

佐賀平野における地下水位の季節的変動による 広域地盤沈下とその管理手法

坂井晃¹・三浦哲彦²・八谷陽一郎³・陶野郁雄⁴

¹正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

²フェロー会員 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

³正会員 工博 佐賀県環境生活局 (〒840-8570 佐賀市内1-1-59)

⁴正会員 工博 山形大学教授 理学部地球環境学科 (〒990-8560 山形市小白川町1-4-12)

農業用および消雪用として地下水を利用している軟弱地盤地帯では、季節的な地下水揚水に伴って地下水位の変動が起こり、繰返し圧密に起因した広域地盤沈下が進行する。大渇水時・豪雪時には、大きな地下水位低下を引き起こし、甚大な地盤沈下被害を受けることになる。本論文は、農業用水として夏季に過剰な地下水揚水を行っている佐賀平野白石地区を対象に、季節的な地下水位変動に伴う地盤沈下の実態と地盤沈下解析の結果を示し、さらに季節的な地下水位変動量と地下水揚水量および年間沈下量との関係を明らかにして、地盤沈下防止を目的とした管理手法について検討したものである。

Key Words: settlement, ground water level, pumping, monitoring on site, control, soft ground

1. はじめに

地下水揚水に伴う地盤沈下は、過剰な地下水汲み上げによって帯水層の水圧が低下し、地盤中の有効応力増加に伴って生じる粘土層および砂礫層の圧密・収縮に起因している。地下水は、四季を通じて水温がほぼ一定であり、自然の浄化作用を受けていて水質もよい。また、河川の水のような水利権がなく、敷地内で自由に使用できるため、水源の乏しい地域においては地下水が盛んに利用されてきた。その結果、広域地盤沈下が進行し、公共施設等の構造物の抜け上がり、道路の波打ち等の被害だけでなく、低平地では排水機能の低下による浸水や冠水の危険性も増大させる要因となっている。

近年、これら地盤沈下の中でも、年間を通じた地下水揚水だけではなく、季節的な地下水揚水によって生じる地盤沈下対策の必要性が指摘されている。このような地盤沈下現象は、有効応力の増加だけでなく、季節的な地下水位変動によって地盤内応力変動の繰返しの影響を受けていることが知られている^{1)・2)}。地下水位の季節的な変動による地盤沈下は、農業用水・のり用水のためにそれぞれ夏季・冬季に地下水を利用している佐賀平野^{3)・4)}および消雪用として冬季に地下水を利用している新潟県の六日町等が挙げられる^{1)・5)・6)}。大渇水時・豪雪時には、

特に多量の地下水揚水を行うためにわずか1～2ヶ月間に極端な地下水位低下を引き起こし、大きな地盤沈下被害を受けることになる^{6)・7)}。

佐賀平野の白石地区の地下水位は、農業用水として利用する夏季に低下し、冬季にほぼ回復しているが、その水位変動によって現在でも地盤沈下が進行している⁸⁾。このような地下水揚水による地盤沈下を防止するためには、年間の揚水総量を規制するだけでなく、各地域の地下水利用と地盤沈下に及ぼす地下水位低下の影響を考慮した地盤沈下の管理が重要である。

本論文は、地盤沈下が進行している佐賀平野白石地区を対象に、季節的な地下水位変動に伴う地盤沈下の実態と地盤沈下解析結果を示し、地盤沈下に及ぼす地下水位変動量の影響について明らかにした。また、季節的な地下水位変動量と地下水揚水量および年間沈下量との関係から、地盤沈下防止を目的とした管理手法について検討した。

2. 季節的な地下水位変動に伴う地盤沈下の実態と沈下解析

(1) 地質構成と地盤特性

図-1に示す佐賀平野は、大部分が完新世の三角州性低

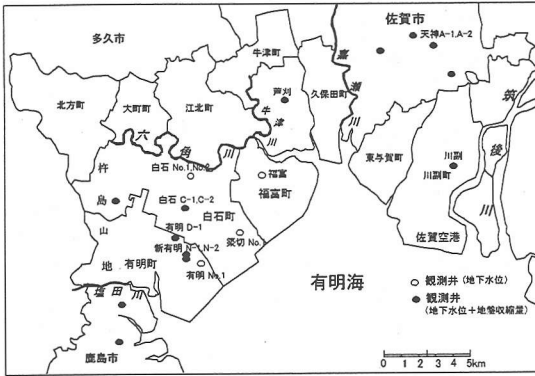


図-1 佐賀平野と観測井位置

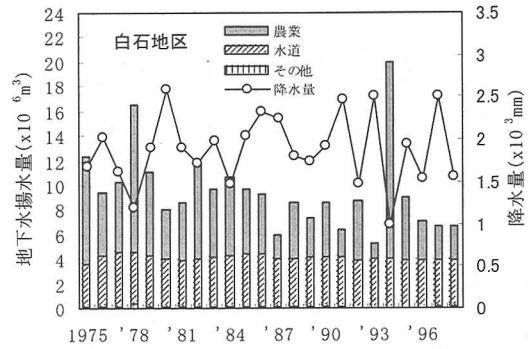


図-3 白石地区における用途別地下水揚水量の経年変化

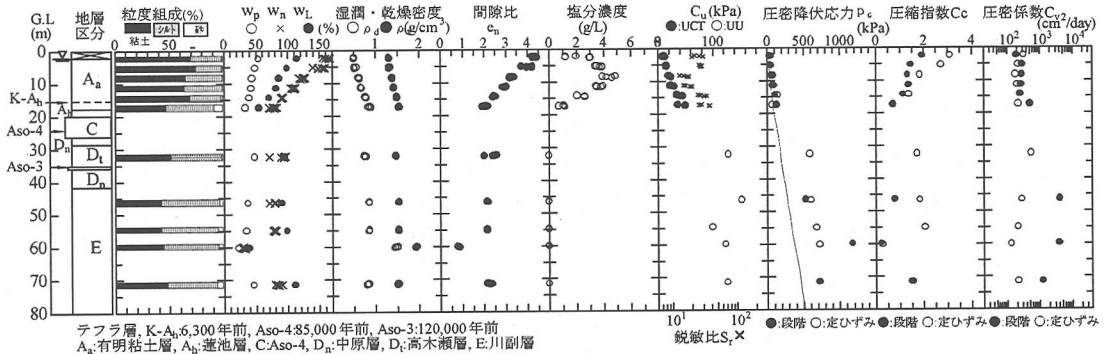


図-2 白石観測点 (白石 C-1, C-2) における土質特性

地で占められており、六角川河口部～牛津川を境界として、便宜的に佐賀地区（東部）と白石地区（西部）に分けられる。下山ら⁹⁾は、佐賀平野の地盤構成として、最近のテフラ層序の確立と試錐資料に基づいて、新たな地質層序を提唱している。これらの地層のうち、高木瀬層と有明粘土層は後期更新世と完新世の高海面期を代表する海成層である。また、有明海北岸低地をつくる完新統の粘土は、非海成粘土と海成粘土の2種類（蓮池層と有明粘土層）に区分されている。

佐賀平野の上層部には、有明粘土層・蓮池層が10～30m程度の厚さで堆積している。佐賀平野では、地盤沈下と地下水位の関係を明らかにすることを目的として、観測井が1973年以降順次設置され、これによって地盤沈下調査が詳細に行われるようになってきた。図-2は、佐賀平野白石地区のほぼ中心部に位置する白石観測点（白石 C-1, C-2）において1996年に得られた土性図を示している。この地点の地質構成は、上層部は19mの完新統（有明粘土層 A_a 、蓮池粘土層 A_b ）からなり、それ以下は、阿蘇-4 火砕流堆積物 Aso-4・中原層 D_n 上部・高木瀬層 D_1 ・阿蘇-3 Aso-3・中原層 D_n 下部・川副層 E から構成されている。上部粘土層の自然含水比は、液性限界よりも大きく地表に近いところほどその傾向は顕著である。

間隙比は、地表面に近くなるほど大きな値(4.0以上)を示しているが、深さ30m以深の粘土層ではほぼ一定の約2.0の値を示している。圧密試験としては、段階荷重圧密試験と定ひずみ速度圧密試験を行った。上部粘土層の圧密係数は、深さに依存することなくほぼ一定の値を示しているが、圧縮指数は地表面に近くなるほど大きくなる。一方、非排水せん断強度は深さ方向に増加し、鋭敏比は10～50の大きな値を示している。圧密試験から得られた圧密降伏応力は、上部粘土層ではわずかに過圧密状態にあるが、深さ30m以深の下部粘土層になると過圧密比が増大し過圧密比は約2の値を示している。

(2) 地盤沈下の実態

佐賀平野は、1963年以降に最大累積沈下量が123cm、累積地盤沈下面積は324km²にも及ぶ地盤沈下地帯である。佐賀平野の各河川の感潮域がその中流部にまで及んでいるため、従来より水源として地下水の利用が盛んに行われてきた。佐賀県では県条例により1974年7月から地下水の揚水規制が実施されてきた。その結果、筑後川の右岸から六角川河口部～牛津川にかけての佐賀地区（佐賀市他）では、工業用としての地下水揚水に対する各事業所の節減・合理化等によって、1975年後半から地下水

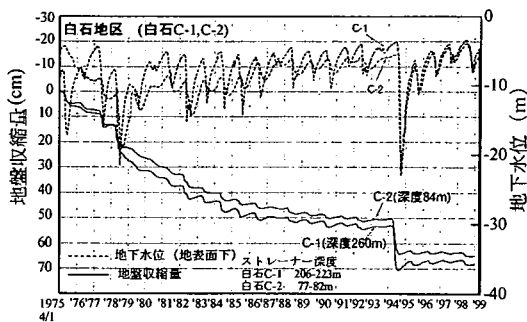


図-4 白石観測点(白石 C-1,C-2)の地下水位と地盤収縮量

揚水量が大幅に減少し、地盤沈下は急速に沈静化している。ただし、佐賀地区南部ののり用揚水が行われている地域では、冬季に地下水位が低下し地盤沈下が進行している。これに対して、白石地区(白石町、有明町、福富町)では、六角川の感潮域が中流まで達し、自然流下によるかんがいの一部の地域に限られていることに加え、土地基盤整備事業および干拓地の造成によって水需要が増してきた。したがって、白石地区では、現在もなお上水と農業用水を地下水に依存せざるを得ない状況にあり、地盤沈下は依然として進行している⁸⁾。

図-3に示した用途別地下水揚水量と降水量の経年変化から、白石地区の揚水量は、そのほとんどが農業用水と水道用水に限られている^{8)・10)}。特に、ほぼ一定の揚水量を示している水道用水に比べて、農業用水の揚水量は降水量が少ない年度において増加する。渇水期の1978年度および1994年度にはそれぞれ1199万 m^3 、1600万 m^3 もの農業用揚水量を記録している。このように、白石地区では、農業用揚水量の変化が全体の揚水量変化にほぼ対応している。

佐賀平野において、地下水位と地盤収縮量(地表面から観測井深度までの沈下量)の変動状況を観測するために、現在30ヶ所36井による観測井調査が実施されている⁸⁾。これらの内10ヶ所は地下水位と地盤収縮量の両者、その他の箇所は地下水位のみの観測が行われている。また、広域的な地盤沈下量の把握を目的として、県内で合計215点の水準測量も年1回実施されている。現在、地盤沈下の激しい白石地区では、地下水位と地盤収縮量の観測井2ヶ所、地下水位のみの観測井4ヶ所がある。また、白石地区の上部粘土層の収縮状況を調査するために、簡易沈下計(平均約22m深さまで単管を挿入しその抜け上がり測定)も設置されている。図-4は、1975年から1998年までの地下水位と地盤収縮量の観測例(白石 C-1, C-2)を示している。農業用のために、主に深度約100mから200mに堆積している川副層Eと牛屋層Fから地下水を揚水しているために、地下水位は夏季に低下

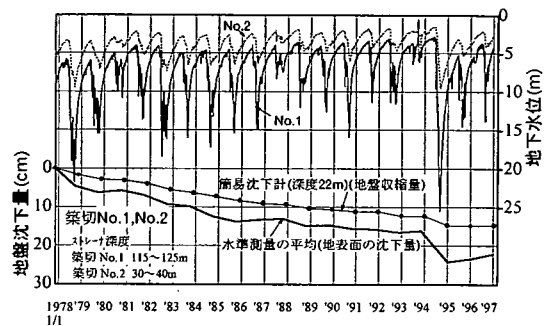


図-5 築切観測点における地下水位と地盤沈下量

する周期的変化を示し、1994年までは回復時の地下水位は僅かに上昇傾向にあるものの、地盤は不可逆的に沈下し続けている。

1994年の大渇水時には、6月下旬からの地下水揚水量急増に伴って沈下が進行し、9月上旬には最も低い地下水位(白石 C-1では約20mの低下)を記録した^{7)・11)}。地下水位回復に伴う地盤沈下量の回復はほとんど見られず、白石 C-1で年間に最大約16cmもの沈下が生じた。白石観測点の C-1 と C-2 の井戸深度はそれぞれ約260mと84mであり、1994年に生じた両者の沈下の差約5cmは更新統の84mから260m区間における沈下量と見なすことができる。したがって、この区間における更新統の沈下量は、圧縮性は小さいものの厚く堆積していることから全沈下量の約3割と比較的大きな値を示している。また、地下水位の回復期間における C-1 と C-2 の沈下量の差が減少していることは、更新統においてその膨潤による沈下回復が生じたものと考えられる。

観測井には、白石観測点(C-1, C-2)のように地下水位と地盤収縮量の両者を観測しているものではなく、地下水位のみを観測しているものがある。このような観測井地点における地表面の沈下量推定にはその周辺の水準測量の平均値(地表面の沈下量)を用いた。図-5は、1978年～1996年までの築切の地下水位¹²⁾とその周辺の簡易沈下計(深度22m:粘土層の沈下)による地盤収縮量および水準測量による地表面の沈下量を示している。地下水位は、夏季に低下し冬季に回復する変動を繰り返す、10m以上の水位変動を示すときも少なくない。しかし、地下水が約100m-200mの深度領域で揚水されており、それよりも浅い更新統においても数層の粘土層を挟んでいることから、層厚19mの完新統からさらに十数mの位置にある深さ30m-40mの水位は、深さ120mの地下水位に対し約1/3程度しか変動していない。また、各年の累積沈下曲線から、全沈下量に占める完新統の割合は、1978年を基点に見ると当初は50%弱であるがその後は約65%となっている。しかし最近10年間では1994年の大渇水

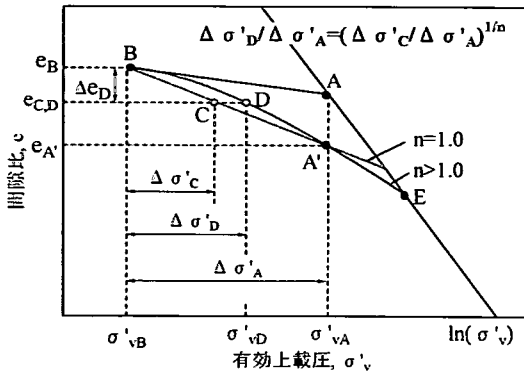


図-6 再載荷時における $e-\ln \sigma'_v$ 曲線

表-1 白石観測点の解析定数

地層	要素番号	深度 (m)	有効被圧 σ'_v (kPa)	圧密降力 P'_c (kPa)	初期應比 e_0	圧縮指数 C_c	圧密係数 C_v (m ² /day)	係数 n, α, β
完新統	1	1.5	16	29		4.40	2.0	$n=2.0$ $\alpha=0.02$ $\beta=0.1$
	3	4.0	25	45		4.10	1.5	
	6	7.0	36	63		3.40	1.4	
	9	10.0	47	82		3.30	1.4	
	12	13.0	58	100		2.50	1.2	
	15	16.0	69	118		2.10	0.8	
更新統	18	19.0	80	137	1.00	0.03	1×10^2	$n=1.0$ $\alpha=0.1$ $\beta=0.5$
	19	30.0	154	308				
	20	40.0	231	462				
	21	50.0	308	616				
	22	60.0	385	770			1×10^4	
	23	70.0	461	922				
		84.0	569	1138				

時に更新統の沈下が大きな割合を示しているものの、それ以外ではほぼ完新統のみの沈下が生じている傾向にある。これらの傾向は、白石観測点 (C-1, C-2) の地下水位と地盤収縮量の関係にも認められた。

(3) 地下水位変動に伴う地盤沈下の解析

季節的な地下水位変動に伴う地盤沈下は、水位低下による静的な圧密沈下だけでなく、粘性土の繰返し圧密に起因する沈下も含んでいる^{1), 4)}。繰返し圧密による地盤沈下の予測法としては、テルツァーギの一次元圧密方程式を基本にした繰返し一次元圧密モデルがあり^{1, 3)}、筆者らは、沈下に及ぼす繰返し効果の影響を考慮するために、除荷時の体積圧縮係数比 $m_{vs}/m_v = \alpha (< 1)$ に対し、過圧密領域における再載荷時の体積圧縮係数 m'_{vs} として、 $m'_{vs}/m_v = \beta (\geq \alpha)$ の値を設定する方法を提案している⁴⁾。体積圧縮係数としては、間隙比 e と有効上載圧 σ'_v の関

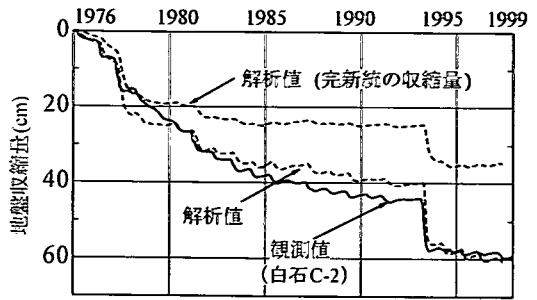


図-7 白石観測点における地盤沈下解析結果 (1976年4月から1999年3月まで)

数で表される次式を用いた。

$$m_v = 0.434 C_c / (1 + e) \sigma'_v \quad (1)$$

本解析では、さらに、図-6に示した $e-\ln \sigma'_v$ 曲線のように、過圧密領域から正規圧密曲線に至る再載荷時の経路としては、直線 BCA' に対して、 n の値 (≥ 1.0) によって間隙比の減少が再載荷初期に小さく載荷荷重の増加に伴って次第に増加する次式の曲線 $BDA'E$ を用いた。

$$\frac{\Delta \sigma'_D}{\Delta \sigma'_A} = \left(\frac{\Delta \sigma'_C}{\Delta \sigma'_A} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

地盤沈下観測井調査が実施されている白石観測点にこのモデルを適用して有限要素法解析を行い、地下水位変動に対する沈下量を実測値と比較した。また、この地盤を対象に、地盤沈下に及ぼす地下水位変動量の影響について解析的検討を加えた。

a) 白石観測地点の地盤沈下解析

解析対象地盤は、図-2に示した白石観測点の地盤である。白石観測点 C-2 (深度 84m) における観測結果と比較するために、解析深度は 84m とした。本解析地盤は、深さ 19m まで堆積している完新統とそれ以深の更新統から成り、それぞれ要素数 17.6 の計 23 要素に分割した。解析に用いた完新統の土質諸定数は、図-2に示した土質特性を用いて、表-1のように設定した。更新統は、完新統に比べ圧縮性が小さくかつ透水性の良い地層と考えられるが、土質定数は有効土被り圧と圧密降伏応力のみが得られている。ここでは、白石観測点近傍で観測された地下水位変動量と地盤収縮量の深さ方向分布^{1, 4)}を参照して更新統の圧縮指数を設定した。また、地下水揚水に伴う地下水位変動量は、深度 50 m 付近よりも深いところではほぼ同じ変動量を示していることから^{1, 4)}、深度 50 m 以深の透水係数を大きく仮定して大きな圧密係数の値を設定した。また、各層の沈下に及ぼす繰返し効果と再載荷曲線を表わすパラメータ n, α, β の値は、観測された地盤収縮量の経年変化曲線と対比させながら、完新統については更新統よりも除荷時の回復率が小さく

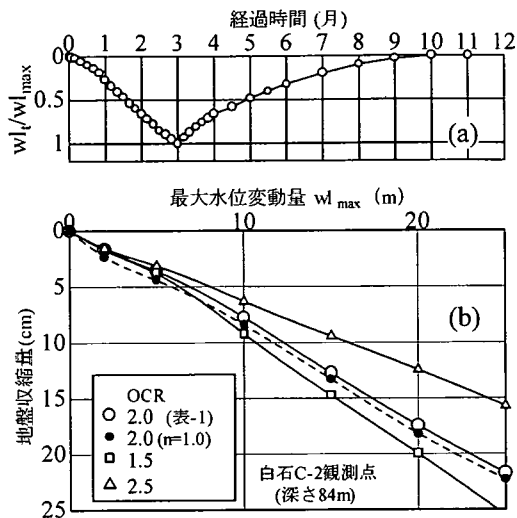


図-8 沈下に及ぼす地下水位変動の影響

かつ再載荷時における $e-\ln \sigma_v'$ 曲線の非線形性が大きくなるように設定した。計算時間刻み 1 日，下部排水条件のもとで，1ヶ月毎の地下水位変動量に対する繰返し一次元圧密解析を行った。ただし，初期間隙水圧分布は静水圧分布を用いた。解析対象期間は，1976年4月から1999年3月までの23年間である。

図-7は，観測井(C-2)の地盤収縮量と解析沈下量の経時変化を比較したものである。解析沈下量は，1978年と1994年に生じた大きな沈下も含め，観測値の沈下状況を概ね捉えていることがわかる。完新統の沈下は，全沈下量(深さ84mまで)の約50~60%であり，簡易沈下計と水準点の比較から推定された50%の値¹⁵⁾とも対応している。

b)地盤沈下に及ぼす地下水位変動の影響

季節的な地下水位変動は1年周期の繰返し変動であるが，その地盤収縮量は各年の水位変動量によって大きく異なる。ここでは，前述と同じ解析地盤と解析条件を設定し，地盤沈下に及ぼす地下水位変動の影響について，解析的検討を行った。解析に用いた地下水位変動波形は，過去の地下水位変動パターンを参照に，図-8(a)に示すような水位低下期間3ヶ月目に最大水位変動量(w_{max})を有する1年間の変動波形を採用した。図-8(b)は，最大水位変動量 w_{max} を種々変化させたときの地盤収縮量(年間収縮量)を示している。直線で表される再載荷曲線($e-\ln \sigma_v'$ 関係)を用いた解析結果●印($r=1$)の地盤収縮量は，表-1の解析諸定数を用いた○印に比べて幾分大きな値を示しており，その増加率は最大水位変動量 w_{max} が小さくなるほど僅かに大きくなる特徴がある。また，これらの関係は，図-8(b)に示されるように過圧密比の値によっても異なり，更新統の過圧密比が2.5, 2.0, 1.5

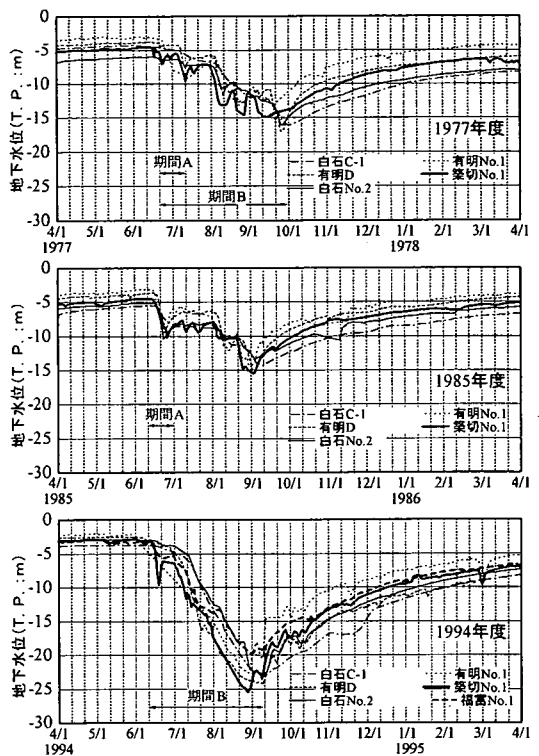


図-9 代表的な地下水位変動パターン

と小さくなるほど地盤収縮量の変化率が大きくなっている。

3. 地下水位変動に及ぼす地下水揚水量の影響

地下水位低下と地下水揚水量の関係は，地下水位観測点を中心とした半径方向の揚水量分布によって検討することができる。佐賀県では，地盤沈下の原因となっている地下水揚水状況を把握するために，佐賀県公害防止条例に基づき揚水機の排出口の断面積の合計が 21cm^2 を越える揚水施設および特例承認を受けた揚水施設を有する事業所に地下水揚水量の報告を義務づけている。白石地区における季節的な地下水位変動は，農業用揚水に起因しているので，ここでは地下水揚水量として報告された農業用揚水量を用いることにする。

(1)地下水位低下時における地下水位変動量と地下水揚水量の関係

地下水位変動量と揚水量の検討には，地下水位が低下している期間の揚水量とそのときの水位変動量の関係を用いた。地下水位変動の傾向は，各年度によって異なるが，図-9に代表的と思われる地下水位変動パターンを示す。地下水位低下期間には，

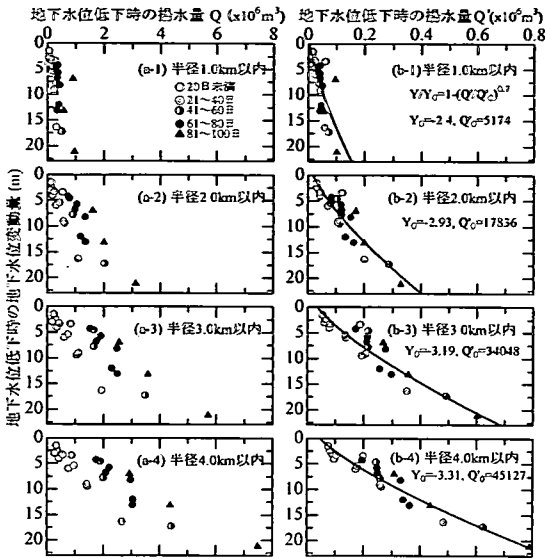


図-10 有明観測点Dにおける揚水量 Q 、 Q' と地下水位変動量の関係

- (i) 水位低下と回復を複数回繰返しながら徐々に水位が低下していくタイプ (1977 年度) : 最初の低下を示した期間 A と、水位低下が起こってから最大の水位低下を示すまでの期間 B の 2 箇所の低下期間を採用。
- (ii) 水位低下後に比較的長い回復傾向を挟んで再び水位が低下していくタイプ (1985 年度) : 最初の低下を示した期間 A を採用。
- (iii) 大渇水時 (1994 年度) のように大きな水位低下が 1 回見られるタイプ : この場合には水位低下開始時から水位回復する直前までの期間 B を採用。

図-10 (a-1)~(a-4) は、有明観測点 D における地下水位低下期間の水位変動量と各半径内の揚水量の関係を示したものである。約 20m の大きな地下水位変動量は、1994 年の渇水年における値である。これらの図から、揚水量増加に伴う水位変動量の増加率は、半径の増加、すなわち影響範囲の拡大とともに減少しているのがわかる。有明観測点 D は半径 2km 以内にも揚水井戸が多く存在していることから、任意の水位変動量に要する半径 2km 以内の揚水量は、近傍に揚水井戸が少ない白石観測点 C-1、No.2 の場合よりも多いことが認められた。また、有明沿岸部に位置する他の観測点 (有明 No.1・築切 No.1・福富観測井 No.1) の揚水量 Q と水位変動量の関係においても、有明観測点 D と同様の傾向が認められた。

(2) 地下水位低下日数を考慮した揚水量と地下水位変動量の関係

図-10 (a-1)~(a-4) に示した地下水位変動量は、地下

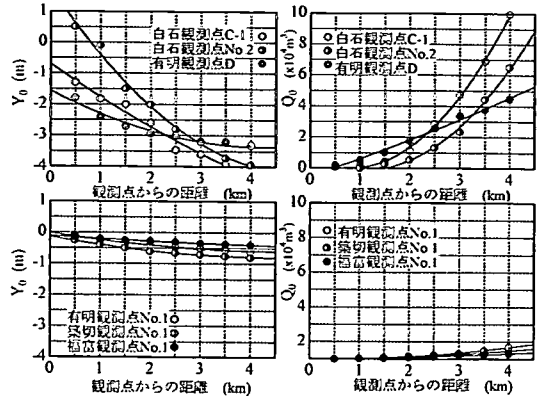


図-11 各観測点における係数 Y_0 、 Q_0 の値

水位低下日数別(20 日未満, 21-40 日, 41-60 日, 61-80 日, 81-100 日)の 5 段階)にプロットされている。これら揚水量と水位変動量の関係は、半径領域が大きくなるにつれてバラツキが大きく、同じ水位変動量に要する揚水量は水位低下期間によって異なった値を示している。このように、白石地区においては、揚水量が同じであってもそのときの水位低下期間が長くなるほど水位変動量は小さくなる傾向がある。したがって、本論文では、これら白石地区における実測傾向を簡易的に表現する方法として、種々の水位低下期間によって異なる揚水量 Q に代わり、次式で表される揚水量 Q' を用いる。

$$Q = \frac{Q'}{\sqrt{T/T_0}} \quad (3)$$

ここに、 Q' : 日数補正後の揚水量 (m^3)、 Q : 補正前の実揚水量 (m^3)、 T : 水位低下日数 (日)、 T_0 : 単位日数 (ここでは 1 日を使用)。

図-10 (b-1)~(b-4) は、式(2)を用いた揚水量 Q' と地下水位変動量の関係を観測点からの領域毎に示したものである。揚水量 Q と地下水位変動量の関係は水位低下期間によってばらばらになっているが、式(1)の揚水量 Q' を用いることによって揚水量と水位変動量の相関関係が良くなっていることがわかる。

上述の揚水量 Q' と水位変動量 Y の関係を定式化するために、次式で表す曲線近似を用いた。

$$Y/Y_0 = 1 - (Q'/Q_0)^{\zeta} \quad (4)$$

ここに、係数 Y_0 と Q_0 の値は、それぞれ地下水位変動量と揚水量の軸の切点に相当し、同じ半径内ではその値が小さくなるほど観測点の中心よりもその周辺の揚水量の影響が大きいことを意味する。係数 Q_0 は、地下水位低下が始まる時の各半径領域内の揚水量 Q' の値を示している。また、式(4)の係数 ζ は、任意の領域内揚

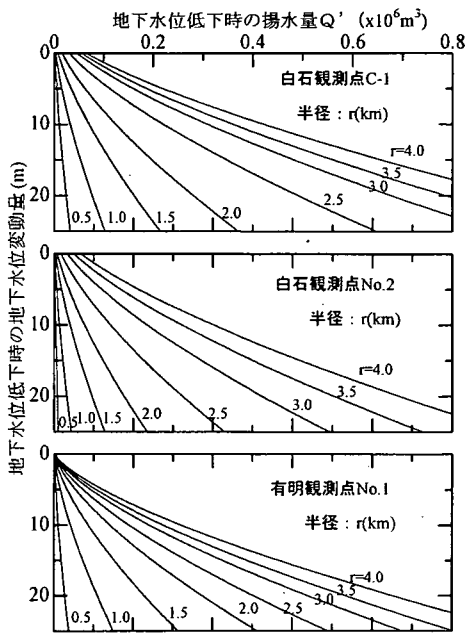


図-1 2 各観測点における地下水位変動量と地下水揚水量 Q' の関係

水量に対する各観測点の水位変動特性を表すものであり、実測値との比較により、白石地区の全観測点において $\alpha = 0.7$ の値が得られた。図-1 1 は、各観測点別に係数 Y_0 と Q_0' の値を半径方向にプロットしたものである。各観測点の揚水量 Q' と地下水位変動量の関係は、これらの関係から任意の半径方向に対して求めることができる。図-1 0 (b-1) ~ (b-4) の図中に、式(4)によって得られた曲線を示す。

図-1 2 は、式(3)を用いた揚水量 Q' と水位変動量の関係を各観測点毎に示している。白石町中・北部に設置されている白石観測点 C-1, No.2 では、観測点近傍ではあまり揚水されていないことから、半径 2km 以上になると任意の水位変動量に要する揚水量が急増している。一方、有明海沿岸域の有明観測点では、近辺に揚水井戸が多く存在していることもあり、半径の増加に伴って次第に揚水量の増加率が減少している。これらの関係は、他の有明海沿岸域である築切、福富観測点においても同様の傾向が認められた。

4. 地盤沈下管理パラメータの検討

(1) 地下水位変動量と年間沈下量

図-5 に示したような季節的な地下水位変動に対して、各年の地下水位がほぼ同じ値に回復するときは、図-8 に

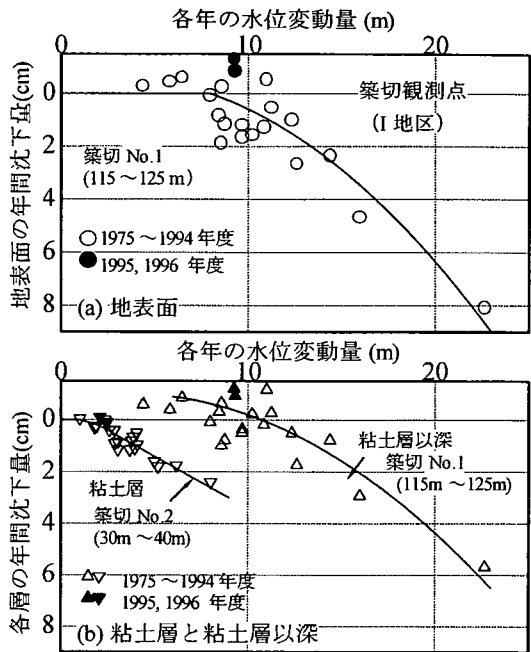


図-1 3 築切観測点における地下水位変動量と年間沈下量の関係

示した解析結果からもわかるように、水位低下時の最大地下水位変動量とその年の地盤収縮量の間には、地域の地盤特性に応じた相関関係がある。その一例として、図-1 3 (a) には、築切における各年の最大地下水位変動量(ストレナ深度約 120m)と年間沈下量の関係を示している。ここに、各年度期間内における地表面から観測井設置深度までの地盤収縮量は、地表面の年間沈下量にほぼ等しいものとしてプロットした。水位変動量の減少とともに沈下量も減少し、最大水位変動量が約 8m 以下になると沈下が見られない。また、これらの沈下状況を完新統の粘土が大部分を占める深さ 22m までとそれ以深の更新統の沈下量に分けたときの関係を図-1 3 (b) に示す。深さ 30m~40m の水位変動量に対する完新統の粘土の沈下量は、深さ 115m~125m の水位変動量に対する深さ 22m 以深の更新統の沈下よりも大きく、1m 以上の水位変動量に対して沈下を生じている。また、22m 以深の更新統の沈下は、渇水時以外は小さく、水位変動量が 10m 以下ではむしろ隆起傾向にある。ただし、渇水年の 1994 年以降の 2 年間にあたる 1995, 1996 年においては、図-5 に示されるように冬季の地下水位が 1994 年の水位まで回復していない状況にある。このような状態から地下水位が低下しても、図-1 3 (b) の中の黒印で示されるように、完新統の粘土の沈下はあまり見られず、かつ深さ 22m 以深における更新統の隆起状態も例年よりも大きくなる特徴がある。したがって、渇水後の数年間の年間沈下量

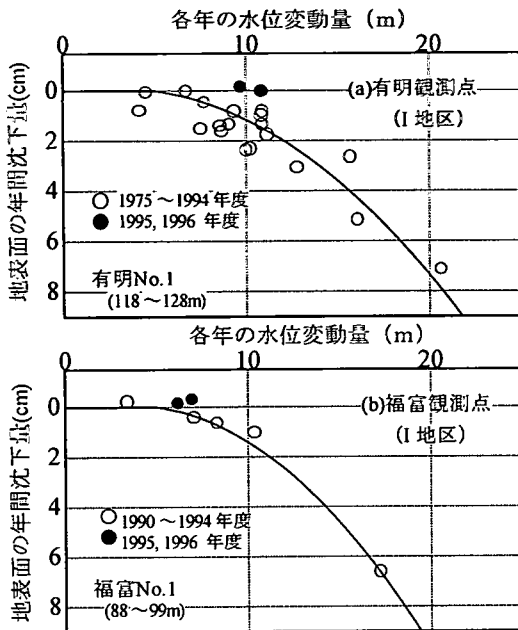


図-14 有明海沿岸域における地下水位変動量と年間沈下量の関係

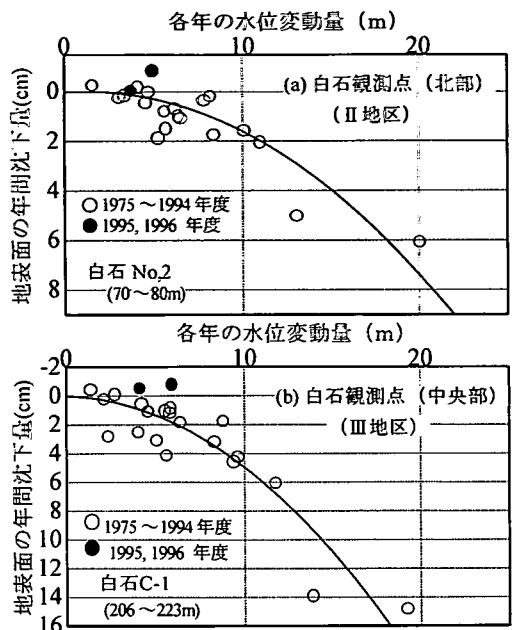


図-15 白石町北部・中央部における地下水位変動量と年間沈下量の関係

は、例年の水位変動量に対する沈下よりも小さくなっている。

(2) 地下水位変動量に対する年間沈下量の地域特性

a) 有明海沿岸域の地域特性 (地域区分 I)

有明海沿岸域には、3ヶ所の観測井地点(築切観測点 No.1(ストレーナ深度 115~125m), 有明観測点 No.1(ストレーナ深度 118~128m), 福富観測点 No.1(ストレーナ深度 89~99m))がある。図-14は、有明観測点と福富観測点における年間最大地下水位変動量と地表面の年間沈下量の関係を示す。この地域では、最大水位変動量が5m~8mに達すると沈下が発生し始め、約10m~12mの変動量を越えると年間2cm以上、および約14m~17mの変動量を越えると年間4cm以上の年間沈下量が生じている。ここに、有明観測点周辺では、図-13に示した築切観測点と比べて粘土層厚が10m程度厚く堆積している。このように、粘土層厚は地域によって幾分異なっているが、水位変動量に対する地表面の沈下量はほぼ同じである。このことから、有明海沿岸域の各年の最大地下水位変動量と年間沈下量の関係は、地下水位変動量に対して同じ沈下特性を有する地域と見なすことができる。

b) 白石町北部の地域特性 (地域区分 II)

白石町北部に設置されている白石観測点 No.2 の各年域区分の最大水位変動量と地表面の年間沈下量との関係を図-15(a)に示す。ここでは、ストレーナ深度

(No.1:115~125m, No.2:70~80m)の中で、水位変動が大きいNo.2の水位を用いた。この地域は、水位変動量が4~5mになると沈下が生じ始め、約11mの水位変動で約2cmとなり、水位変動量約15mになると年間約4cmの年間沈下量が生じている。沈下が発生する水位変動量は約4mであり、有明沿岸域のそれと比較して幾分小さな値を示しているのが特徴である。

c) 白石町中央部の地域特性 (地域区分 III)

図-15(b)は、白石町中央部に設置されている白石観測点 C-1 の各年の最大水位変動量と地表面の年間沈下量の関係である。この観測点もストレーナ深度(C-1:206~223m, C-2:77~82m)の2つが設置されているが、水位変動量の大きい白石 C-1 の水位を用いた。この地域は、有明海沿岸域・白石町北部とは異なり、水位変動量に対する年間沈下量が大きく、約2mの地下水位変動量で沈下が発生し、約4mの変動で年間1cm以上、約9mを越えると年間4cm以上の沈下が生じる可能性がある。

d) 山麓部の地域特性 (地域区分 IV)

白石地区の西部に位置する地域は、南北に連なる杵島山地の山麓部にあたる。この地域は、地下水利用域ではなく地下水涵養域と考えられ、通常では地下水位変動量や地盤沈下は認められない地域である。この地域の一部では、1994年の大渇水時に最大で約30cmの沈下が発生したと推定されているように、大渇水時期のみに大きな沈下を生じる特徴がある^{7), 11)}。1994年度の地下水位

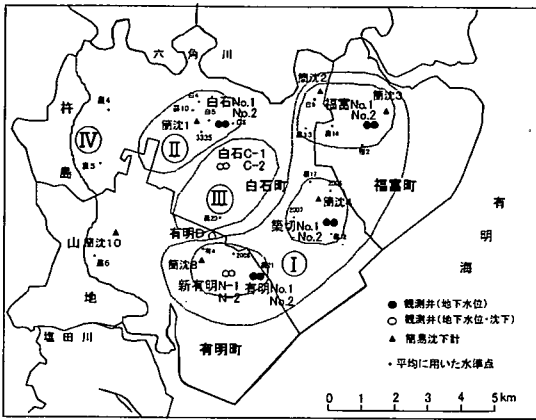


図-16 白石地区の地盤沈下特性の地域区分

変動記録がないために詳細な検討はできないが、山麓部からの地下水供給が途絶えたために山麓部に近い方から沈下が進行したと考えられる。このように、この地域の水位変動は、他の地域の水位変動傾向とは異なる地域である。

これら年間の最大地下水位変動量に対する年間沈下量の地域特性から、図-16に示すように、白石地区の地盤沈下特性の地域区分としては、山麓部(IV)を含めると、各観測井を中心としたI(有明沿岸部)、II(白石北部)、III(白石中央部)の合計4つの領域に区分することができる。

(3) 地下水位変動量・年間沈下量・地下水揚水量の関係

白石地区における地盤沈下の主要なパラメーターとして各年の地下水位変動量を採用し、それと地下水揚水量や年間沈下量との関係を明らかにしてきた。3.では地下水位変動量と地下水揚水量の関係、4.(2)では地下水位変動量と年間沈下量の関係、についてそれぞれ各観測点毎に示してきた。これら地下水位変動量、地表面の年間沈下量および地下水揚水量 Q' の三者の関係は、一つの関係図としてまとめることができる。図-17(a)(b)は、白石観測点C-1と有明観測点No.1における地下水揚水量 Q' ・地下水位変動量・年間沈下量の相関関係を示したものである。

図-17(a)に示す白石町中央部に設置されている白石観測井C-1に関しては、たとえば半径2km以内の揚水量 Q' が16万 m^3 のとき地下水位変動量は10mで5cmの年間沈下量が生じることになる。この白石町中央部では、地下水位変動量に対する年間沈下量が他の観測点に比べて大きい特徴がある。また、白石町中央部・北部における揚水量 Q' は、半径2kmを越えてから急増する特徴がある。

図-17(b)は、有明観測点No.1における関係図であり、

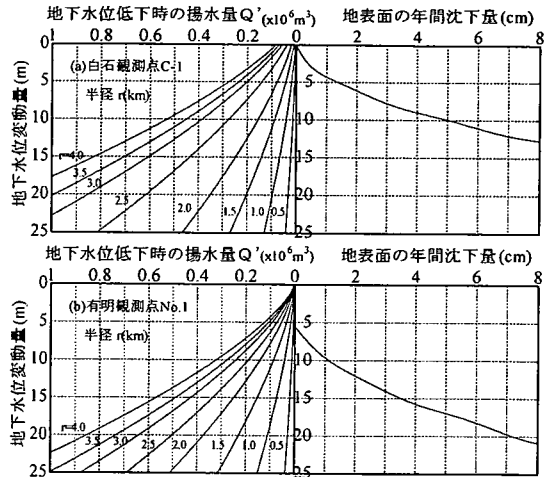


図-17 地下水揚水量・地下水位変動量・年間沈下量の相関図

白石観測井に比べて半径方向の揚水量 Q' の増加は小さく、かつ水位変動に対する沈下量も小さな値を示している。有明海沿岸域の他の築切・福富観測点においては、すでに指摘したように地下水位変動量と年間沈下量の関係において同じ特性を示す領域と見なせるが、地下水揚水量も加えた地下水揚水量・地下水位変動量・年間沈下量の相関関係図においてもほぼ同じ値を示すことが認められた。したがって、これら三地点は地盤沈下に関する地下水揚水量・地下水位変動量・年間沈下量の相関関係においてほぼ同じ特性を有する地域と見なすことができる。

5. 白石地区における地盤沈下管理手法

(1) 地盤沈下管理の考え方

地下水揚水に伴う地盤沈下の防止には、水位低下量および水位変動の回数の削減が最も有効である。しかし、地下水揚水のすべてが地盤沈下に結びつくわけではなく、また水資源としての地下水は地盤環境との許容範囲内において有効利用することが考えられる。地下水位の低下に伴う地盤沈下の防止・軽減を図るために、すでに幾つかの地域においては、地下水位および地下水位の低下量に着目した地盤沈下対策が実施されている^{16)・17)}。新潟県上越市では、消雪用として冬季に地下水を利用している地域であり、地下水位の低下量を用いることによって、地盤沈下に対する注意報および警報の発令・解除の基準が定められ実施されている^{16)・17)}。この上越地域の注意報の発令基準は、12月1日からの地下水位の低下量がある基準を超え、降雪条件からみてその状況が継続すると認められたときとされている。また、注意報の地

下水位低下量よりも大きな基準値に達し、地層収縮及び降雪条件からみて、地盤沈下が著しく進行すると認められたときは、警報を発令して、地下水利用者には状況を迅速に連絡し、節水の依頼・指導等が行われている。今回提案する佐賀平野白石地区の地盤沈下管理手法は、冬季と夏季の違いはあるものの地盤沈下が季節的な地下水位変動に依存している点は同じであることから、新潟県のこのような地盤沈下緊急時対策と同様な考え方を採用した。一方、濃尾平野尾張地域では、1965年以降に大きな沈下を生じているが、1975年以降は工業用水の水源転換等により各年の残留地下水位は回復し沈静化の傾向をたどり、農業用揚水等による大きな季節的な地下水位変動は見られない。この地域では、地盤沈下に対する管理パラメータとして地下水位の値そのものが用いられ、管理目標地下水位、注意報地下水位、警報地下水位、の3種類の安全地下水位が定義されている¹⁸⁾。

佐賀平野白石地区では、農業用揚水によって現在でも夏季に地下水位が低下し、冬季に回復する水位変動によって地盤沈下が進行している。また、回復期の地下水位レベルは年数の経過とともにあまり上昇することなく、ほぼ一定の地下水位レベルを保った状態である。現在、佐賀平野においては、地下水に代わる水源の確保等の事業が進められているが、現状においては、地域の社会経済活動を維持していくために地下水の利用が不可欠なものとなっている。このような地下水揚水による地盤沈下を防止するためには、年間の揚水総量を規制(佐賀地区600万 m^3 、白石地区300万 m^3)¹⁹⁾するだけでなく、規制地域内での地下水揚水に伴う地下水位変動と地盤沈下の地域特性を考慮した地下水管理が重要である^{20), 21), 22)}。

地盤沈下に関わる管理パラメータとしては、地下水位、地下水位変動量、地下水位変動速度などが考えられる。白石地区においては、上述のように、夏季に大きな地下水位低下(変動)があるものの、各年の回復期における地下水位はほぼ一定の水位レベルを保った状態である。このような状況においては、季節的な地下水位変動が地盤沈下の主要因となっている。特に、現状では夏季の地下水揚水に伴う急激かつ大きな地下水位変動を避けることが、地盤沈下の防止にとって極めて重要である。これらのことから、白石地区の地下水管理パラメータとしては、夏季の地下水位変動量を使用することが有効であると考えられる。

本論文では、地盤沈下に関する管理パラメータとして、地下水位レベルそのものではなく、地下水位低下によって生じたその水位変動量に対して、以下の3種類の管理レベルを定義する。

①管理目標レベル: 完全に地盤沈下が停止し、その他の

地盤環境保全上の支障も発生させない水位変動量。

②注意報レベル: これ以上進行すれば、一定規模の年間沈下量が生じ、地盤環境保全上の支障が生じることが懸念される水位変動量。

③警報レベル: これ以上進行すれば、深刻な沈下等の地盤環境保全上の支障が生じることが確実に予測される水位変動量。

(2) 地下水位変動量に基づく管理レベル

地下水位変動量管理レベルの設定には、実測値による相関解析や広域地下水シミュレーション解析等の種々の検討結果を用いる方法が考えられる。本研究では、白石地区において計6ヶ所の観測井が設置されていることから、これらの観測結果を有効利用して、地下水位変動量と年間沈下量の実測相関関係から各地域の地下水位変動量に基づく管理レベルを設定した。

管理レベルは、5.(1)に示した3つの管理レベル(管理目標、注意報、警報)を提案しているが、白石地区については、比較的深刻な地盤沈下が進行しており、これら管理レベルのうち、「注意報レベル」もしくは「警報レベル」の維持達成が緊急な課題である。

一定規模の年間沈下量が生じる可能性のある注意報レベルは、地下水位の低下が比較的短期間に発生することから、沈下の被害をできるだけ最小限に留めることを目標に、年間沈下量が約1cm程度生じる可能性のある地下水位変動量とした。また、警報レベルとしては、深刻な沈下被害等が予測される年間沈下量約4cmの可能性のある水位変動量を適用した。

白石地区の各地域における年間の最大地下水位変動量と地表面の年間沈下量の関係は、図-13, 14, 15に示したとおりである。これらの関係から、地下水位変動量に基づく管理レベル(注意報レベルと警報レベル)は、それぞれの地域において以下の値を設定した。

- (I) 有明海沿岸域(築切No.1, 有明No.1, 福富No.1) : 8.0m, 15.0m,
- (II) 白石町北部(白石No.2) : 6.5m, 15.0m,
- (III) 白石町中央部(白石C-1) : 4.0m, 9.0m.

ただし、これら地下水位管理の実施は、例年6月以降に地下水位が低下し始めることから、6月1日から実施し、地下水位変動量の基準となる初期地下水位は、5月中の最高水位を用いることとする。

季節的な地下水位変動とともに、水位の回復レベルが年々変化するような地下水位の変動パターンを示すときは、最大水位変動量と年間沈下量の関係は逐次変化することになる。しかし、2.(3)に示した地盤沈下解析によってこれらの関係を予測することも可能である。

6. まとめ

季節的な地下水揚水によって地盤沈下が進行している佐賀平野白石地区を対象に、地盤沈下の実態と沈下解析結果を示した。また、地下水位変動量に及ぼす地下水揚水量の影響、および地下水位変動量と年間沈下量の関係を明らかにして、地盤沈下防止のための管理手法について検討した。おもな結果は、以下に示すとおりである。

1) 白石地区では、農業用揚水によって、夏季に地下水位が低下し冬季に回復する水位変動を繰り返している。このような季節的な地下水位変動を伴う地盤沈下は、繰返し圧密モデルを用いた沈下解析を行った結果、地下水位変動量の影響を強く受けることがわかった。

2) 各観測点を中心とした地下水位低下期間の揚水量 Q (半径毎)は、そのときの水位変動量と高い相関関係にあり、揚水の影響範囲の拡大とともに水位変動量の増加率は減少する傾向にある。また、次式で表される揚水量 $Q=Q_0\sqrt{T/T_0}$ (ここに、 T :水位低下日数(日)、 T_0 :単位日数)を用いることによって、水位変動量との間に水位低下期間に依存しない一義的な関係が得られた。

3) 水位低下時の最大地下水位変動量と年間沈下量の間には高い相関関係がある。これらの関係を観測点を中心とした地域に分けると、山麓部を除いて、(I) 有明海沿岸域、(II) 白石町北部、(III) 白石町中央部、の3つの領域に区分することができる。

4) 白石地区で見られるように、季節的に大きな地下水位変動を伴うものの、水位回復時のレベルがほぼ同一レベルを保つような変動パターンを示す場合には、季節的な地下水揚水に伴う急激な地下水位変動を避けることが、地盤沈下の防止にとって重要である。

5) 白石地区の地盤沈下管理パラメータとしては、夏季の地下水位低下時における水位変動量を使用することが有効であり、この値を用いて、地盤沈下防止のための管理レベル(注意報、警報)を提案した。

謝辞: 本論文は、佐賀大学と佐賀県の共同研究および環境庁委託研究による成果の一部に基づいてまとめたものである。本研究の遂行にあたり、佐賀県環境生活局環境課および国土交通省九州地方整備局武雄工事事務所には、貴重な観測データを提供していただき、楢原裕次朗君(佐賀大学大学院)には、各種データ整理に協力いただいた。ここに、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 陶野郁雄, 岩田敏: 地盤沈下(3)新潟県南魚沼郡六日町の地盤沈下の現状, 地下水学会誌, 第30巻, 第2号, pp.95-101, 1988.
- 2) 坂井晃, 陶野郁雄: 地下水位の季節的変動による地盤沈下,

繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシボジウム発表論文集, pp.87-92, 1990.

- 3) 三浦哲彦, 飯盛喜代春, 坂井晃, 陶野郁雄: 佐賀平野における揚水に伴う地盤沈下と地下水水質への影響, 土と基礎, Vol.34, No.11, pp.13-18, 1986.
- 4) 坂井晃, 三浦哲彦, 陶野郁雄, 八谷陽一郎: 季節的な地下水揚水に伴う地盤沈下, 地下水学会誌, 第38巻, 第4号, pp.269-278, 1996.
- 5) 岩田敏, 陶野郁雄: 新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下性状, 国立公害研究所研究報告, 第127号, 1990.
- 6) 関谷一義: 新潟県内の消雪用地下水による地盤沈下, 広域地盤沈下と地盤環境に関するセミナー, pp.91-102, 佐賀, 1997.
- 7) 八谷陽一郎, 北島淳二, 神野健二: 佐賀平野における平成6年異常渇水と地盤沈下, 地下水学会誌, 38-3, pp.181-191, 1996.
- 8) 佐賀県: 地盤沈下の概況, 1981-1999.
- 9) 下山正一, 松本直久, 湯村弘志, 竹村恵二, 岩尾雄四郎, 三浦哲彦, 陶野郁雄: 有明海北岸低地の第四系, 九州大学理学部研究報告, Vol.18, No.2, pp.103-129, 1995.
- 10) 佐賀気象台: 気象月報, 1975-1995.
- 11) 佐賀県環境保全課: 平成6年度佐賀平野地盤沈下予測調査報告書, 1995.
- 12) 建設省河川局編: 地下水位年表, 1979-1997.
- 13) 兵動正幸, 坂井晃: 土の繰返し圧密 5.飽和粘性土の繰返し圧密理論と解析手法, 土と基礎, 講座, Vol.39, No.10, pp.80-86, 1991.
- 14) Sakai, A.: Land subsidence due to seasonal pumping of groundwater in Saga Plain, Japan, *Lowland Technology International*, Vol.3, pp.24-39, 2001.
- 15) 環境庁水質保全局: 平成元年度地盤沈下防止のための目標値設定手法調査報告書, 1990.
- 16) 陶野郁雄編: 新潟県上越市の地盤沈下性状と新しい地盤沈下観測システムの開発, 国立環境研究所研究報告, 第135号, pp.25-34, 1997.
- 17) 陶野郁雄, 関谷一義: 上越市における地盤沈下警報システムとその情報伝達, 日本災害情報学会 1999年研究発表会, pp.45-50, 1999.
- 18) 愛知県地盤沈下対策室: 平成元年度尾張地域地下水管理システム調査報告書, 1989.
- 19) 筑後・佐賀平野地盤沈下防止等対策要綱, 1985.
- 20) 八谷陽一郎: 地下水揚水による佐賀平野の地盤環境への影響に関する研究, 学位論文, 佐賀大学, 1999.
- 21) 佐賀県, 佐賀大学: 共同研究, 「佐賀平野における地盤沈下防止のための地下水位管理システムに関する研究」共同研究報告書, 1998.
- 22) 環境庁水質保全局: 局地急速型地盤沈下対策手法策定調査

MANAGEMENT OF LAND SUBSIDENCE DUE TO THE SEASONAL FLUCTUATION OF GROUND WATER LEVEL IN SAGA PLAIN

Akira SAKAI, Norihiko MIURA, Yoichiro HACHIYA and Ikuo TOHNO

Land subsidence of soft ground has been caused by the seasonal fluctuation in ground water level, when it is seasonally pumped up in summer for agricultural purposes such as Saga Plain in Japan. To propose a useful system for preventing the land subsidence due to the seasonal fluctuation in ground water, the results of measurement from the observation well the past 20 years in Saga were used. Based on the observed results, we clarified the relationship between amounts of ground water level fluctuation and pumping of ground water and the residual settlement per year. As a useful parameter of management for preventing the land subsidence, the ground water level withdrawal during pumping was used and its values for some ranks of management were established to each observation well.