

# 鳥取平野における地下水位変動特性と地盤沈下のFEM解析

清水 正喜<sup>1)</sup>・余悟 純生<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>土木工学科・<sup>2)</sup>鳥取市役所

(1996年8月28日受理)

Characterization of Groundwater Variations and its Application  
to the FE Analysis of the Land Subsidence in Tottori Plain

by

Masayoshi SHIMIZU<sup>1)</sup> and Sumio YOGO<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Civil Engineering・<sup>2)</sup>Tottori Municipal Office

(Received August 28, 1996)

The variations of groundwater levels in Tottori Plain were characterized by using the data having been measured daily since 1975 or 1978. The long-term variations of groundwater levels were evaluated by the moving average method and the short-term variations by Fourier spectra. The spectra showed that the short-term variations are periodic with two distinctive periods of a week and a half year. The groundwater variation characteristics were taken into account in the finite deformation Finite Element analyses which were made to investigate the land subsidence in Tottori City area. The groundwater levels in the period when they were not measured was estimated by assuming a long-term variation trend and by applying the short-term variation characteristics obtained through Fourier analyses.

Key words : Groundwater, Land subsidence, FEM, Finite deformation, Fourier Spectrum, Moving average

## 1. はじめに

鳥取市では、1995年現在、年間約1cmの地盤沈下が観測されている地域がある。地盤沈下は1964年頃から始まったと推定され<sup>1)</sup>、1979年には年間9cmの沈下量が観測された。それに対して、地盤沈下観測網の整備や地下水位観測の強化等の対策がとられてきた。地下水位観測に関しては、既設井戸の水位観測や水位観測井戸の新設などの対策がとられている。

清水<sup>1), 2), 3), 4)</sup>は、鳥取市の地盤沈下の機構を解明し、沈下の将来予測を行う目的で、有限要素解析によって地盤沈下のシミュレーションを行った。これまでに、鳥取市の地盤沈下は沖積粘性土層の圧密現象によるものであること、圧密は粘性土層下部の砂層の地下水位の低下によるものであること等が明らかになった。

一般に、地下水位変動に起因する地盤沈下の問題に有限要素法を適用する上で、地下水位の変動をどのように評価するかが重要になる。これまでの研究では<sup>1)~4)</sup>、月平均水位データを用いて観測期間の地下水位変動を評価し、非観測期間の水位変動は直線と周期一定の三角関数の和で表現した。また、支配方程式の定式化にあたり、まず微小変形の仮定を設け<sup>1)~3)</sup>、その後その仮定を除いて有限変形解析<sup>4)</sup>を行った。

本研究では、水位データを用い、そのスペクトル特性を考察し、スペクトル特性を考慮した有限変形有限要素解析を行った。

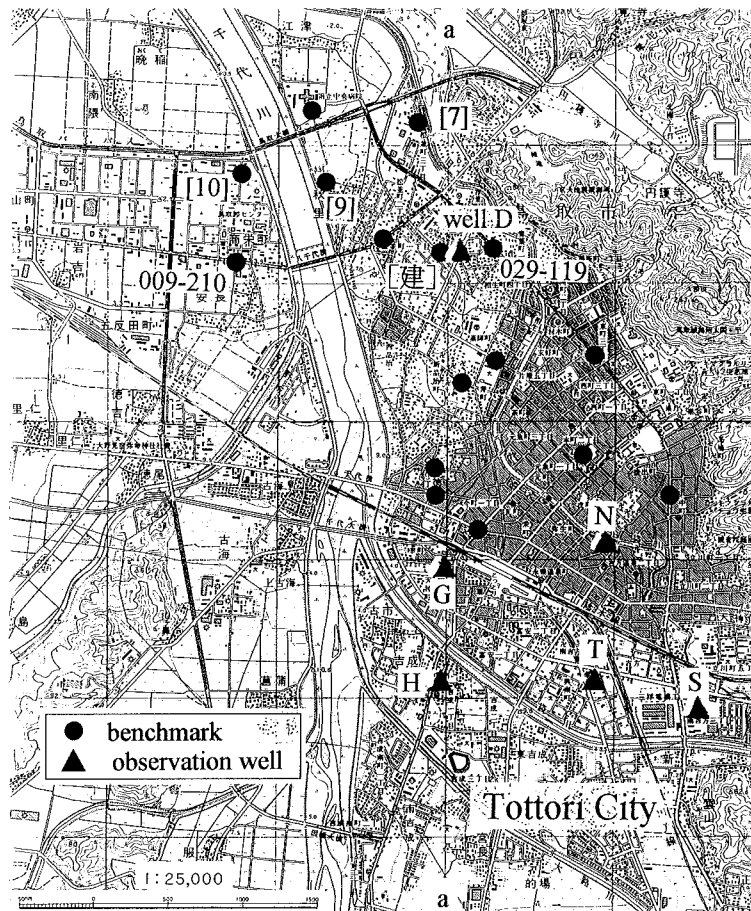


図1：水準点および水位観測井の位置図（観測井名は表2参照）

## 2. 地盤沈下の概要

図1に鳥取市中心部での水準点の位置を示す。建設省国土地理院の一級水準点が国道に沿って設置されている(例えば009-210は国道9号線の210番目の水準点)。その他は公的機関(建設省鳥取工事事務所, 鳥取県, 鳥取市)が地盤沈下対策用に設置した水準点である。

図2に代表的な水準点設置地点における地盤沈下の経年変化を示す。同図で沈下量は水準点設置時の標高からの差をあらわす。図3にそれらの水準点の年間沈下量の経年変化を示す。地盤沈下は市内田園町から県立中央病院にかけての地域で顕著である。沈下の中心が、田園町から北の方へと移行していることが特色である。また、沈下は近年確実に減少しているが、完全にはなくなっていない。

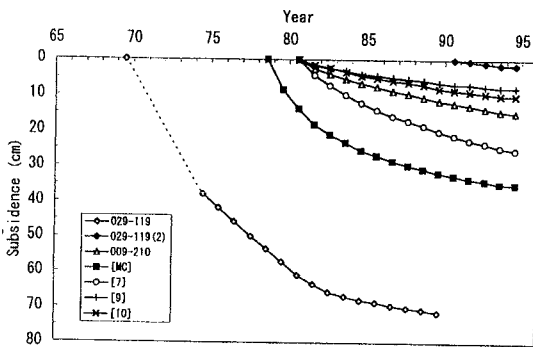


図2：地盤沈下経年変化

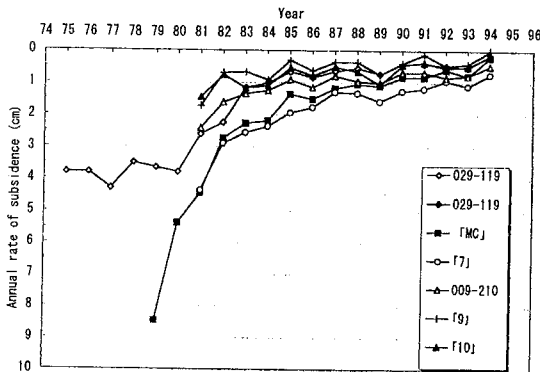


図3：地盤沈下速度の経年変化

## 3. 鳥取市の地質概要

鳥取市城の代表的地質断面<sup>5)</sup>を図4に、各層の地質的・土質的特性を表1<sup>5)</sup>に示す。図4は先の図1における測線a-a'に沿う断面である。

鳥取市では千代代川両岸に沖積層が厚く堆積している。特に上部粘性土層(Uc)は標準貫入試験N値が0から4までの軟弱層であり、かつ層厚も30mに達するところもある。鳥取市城の地盤沈下は主としてこの層の圧縮によって生じていることがすでに明らかにされている<sup>2)</sup>

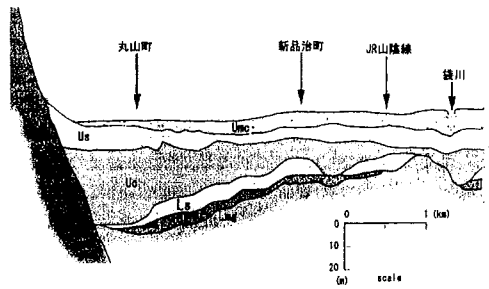


図4：鳥取市中心部の代表的地質断面(図1 a-a'断面)。鳥取地盤図<sup>5)</sup>より作成。

表1：地質区分概要(鳥取地盤図より抜粋)

地質時代	地層区分	地質名	土質特性
第四紀	沖積層	Umc	最上部粘性土層 表層(埋立土を含む)。有機質混じる。N=0~3
		Us	上部砂質土層 河成堆積層。
		Uc	上部粘性土層 海進時代堆積層(主として海成)。N=0~4
	更新世	Lc	下部粘性土層 海成堆積物。N=5~15
		Ls	下部砂質土層 海成堆積物。
		Lmg	最下部礫質土層 扇状地性基底礫層
第三紀以前	B	基盤岩類 火成岩。堆積岩	

## 4. 地下水位観測の概要

現在、鳥取市内には水位観測は6地点、10観測井において行われている。位置を図1に、主要諸元を表2に示す。地下水位観測井は、浅井戸または深井戸で、それぞれ沖積粘土層

(Uc層)の上部砂層 (Us層) および下部砂層 (Ls層) にストレーナが設けられている。

自記水位計によって観測井管頭から井戸内水面までの高さが測定される。観測井管頭の標高から井戸内水面の標高が決定できる。ただし、観測井管頭の標高は各井戸設置時に測量された値が用いられており、更新されていない。なお、水位は東京湾平均海面 (T.P.) からの相対的な高さとして表されている。

水位観測は建設省事業として行われている。水位の自記記録から毎日定時における水位を読み取り、それを日水位とし、さらに日水位の各月平均を月平均水位とし、それらが資料<sup>6)</sup>として作成されている。

表2：地下水位観測井一覧 (建設省資料<sup>6)</sup> による)

観測井名	種類	記号*	深度 (m)	ストレーナ深度 (m)
旧市民病院	(浅)	H 1	13	9.0-12.0
	(深)	H 2	24	19.5-23.0
大成建設	(深)	T	25.0	17.8-20.8
日進小学校	(浅)	N 1	12.0	6.0-9.0
	(深)	N 2	29.5	24.0-27.0
田園町	(浅)	D 1	8.0	7.0-8.0
	(深)	D 2	50.0	32.5-35.5 44.0-48.0
三洋	(浅)	S 1	15.0	10.0-13.0
	(深)	S 2	25.0	21.0-23.0
行徳	(深)	G	45.0	39.0-44.0

\*本研究で使用する記号

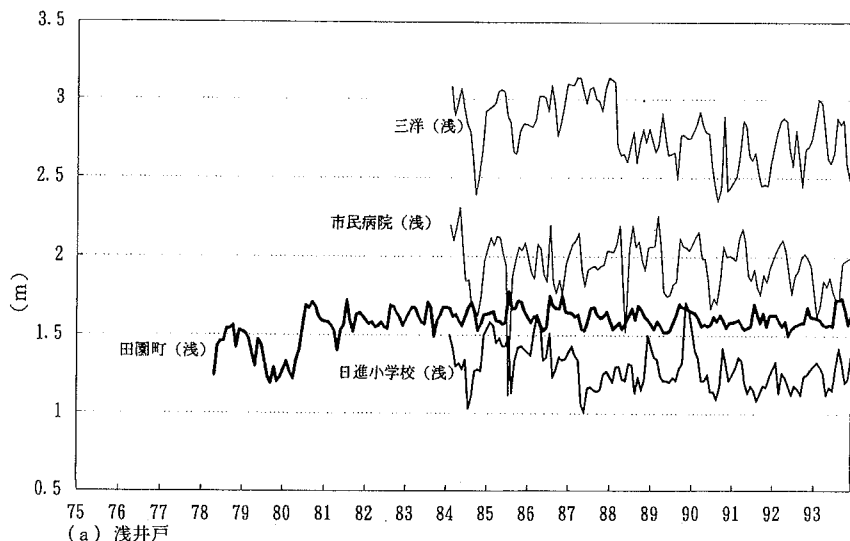


図5：月平均水位の経年変化

## 5. 地下水位変動特性

### 5.1 月平均水位の経年変化

すべての観測井で観測された月平均水位の経年変化を図5 (a), (b)に示す。これらの図から地下水位変動特性の概況を把握することができる：

- 1) 浅層地下水位 (浅井戸の水位) の変動は、いずれの観測井においても同様の傾向を示している。即ち、ほぼ一定の平均水位を中心として振幅約25cmの季節的変動を繰り返している。どの観測井においても、毎年夏頃に水位が低下している。(図5 (a))
- 2) 深層地下水位 (深井戸の水位) は、(市民病院, 日進小学校および大成建設において) 1975年から80年にかけて低下した。その後、最近(93年)まで上昇を続けている。ただし、上昇速度は84年頃を境に鈍っている。(図5 (b))

### 5.2 日水位の変動特性

日水位の時間的变化から地下水位の短期変動特性と長期変動特性を分離することを試みた。田園町での観測水位を例にとってその方法を示す。

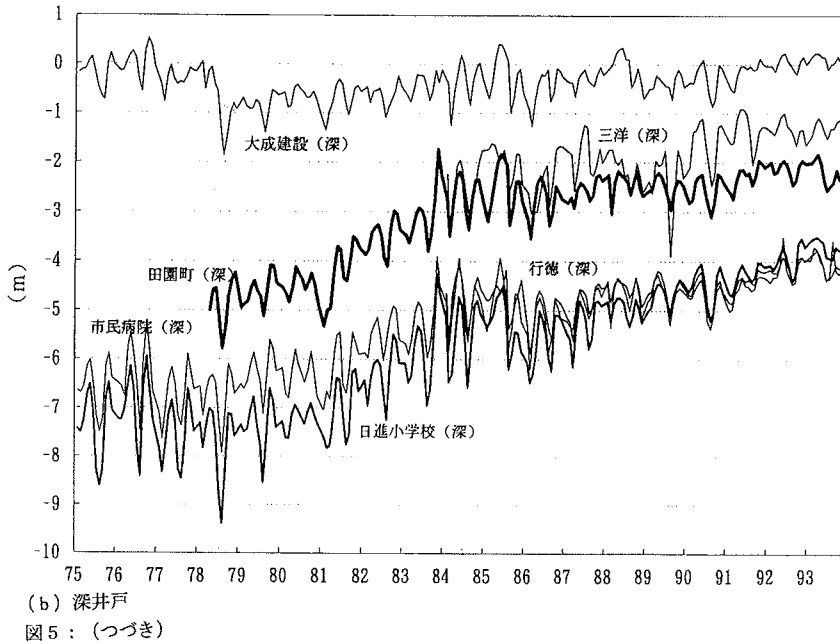
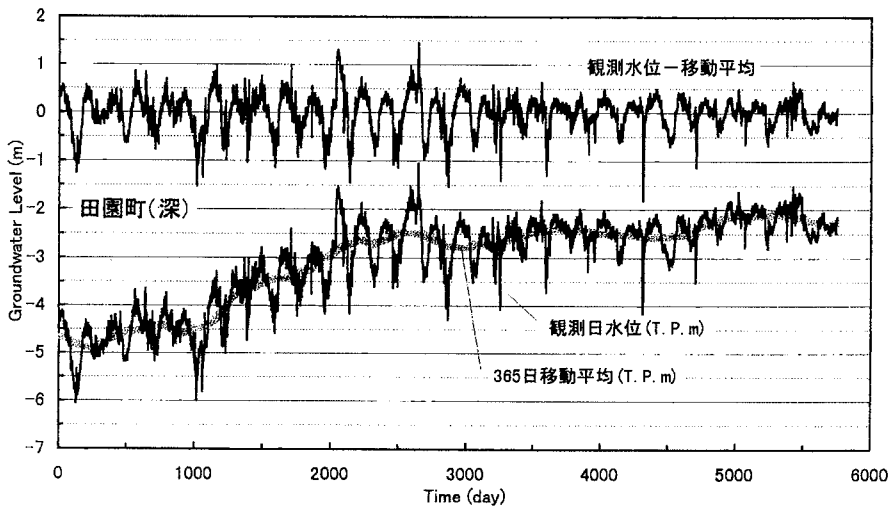


図6に、1978年4月5日から1993年12月31日間の田園町深井戸の目水観測データを示す。この図から、観測目水の変動は、月平均水位にも見られたように(図5(b))、観測期間全長にわたるような長期変動と短い周期の変動とが合成されたものであることがわかる。このような変動特性を持つデータを直接スペクトル解析すると、長期変動成分のスペクトルが卓越するために、短期変動のスペクトルを明確に特徴

づけることができない。したがって、まず長期変動成分を除いてからスペクトル解析を行う必要がある。

長期変動成分を抽出する方法として、フーリエスペクトルから長周期成分を除いて逆変換する方法や移動平均法が考えられる。図6に見られるように長期変動は観測期間において明らかに周期変動ではないので、ここでは、移動平均法を用いた。



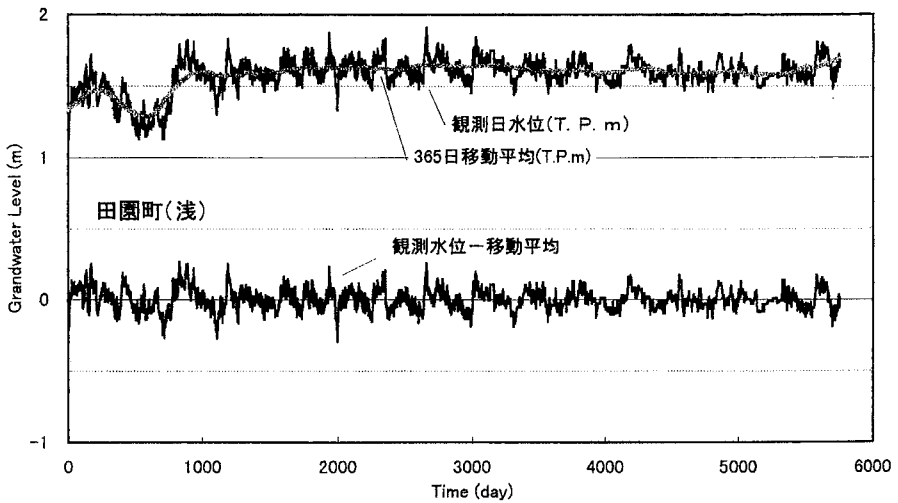


図7：田園町（浅井戸）の日水位の変化

移動平均法では、移動平均の幅を $L$ とすると、 $L/n$  ( $n$ は整数)の周期の成分を除くことができる。逆に言えば、移動平均をとることによって、 $L$ より大きい周期の成分を抽出した変動を調べることができる<sup>7)</sup>。

図6に、 $L=365$ 日 (=1年)とした場合の移動平均の変化を淡い太線で示している。また、観測水位と移動平均の差の変化も示している。

上述のように、移動平均の曲線には、周期 $T$ が1年以下の短周期の変動成分が除かれていると考えられる。移動平均曲線から、観測開始時から約2500日間 (1984年頃まで) 水位が上昇しその後ほぼ一定で推移していることがわかる。

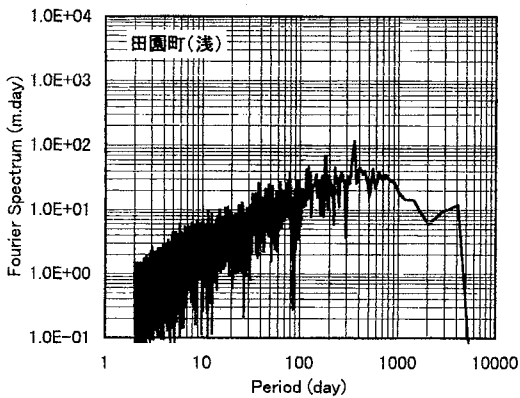
一方、観測日水位と移動平均の差は、長期変動の影響を除外した短期変動特性を表しているが、その特性は観測期間を

通してほぼ同じであることがわかる。さらに、その振幅は1mにも達していることがわかる。

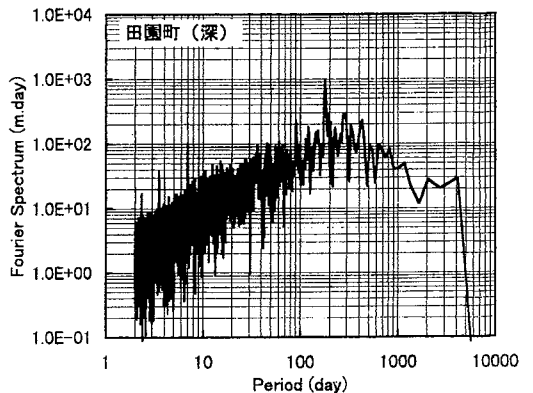
図7に田園町浅井戸の日水位観測データ、移動平均、および両者の差の経時の変化を示す。移動平均は観測期間初期に周期的な変動を示しているが、その後ほぼ一定の値を取っている。したがって、浅井戸水位の長期的な変動はないといえる。また、移動平均を差し引いた曲線の振幅は高々25cm程度でしかない。

### 5.3 短期変動特性 (フーリエスペクトル)

$T \leq 365$ 日の短期変動特性を調べるために観測日水位と移動平



(a)



(b)

図8：観測日水位と移動平均の差のフーリエスペクトル。

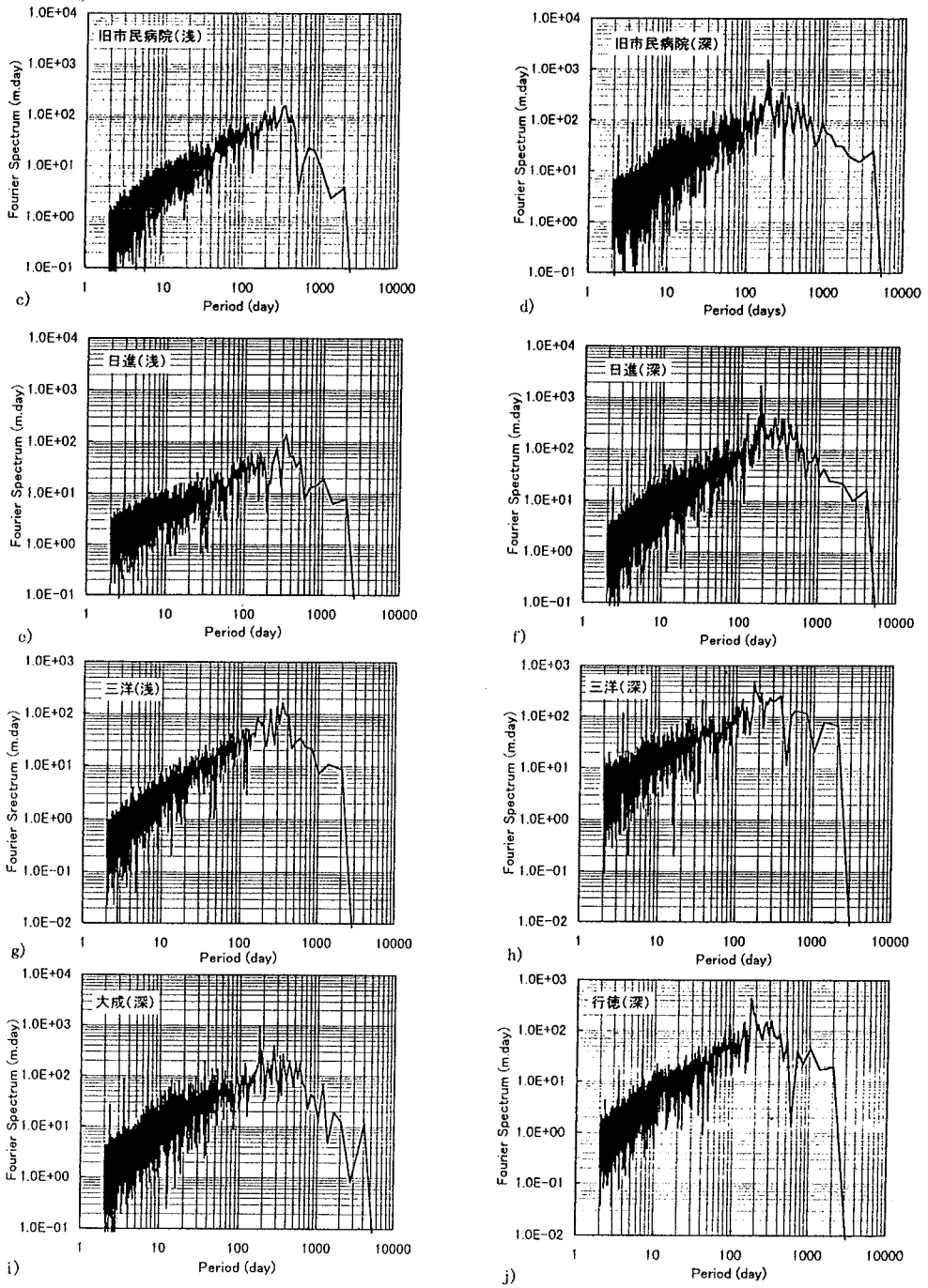


図8 : (つづき)

均の差のデータに対してフーリエ解析を行い、フーリエスペクトルを求めた(図8(a)-(j))。フーリエ変換は大崎<sup>8)</sup>のプログラムを用いて行った。

#### 深井戸水位

どの観測井においても、周期 $T=180$ 日および7日に明瞭なスペクトルのピークが認められる。 $T=7$ 日のピークは1週間をサイクルとする人間活動の周期と一致している。一方、 $T=180$ 日のピークは気候による影響を表していると考えられる。

#### 浅井戸水位

いずれの観測井においても、 $T=365$ 日においてスペクトルのピークが見られる。深井戸水位に見られた $T=7$ 日のピークは見られない。

## 6. 地盤沈下の有限要素解析

有限要素解析を行うに当たり、次の仮説を立てた：

- 1) 地盤沈下は1964年1月1日から発生し、そのときからLs層水位が減少した；
- 2) 地盤沈下発生以前は、Us層の水位とLs層の水位が一致していた；
- 3) Us層水位は地盤沈下発生以前も以後も一定であり、現在の値と等しい；
- 4) 観測以前のLs層水位の短期変動特性は観測開始後の特性と同じであり、観測水位と移動平均との差のスペクトルの逆変換によって表せる。

5) 観測以前のLs層水位の長期変動特性は365日移動平均の直線的減少で表現できる。

これらの仮説に基づいて1964年から観測開始までの水位変動を仮定した(図9参照)。なお、田園町の水位で鳥取市域の水位を代表させ。

仮定した水位と観測した水位を間隙水圧の境界条件として入力し、地盤沈下をFEM解析した。地盤材料の構成関係は先の研究<sup>1)-4)</sup>と同じである。1日(24時間)毎のデータを直線で表しそれを20等分して、時間増分 $1/20$ (日)で計算した。微小変形を仮定しないで有限変形解析を行った。各時間増分に対して反復計算を行っている。有限変形有限要素解析の定式化の詳細は文献<sup>9)</sup>に示した。

解析結果を図9に示す。地盤沈下は、短期的変動によってわずかに変動しているが、沈下傾向は地下水位の長期変動傾向と一致している。

## 7. おわりに

観測データを用いて、鳥取市における地下水位の変動特性を調べた。その結果を利用して、鳥取平野の地盤沈下を有限変形有限要素解析した。地下水位が観測されていない期間の水位を、観測期間の水位のスペクトル特性を考慮して推定した。

鳥取市では、浅層地下水の水位はほぼ一定であり、深層地下水の水位は上昇傾向にある。したがって地盤は沈下せず隆起してもおかしくない。ところが、地盤沈下は、近年減少傾

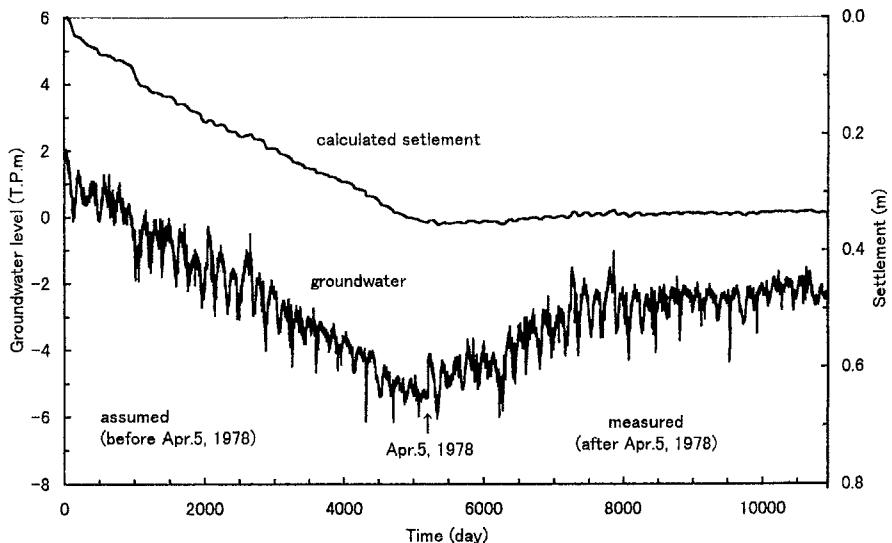


図9：仮定した水位変動と地盤沈下(有限要素解析結果)



向にあるものの、今なお年間1cm弱を記録している。このことに関して次の点を指摘できる：

1) 地盤沈下が鳥取市中心部から北の方へ移っているが、地下水位観測井は鳥取市中心部にしか存在しない（最も北にあるのが田園町）。したがって、現在設置されている地下水位観測井の水位から地盤沈下の機構を論じること自体が不適當である可能性がある。

2) 鳥取市において現在生じている地盤沈下の原因として、①土の変形の時間依存性（クリープ）、②交通量の増加、などの地下水位変動以外の要因を考慮する必要がある。

鳥取市以外にも、地盤沈下が生じている地域で地下水位が観測されている場合が多いが、観測データを利用して地盤沈下を定量的に評価した例は多くない。本研究で用いた手法は一つの評価方法である。水位の変動特性をどのように評価するかによって解析結果が変わることが予想される。今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 清水正喜(1990): 地下水位の変動による地盤沈下挙動のFEM解析, 第35回土質工学シンポジウム発表論文集, pp.149-152.
- 2) Shimizu, M.(1991): Finite element analysis of land subsidence due to the variation of groundwater level, Proc. Of the Fourth Int. Symposium on Land Subsidence, IAHS Publication No.200, pp.645-654.
- 3) 清水正喜(1992): 地下水位の変動による地盤沈下挙動の有限要素解析—実用的モデル化と解析例—, 地盤工学会中国支部論文報告集, 「地盤と建設」, Vol.10, No.1, pp.43-54
- 4) Shimizu, M.(1996): Application of a large-strain finite element model in predicting land subsidence due to the variation of groundwater levels, Proc. of Dr. J.F.Poland Memorial Symposium, Association of Engineering Geologists of USA (in press).
- 5) 鳥取地盤研究会(1991): 「鳥取地盤図」, 土質工学会中国支部
- 6) 建設省中国地方建設局(1994): 「地下水位観測データ」
- 7) 堀川 明(1977): 「ランダム変動の解析(増訂版)」, 共立出版
- 8) 大崎順彦(1976): 「地震動のスペクトル解析入門」, 鹿島出版
- 9) Shimizu, M. (1994): Formulation for finite deformation FE analysis of one-dimensional consolidation of saturated soils, Reports of the Faculty of Engineering, Tottori University, Vol.25, pp.187-198.

