

# 大規模埋立地における磁気伝送水圧式沈下計による沈下測定

THE SETTLEMENT MEASUREMENT USING MAGNETIC TRANSMISSION TYPE WATER PRESSURE GAUGE AT LARGE RECLAIMED LAND CONSTRUCTION SITE

<sup>1</sup> 田端竹千穂・<sup>2</sup> 水上純一・<sup>3</sup> 森川嘉之・<sup>4</sup> 浅香智昭

Takechiho TABATA, Junichi MIZUKAMI, Yoshiyuki MORIKAWA, Tomoaki ASAKA

<sup>1</sup> 正会員 関西国際空港造成株式会社 〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港 1 番地

<sup>2</sup> 正会員 関西国際空港株式会社 〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港 1 番地

<sup>3</sup> 正会員 関西国際空港株式会社 〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港 1 番地

<sup>4</sup> 関西国際空港株式会社 〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港 1 番地

This paper describes utility of measuring settlement system with magnetic-transmission type water pressure gauge. In this system, settlement data can be acquired on board as magnetic wave from the gauge. The electromagnetic wave has very low frequency and can transmit through seawater, sediment and the atmosphere. Therefore, measurement can be taken without cables and its guide even if the gauge is buried in sand. Moreover, this system does not obstruct dumping and reclamation work in contrast to settlement plate with steel pipe.

A series of tests on utility of this system was performed in the construction site of the Kansai International Airport. In these test, influences of dumping work on accuracy of measurement and strength of electromagnetic waves were investigated. After successfully performing these tests, this system is now being used in coastal reclamation projects.

*Key Words* : Settlement measurement, wireless transmission, water pressure gauge

## 1. はじめに

磁気伝送水圧式沈下計は海底面上の砂層中に設置した水圧計で測定した水圧データを埋立海域を航行するデータ回収船に無線伝送するシステムであり、これにより海中に障害物（従来の鋼製沈下板の立ち上げ鋼管）を設置する必要がなくなり作業船の妨げにならないので、工事区域内の任意の場所での沈下測定が可能になる。

この伝送方式は音響周波数帯域の低周波磁界を搬送波とする新しい通信方式であり、海水中、地盤中、空气中を問わず通信可能であること、任意の時点で現在および過去の測定データを海上・地上で収集できること、内蔵電池で長期間測定できることなど多くの特長を有している。しかし、新しい通信方式および大水深の埋立地盤中の水圧データと水面標高から沈下を求める沈下測定法とともに実施例が少ないことから、関西国際空港島造成にこの沈下測定法を適用するに先だって工事現場内に先行確認工区を設定し、大型土運船での土砂投下試験、測定精度検証試験、データ受信強度確認試験、データ処理方法の検討などの信頼性確認試験によって実用性を確認後、空港島埋立区域全域に磁気伝送水圧式沈下計を設置して運用している。

本報では磁気伝送水圧式沈下計実用上の課題と検証結果について報告する。

## 2. 磁気伝送水圧式沈下計測システム

### (1) システムの概要

電波による一般の無線通信は空間を伝播する電磁波を利用する通信方式であり、地中や海水中では距離に対する減衰が激しく実用性がない。

送受信アンテナにコイルを使用して搬送波周波数を極端に下げると波長より十分短い距離では磁力線が卓越し、海水中や地盤中など、導電率の高い媒質中でも通信手段として用いることができる。図-1はこの原理を利用した海底地盤沈下測定システムの構成を示しており、動作の概要は次の通りである。

海底地盤に設置される沈下データ送信機には設置点の水頭を検出する水圧計があり、測定データはデータロガーに収録される。海底の受信アンテナが海上あるいは地上に置かれる送受信制御装置から送られるデータ送信指令を受信すると、データロガーの収録データは送信機で低周波搬送波に載せられ、送信アンテナから送信される。

海上（地上）の受信アンテナで受信した送信信号は水圧データに変換された後、信頼性をチェックしてデータ処理コンピュータに送られ、気圧・潮位補正の後、各測点の水頭に変換され沈下量が算出される。

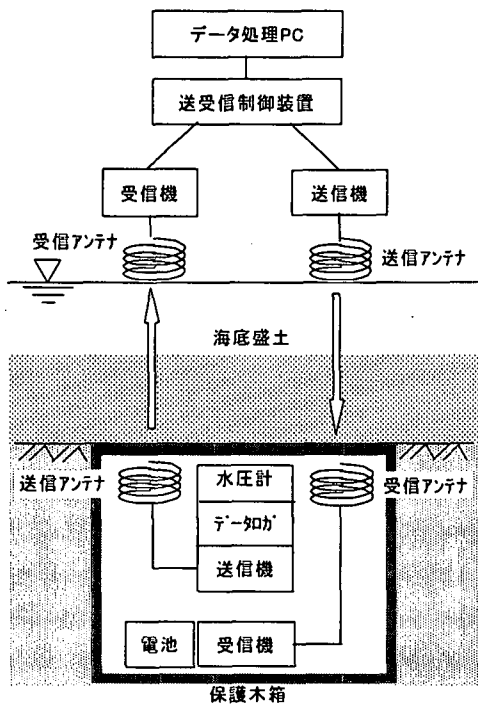


図-1 磁気伝送水圧式沈下計構成図

## (2) 測定データの収集

一般埋立工区では水圧が2時間ピッチで測定されており、データロガーの収録データ数は99回に設定されているのでデータの保有日数は8日である。土砂投入中は毎週データを収集して施工管理、出来高管理等に活用している。

海底に設置された各計器は5分に一回指令送信を受信する待機状態になり他の時間帯はスリープ状態である。海上あるいは地上から送信指令信号を送り続けると待機状態になった計器の受信機は指令信号中に書き込まれたIDコードを読み取る。IDコードが一致すると現在の水圧を測定してロガーに収録されている過去データの先頭に書き込んだ後送信アンテナを通じて送信する。送信回数は3回、受信側では受信データの真偽をチェックし、データ処理PCに転送する。

海上でのデータ収集では送受信制御装置と送受信アンテナを船舶に搭載し、RTK・GPSによって位置を辿ってデータ回収作業を実施している。現在一般埋立工区に37基、護岸部および一期空港島との結合部などを含めて約50基の磁気伝送水圧式沈下計が設置されており、一部は陸上からのデータ収集に移行している。

## (3) 磁気伝送システムの伝送距離

この伝送方式において伝送効率を示す送信電圧( $E_o$ )と受信電圧( $E_i$ )の比は

$$\frac{E_i}{E_o} = \frac{1}{r^3} \cdot e^{-f(\omega, \sigma, \mu)} \quad (1)$$

と表すことができる<sup>1)</sup>。ここで $r$ は送受信アンテナ間の距離、減衰率を示す関数( $f$ )は搬送波の角周波数( $\omega = 2\pi f$ )と媒質の導電率( $\sigma$ )、媒質の透磁率( $\mu$ )およびシステム独自の伝送効率に関する実験値を含んだ関数であり、搬送信号が距離の三乗に反比例して減衰し周波数および媒質の導電率が高いほど減衰が大きいかを示している。海上での盛り立て工事においては海水の導電率が最も高く、地盤を中間にして空気中では導電率が最も低く、伝送効率が高い。

現実の海底地盤の盛土過程では土砂投入の進行とともに海水が土砂に置き換わり、沈下によって伝送距離が増大することになる。海水中での実用的な伝送可能距離は約45m程度であるが、同じ受信電圧は地盤に換算すると約90mに相当するため空港島建設に伴う沈下量を大きく上回る測定可能範囲とみることができるが、導電率の異なる互層の媒質での伝送効率について確認した実績が無いこと、透水性の高い土砂が海水で飽和した条件での伝送特性についても未知であったため実用上の課題であった。

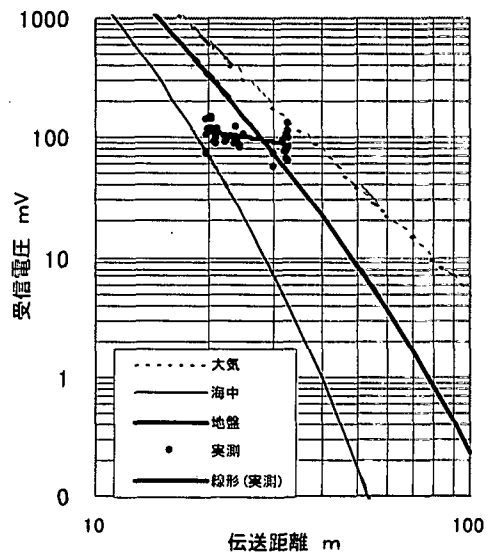


図-2 土砂投入に伴う伝送効率の向上

図-2は護岸部に設けられた先行確認工区に設置された磁気伝送装置の受信レベルと土砂投入厚および沈下量の関係を示す。計器設置時約19mであった水圧計の海水深度は土砂投入に伴って順次土砂に置き換えられ、投入した土砂が海面に達した時点の沈下量は約7m、計器設置点から海面までの深度は26mになった。その後海面上に土砂が盛り上げられ水圧計データ送信コイルから受信コイルまでの距離は約31mになった。図中の黒点は護岸法線直近に設置された計器3基の設置時から護岸完成までの受信信号電圧の実測結果である。投入した土砂が海面に達した時の受信電圧は地盤中の予想曲線を上回っており、土砂が空気中に積み上げられる段階では全深度が空中である場合の受信電圧に近い伝送効率を示

すことが確認された。これらの測定結果から、海水－土砂－空間の互層媒質での伝送効率を考える上で貴重な資料が得られた。

### 3. 装置の設置方法

磁気伝送水圧式沈下計は、埋立工事に支障をきたさず任意の場所の海底地盤沈下を測定できなければならない。埋立工事は底開き式大型土運船で土砂を投入する工法で行われるので、海底に設置した装置が土砂投入によって損傷を受けないこと、また、測定・データ伝送に支障のある姿勢変化が無い設置方法でなければならない。図-3は先行確認工区の磁気伝送水圧式沈下計および沈下板の配置を示す。

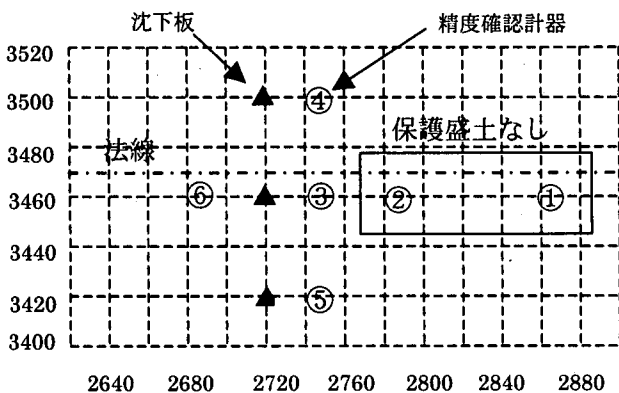


図-3 先行確認工区の計器配置 (単位 m)

信頼性確認試験に当たって試験用機器 6 台の内 4 台は土のう保護した設置架台の周囲約 5 m に保護盛土を施し、2 台は保護盛土無しで土運船から土砂を投入した。試験の結果、堆積した投入土砂の法尻にあった保護盛土のない伝送装置が約 40 度傾斜した。送信アンテナ (コイル) から放射される磁力線は円筒形コイルの軸上で最も高い強さを持つのでアンテナが傾いた条件で装置設置点直上での磁力線強度はアンテナの傾きに応じて減少する。

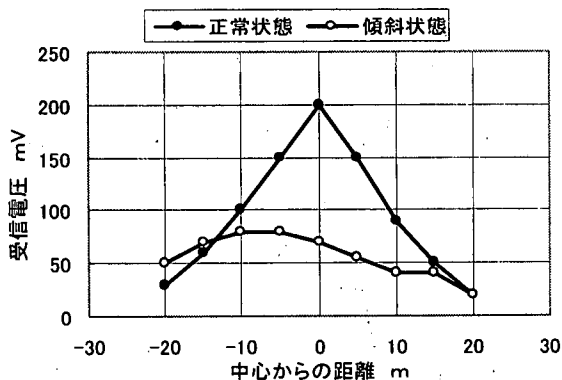


図-4 送信アンテナの姿勢と受信レベル

図-4は GPS 測量によって海上に 5m メッシュの測定点を設け、それぞれの点の搬送波受信レベルを測定した結果であり、正常状態の場合のレベル分布

に対して傾斜したアンテナの場合は受信レベルが 60%程度減少していることが分かる。その後の検討から、一般埋立工区に設置された装置は木箱に入れ小砂利を間詰し、海底の敷砂中に埋設して設置することとした、なお、木箱に入れた装置全体の単位体積重量を  $19.61\text{kN}/\text{m}^3$  とし、装置の沈下、浮上を防止している。

### 4. 計器設置位置に作用する水圧による沈下測定精度

#### (1) 潮位、気圧、海水比重

沈下測定用水圧計は海底面の土中にあり、圧力計の背圧は真空であるため海面に作用する大気圧を受けている。また、海面高さは潮位によって変動しているから、海面の基準レベル (CDL) から海底面の圧力計受圧部までの高さを求めることによって沈下量を求めることができる。下式はこれらのパラメータを用いた計算手順を示す。

$$H = \frac{(p_t - p_a) \times 10^3}{98.0665 \times \gamma_w} - h_t \quad (2)$$

$H$ : 水圧計から基準水面までの高さ (cm)  
 $p_t$ : 測定値 (kPa)  
 $p_a$ : 大気圧 (kPa = hPa / 10)  
 $\gamma_w$ : 海水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $h_t$ : 潮位 (cm)

工事現場の潮位および気圧は MT 局 (工事海域の気象海象観測施設) の観測結果データを用いることができる。海水の密度は海水の温度分布や潮の干満、潮流などによる変化の可能性があるので信頼性確認試験の一年間に亘って海水を採取して実測調査した。海水の採取には先端に重錘とワイヤをつけた内径 12mm のチューブを用い、海底まで沈めたチューブの手許を閉じ、先端ワイヤを引き上げることによって海面から海底まで全深度の海水を採取し、チューブ内の海水を攪拌することによって海面から海底までの平均比重と平均水温を求めた。調査の結果、2000 年～2002 年 48 回測定の平均値は  $1.0238\text{g}/\text{cm}^3$ 、標準偏差  $0.0012\text{g}/\text{cm}^3$  であり、1 年を通じて  $1.024\text{g}/\text{cm}^3$  を採用して良いことが確認された。

図-5、6は測定された水圧と気圧、潮位の関係の

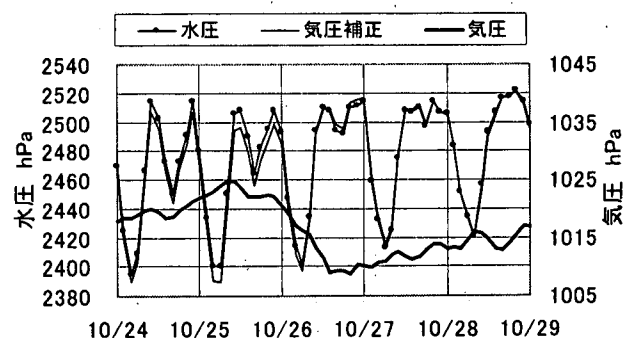


図-5 測定水圧と気圧の関係

一例を示す。潮位補正量は月齢のピークで1 m内外、気圧変化による変動幅は好天時に10数 cm、悪天候時には数10cmに達する。

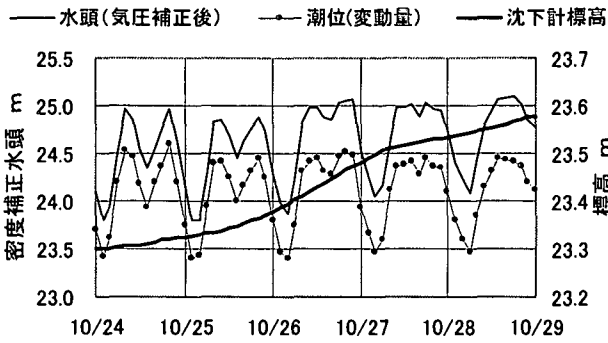


図-6 潮位と沈下成分の関係

### (2) 波浪の影響

波浪は波圧として海底の水圧計に作用する。波圧の影響は海面から水圧計までの深さが大きいほど低下し、波の周期が大きいほど影響が大きい。水深を20 mとした時の波圧の減衰係数と周期の関係は図-7の通りであり、測定地盤高平均処理前のばらつき許容限界を10cmとすると、周期5秒以下、波高1 m以下では波浪の影響を受けないことが分かる。MT局で観測された1995年から5年間の波浪25万ケースの内この条件を越す波浪の発生回数は全ケースの0.25%に過ぎないことから、各測定時点の瞬時値でよいと判断した。

海底20mにおける波圧の減衰係数と波の周期

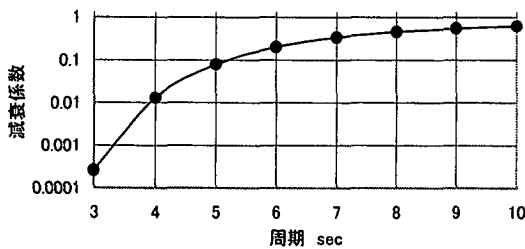


図-7 波浪周期と波圧の減衰係数

図-8は試験期間中の1999年1月～3月の波浪の整理結果であり、横軸は時間経過、縦軸はそれぞれの時点に発生した波浪から計算した波圧の大きさを水頭換算した量である。この期間中に影響度が

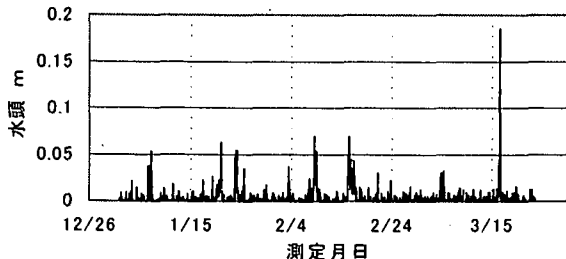


図-8 波高、周期から求めた波浪誤差

10cmを越した波浪の発生は1回であった。なお、この波浪の発生時刻は測定時刻を外れていたため収録データに波浪の影響を受けたものは無かった。

### (3) 測定結果と精度の検証

図-9は先行確認工区に設置した磁気伝送水圧式沈下計6台の測定結果である。法線に近い4台が最も大きい沈下を示しており、外海側30mの④は護岸法面の盛り立てに伴って法線部の沈下を下回っている。また、陸側の⑤は法面構築に伴って法線部の沈下を下回った後、埋立の進行に伴って法線部の沈下に近づいている。

磁気伝送水圧式沈下計の測定精度を検証するため、護岸部に設置した試験用磁気伝送水圧式沈下計3台(③, ④, ⑤)と並列に従来から用いられている沈下板と鋼製柱による沈下測定値を比較した。図-10は法線直近③測点の水圧による測定結果と沈下板測

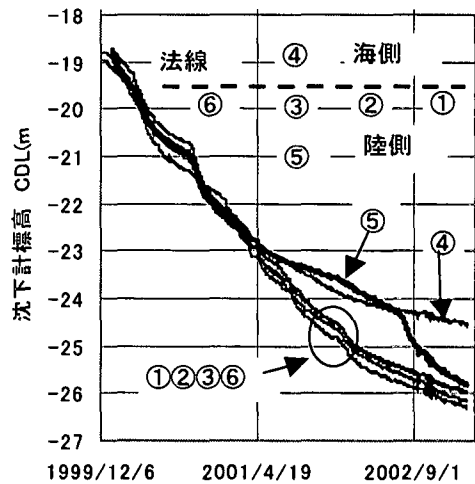


図-9 先行確認工区の沈下状況

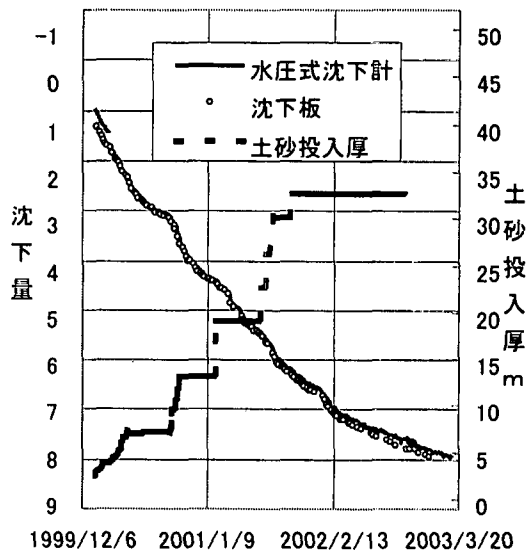
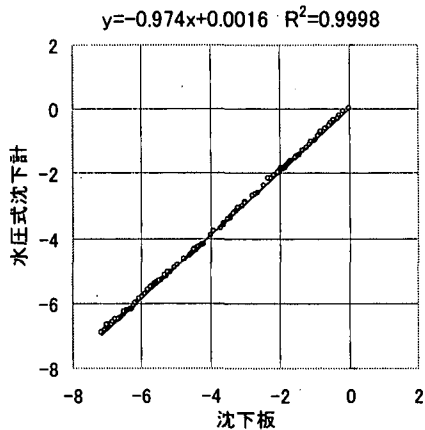


図-10 水圧式沈下計と沈下板による測定結果定値の関係、図-11は相関を示す。



### 5. 測定頻度と平均効果

潮位，気圧による補正結果に含まれるデータのばらつき要素を挙げると次の通りである。

(1) 潮位計と各測点の水圧式沈下計はそれぞれ別の場所にあるから潮位に重畳する波浪の影響量は個々に異なるため，同一の潮位を差し引くことによって微小な差が残ることがある。

(2) 水圧式沈下計は内蔵時計の指令によって水圧を測定する。時計に時差があり，潮位測定時刻と水圧測定時刻が異なると補正後に実潮位との差が生じる。設置後3年目である現在データロガーの時刻誤差は10分内外であり，1日平均値に対して誤差が生じる量ではないと判断している。なお，潮位の変動が最も激しい大潮において10分間の潮位変動は5～6cmである。また，各装置の測定時刻はデータ収集時に知ることができ，潮位の測定時刻は高頻度(1分)であるから，将来時計の累積誤差が大きくなった時にはデータロガーの測定時刻に合わせた潮位を採用して補正することが可能である。

(3) 土砂投入が進行して陸地化すると，水圧計設置点に作用する潮位変化による水圧に遅れを生じ，実潮位と水圧計に作用する水圧の振幅に差があるため，実潮位を差し引くとその差分に相当する実潮位差が残ることになる。

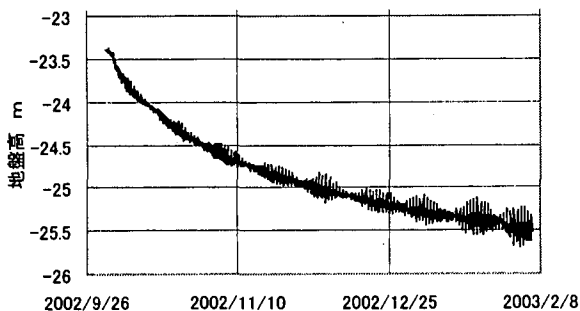


図-12 気圧・潮位補正した原データ  
補正結果にみられる実潮位との差の成分は時間に

対して平均することによって除去することができるが，平均時間を長くすると土砂投入による地盤の圧縮のような早い現象を見落とすことになることから，1日を超えない平均時間で実用上差成分を無視できる測定頻度として2時間ピッチで測定することとした。陸地化が進行中の一測点を例にとって測定頻度と平均効果について述べる。

図-12は測定頻度12回/日で得られた測定値を気圧および潮位補正した原データを示す。2002年10月頃から潮位差成分が徐々に増している。

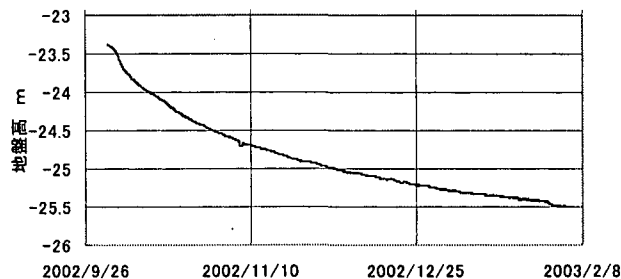


図-13 12回/日測定を1日平均した結果

図-13は上記の補正結果を平均長1日で平均した結果を示し，原データにみられる実潮位差の成分が除去されている。

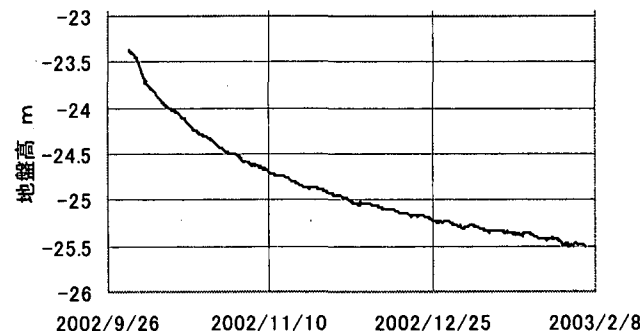


図-14 4回/日測定を1日平均した結果

図-14は同一のデータから0，6，12，18時の測定値のみを抽出し，1日平均値を求めた結果を示し，盛土の進行に伴って実潮位差の成分が12回測定と比較して大きくなっていることが分かる。

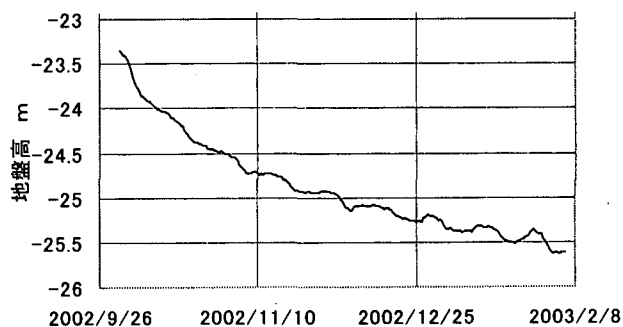


図-15 2回/日測定を1日平均した結果

図-15 は同一のデータから 0, 12 時の測定値を抽出し, 1 日平均値を求めた結果であり, 盛土の進行に伴って増加する 1 ヶ月周期の変動が除去されないことが分かる。

以上の結果から, 土砂投入によって潮位遅れが生じても測定値が潮位の日変動波形を表すだけの頻度を持っていれば平均長 1 日で実潮位差成分を除去することができることが分かる。今後工事の進行につれて潮位の減衰が進むと思われるが, 日変動潮位成分に応答する限り一日平均によって実潮位差の少ない沈下データを得ることができると考えられる。

## 6. 考 察

### (1) 水圧計による沈下測定精度

a) 水温と海水成分に左右されると考えられる海水比重は 2000 年から 3 年間の平均値が  $1.0238\text{g}/\text{cm}^3$ , 標準偏差  $0.0012\text{g}/\text{cm}^3$  であり, 年間を通して  $1.024\text{g}/\text{cm}^3$  を採用して良いことが確認された。

b) 気圧と潮位を補正することによって基準海面から水圧計設置点までの深度を測定することができ, 海底面から立ち上げた鋼管を基準とする沈下板測量と水圧式沈下計測定値が実用上一致することが実証された。

### (2) 陸地化後の潮位補正

盛土の進行に伴って水圧計に作用する潮位の減衰が大きくなることが予想される。現在までの測定結果から 1 日 12 回の測定値を 1 日平均することによって実潮位との差を除去できることが確認された。

### (3) 送信データの伝送距離

計画時に得られていた伝播媒質と伝送距離の実測データは海水中と空気中およびボーリング孔による地盤の一例であった。本工事での実測によって海水が土砂に置き換えられる過程での伝送効率を実測することができた。測定結果から, 沈下による受信電圧は当初の予想を上回っており, 水中 19m

の受信電圧と海面上約 4.5m 地盤高約 31m での受信電圧の差は僅少である。今後, 空港完成後には地上部の電氣的ノイズの増大が予想されるが, 現在の受信電圧は一期空港島のノイズ電圧を明らかに上回っているため, 今後の沈下を含めて長期測定に不安がないと考えられる。

### (4) 計器の寿命

磁気伝送システムは内蔵電池で作動するものであり, 計器の寿命は測定頻度と測定データの回収頻度で決まる。測定頻度は 1 日 12 回であり, 毎週蓄積データを回収すると電池の予想寿命は 14 年である。盛土工事完了後には連続データの必要性はないと考えられ, 必要時にデータ回収する方針にすると一層の長期測定を期待することができる。

## 7. 終わりに

上記の諸検討・実用化試験の結果から, 関西国際空港第二期空港島造成時に磁気伝送水圧式沈下計を適用して十分な沈下測定精度が得られることが確認できた。そこで, 埋立区域において, 従来の沈下板に替えて磁気伝送水圧式沈下計を測点 37 箇所の海底面上に設置して沈下計測を実施している。その結果, 作業船の運航状況を配慮した計測空白域を設けることなく, 埋立地全域の沈下状況を把握できるようになった。

謝辞: 磁気伝送水圧式沈下計は関西国際空港(株)が計画した盛土底面に設置した水圧計による沈下測定法と坂田電機(株)が開発した磁気伝送システムによって完成した新技術である。実用性の高い計測システムを開発した坂田電機(株), ならびに計画段階から実用測定段階に到るまで測定方法, データ処理方法などについて協力いただいた同社常務取締役中山淳氏に謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 松本欣司: 電波工学入門, pp83~84, 1978, 朝倉書店