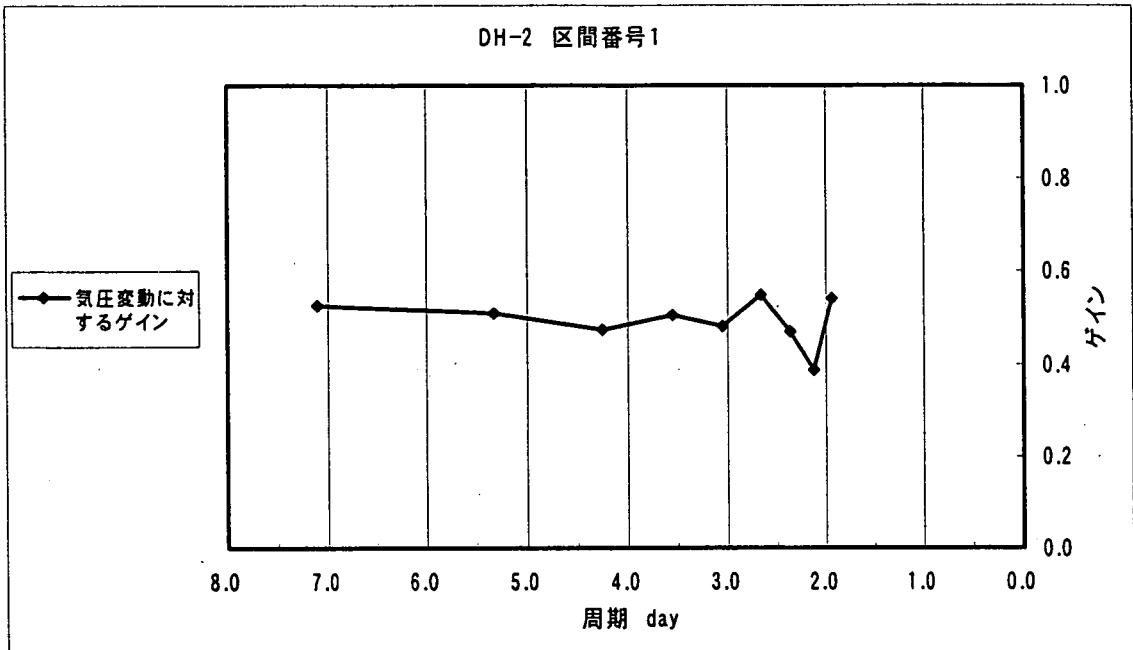


図 3-4(a) DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

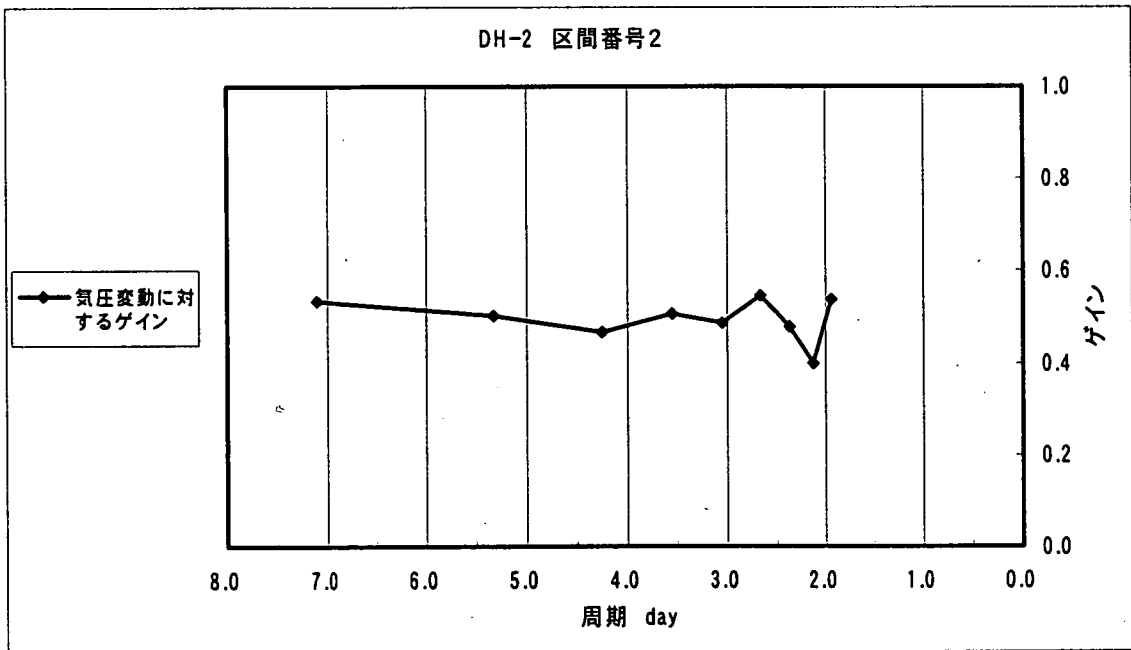


図 3-4(b) DH-2 号孔の区間番号 2 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

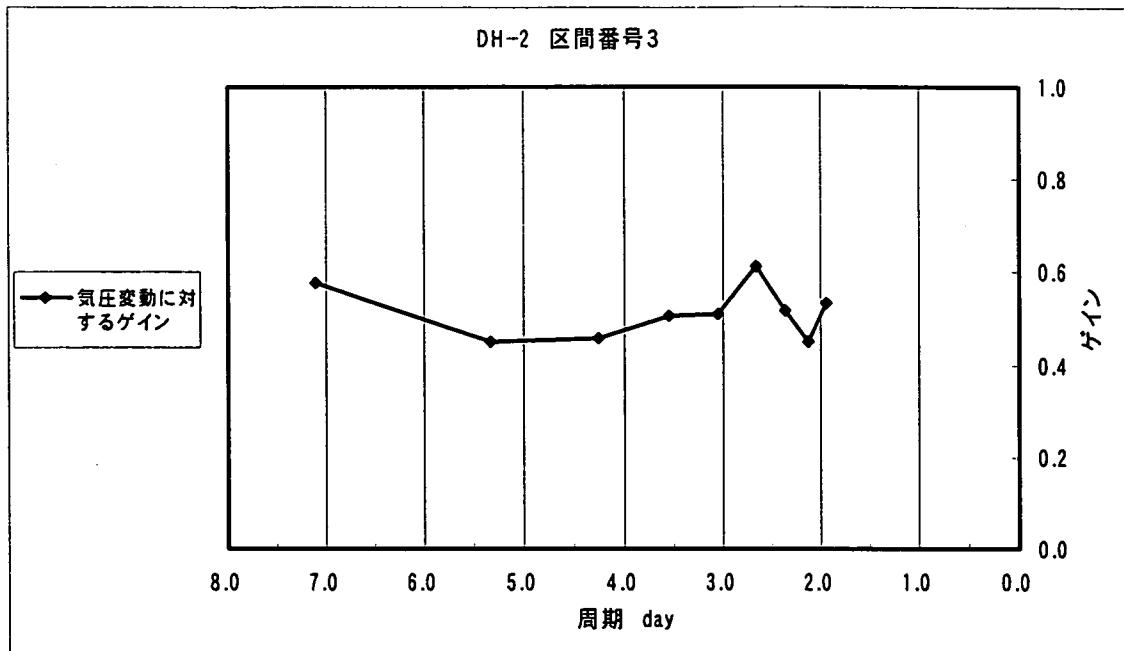


図 3-4(c) DH-2 号孔の区間番号 3 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

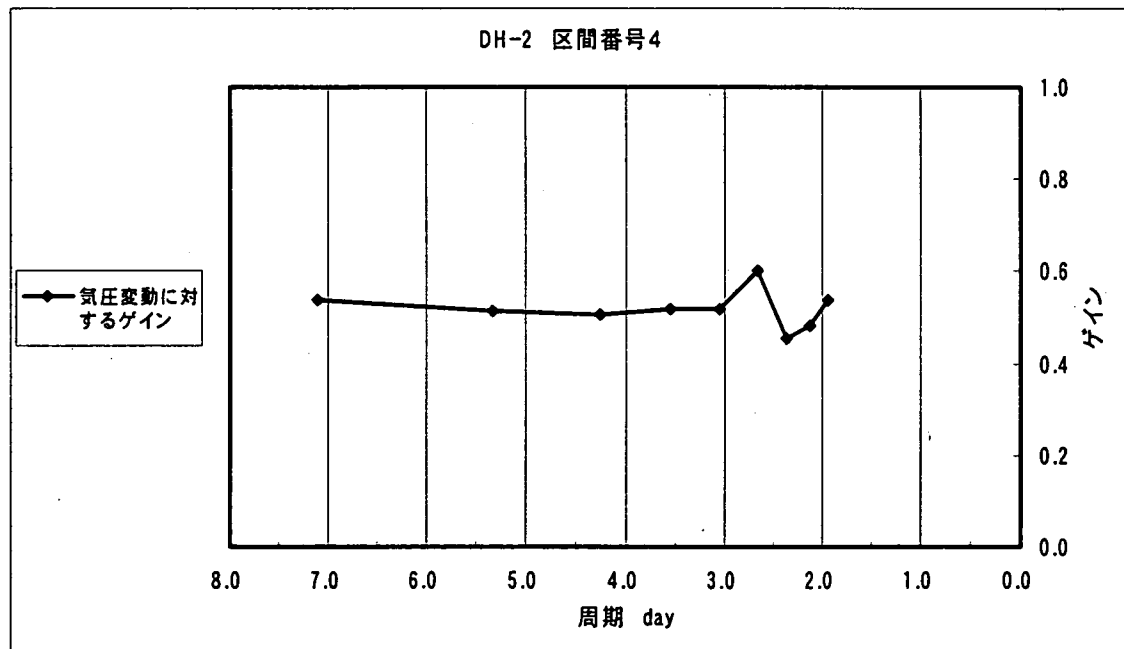


図 3-4(d) DH-2 号孔の区間番号 4 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

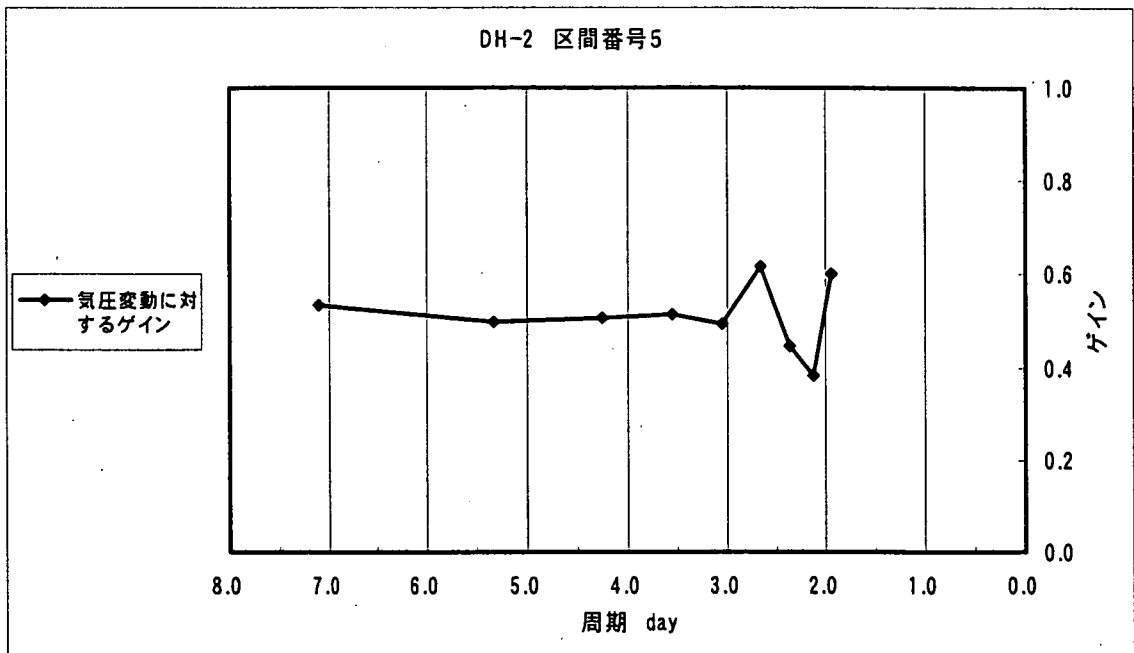


図 3-4(e) DH-2 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

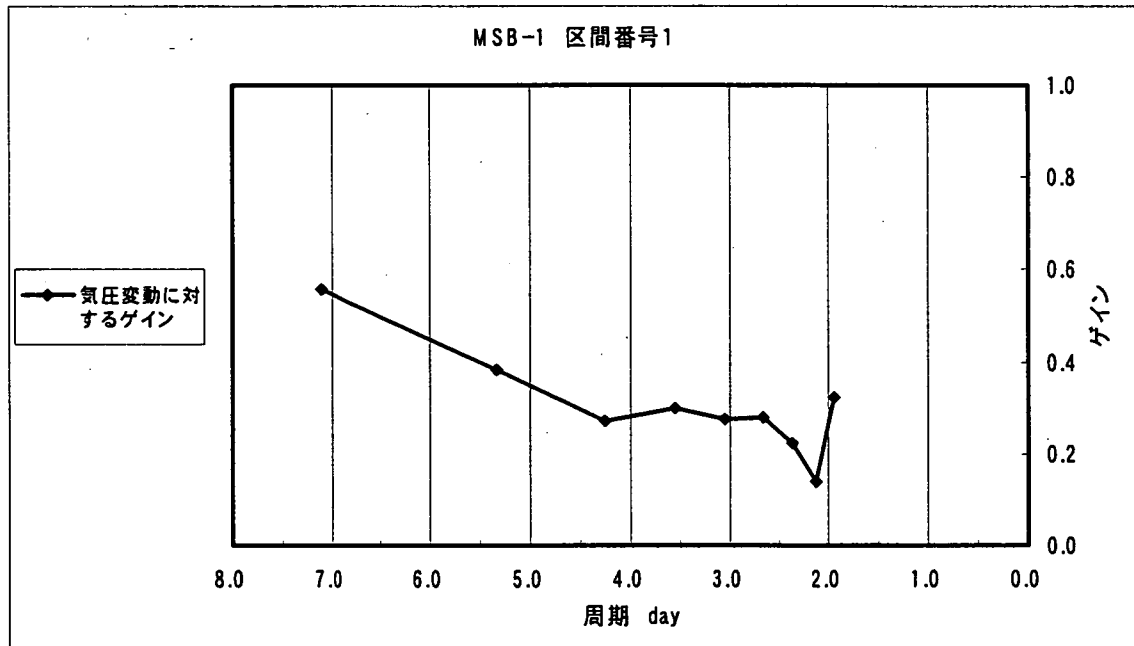


図 3-4(f) MSB-1 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

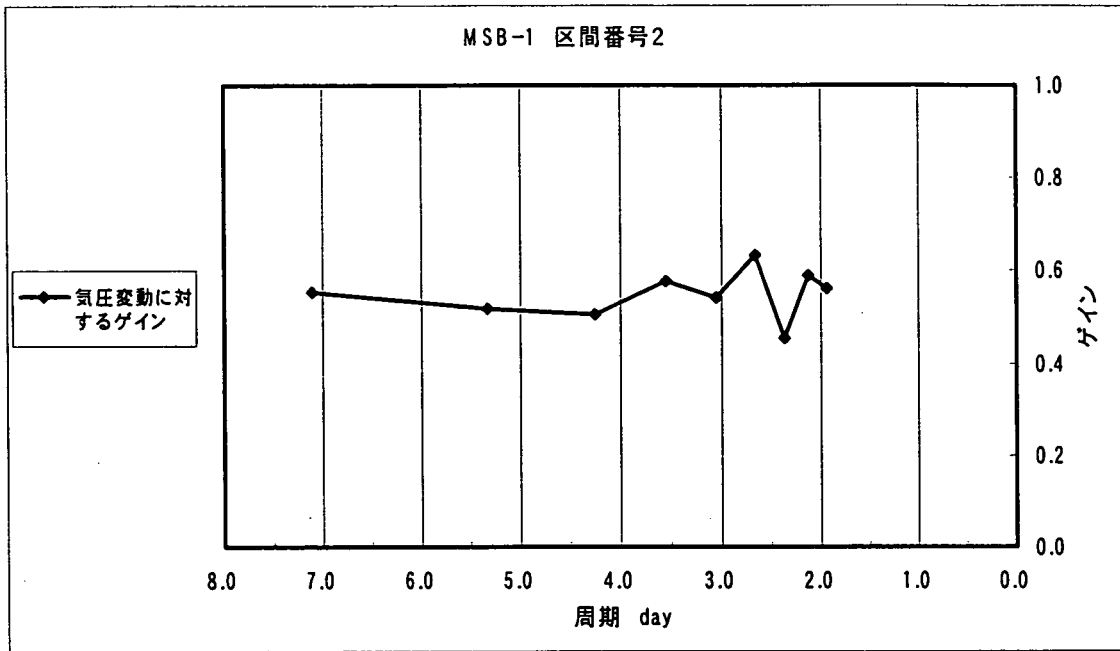


図 3-4(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

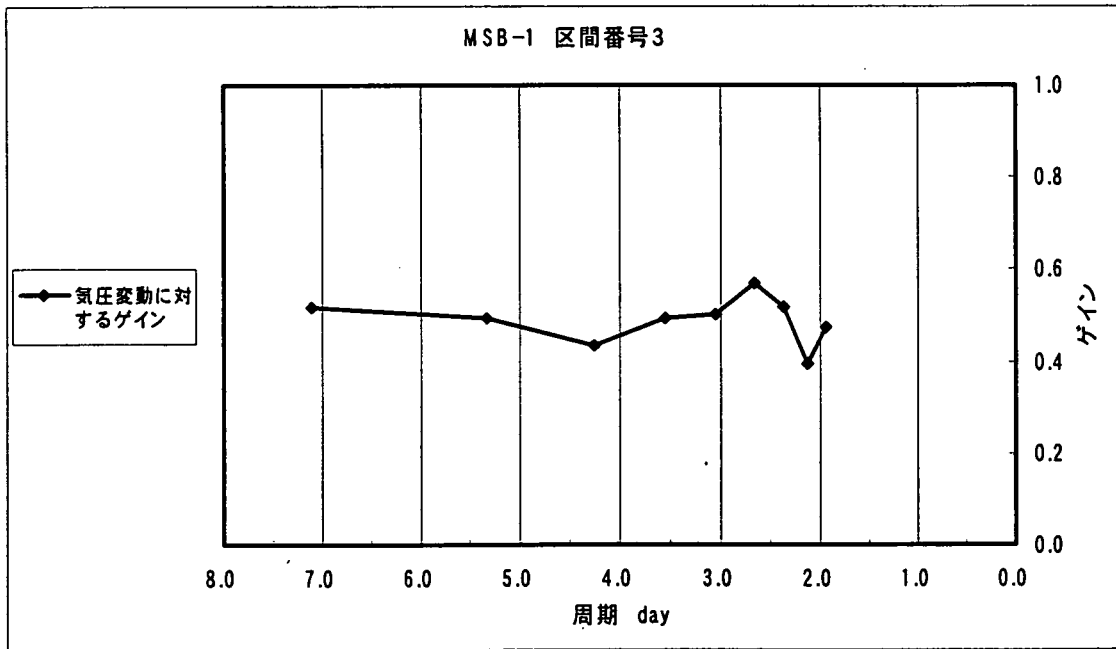


図 3-4(h) MSB-1 号孔の区間番号 3 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

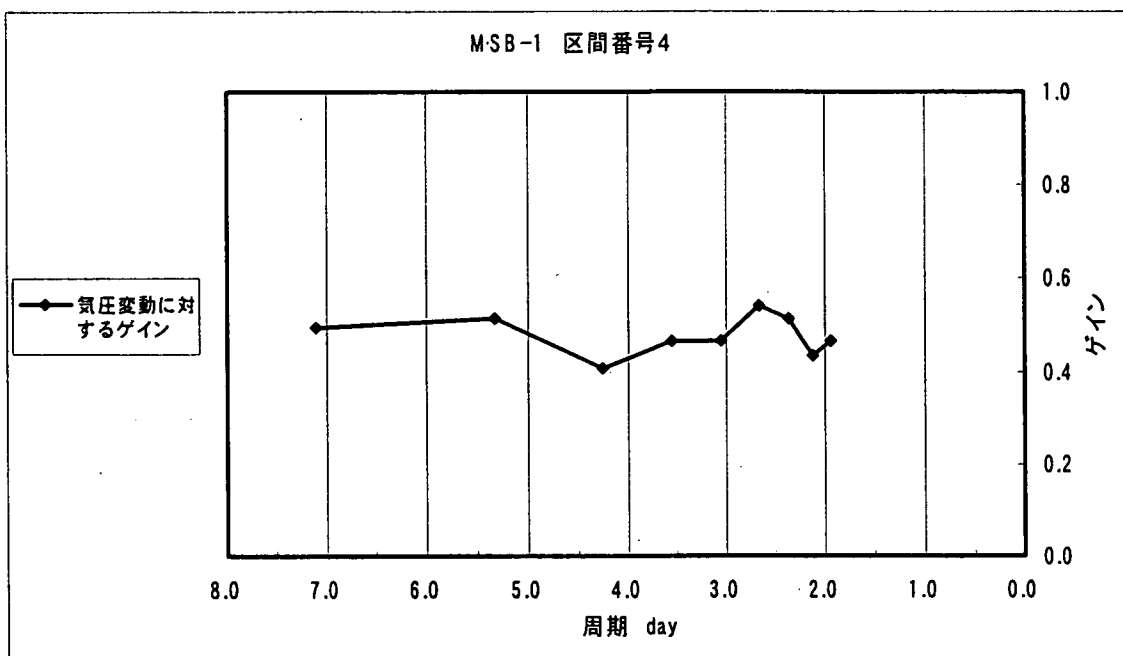


図 3-4(i) MSB-1 号孔の区間番号 4 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

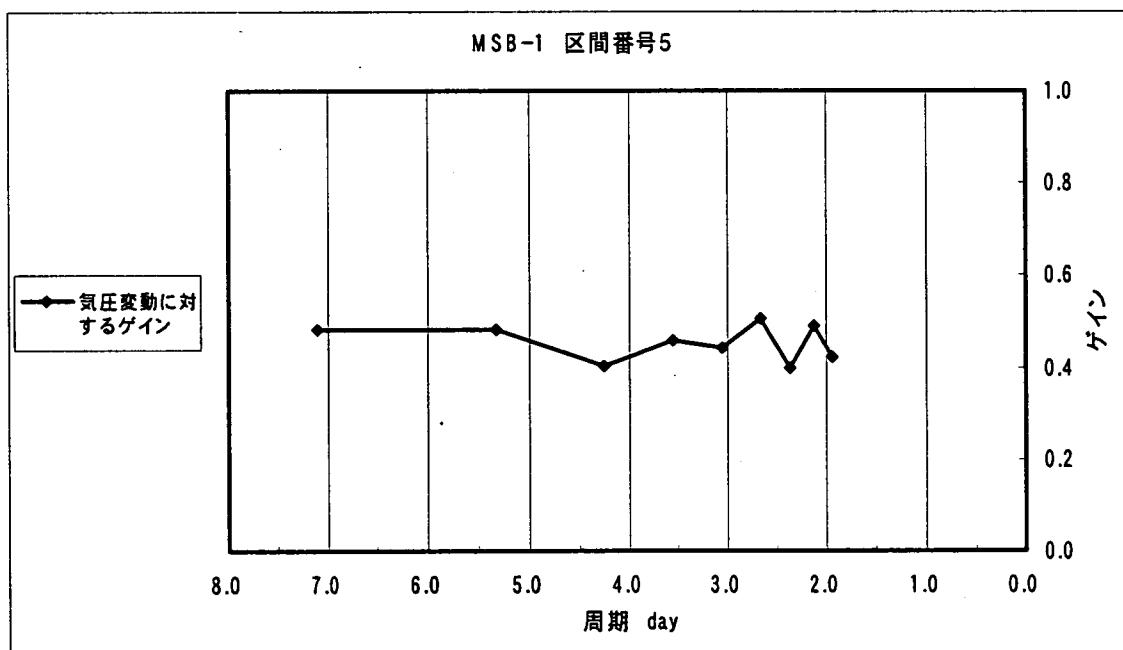


図 3-4(j) MSB-1 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の気圧変動に対するゲイン

気圧変動に対するゲインについては、6.1 で考察する。

3.4 面積ひずみに対するゲイン

作業対象とした全区間の間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲインを図 3-5 に示す。

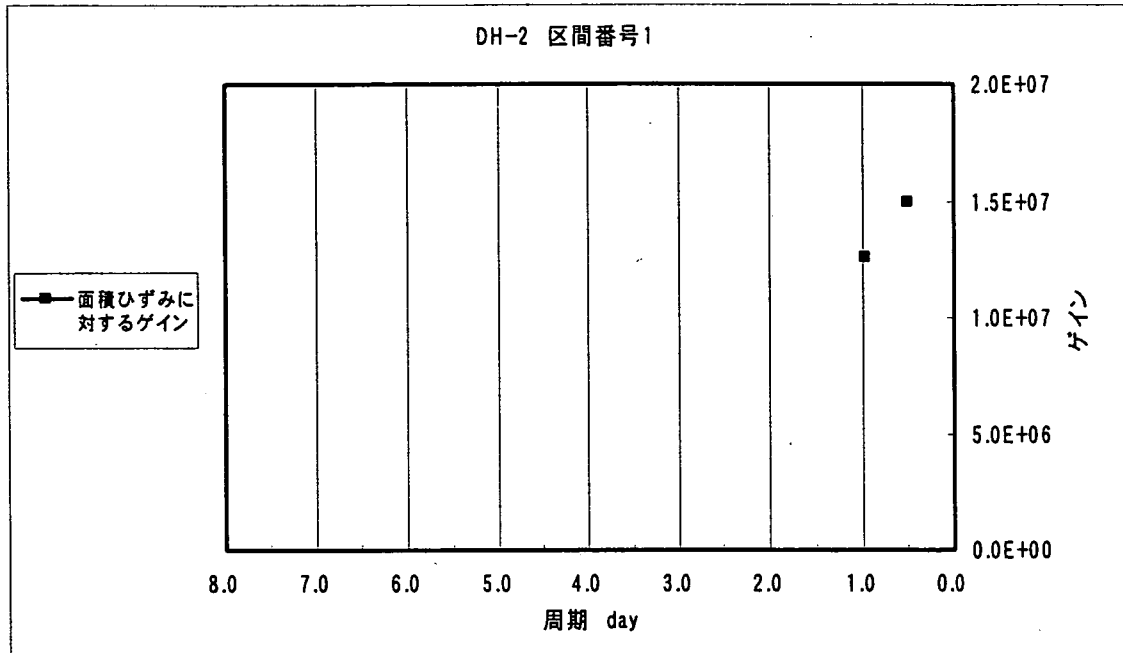


図 3-5(a) DH-2 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

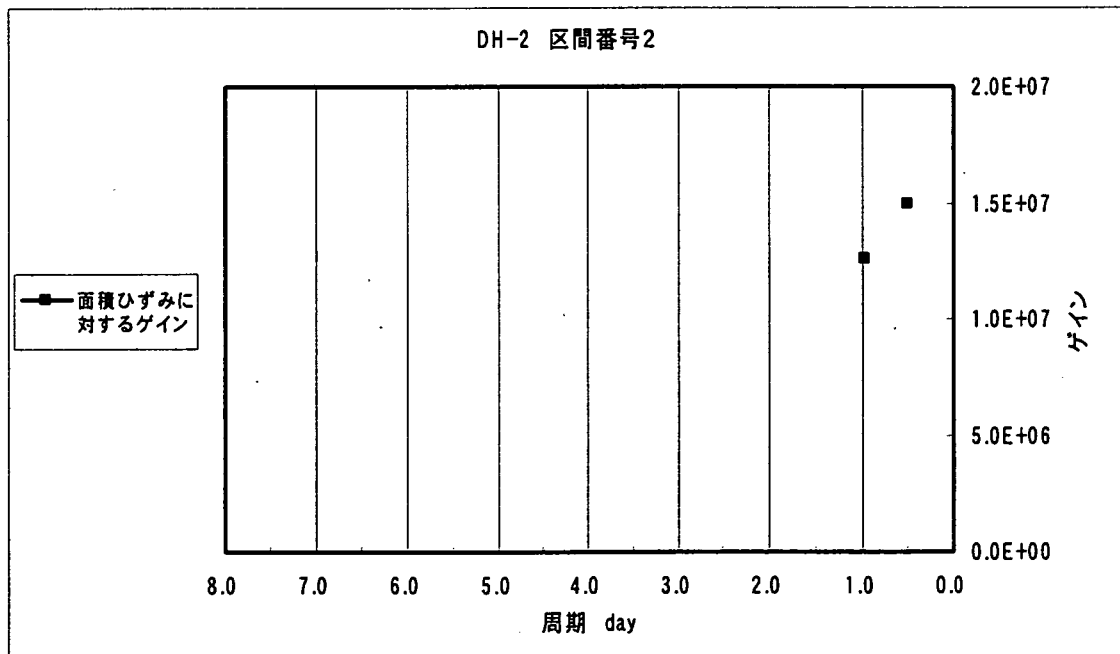


図 3-5(b) DH-2 号孔の区間番号 2 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

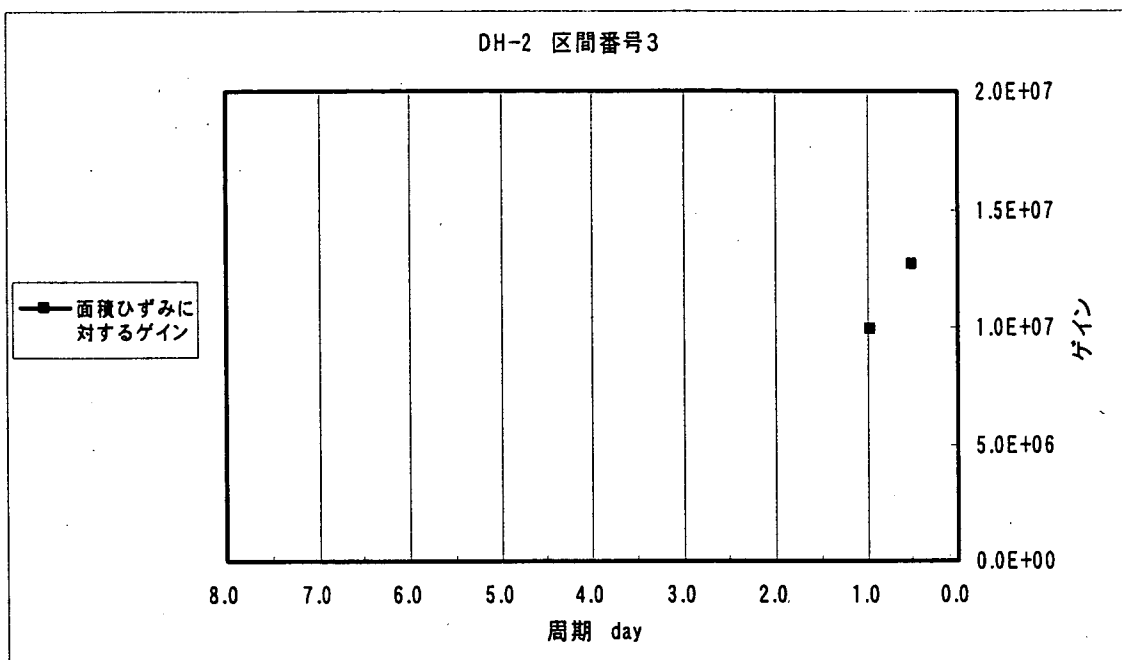


図 3-5(c) DH-2 号孔の区間番号 3 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

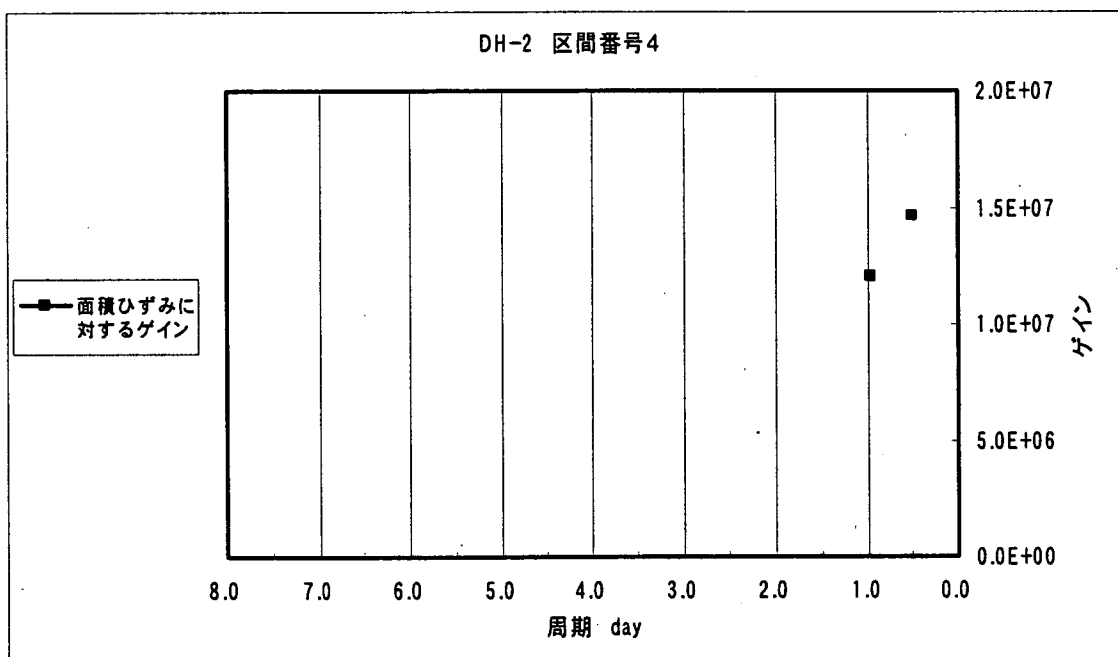


図 3-5(d) DH-2 号孔の区間番号 4 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

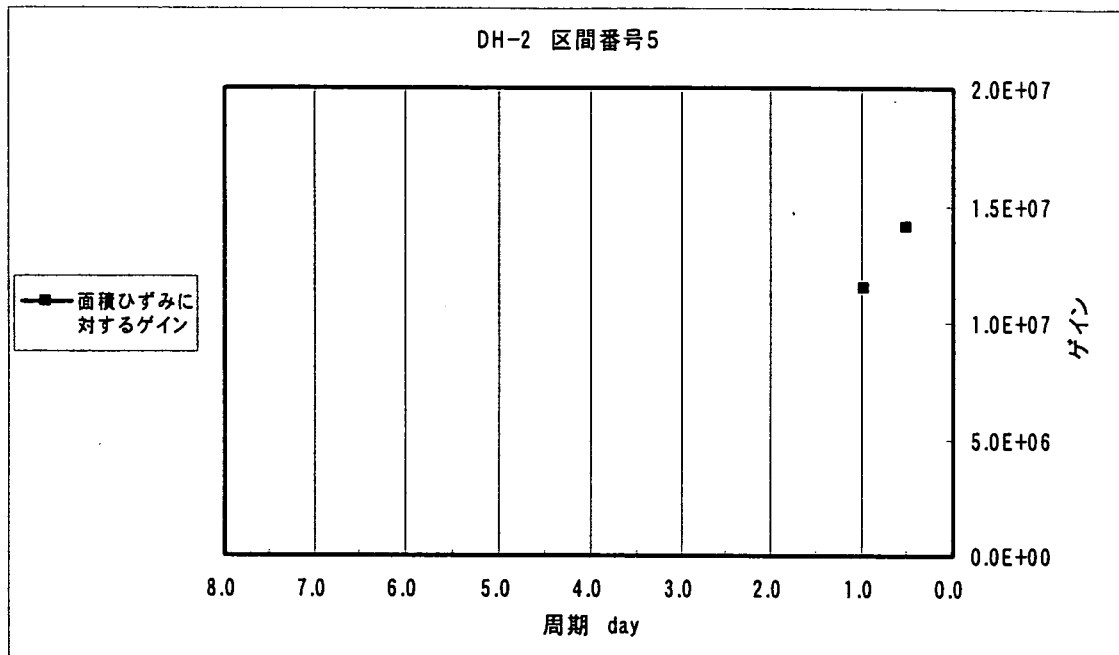


図 3-5(e) DH-2 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

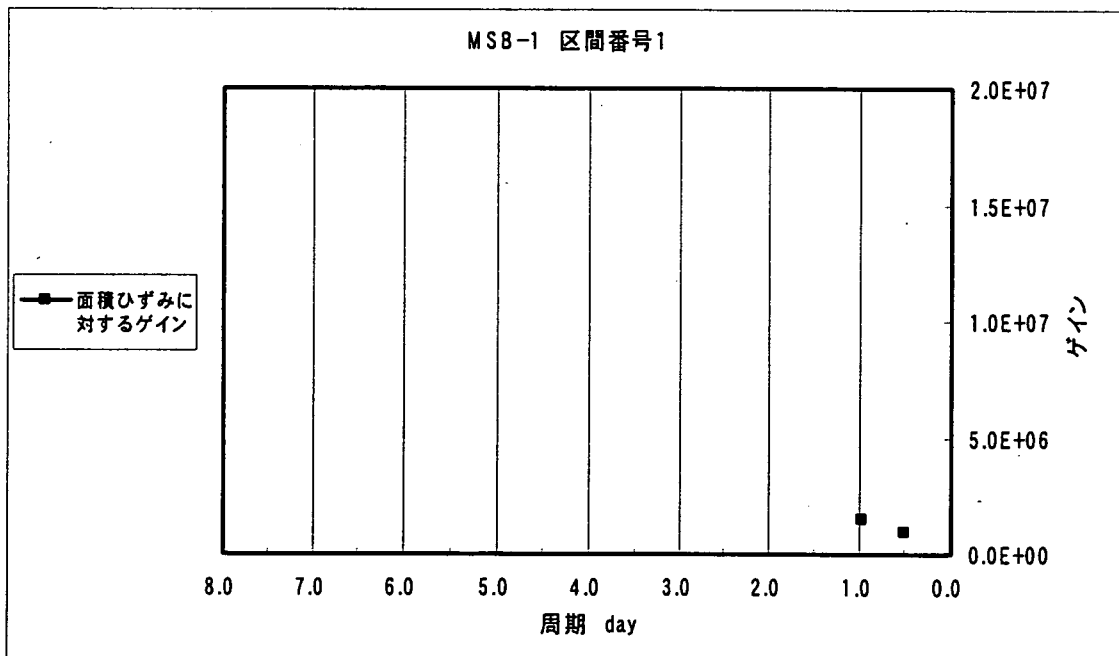


図 3-5(f) MSB-1 号孔の区間番号 1 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

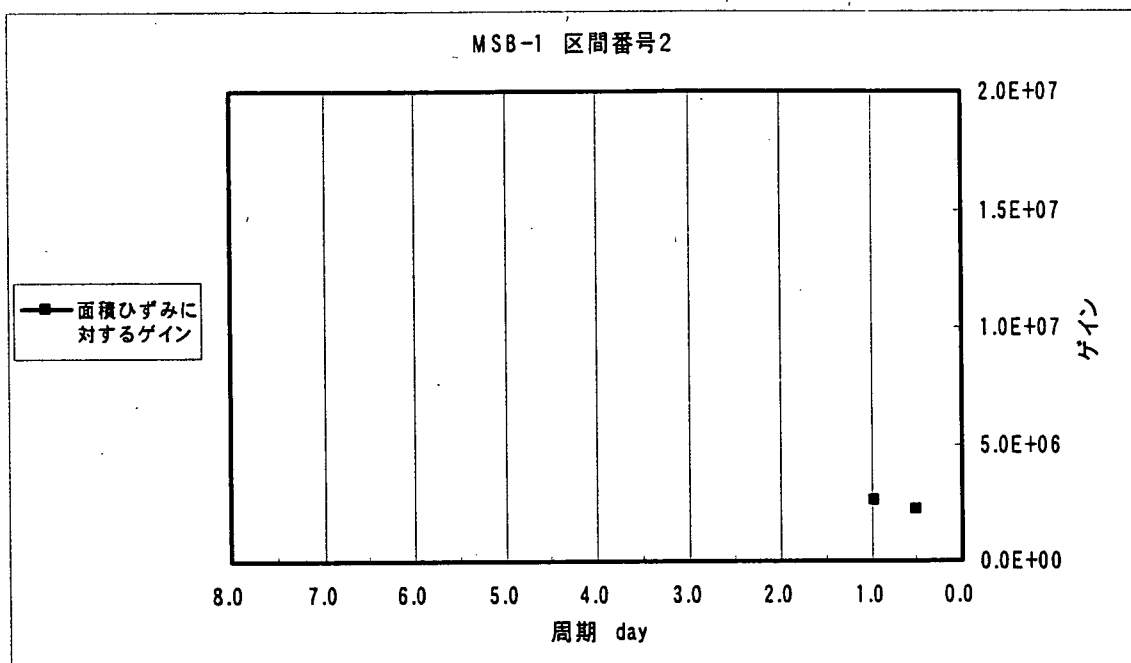


図 3-5(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

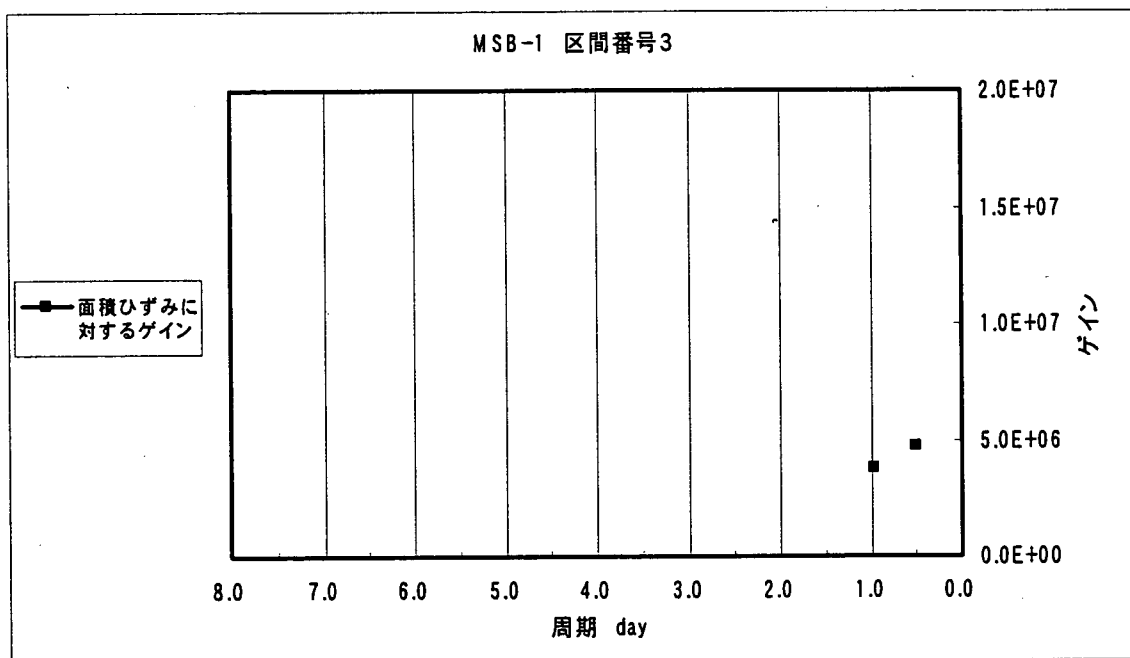


図 3-5(h) MSB-1 号孔の区間番号 3 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

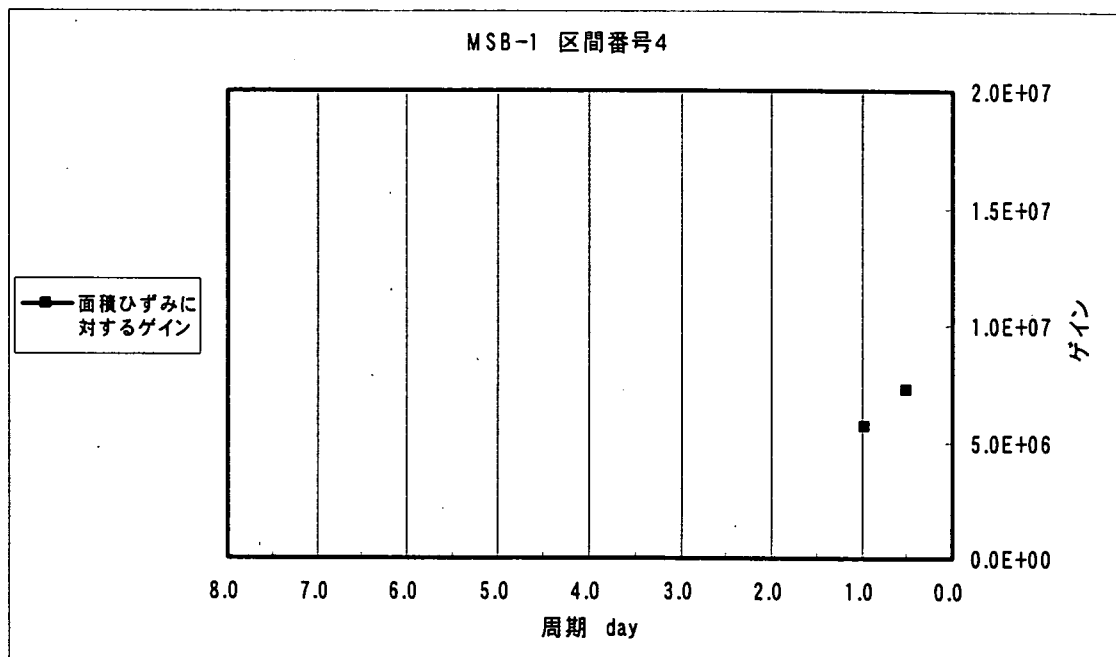


図 3-5(i) MSB-1 号孔の区間番号 4 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

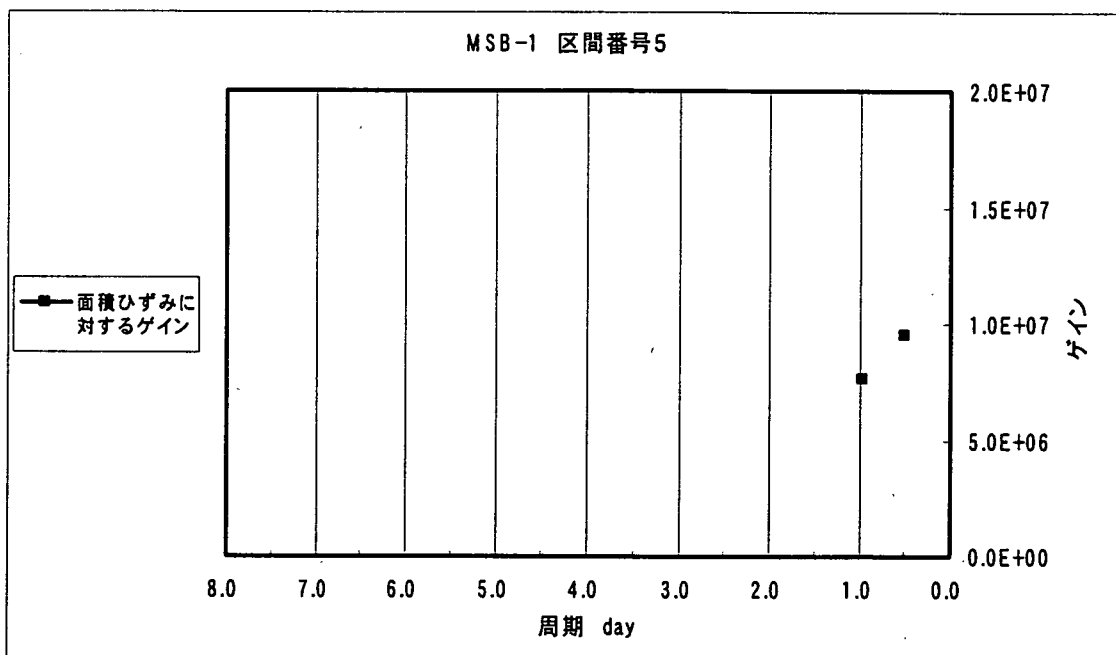


図 3-5(j) MSB-1 号孔の区間番号 5 における間隙水圧変動の面積ひずみに対するゲイン

面積ひずみに対するゲインについては、6.1 で考察する。

4. BAYTAP-G 解析結果との比較方法

スペクトル解析の結果は、周波数領域で表示されるが、BAYTAP-G のアウトプットは時間領域で得られるため、お互いを直接的に比較することはできない。本検討では、BAYTAP-G のアウトプットを周波数領域に変換することによって、周波数領域でスペクトル解析の結果との比較を行った。また、スペクトル解析の結果を時間領域に変換することによって、時間領域で BAYTAP-G のアウトプットとの比較を行った。前者の比較方法を 4.1 で述べ、後者の比較方法を 4.2 で述べる。

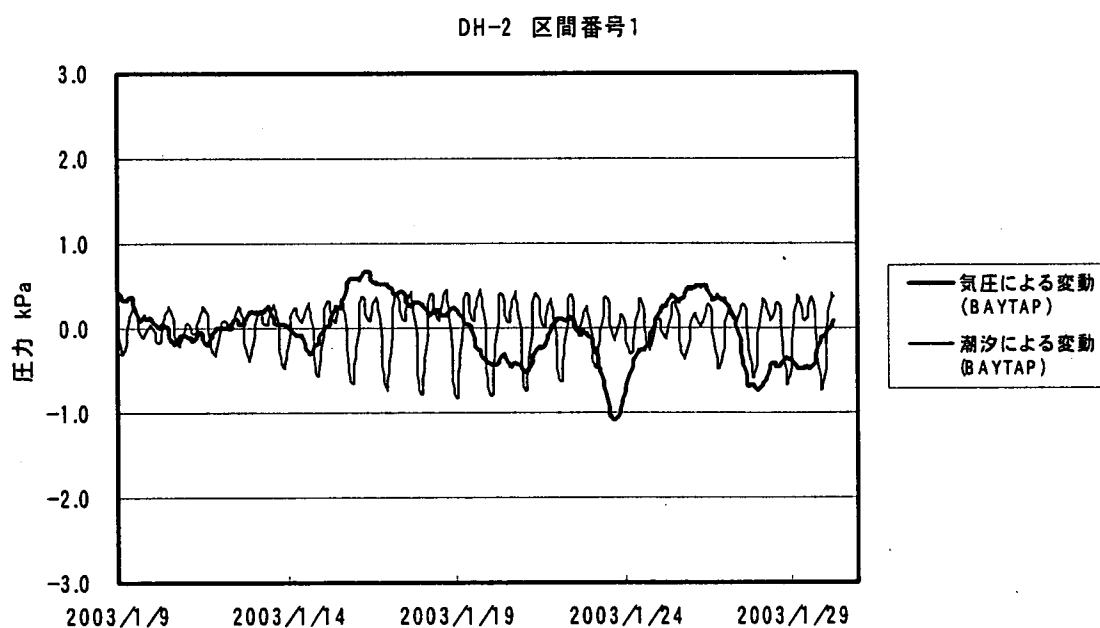
4.1 周波数領域における比較

DH-2 号孔の区間番号 1 を例として説明する。

(1) BAYTAP-G のアウトプット

核燃料サイクル開発機構提供の BAYTAP-G のアウトプットは、「IRREGULAR」、「TREND」、「RESPONSE」、「TIDAL」、「ORIGINAL」の 5 列の時系列データから構成されている。このうち、スペクトル解析との比較に必要な時系列データは、「RESPONSE」と「TIDAL」であり、それぞれ、気圧に応答した間隙水圧の変動成分（気圧応答成分）、地球潮汐に応答した間隙水圧の変動成分（潮汐応答成分）を意味する。

DH-2 号孔の区間番号 1 の気圧応答成分と潮汐応答成分を図 4-1 に示す。



(2) フーリエスペクトルの計算

BAYTAP-G で処理された気圧応答成分と潮汐応答成分は、トレンドが除去されているため、2.2(2)で述べたトレンド除去を行うことなく、2.3(1)で述べた方法でフーリエ変換を行

いフーリエスペクトルを求めた。

図 4-1 の時系列データをフーリエ変換して得られたフーリエスペクトルを図 4-2 に示す。

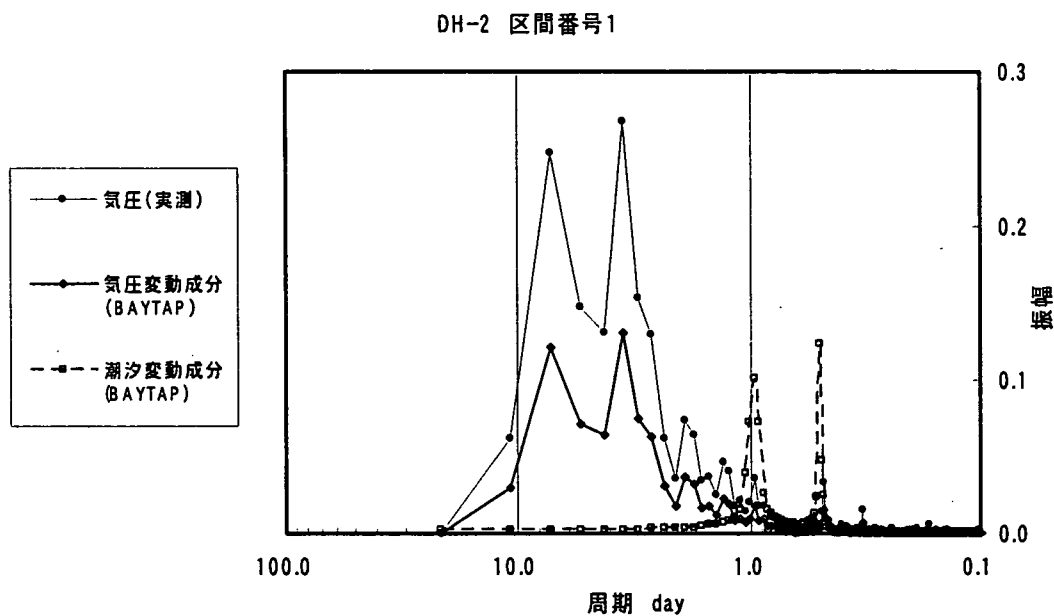


図 4-2 DH-2 号孔の区間番号 1 における BAYTAP-G によって分離された気圧による変動と潮汐による変動のフーリエスペクトル

(3) クロススペクトルの計算

クロススペクトルは、2.3(2)で述べた方法で、フーリエスペクトルから求めた。

(4) ゲインの計算

ゲインは 2.3(3)で述べた方法で求めた。

図 4-2 のフーリエスペクトルから求めた気圧変動に対するゲインを図 4-3 に、面積ひずみに対するゲインを図 4-4 に示す。

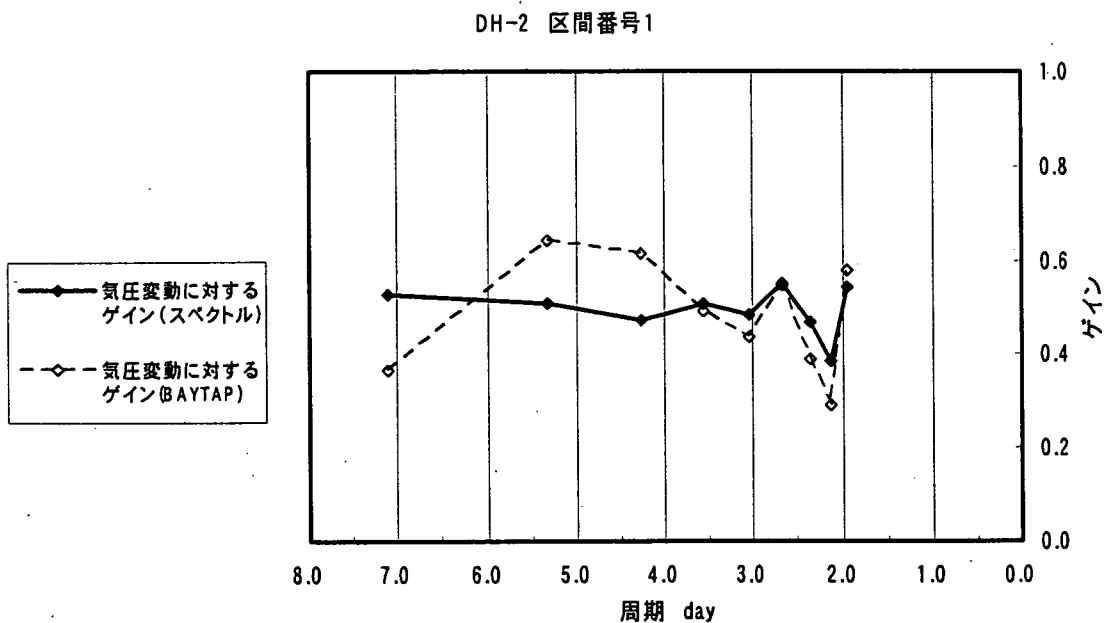


図 4-3 DH-2 号孔の区間番号 1 における BAYTAP-G によって分離された
間隙水圧の気圧応答成分の気圧変動に対するゲイン

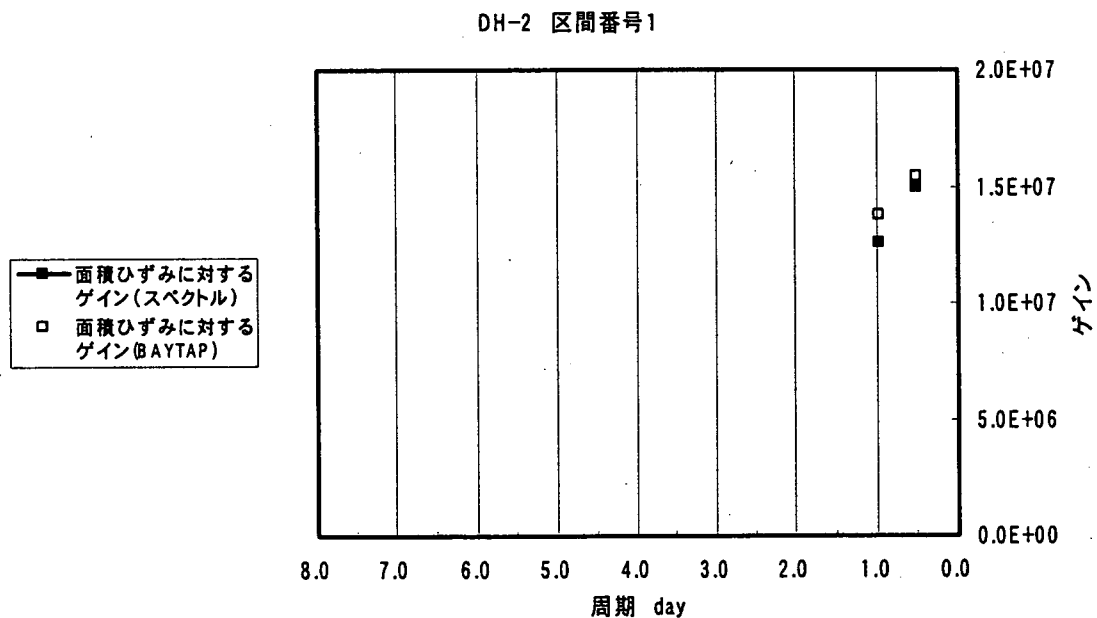


図 4-4 DH-2 号孔の区間番号 1 における BAYTAP-G によって分離された
潮汐応答成分の面積ひずみに対するゲイン

(5) 位相差の計算

位相差は 2.3(4)で述べた方法で求めた。

気圧変動および面積ひずみに対する位相差を図 4-5 に示す。

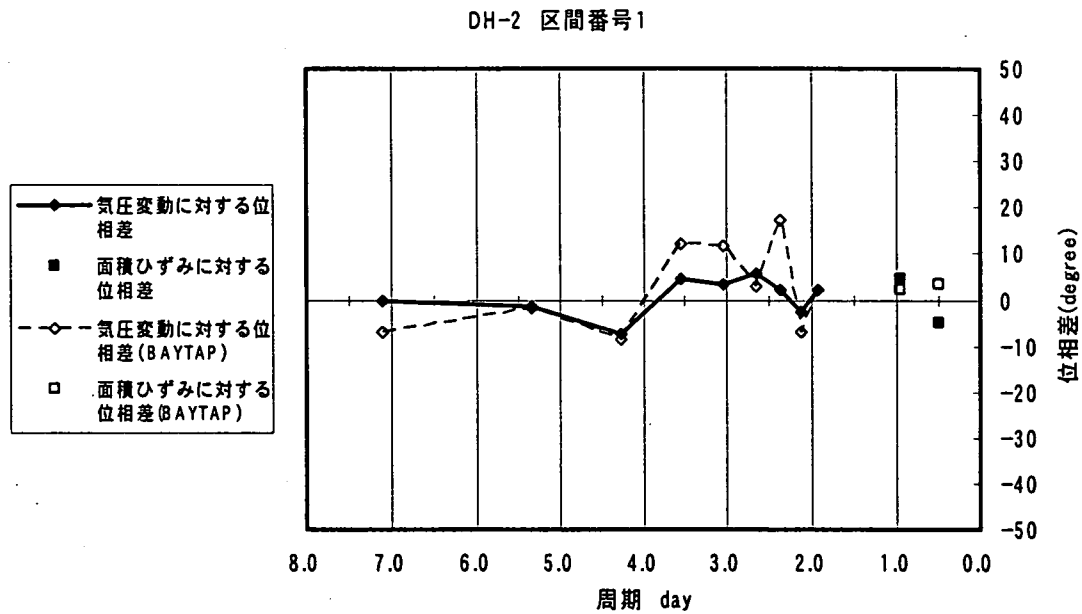


図 4-5 DH-2 号孔の区間番号 1 における BAYTAP-G によって分離された気圧応答成分と潮汐応答成分の位相差

4.2 時間領域における比較

DH-2 号孔の区間番号 1 を例として説明する。

(1) 周波数領域における応答特性

周波数領域における応答特性は、(2.6)式で定義される周波数応答関数 $H(f_k)$ で表される。気圧変動に対する周波数応答関数 $H_1(f_k)$ は気圧変動のパワースペクトル $S_{11}(f_k)$ と気圧変動と間隙水圧変動のクロススペクトル $S_{1y}(f_k)$ を用いて次式から求めることができる。

$$H_1(f_k) = \frac{S_{1y}(f_k)}{S_{11}(f_k)} \quad (4.1)$$

周波数応答関数 $H_1(f_k)$ が求められれば、周波数領域における気圧変動 $X(f_k)$ に対する間隙水圧の応答（気圧応答成分） $Y(f_k)$ は次式で表すことができる。

$$Y(f_k) = H_1(f_k)X(f_k) \quad (4.2)$$

面積ひずみに対する周波数応答関数 $H_2(f_k)$ も同様に、面積ひずみのパワースペクトル $S_{22}(f_k)$ と面積ひずみと間隙水圧変動のクロススペクトル $S_{2y}(f_k)$ から求めることができるので、(4.2)式を用いて潮汐応答成分を計算することができる。

このようにして得られた、間隙水圧変動のうち、気圧応答成分と潮汐応答成分のフーリエスペクトルを図 4-6 に示す。

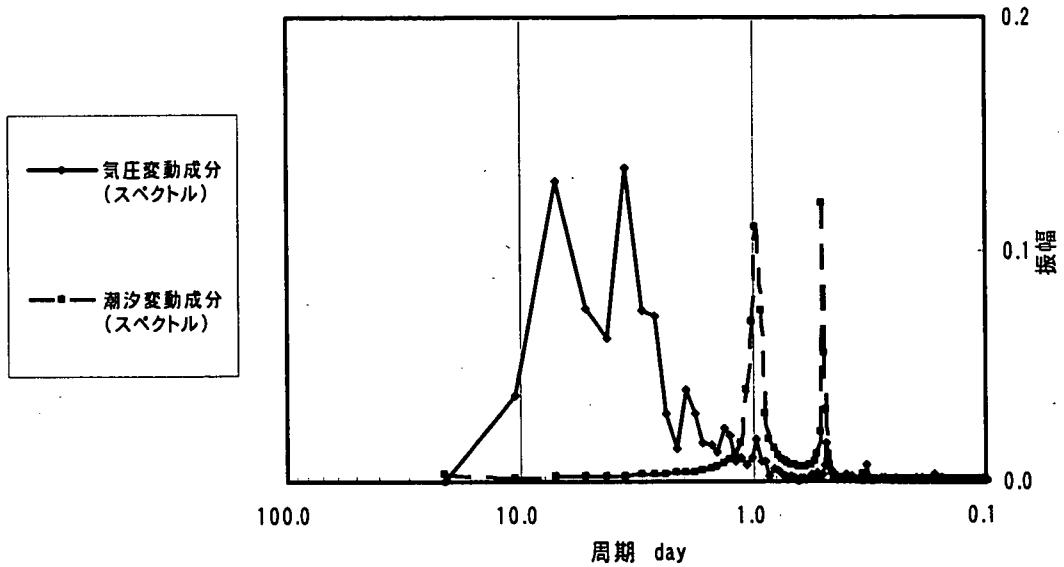


図 4-6 周波数領域における間隙水圧の気圧応答特性と潮汐応答特性

(2) 時系列データの計算

時系列データは、気圧応答成分と潮汐応答成分のそれぞれについて、逆フーリエ変換を行うことによって得られる。離散データの逆フーリエ変換は次式で表され (Bendat and Piersol(2000), p.413), フーリエ変換と同様に FFT を用いて計算を行った。

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp \left[i \frac{2\pi kn}{N} \right] \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.3)$$

図 4-6 を逆フーリエ変換して得られた気圧変動成分の時系列データを図 4-7 に、潮汐応答成分の時系列データを図 4-8 に示す。

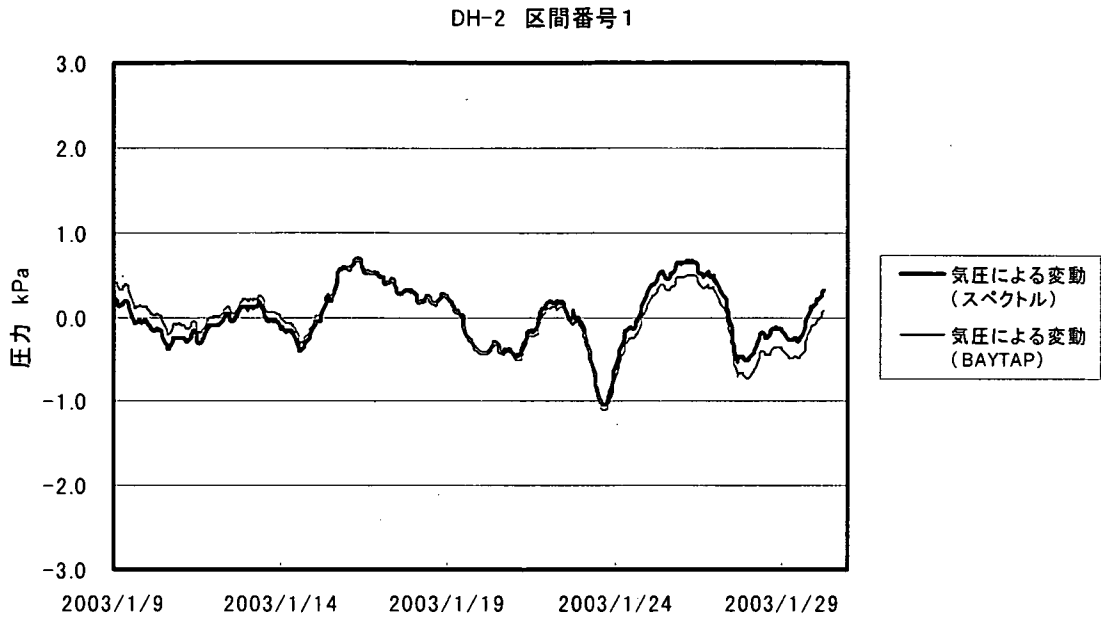


図 4-7 気圧変動に対する応答に関するスペクトル解析 (黒) と BAYTAP-G (赤) の比較

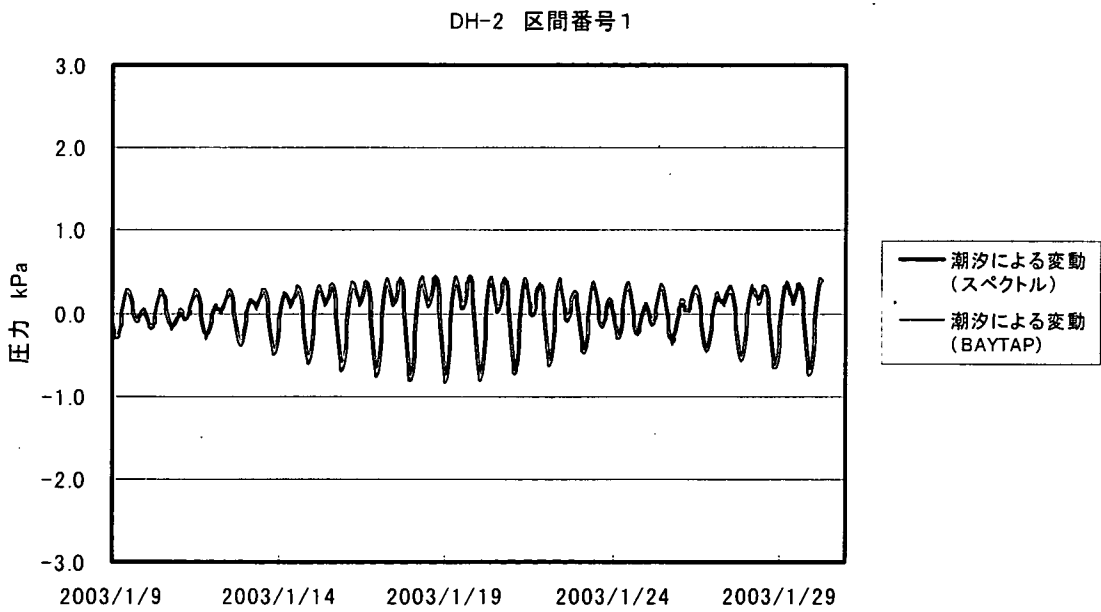


図 4-8 潮汐変動に対する応答に関するスペクトル解析 (黒) と BAYTAP-G (赤) の比較

5. BAYTAP-G 解析結果との比較検討結果

5.1 周波数領域における比較結果

作業対象とした全区間について、気圧変動に対するゲインをスペクトル解析と BAYTAP-G とで求めて比較した図を図 5-1 に示す。

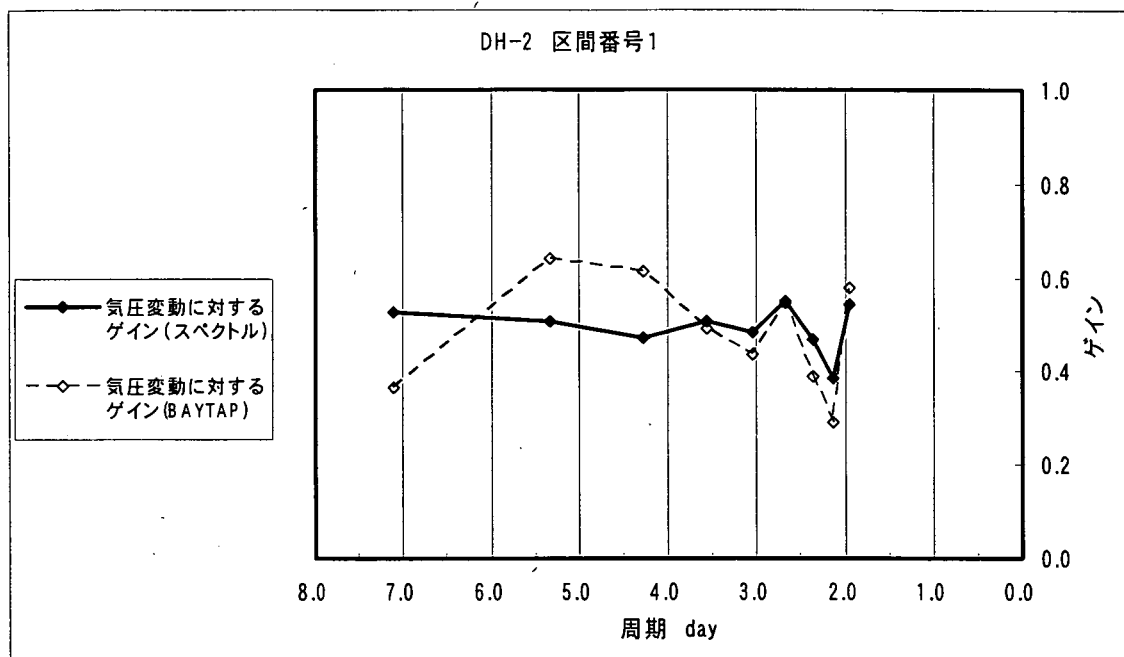


図 5-1(a) DH-2 号孔の区間番号 1 におけるゲインの比較
スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

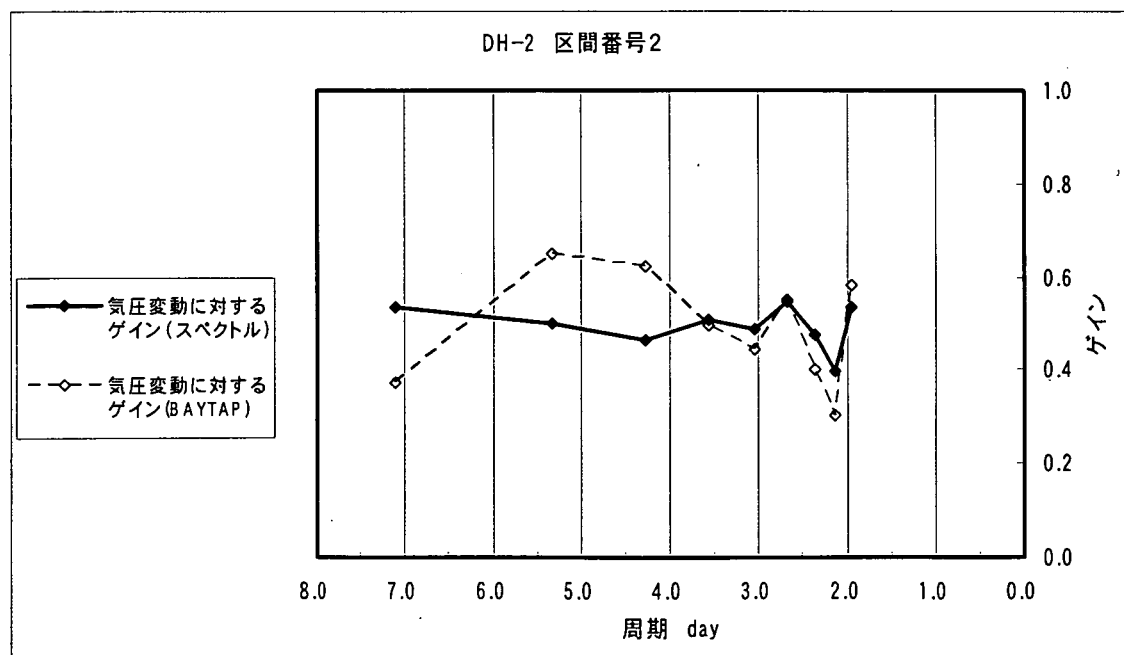


図 5-1(b) DH-2 号孔の区間番号 2 におけるゲインの比較
スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

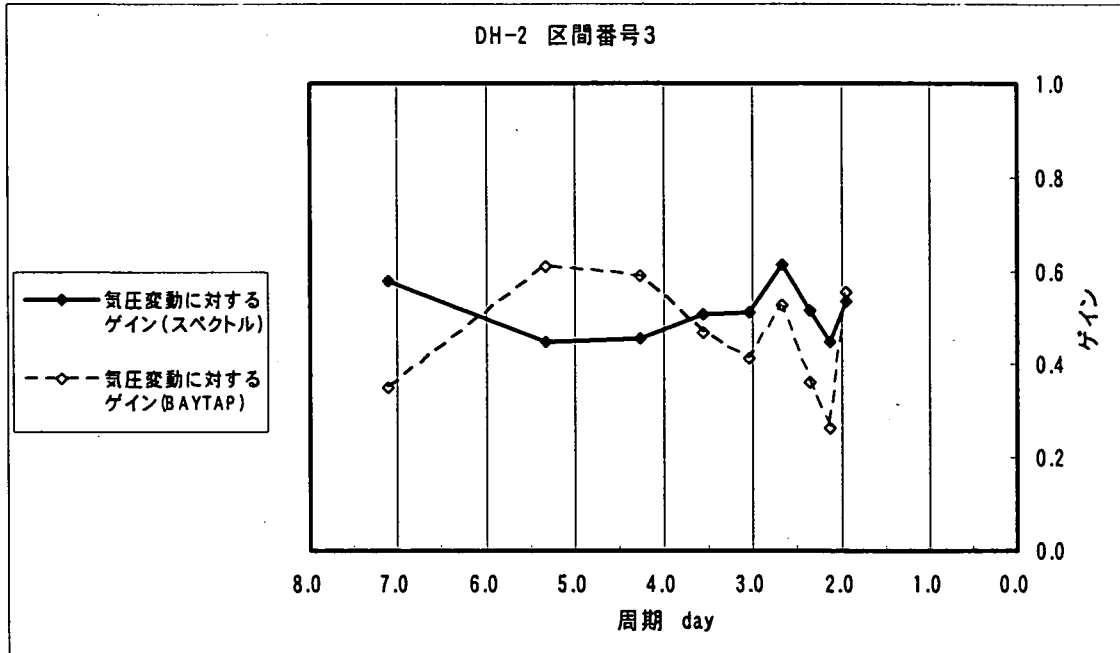


図 5-1(c) DH-2 号孔の区間番号 3 におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

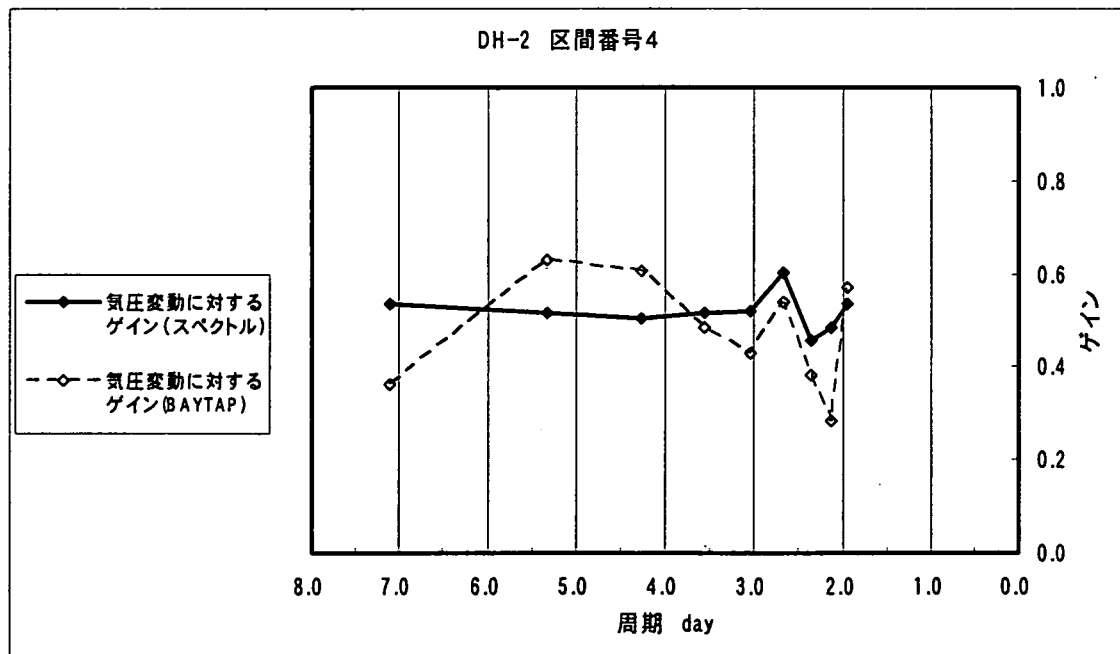


図 5-1(d) DH-2 号孔の区間番号 4 におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

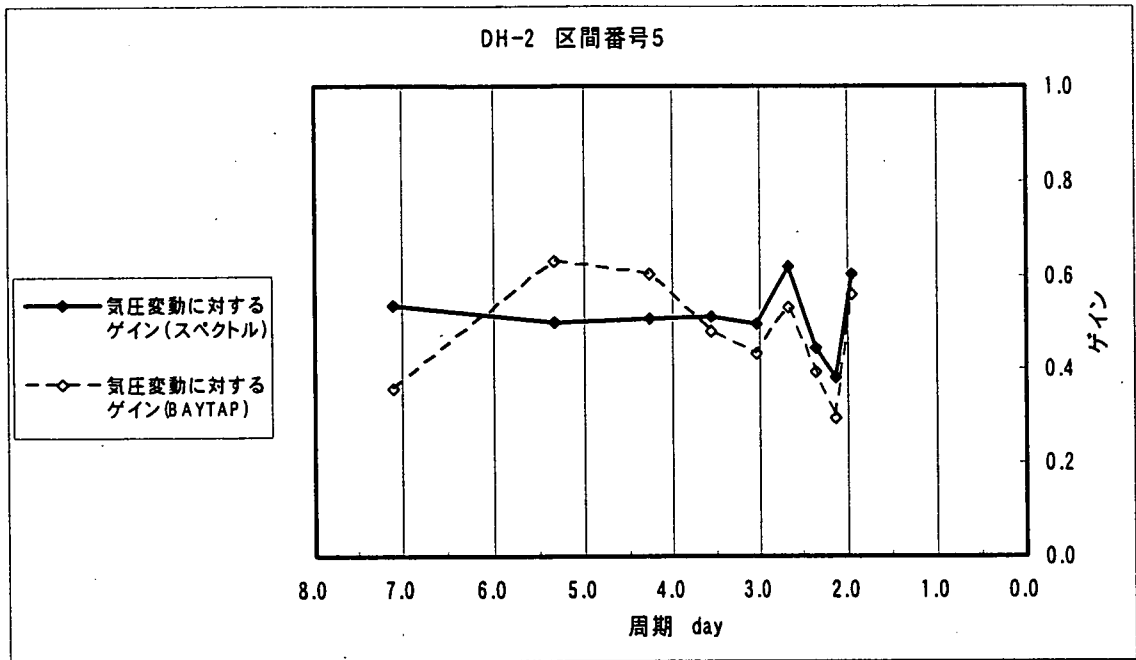


図 5-1(e) DH-2 号孔の区間番号5におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

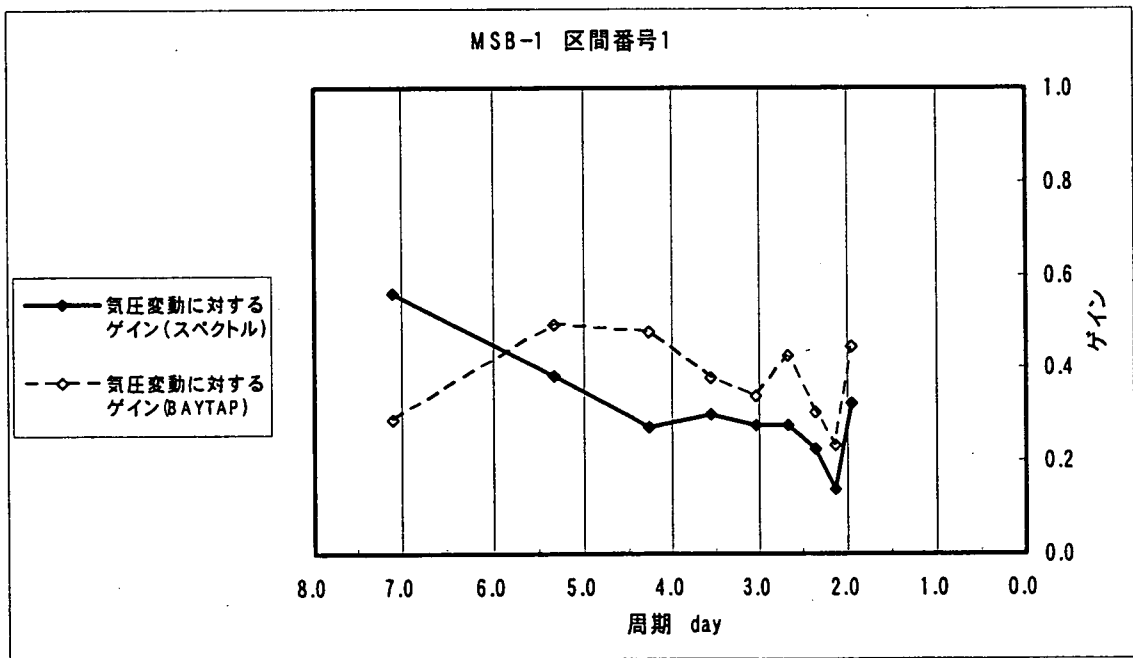


図 5-1(f) MSB-1 号孔の区間番号1におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

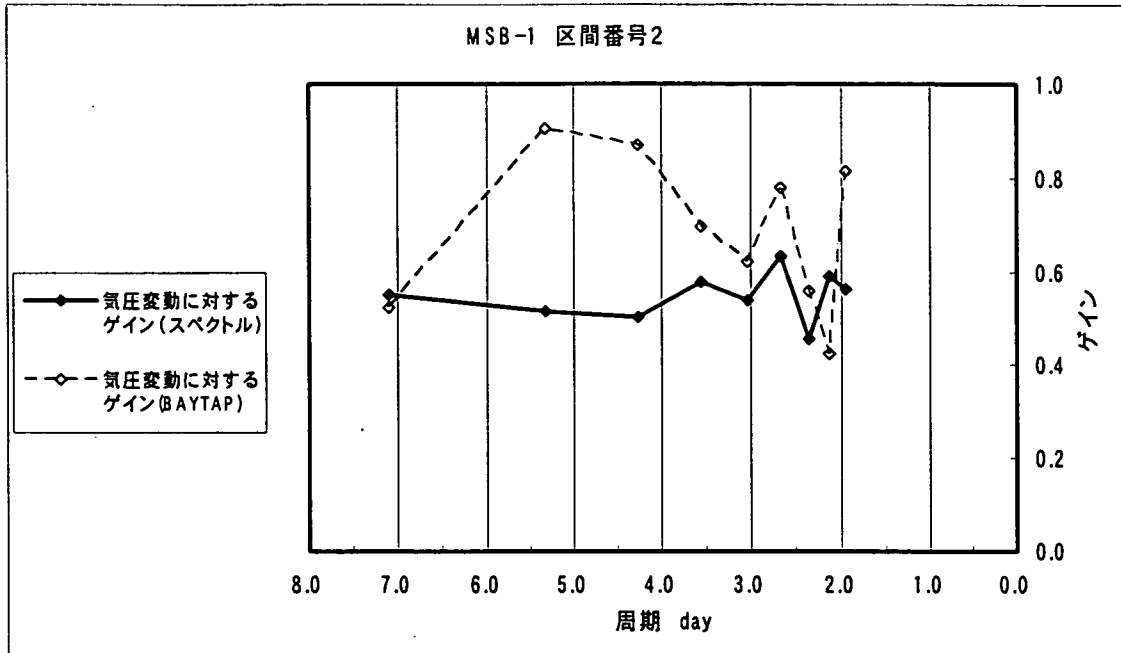


図 5-1(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

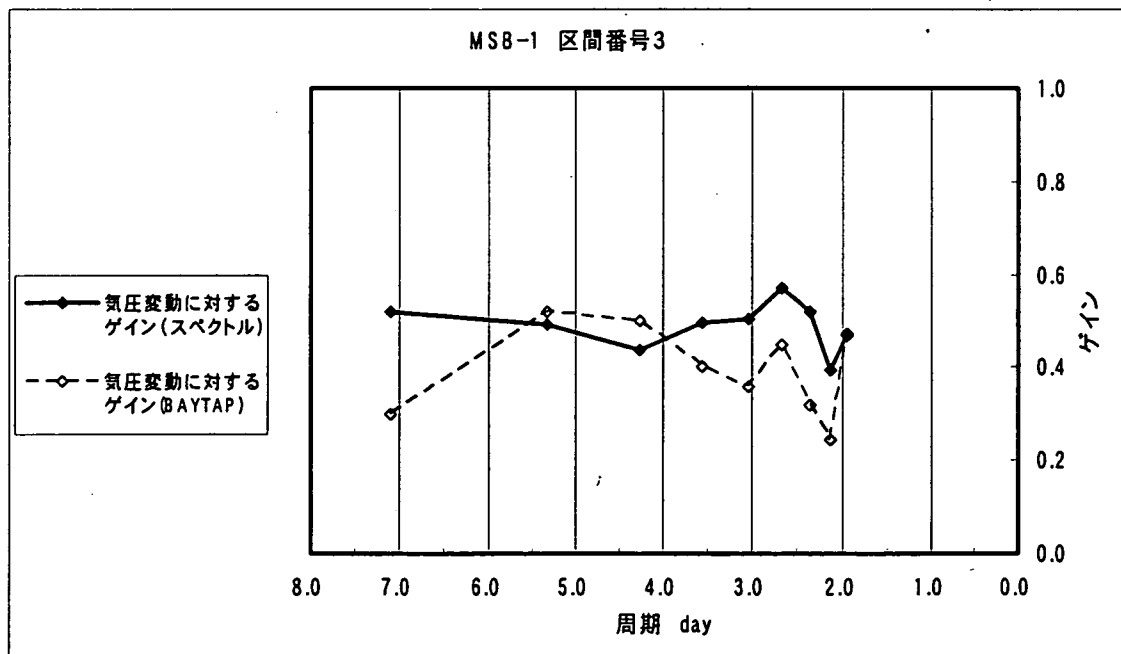


図 5-1(h) MSB-1 号孔の区間番号 2 におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) - BAYTAP-G (破線)

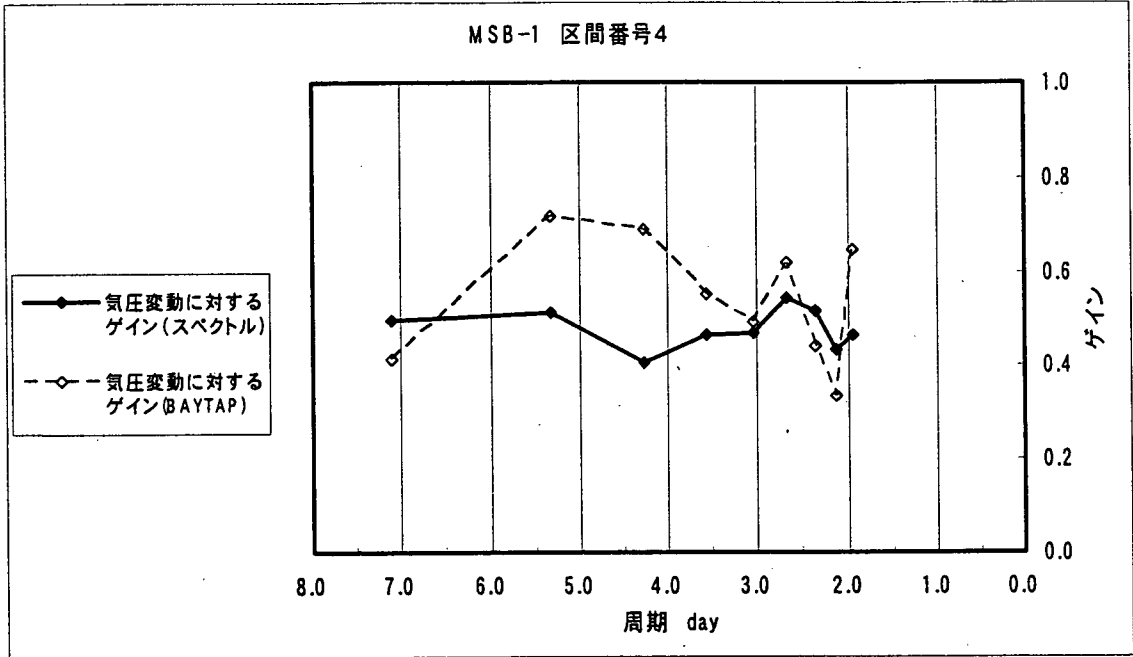


図 5-1(i) MSB-1 号孔の区間番号4におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) -BAYTAP-G (破線)

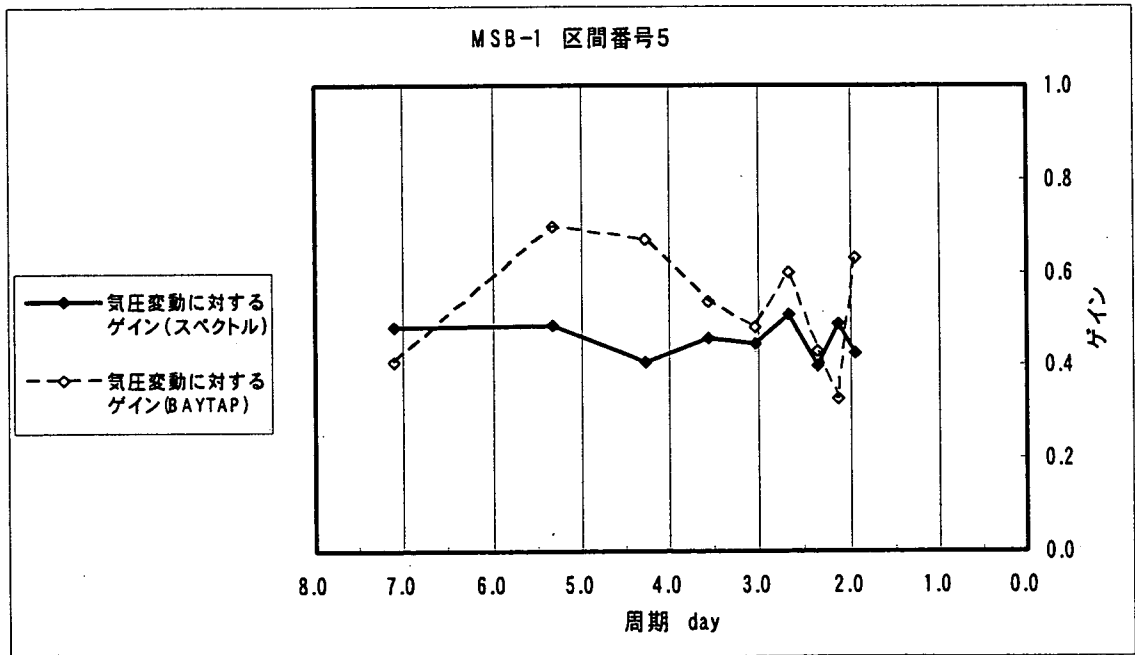


図 5-1(j) MSB-1 号孔の区間番号5におけるゲインの比較
 スペクトル解析 (実線) -BAYTAP-G (破線)

5.2 時間領域における比較結果

作業対象とした全区間の気圧応答成分と潮汐応答成分について、スペクトル解析とBAYTAP-Gとで求めた時系列データを比較した図を図5-2に示す。

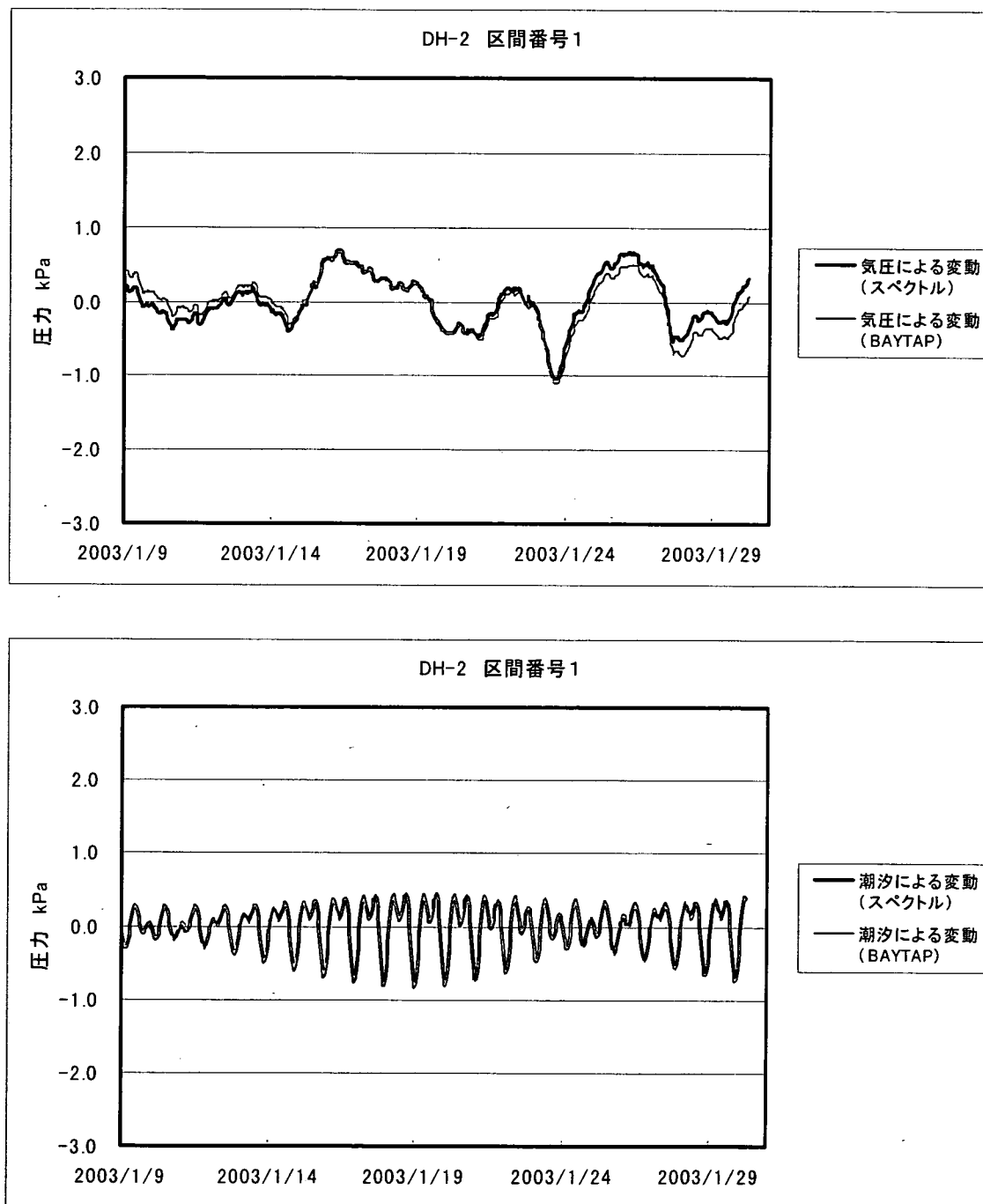


図5-2(a) DH-2号孔の区間番号1における時系列データの比較
スペクトル解析(黒線) - BAYTAP-G(赤線)

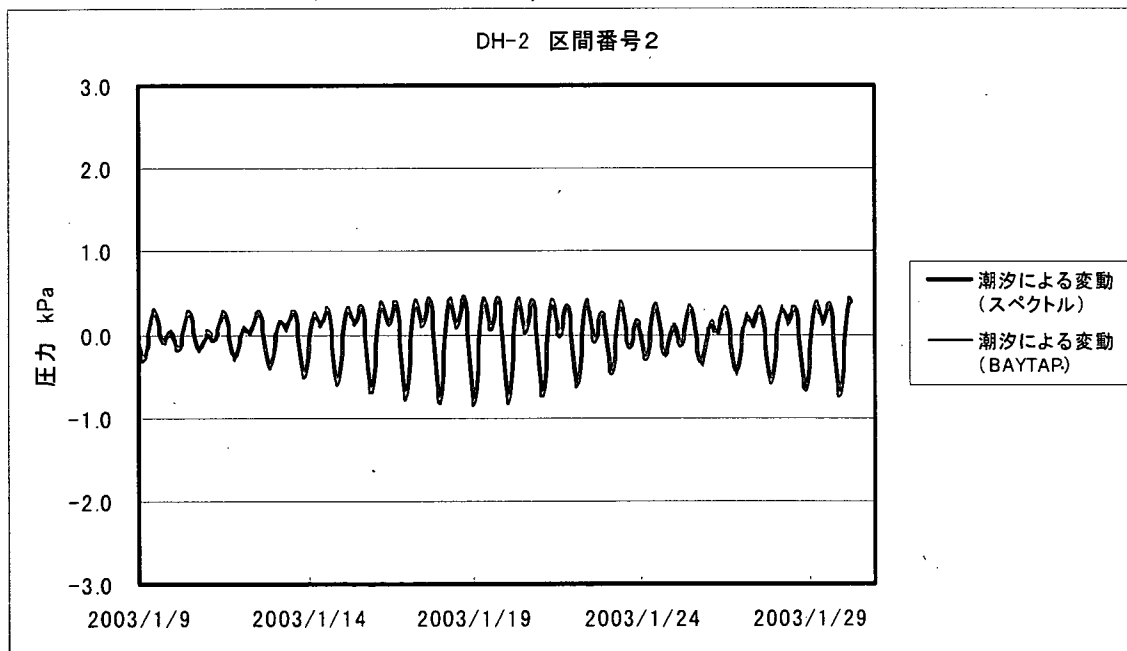
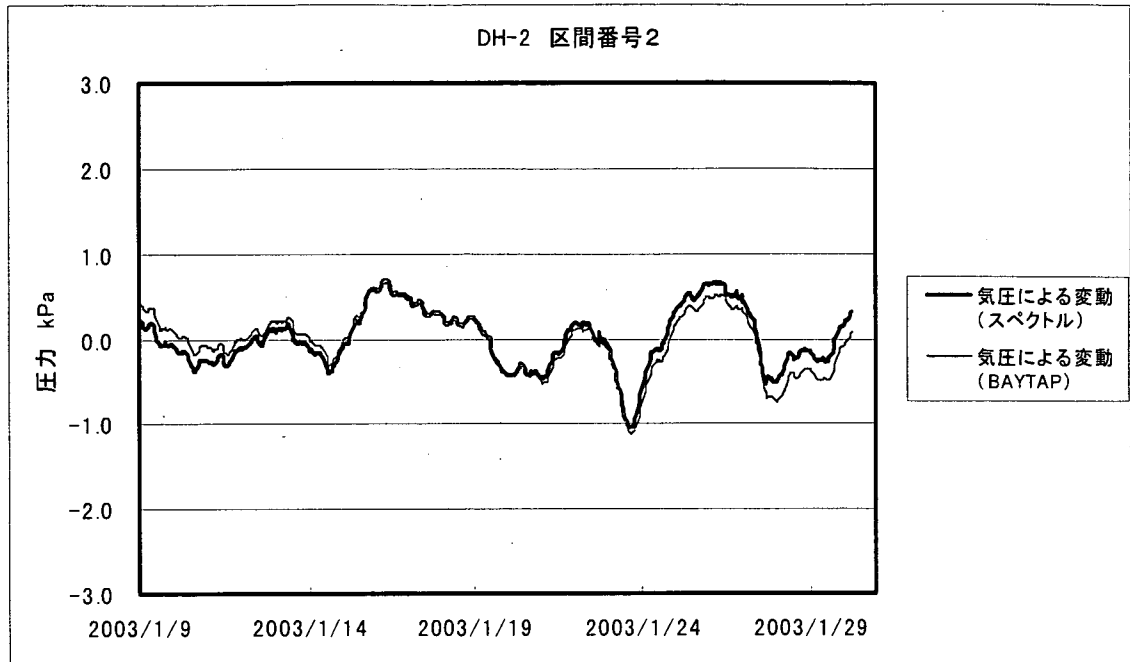


図 5-2(b) DH-2 号孔の区間番号 2 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

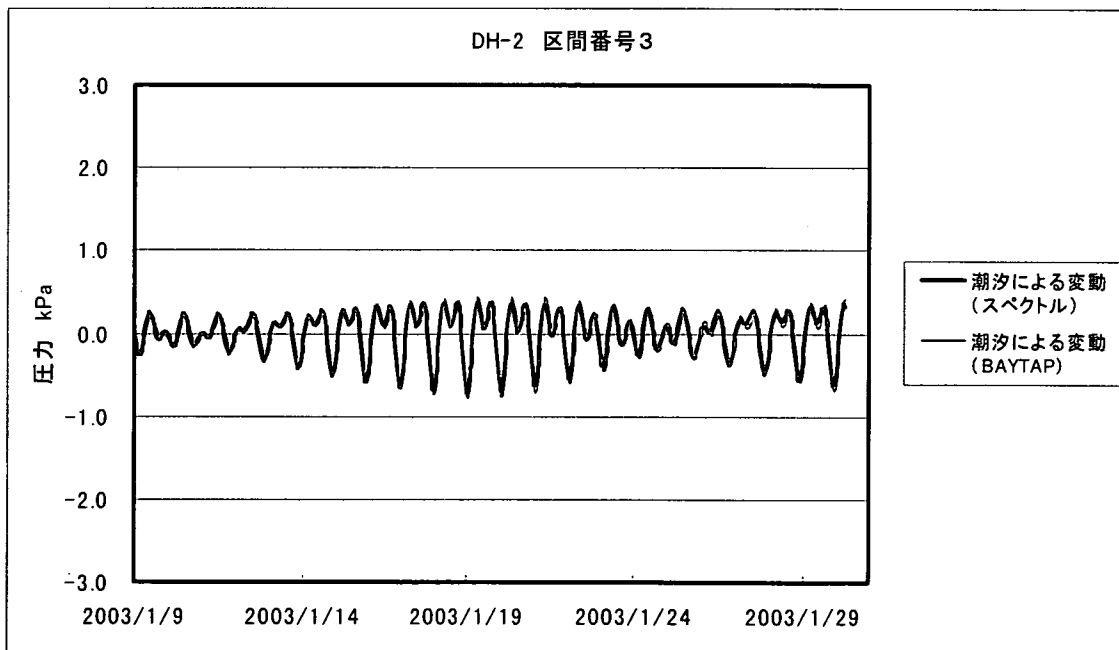
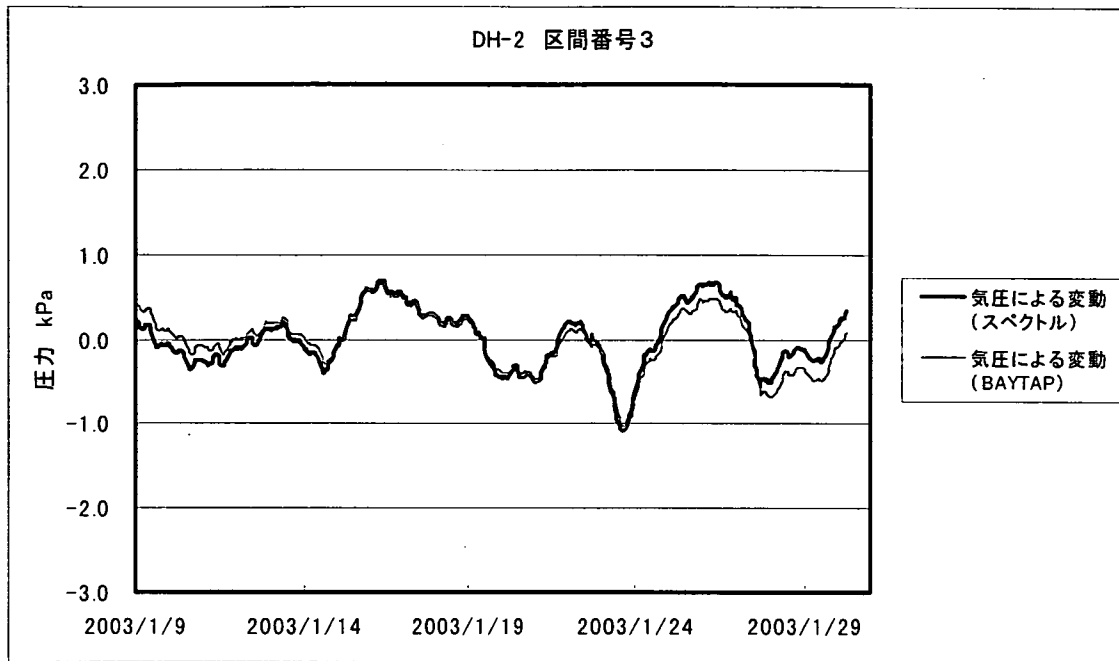


図 5-2(c) DH-2 号孔の区間番号 3 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

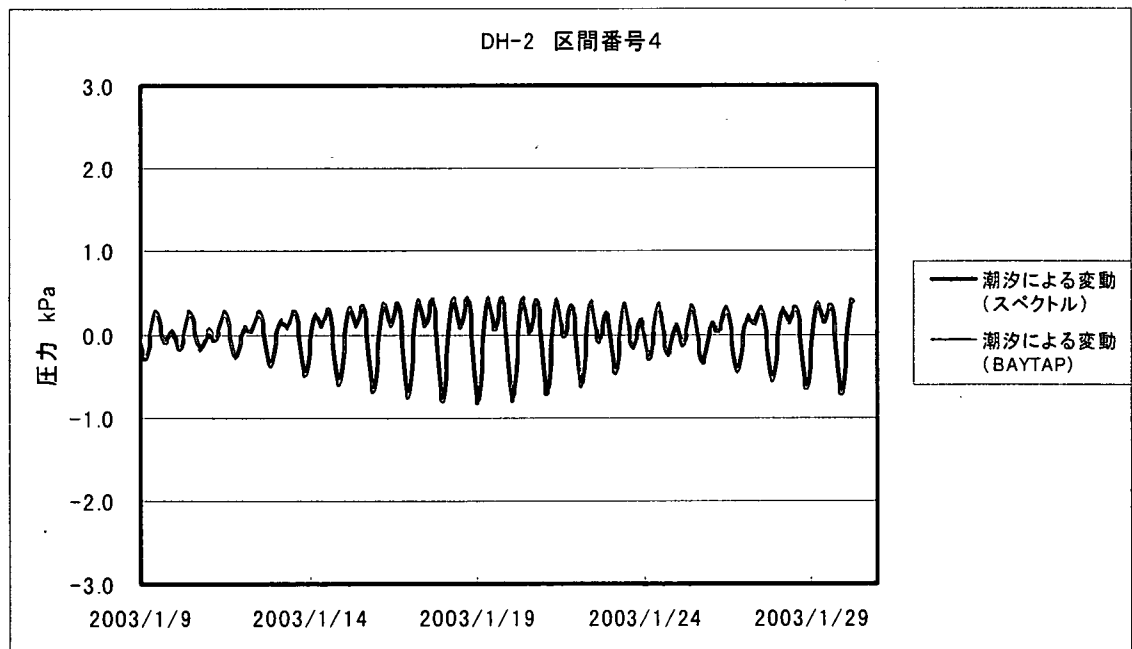
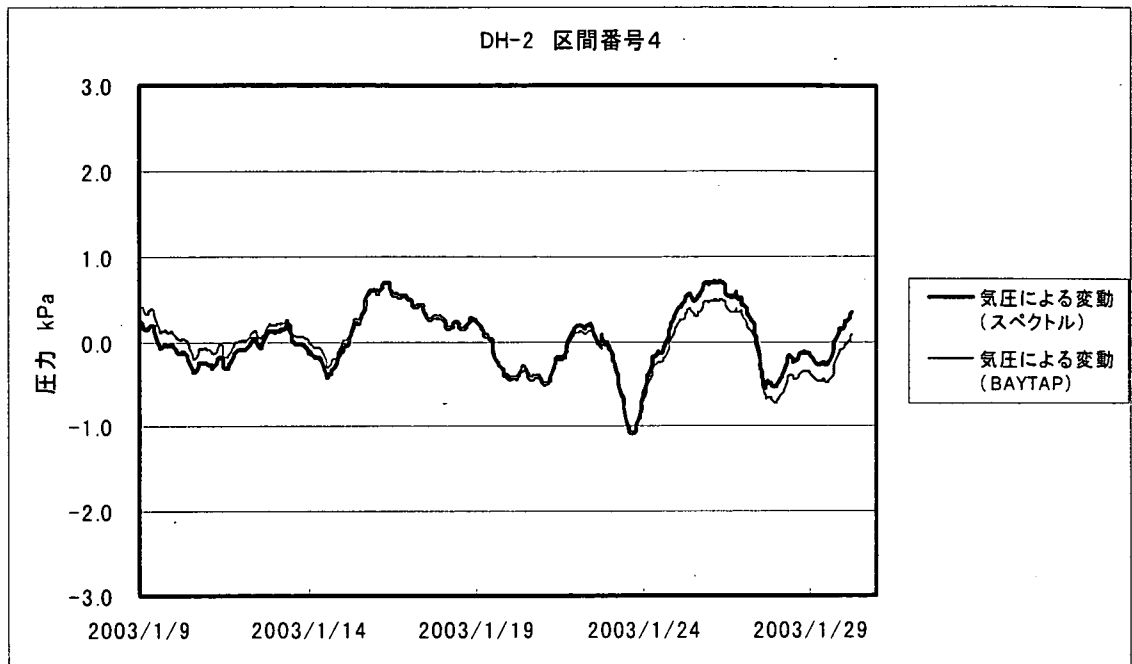


図 5-2(d) DH-2 号孔の区間番号 4 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

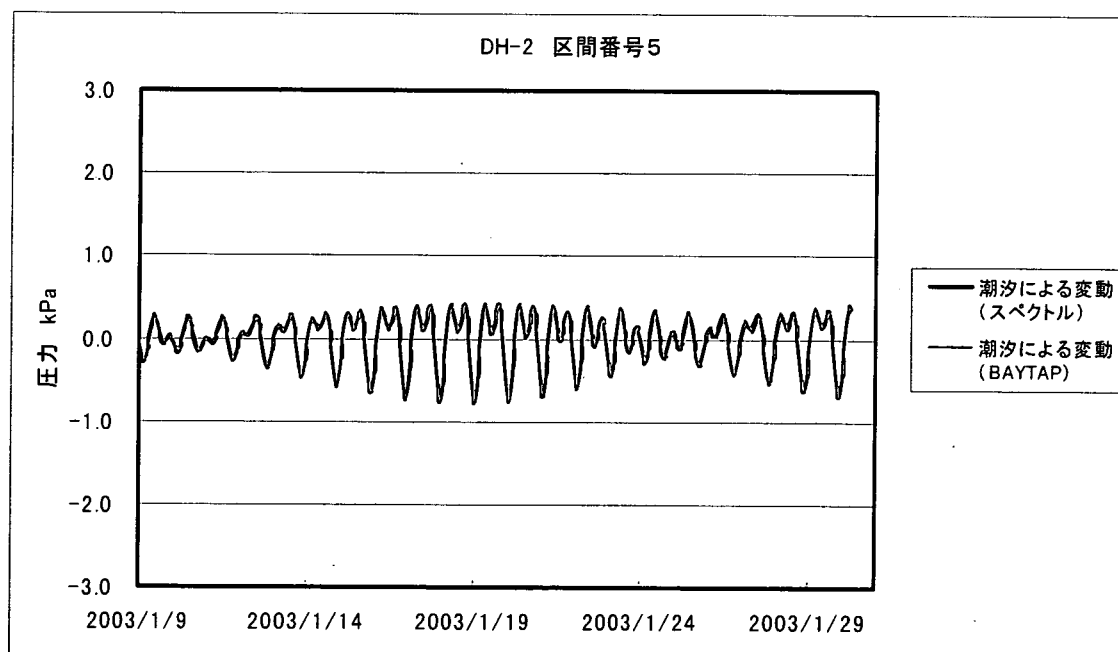
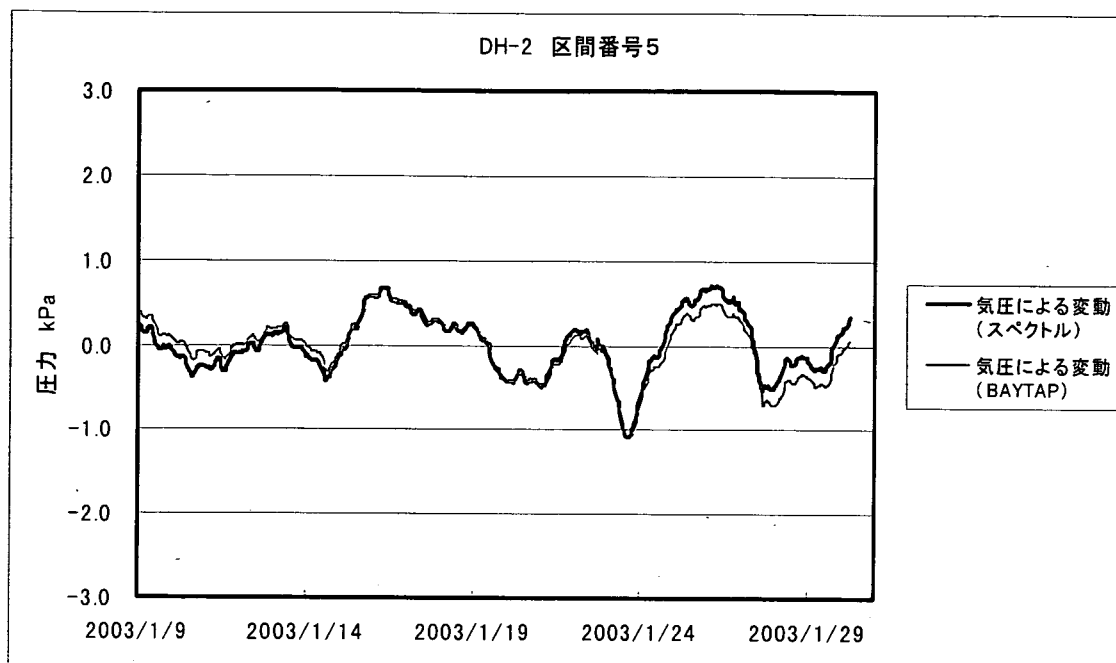


図 5-2(a) DH-2 号孔の区間番号5における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

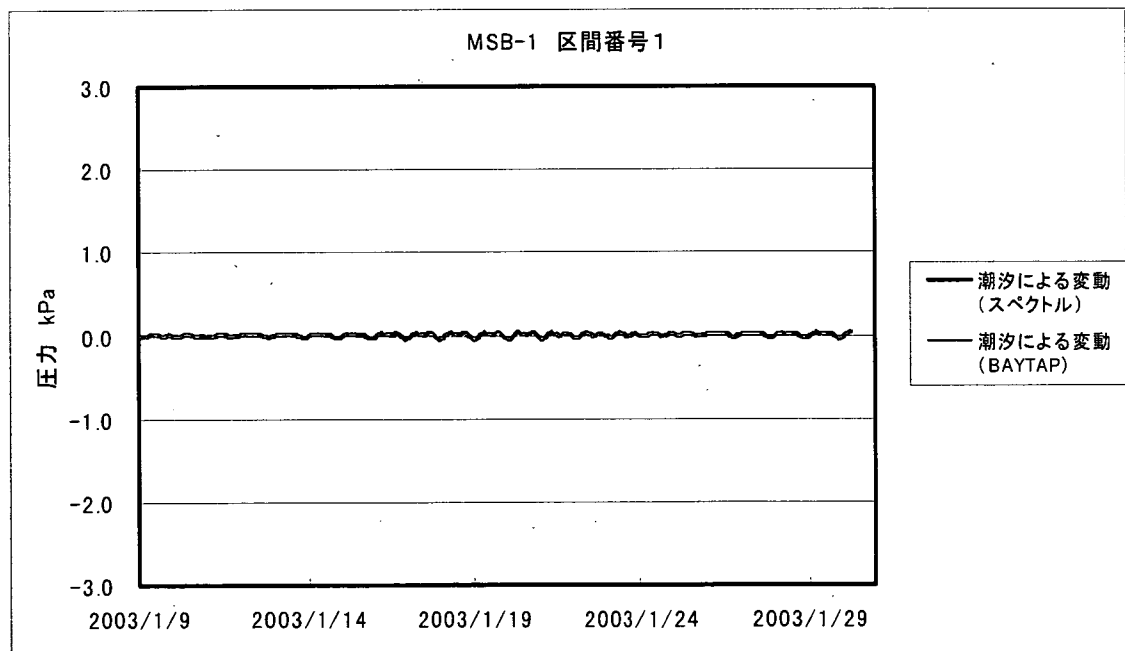
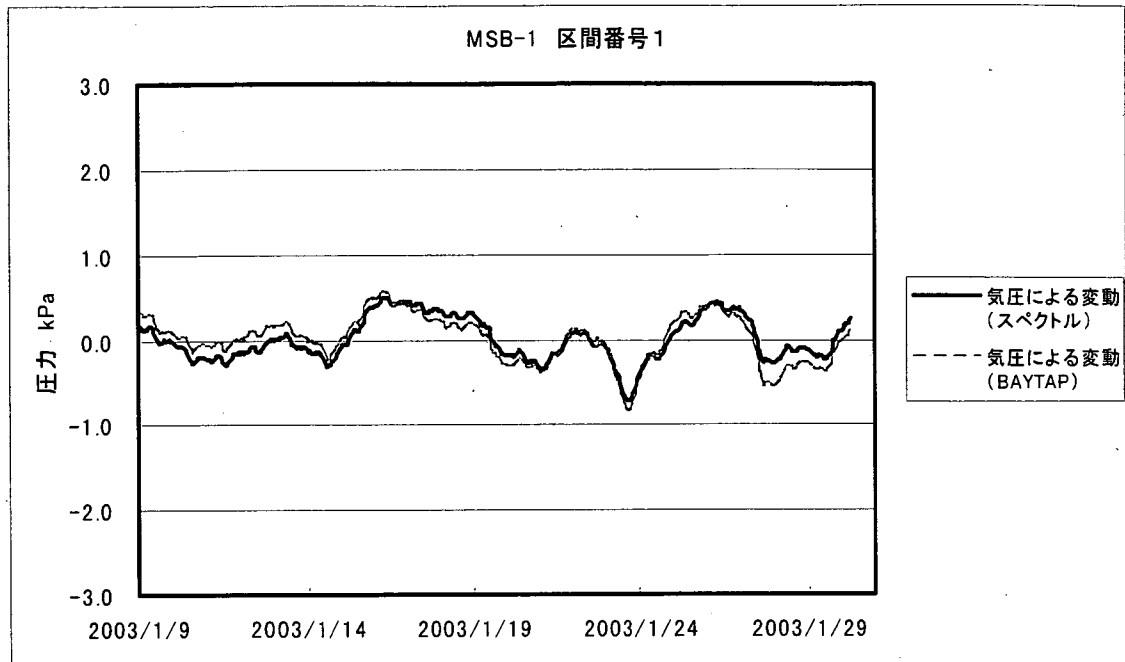


図 5-2(f) MSB-1 号孔の区間番号 1 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

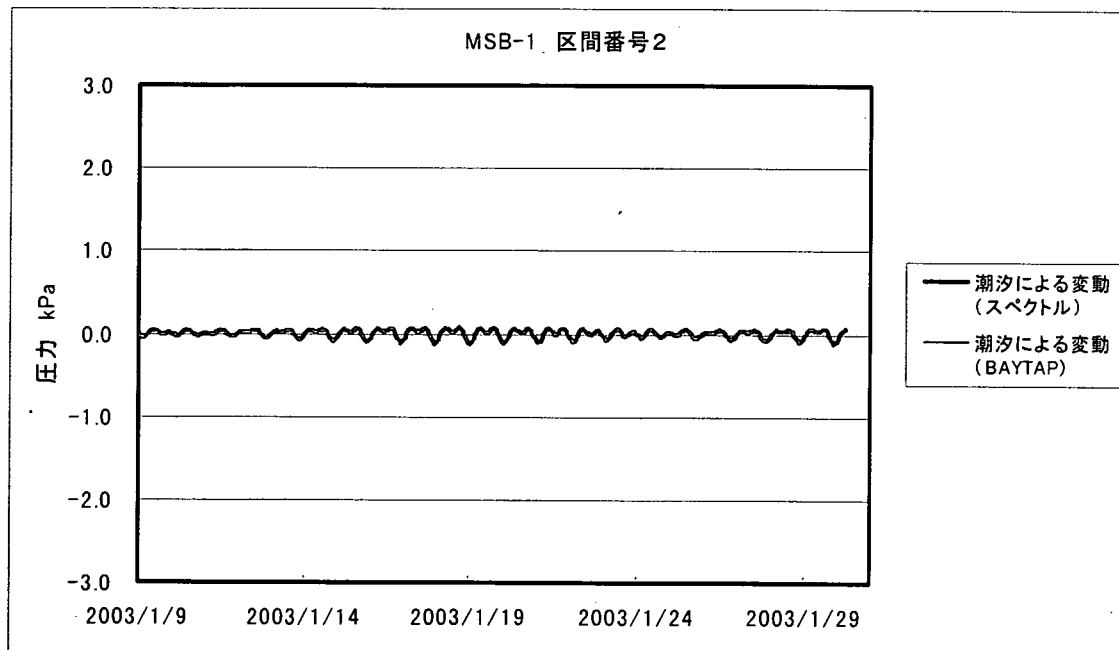
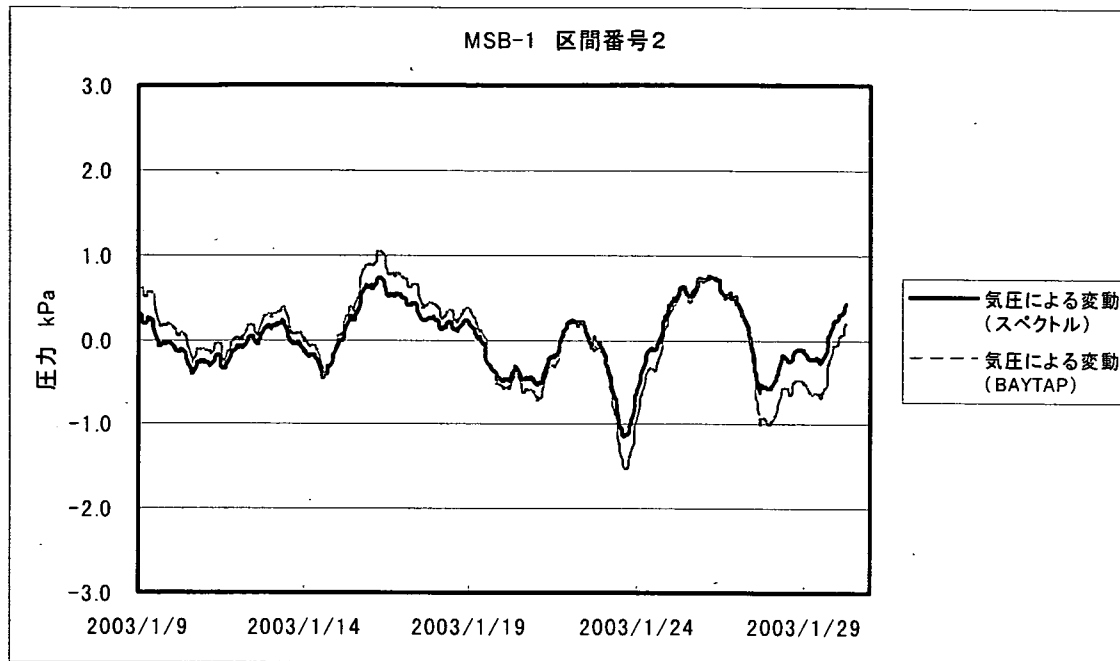


図 5-2(g) MSB-1 号孔の区間番号 2 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

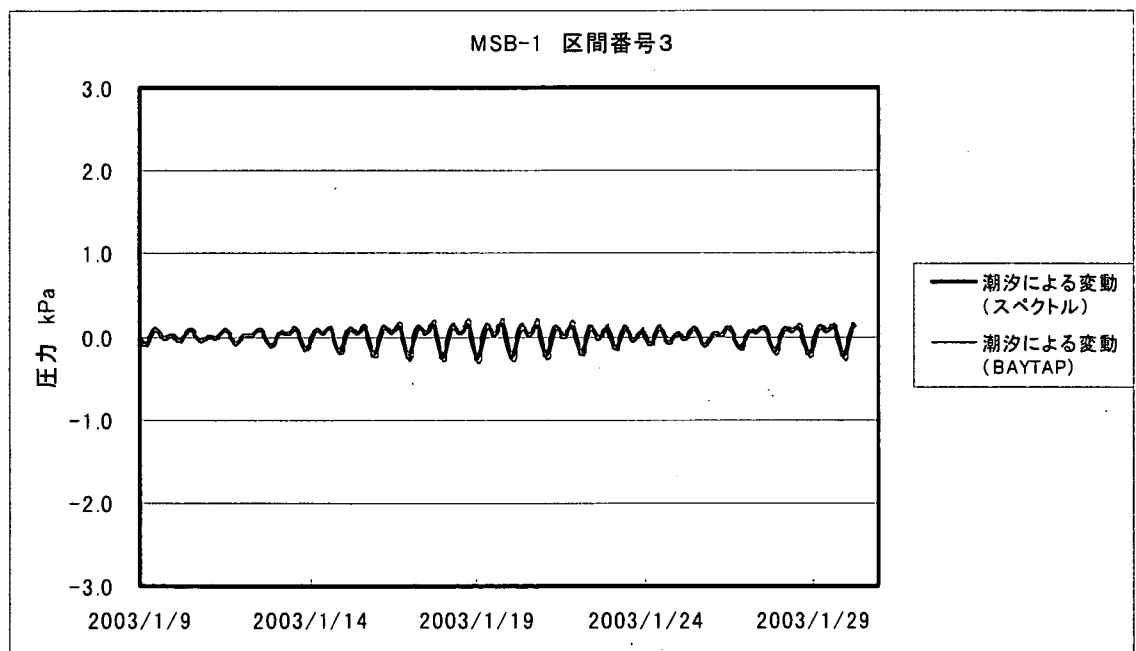
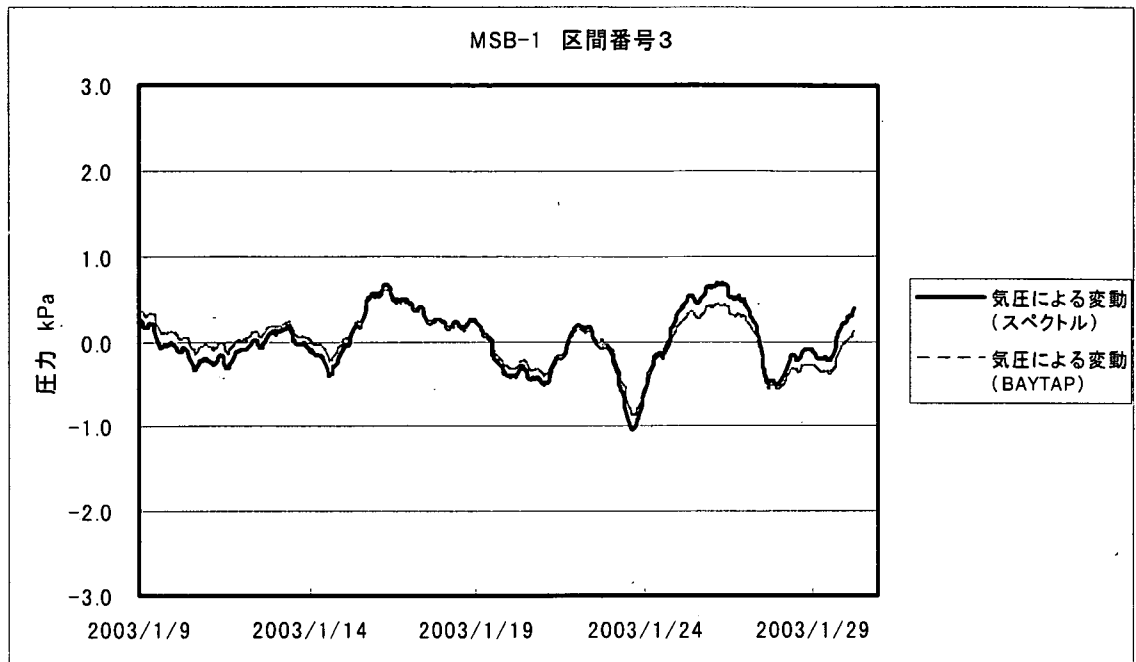


図 5-2(h) MSB-1 号孔の区間番号 3 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

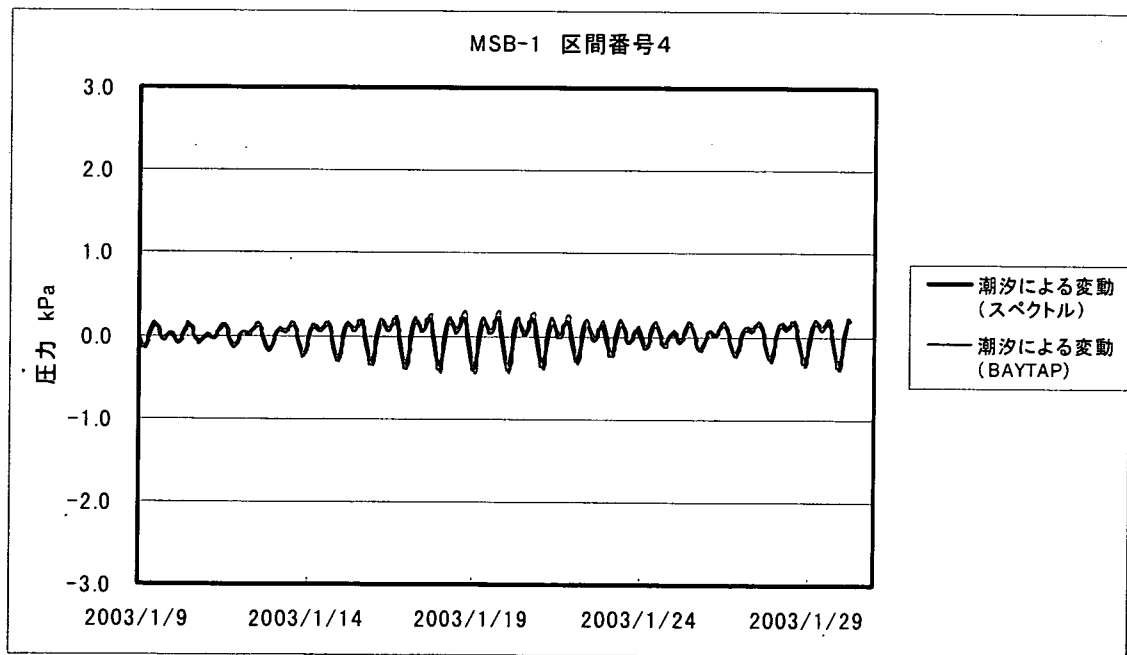
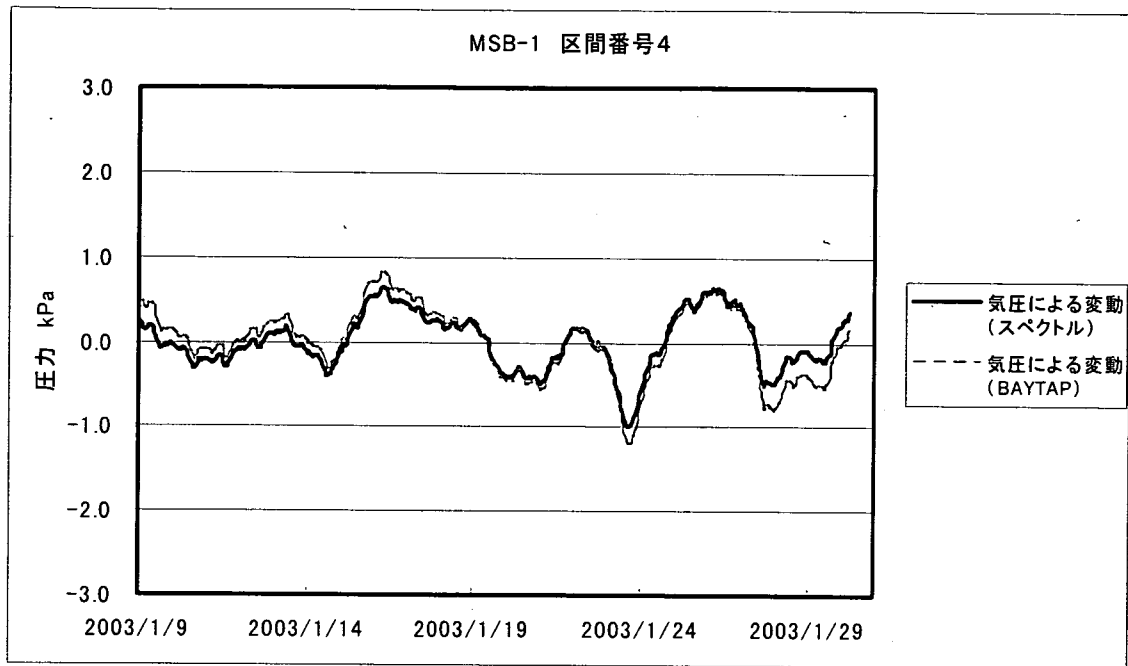


図 5-2(i) MSB-1 号孔の区間番号 4 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

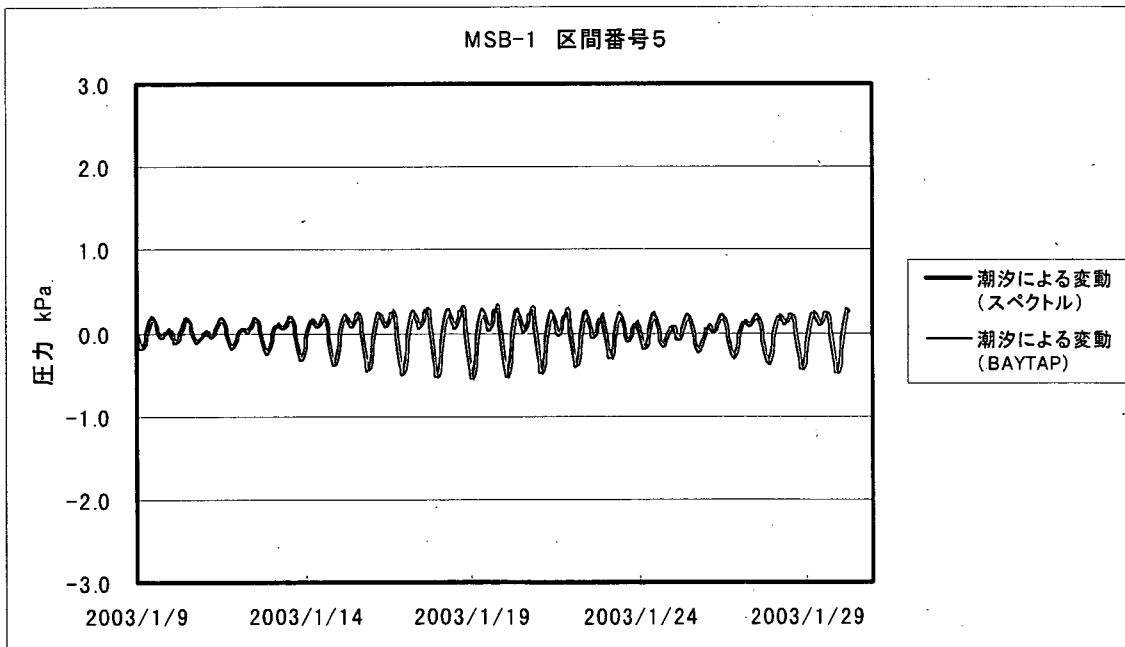
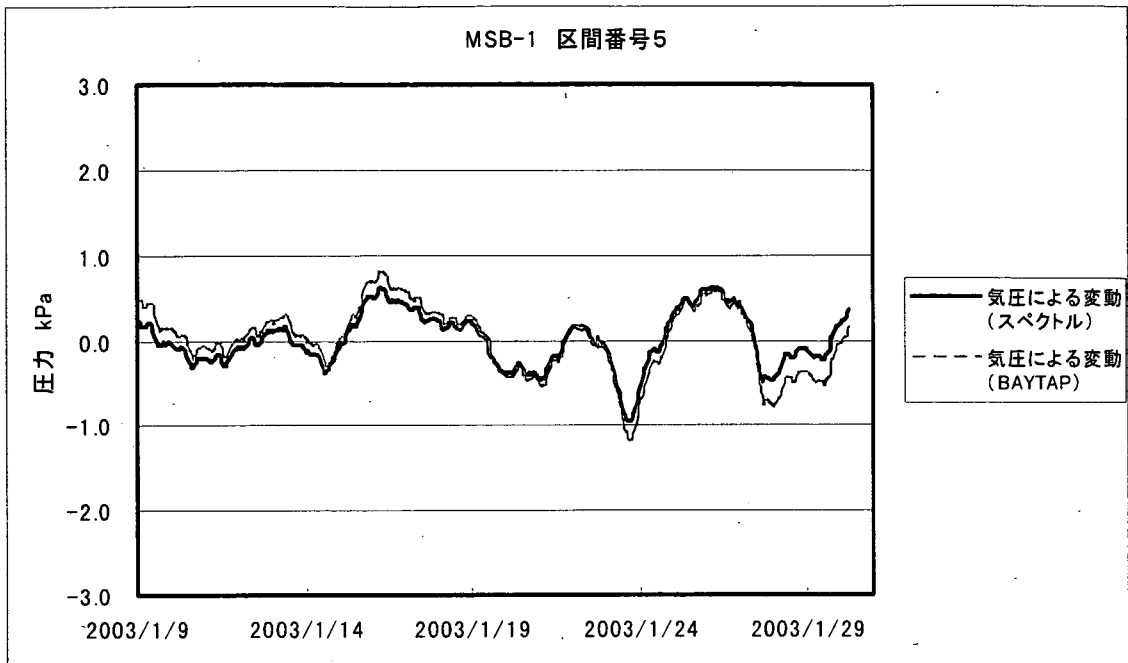


図 5-2(j) MSB-1 号孔の区間番号 5 における時系列データの比較
 スペクトル解析 (黒線) - BAYTAP-G (赤線)

6. 考察

6.1 スペクトル解析結果の考察

作業対象とした DH-2 号孔, MSB-1 号孔の合計 10 区間 (表 2-1) について, 間隙水圧のスペクトルを求め, 気圧変動および面積ひずみのスペクトルと比較した (図 3-1, 3-2)。この結果, すべての区間において間隙水圧が気圧変動と面積ひずみに応答して変動していることが確認できた。

間隙水圧変動の気圧変動に対する位相差 (図 3-3) およびゲイン (図 3-4) から, MSB-1 号孔の区間番号 1 以外の区間では間隙水圧は気圧変動に対して非排水的に応答しているものと判断できる。また, 面積ひずみに対する位相差 (図 3-3) およびゲイン (図 3-5) から, MSB-1 号孔の区間番号 1 以外の区間では間隙水圧は面積ひずみに対して非排水的に応答しているものと判断できる。

非排水応答の場合には, 気圧変動および面積ひずみのそれぞれに対して, 周期によらずゲインは一定になることが理論的に示されており, これを用いて 2.4 で述べたように物性の推定が可能となる。しかし, 図 3-4 および図 3-5 に示されているように, 実際には周期ごとにゲインはややばらついている。これは, 生データの質, トレンドの除去方法などによるものと考えられるが, 代表的なゲインを特定するためには, 間隙水圧変動の原因となる気圧変動や面積ひずみの卓越周期 (ピーク) に対するゲインを利用することが最も適切であると考えられる。したがって, 気圧変動に対しては 3.56 日周期の変動に対するゲインを求め, 面積ひずみに対しては, 0.508 日周期の変動に対するゲインを求めた。この結果を表 6-1 に示す。

表 6-1 非排水応答から求めた各区間のゲイン一覧表

孔名	区間番号	測定深度	地質	ゲイン	
				気圧変動に対するゲイン	面積ひずみに対するゲイン
MSB-1	2	117.2 ~ 131.6	明世累層(基底礫岩)	0.58	2.2E+06
	3	132.5 ~ 176.3	土岐夾炭累層	0.50	4.7E+06
	4	177.2 ~ 195.1	土岐夾炭累層(基底礫岩)	0.47	7.3E+06
	5	196.0 ~ 201.0	土岐花崗岩(風化部)	0.46	9.5E+06
DH-2	1	176.0 ~ 226.0	土岐花崗岩	0.51	1.5E+07
	2	227.0 ~ 292.0	土岐花崗岩	0.51	1.5E+07
	3	293.0 ~ 308.7	土岐花崗岩	0.51	1.3E+07
	4	309.7 ~ 343.9	土岐花崗岩	0.52	1.5E+07
	5	344.9 ~ 414.0	土岐花崗岩	0.51	1.4E+07

非排水応答の場合には, 気圧変動および面積ひずみのそれぞれに対して, 周期が長くなるとともに, 地下水流動の影響が大きくなることが理論的にも示されており, 一般的には位相差が大きくなりゲインが変化する。今回検討した 10 区間のうち, 唯一間隙水圧応答が地下水流動の影響を受けていた MSB-1 号孔の区間番号 1 では, 気圧変動に対して周期が長いほど位相差が大きくなり (図 3-3(f)), ゲインが大きくなる傾向にある (図 3-4(f))。

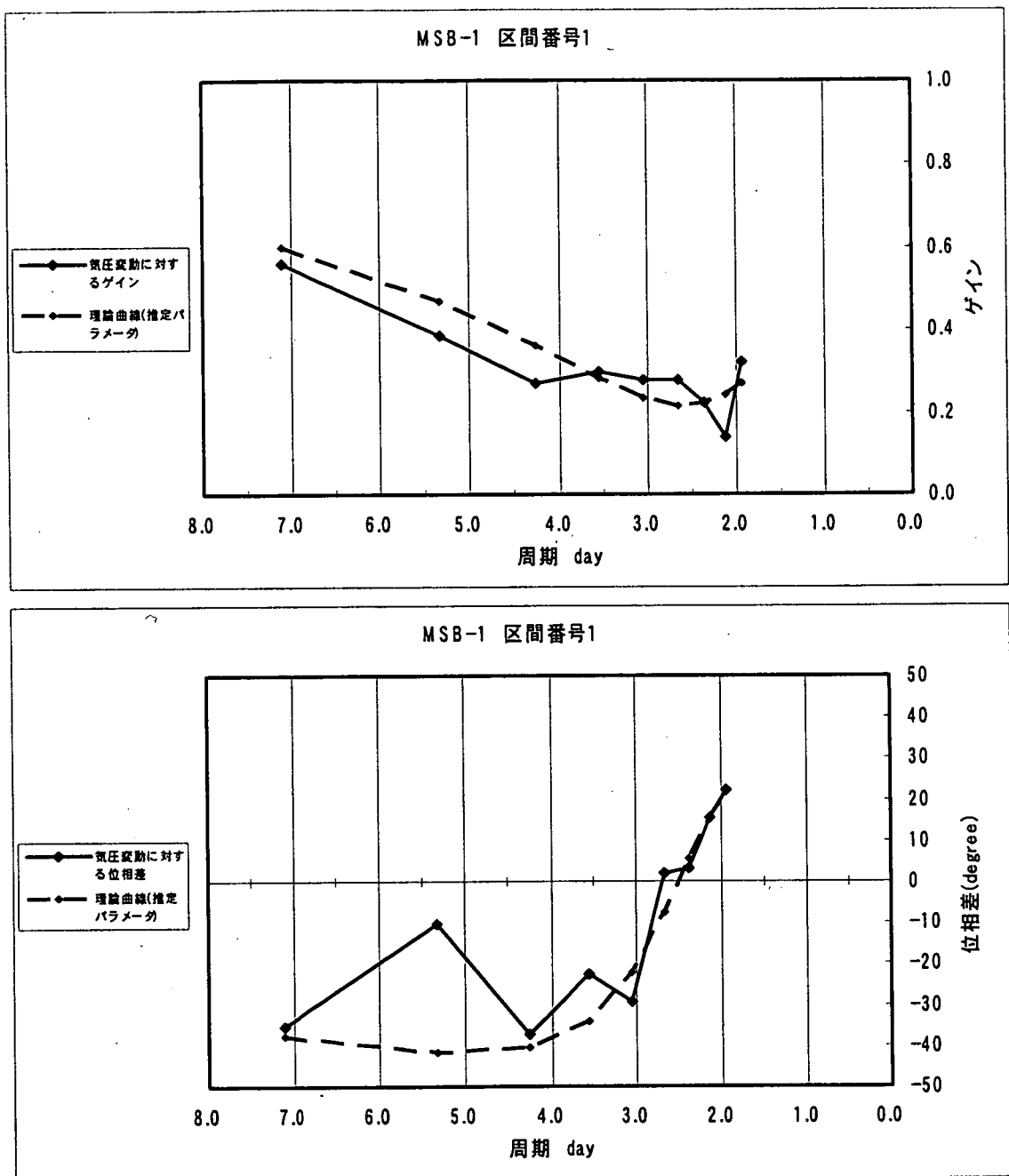


図 6-1 MSB-1号孔 区間番号1におけるゲイン (上) と位相差 (下) についての実測値と推定パラメータを用いた理論曲線の比較

このような傾向は、2.4 で述べた解に適切なパラメータを与えることによって再現することができ、このときに与えたパラメータがゲインおよび位相差の周波数特性を適切に再現する推定パラメータとなる。MSB-1号孔の区間番号1では、 $z=66.4$ m (測定区間の深度) を与えて、 c_1 , c_2 , z_1 , γ の4つの未知パラメータを試行錯誤的に推定した。この結果、以下のようなパラメータセットが、図 6-1 に示すように、実際のゲインと位相差の周波数特性をもっとも適切に再現するパラメータ (推定パラメータと呼ぶ) として推定できた。

$c_1=7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (不飽和帯の鉛直方向の気体拡散率)

$c_2=5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (飽和帯の鉛直方向の水頭拡散率)

$z_1=35 \text{ m}$ (地下水面深度)

$\gamma=0.7$ (飽和帯の载荷効率)

なお、これら4つの未知数がゲインと位相差の周波数特性に与える感度を図6-2~6-5に示した。

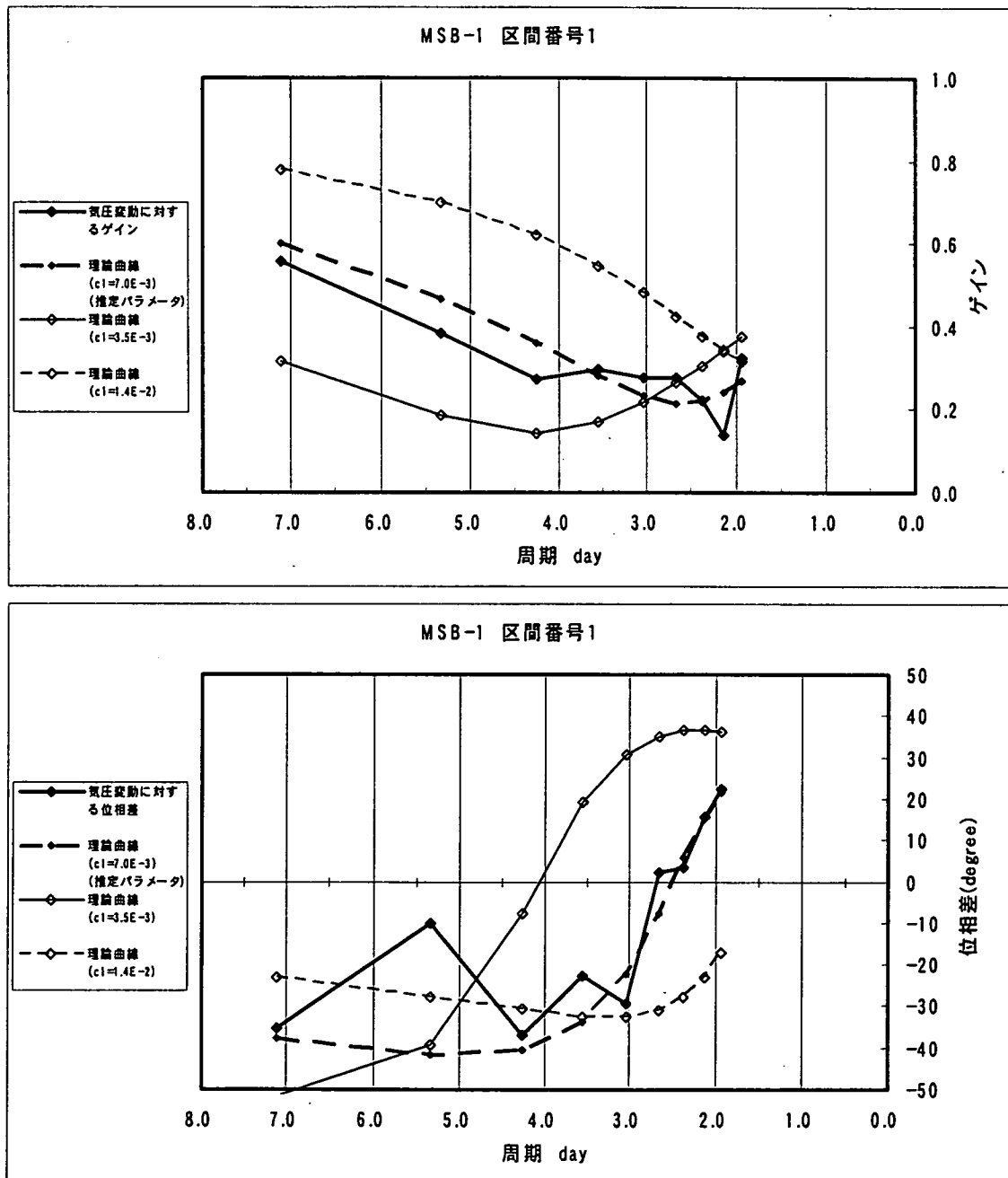


図6-2 ゲイン(上)と位相差(下)についての推定パラメータを用いた理論曲線と不飽和帯の鉛直方向の気体拡散率(c_1)の感度の比較

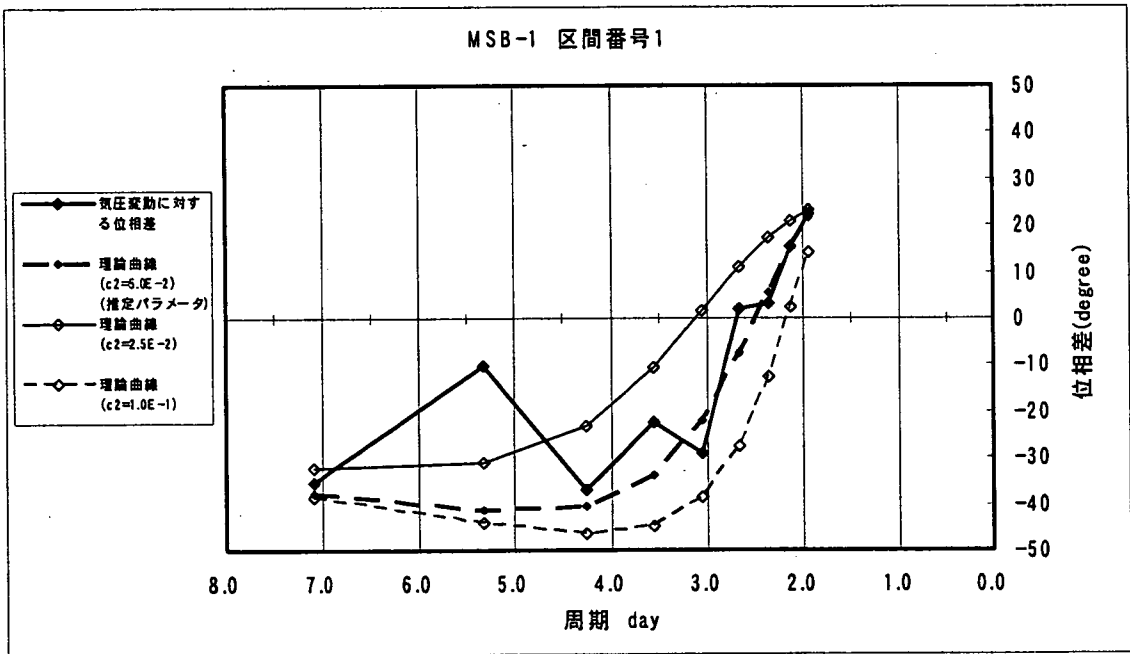
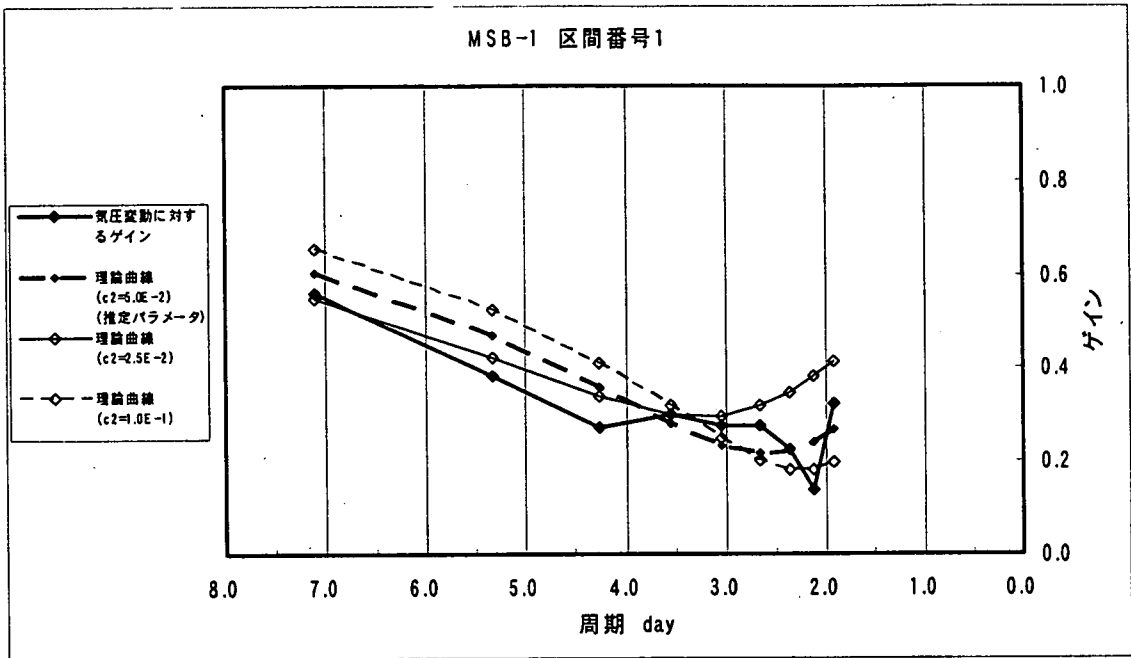


図 6-3 ゲイン (上) と位相差 (下) についての推定パラメータを用いた理論曲線と飽和帯の鉛直方向の水頭拡散率 (c_2) の感度の比較

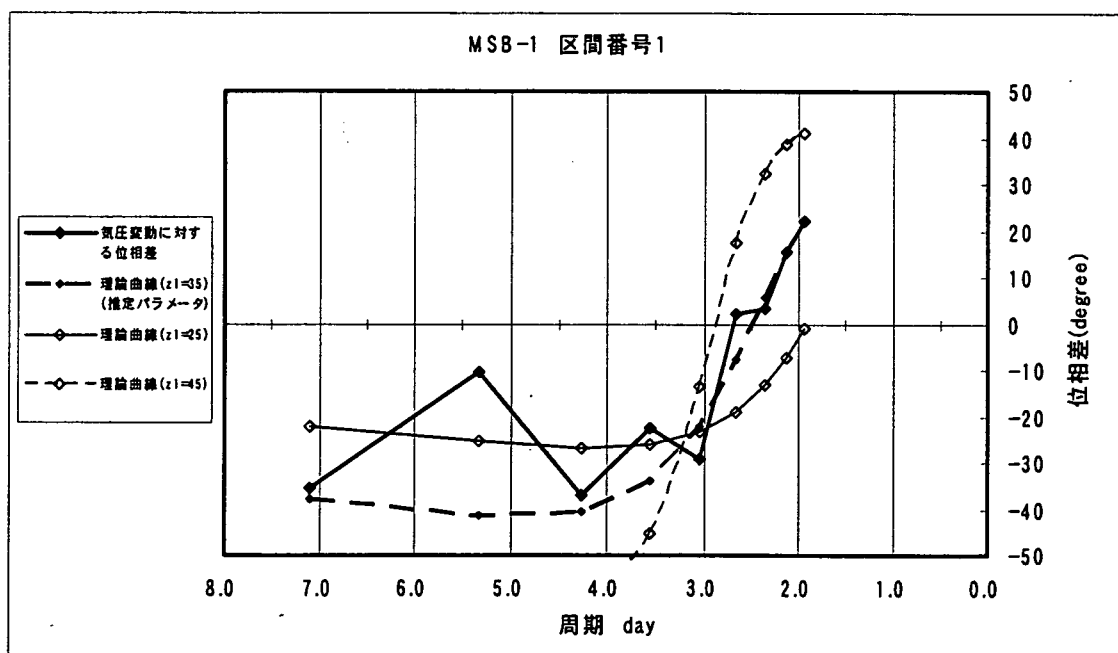
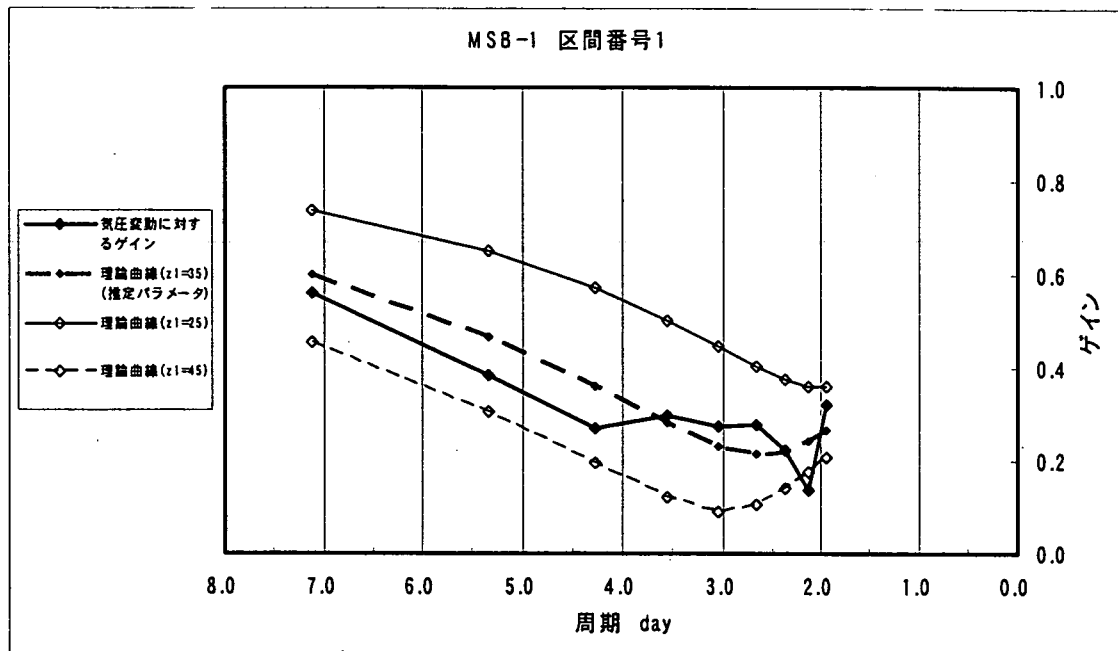


図6-4 ゲイン (上) と位相差 (下) についての推定パラメータを用いた理論曲線と
地下水面 (z_1) の感度の比較

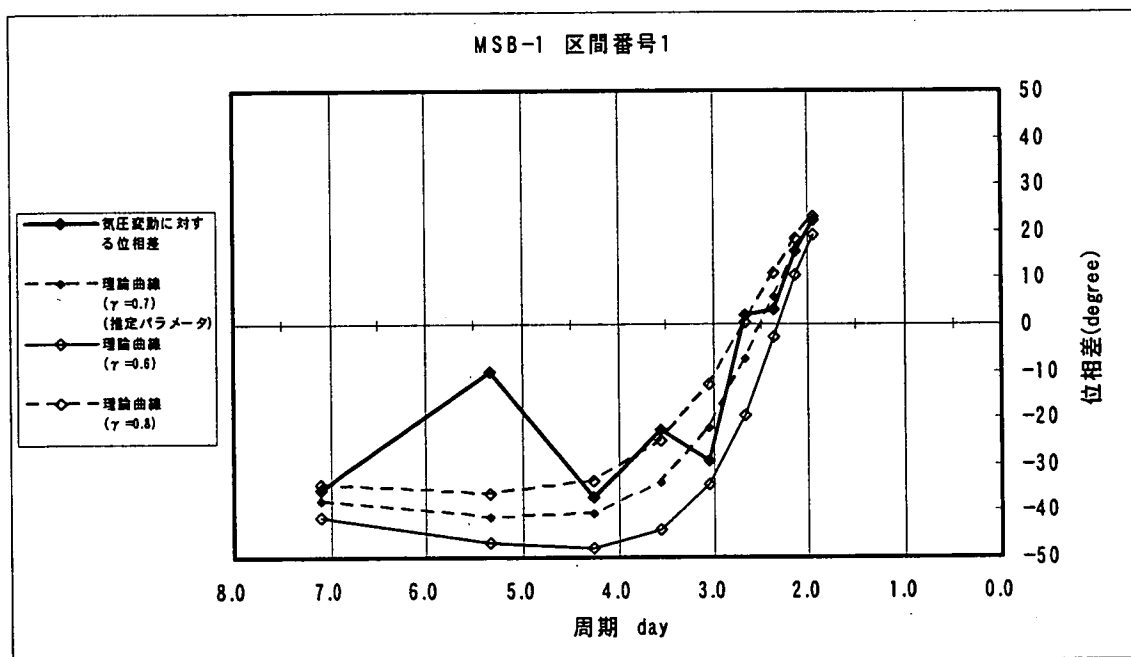
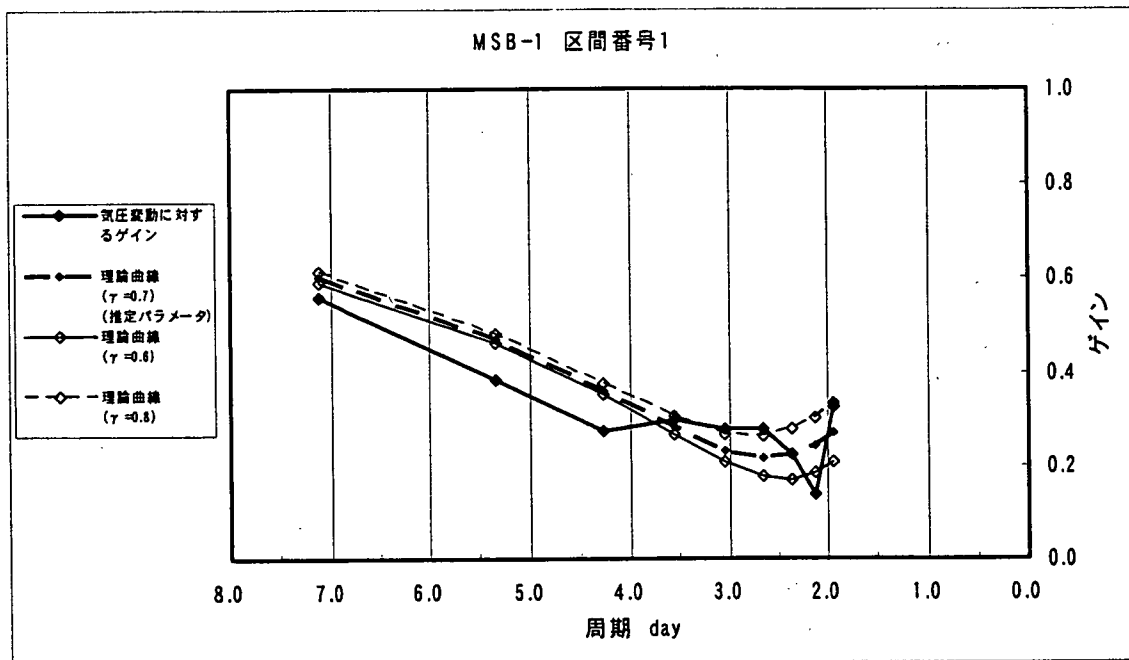


図 6-5 ゲイン (上) と位相差 (下) についての推定パラメータを用いた理論曲線と
 载荷効率 (γ) の感度の比較

4 つの未知パラメータのうち、地下水流動を推定するために有益な情報は飽和帯の鉛直方向の水頭拡散率 (c_2) と载荷効率 (γ) であるが、感度を検討した範囲では、気体の拡散率 (c_1) と地下水面位置 (z_1) の感度の方が大きく、必ずしも推定精度が高いとはいえない。未知パラメータが多く、感度の小さいパラメータがあるため、推定パラメータ以外の

パラメータの組み合わせが解として存在することも考えられる。

このような状況を考慮すると、推定パラメータは信頼性の高い推定値とみなすよりは、詳細な調査の必要性を判断したり、その計画を作成するための参考値として位置付けるべき値である。しかしながら、連続的に測定されているモニタリングデータから、地下水流動を推定するために有益な情報が得られることから、このようにモニタリングデータの解析を行うことの重要性は高いものと判断できる。

MSB-1 号孔の区間番号 1 以外の非排水応答から得られたゲインの情報(表 6-1)と MSB-1 号孔の区間番号 1 から得られた地下水流動を伴う応答から推定した情報を総合して、スペクトル解析から得られた推定結果を表 6-2 に示す。表 6-2 では、非排水応答のゲインから(2.11)および(2.12)式を用いて γ および $2G\gamma$ を求めた。また、両者から G を分離して算出した。

表 6-2 推定したパラメータ

孔名	区間番号	測定深度	地質	γ	$2G\gamma$	G Pa	$c_2 m^2/s$
MSB-1	1	66.4 ~ 116.3	明世累層	0.70	9.1E+05	6.5E+05	5.0E-02
	2	117.2 ~ 131.6	明世累層(基底礫岩)	0.58	2.2E+06	1.9E+06	
	3	132.5 ~ 176.3	土岐夾炭累層	0.50	4.7E+06	4.8E+06	
	4	177.2 ~ 195.1	土岐夾炭累層(基底礫岩)	0.47	7.3E+06	7.8E+06	
	5	196.0 ~ 201.0	土岐花崗岩(風化部)	0.46	9.5E+06	1.0E+07	
DH-2	1	176.0 ~ 226.0	土岐花崗岩	0.51	1.5E+07	1.5E+07	
	2	227.0 ~ 292.0	土岐花崗岩	0.51	1.5E+07	1.5E+07	
	3	293.0 ~ 308.7	土岐花崗岩	0.51	1.3E+07	1.2E+07	
	4	309.7 ~ 343.9	土岐花崗岩	0.52	1.5E+07	1.4E+07	
	5	344.9 ~ 414.0	土岐花崗岩	0.51	1.4E+07	1.4E+07	

γ の値からは、細谷・徳永(2003)が整理しているように、非定常の地下水流動を表現するために必要な比貯留係数 S_s を次式によって求めることができる。

$$S_s = \rho g \left(\frac{\phi}{1-\gamma} \frac{1}{K_f} \right) \quad (6.1)$$

ここに、 ϕ は間隙率、 K_f は水の体積弾性率 (2.3×10^9 Pa) である。

実際に比貯留係数を求めるためには間隙率の情報が不足しているため、ここでは堆積岩の間隙率を 50%、花崗岩の間隙率を 10% と仮定した。このとき、比貯留係数は、MSB-1 号孔の区間番号 1 では $7.1 \times 10^{-6} m^{-1}$ となり、DH-2 号孔の区間番号 1 では $8.6 \times 10^{-7} m^{-1}$ となる。

次に、剛性率 G の値は、計算で求めた面積ひずみの値を利用しているため、絶対値は必ずしも信頼性の高い値ではない。そこで、ここでは区間相互の相対的な関係に着目する。このとき、DH-2 号孔では区間によらずほぼ一定の値であるが、MSB-1 号孔では深い区間ほど値が大きくなり、区間番号 5 では DH-2 号孔に近い値となっている。 G は岩盤の変形特性を示しており、一般的には花崗岩よりも堆積岩の方が小さく、浅い深度ほど小さいも

のと考えられ、MSB-1号孔とDH-2号孔の各区間の地質および深度から想定される傾向と調和的な傾向である。

なお、MSB-1号孔の区間番号5とDH-2号孔の1区間は、ほぼ同じ深度であり、地質もともに花崗岩である。この2区間を比較すると、 γ の値も G の値も大きな差異がない結果となっている。MSB-1号孔の方が G の値がやや小さいが、この原因のひとつとしてMSB-1号孔の区間番号5の分布する花崗岩が風化している影響が考えられ、モニタリングシステムによって結果が大きく異なるということはないものと判断できる。

なお、MSB-1号孔の区間番号1では、飽和帯の鉛直方向の水頭拡散率($c_2=5.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$)が求められており、上述のように間隙率を50%と仮定すると比貯留係数が $7.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ と計算できる。これらから計算できる飽和帯の鉛直方向の透水係数は $3.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ となる。

6.2 BAYTAP-Gとの比較

BAYTAP-Gとの比較は、周波数領域と時間領域で実施した。

周波数領域では、BAYTAP-Gによって分離された間隙水圧変動の気圧応答成分と潮汐応答成分についてスペクトル解析を行い、気圧変動に対するゲインに対するゲインを求めた(図5-1)。

この結果、図6-6に例を示すようにスペクトル解析とBAYTAP-Gで大きな違いが認められた。すなわち、スペクトル解析では、1.94~7.11日の周期範囲においてゲインはほぼ一定であることに対して、BAYTAP-Gではゲインは一定ではない。また、ゲインの絶対値もBAYTAP-Gで分離された気圧応答成分の方がスペクトル解析よりも大きい。

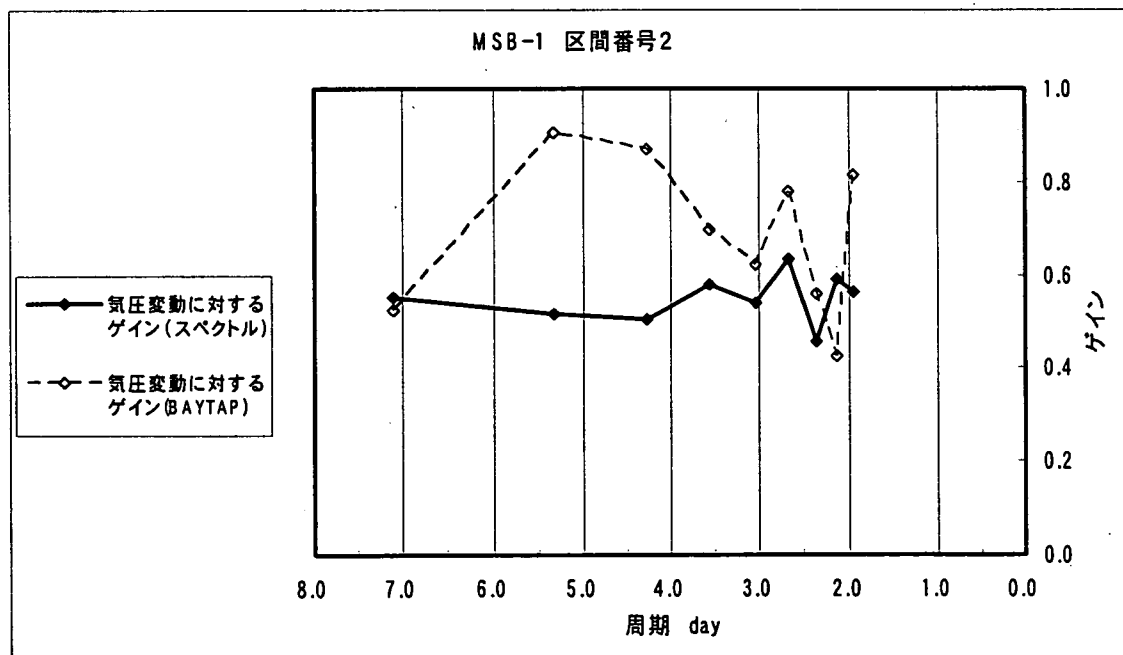


図6-6 気圧変動に対するゲインの周期依存性についてのスペクトル解析とBAYTAP-Gの比較

まず気圧変動に対してゲインが一定にならない現象は、測定深度を考慮すると物理的には説明することが難しい。しかし、図 6-7 に示すように、BAYTAP-G で分離したトレンドのスペクトルと気圧のスペクトルを比較すると、長周期の変動の一部が気圧応答成分ではなく、トレンドとして分離されていることがわかる。BAYTAP-G のトレンドの分離方法は、スペクトル解析のようにトレンドを固定するのではなく、気圧応答成分とトレンドを同時に分離するという柔軟な（制約条件が緩い）方法を採用しているため、本来は気圧に対して応答している長周期の間隙水圧変動をトレンドとして分離することがあるものと解釈できる。

また、図 6-7 では BAYTAP-G で分離された気圧応答成分と 2.2(2) で述べた方法でトレンド除去のみを行った間隙水圧変動のスペクトルを比較している。2.2(2) で述べた方法ではトレンドを一次関数と仮定しているため、後者は間隙水圧の実測値のスペクトル成分を保存しているものと解釈できる。図 6-7 で特筆すべきは、BAYTAP-G で分離された気圧応答成分の方が、トレンドを除去しただけの間隙水圧変動に比べて、7.11 日や 3.56 日の周期の振幅が大きいことである。このような傾向は物理的には考えにくく、BAYTAP-G では、間隙水圧変動を気圧応答成分とトレンドに分離するとき、気圧応答成分に過剰な重み付けがされているという仮説が考えられる。図 6-7 ではトレンドのスペクトルが気圧変動のスペクトルに対応しており、後述の図 6-9 では、トレンドの時系列データが気圧変動と逆位相で変動している。これらは、気圧応答成分に過剰な重み付けがされているという仮説を裏付けるデータである。すなわち、BAYTAP-G では、トレンドと気圧応答成分を分離するとき、適切に分離されない場合があることを示している。

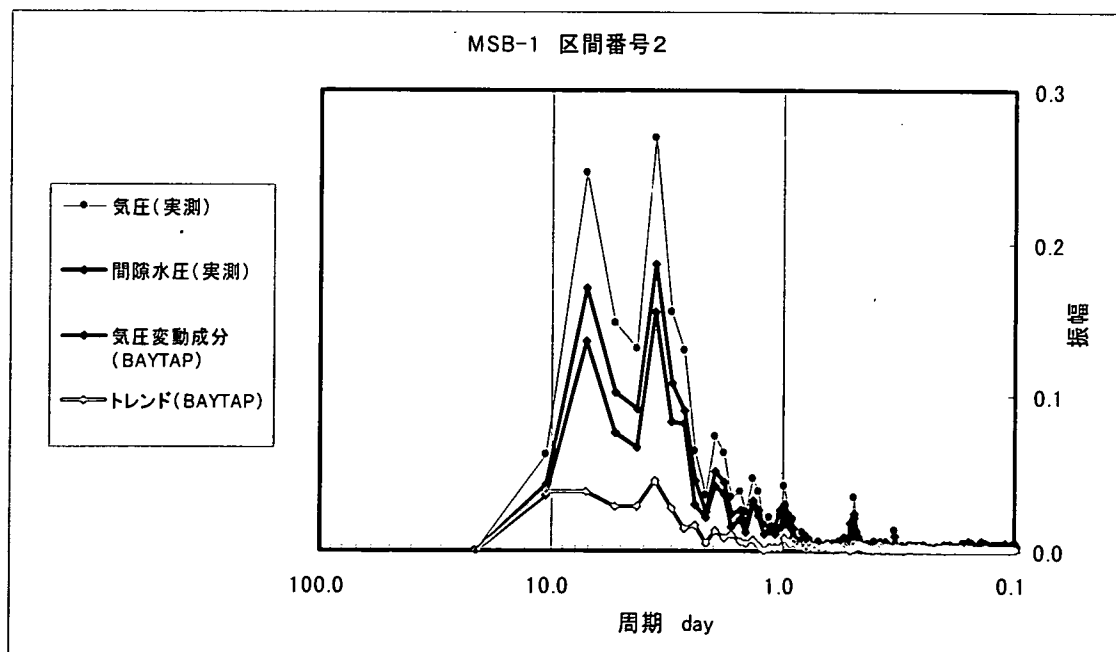


図 6-7 MSB-1 号孔 区間番号 2 における BAYTAP-G によって分離された気圧応答成分とトレンドのスペクトル

この点については、田村(1995)も「BAYTAP-Gでは、ドリフト(トレンドを意味する)の形の拘束条件の基本的なオプションとして、第2階差が0になるという仮定をおいた。ドリフトが直線的であるという仮定が有効に働くためには、解析しようとする現象に対して適当なサンプリング間隔が要求される。たとえば、数日周期のややゆったりとした大気圧変動の応答を求めようとする場合、サンプリング間隔を1時間とはせずに、2~3時間間隔にとった方が良いこともある。」と述べている。

次に、スペクトル解析によって求められた気圧変動と面積ひずみに対する周波数応答関数から、逆フーリエ変換によって気圧応答成分と潮汐応答成分を求めて、BAYTAP-Gによって分離された気圧応答成分と潮汐応答成分とを時間領域で比較した。

潮汐応答成分については、図5-2に示したように、すべての区間において両者はほぼ一致した。しかし、気圧応答成分については、DH-2号孔ではほぼ一致したものの、MSB-1号孔では図6-8に例示するように両者は必ずしも一致しなかった。

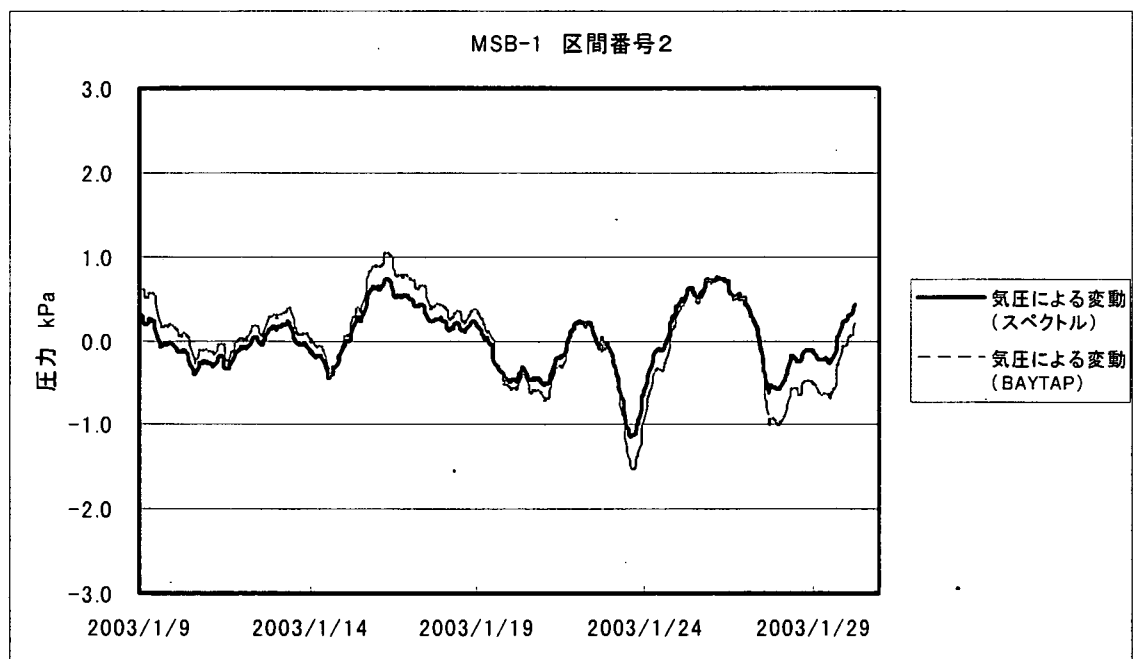


図6-8 MSB-1号孔 区間番号2における時系列データの比較
 スペクトル解析(黒線) - BAYTAP-G(赤線)

両者の差異が最も大きなMSB-1号孔の区間番号2について、2.2(2)に述べた方法でトレンドを直線で除去した間隙水圧変動(紺)とスペクトル解析によって求めた気圧応答成分(黒)とBAYTAP-Gによって求めた気圧応答成分(赤)を図6-9に比較した。

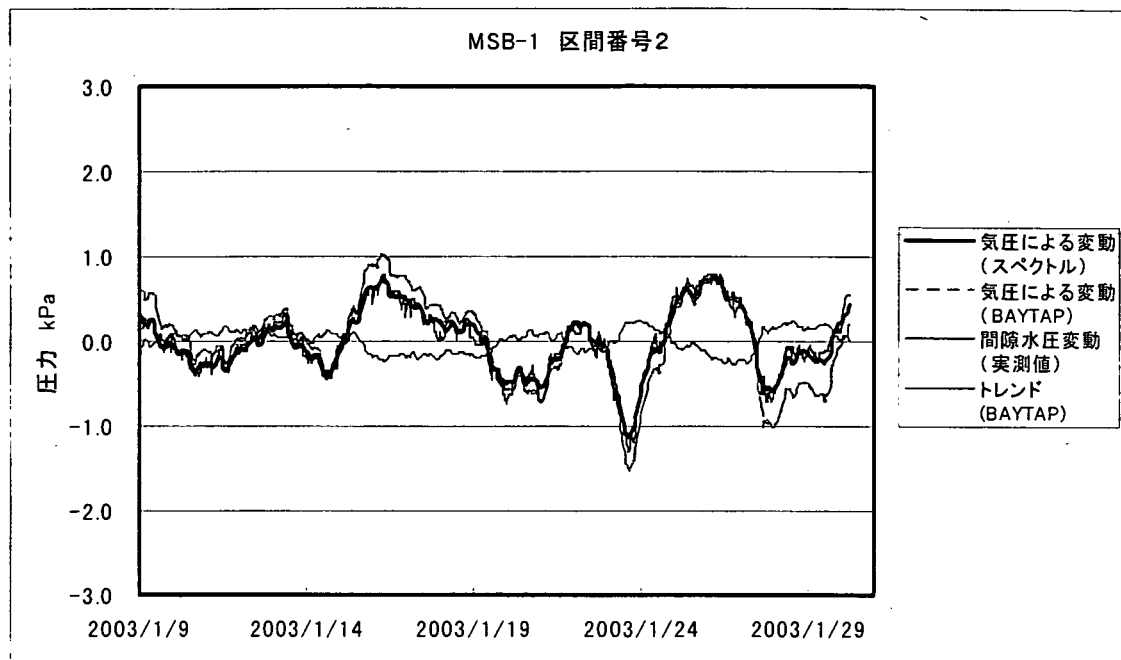


図 6-9 MSB-1 号孔 区間番号 2 における時系列データの比較
 スペクトル解析で求めた気圧による間隙水圧変動 (黒線),
 BAYTAP-G で分離した気圧応答成分 (赤線),
 実測の間隙水圧変動 (トレンドを直線で除去) (紺線),
 BAYTAP-G で分離したトレンド (水色線)

図 6-9 では、BAYTAP-G で分離した気圧応答成分よりもスペクトル解析で求めた気圧変動による間隙水圧変動の方が、実際の間隙水圧変動に一致していることがわかる。図 6-9 では、BAYTAP-G によって分離されたトレンドについて 2.2(2)で述べた方法と同じ方法で、直線成分を除去したデータを水色で示している。これが、気圧応答成分と逆位相で変動しており、周波数領域での比較で述べたように、BAYTAP-G では気圧変動による影響の一部をトレンドとして除去していることを示している。

周波数領域と時間領域での比較を総合すると、以下のように結論できる。

間隙水圧のモニタリングデータを、気圧変動による応答と潮汐による応答に分離する場合、スペクトル解析でも BAYTAP-G でも DH-2 号孔のようにほとんどの場合、顕著な差異は生じない。

しかし、BAYTAP-G では、間隙水圧変動を気圧応答成分とトレンドに分離するときに、気圧応答成分の一部をトレンドとして解釈することがあることに留意が必要である。

間隙水圧のモニタリングデータを用いて、水理・変形特性を推定する場合には、長周期成分がトレンドとして分離される可能性があるため、BAYTAP-G を用いて気圧応答成分を分離する方法は適切ではない。スペクトル解析によって気圧変動の応答を分離する方法を採用すべきである。

6.3 今後の課題・提案

本業務では、DH-2号孔とMSB-1号孔の10区間について、スペクトル解析を行い、気圧変動と地球潮汐に対する間隙水圧の変動を利用して、岩盤の水理・変形特性を推定した。

気圧変動、地球潮汐に対する間隙水圧の変動からは、細谷・徳永(2003)が述べているように、比貯留係数や鉛直方向の透水係数を推定することが可能である。

本業務でも、比貯留係数や鉛直方向の透水係数を推定したが、そのほとんどが測定した深度が大きいため非排水応答であった。非排水応答の場合には、変形特性についての情報が得られるが、透水性に関しての情報が得られないので、次に検討する場合には、比較的浅部を中心として検討することが望ましい。

なお、研究所用地周辺では地下水流動解析が行われているが、今までの検討では、堆積岩において鉛直方向の透水性が水平方向よりもかなり小さく、この鉛直方向の透水係数が研究所用地周辺の地下水流動を大きく支配している可能性が示唆されている(稲葉・三枝(2004))。鉛直方向の透水係数は単一の試錐孔では測定することが難しいことと、鉛直方向の透水係数を測定するためには鉛直方向の透水性を支配する地質構造を把握して、これを適切に考慮した計画で測定を実施する必要があることを考慮すると、はじめに既存のモニタリングデータに対して、本業務で述べたスペクトル解析を適用し、鉛直方向の透水係数の程度を大まかに推定した後に、その結果を参考として本格的な調査計画を策定する手順が合理的であると提案する。

7. おわりに

本業務では、MSB-1号孔およびDH-2号孔の10区間における2003年1月9日から1月30日までの間隙水圧のモニタリングデータに対してスペクトル解析を実施して次のような結論を得た。

- ・ 間隙水圧のモニタリングデータをフーリエ変換して得られたスペクトル図では、7.11日、3.6日、0.970日、0.508日の周期でピークが認められた。
- ・ 気圧変動のスペクトル図では、7.11日、3.6日の周期がピークとして表れており、間隙水圧が気圧変動に応答していることがスペクトル図上で確認できた。
- ・ 理論的に求めた面積ひずみのスペクトル図では、0.970日、0.508日の周期がピークとして表れており、間隙水圧が地球潮汐に応答していることがスペクトル図上で確認できた。
- ・ 0.508日周期の地球潮汐に対する応答は、検討対象としたすべての区間で非排水的に応答している。
- ・ 気圧変動に対する応答は、MSB-1号孔の区間番号1を除くと、非排水的に応答している。
- ・ 気圧変動に対する応答のゲインから、各区間について载荷効率 γ を求めた。
- ・ 地球潮汐に対する応答のゲインから、各区間について $2G\gamma$ を求めた。ここに、 G は岩盤の剛性率である。
- ・ 载荷効率から、比貯留係数を推定した。MSB-1号孔の堆積岩では、 10^{-6} m^{-1} のオーダーであると推定し、MSB-1号孔の区間番号5とDH-2号孔の花崗岩では、 10^{-7} m^{-1} のオーダーであると推定した。
- ・ MSB-1号孔の区間番号1では、鉛直方向の透水係数を 10^{-7} m/s のオーダーであると推定した。
- ・ MSB-1号孔とDH-2号孔を比較すると、気圧変動、地球潮汐に対する応答の差異は地質の違い（MSB-1号孔では堆積岩、DH-2号孔では花崗岩）で説明でき、同じ花崗岩で比較するとその差異は小さく、モニタリングシステムの違いの影響は明瞭には認められなかった。

また、スペクトル解析の結果をBAYTAP-Gで処理した同じ区間および期間のデータと比較することによって次の結論を得た。

- ・ BAYTAP-Gで分離した気圧変動による応答（気圧応答成分）の周波数特性は、トレンドの除去方法の影響を受けるため、スペクトル解析とはやや異なる結果となった。物理的な解釈を行う場合や、水理特性を推定するためには、BAYTAP-Gの利用は必ずしも適切ではないと判断できる。
- ・ BAYTAP-Gで分離した地球潮汐による応答（潮汐応答成分）は、スペクトル解析と大きな差異は認められなかった。
- ・ 水理特性の推定、物理的な解釈を行うためには、BAYTAP-Gを用いるよりもスペクトル

ル解析の方が適切であると考えられる。

水理試験の影響をみる場合のように、気圧応答成分や潮汐応答成分を除去するときには、トレンドを仮定する必要のない BAYTAP-G が便利である。しかし、BAYTAP-G では気圧応答成分が適切に分離できない可能性があることに留意を要する。BAYTAP-G を利用する場合には、トレンドの周期性をチェックするなどの確認作業が必要である。

参考文献

- 細谷真一・徳永朋祥：“間隙水圧の気圧変動応答，地球潮汐応答を用いた水理特性評価技術の展望”，地下水学会誌，Vol.45，No.3，pp.299～318 (2003)
- 細谷真一・徳永朋祥：“応力変化によって生じる間隙水圧変化に関する考察 -岩盤と土質材料の比較-”，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.301～306 (2004)
- 稲葉薫・三枝博光：“ローカルスケール領域および境界条件設定のための広域地下水流動解析” (投稿準備中) (2004)
- 中川一郎，他：“地球潮汐”，坪川家恒編：現代測地学 第5巻，日本測量協会，pp.193～267 (1986)
- 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会 (1994)
- 田村良明：“地球潮汐データの解析”，赤池弘次・北川源四郎編：時系列解析の実際 II，朝倉書店，pp.151～165 (1995)
- Beaumont, C., and J. Berger: "An analysis of tidal strain observations from the United States of America, I, The laterally homogeneous tide", Bull. Seismol. Soc. Am., 65, 1613～1629 (1975)
- Bendat, J.S. and A.G. Piersol: Random Data: Analysis and measurement procedures, Third Edition, John Wiley, New York (2000)
- Hsieh, P.A., et al.: "Estimation of aquifer transmissivity from phase analysis of Earth-tide fluctuations of water levels in artesian wells", Water Resour. Res., 23, 1824～1832 (1987)
- Jaeger, J.C. and N.G.W. Cook: Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen & Co Ltd., London (1969)
- Roeloffs, E.A.: "Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena", Adv. Geophys., 37, 135～195 (1995)
- Tamura, Y., et al.: "A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion", Geophys. J. Int., 104, 507～516 (1991)
- Wang, H. F.: Theory of Linear Poroelasticity, Princeton University Press, Princeton (2000)