

地下水位変動の統計的特性について

埼玉大学理工学部 正会員 ○佐藤 邦明

〃 〃 〃 渡辺 邦夫

序

最近、わが国各地で地盤沈下と共に地下水位観測も活発となり、多くの観測井で水位自記記録が得られるようになって来ている。それらは、地下水文、地震予知、地盤沈下対策などに不可欠であるばかりでなく、水文学・地質学にも重要な基礎資料となりうるものである。観測井の設置自体が、沈下・水位の観測のみならず、地層構造、地史、さらに地下水温、水質など地下探査の可能性を与え、地下における物理量・現象究明の probe としての役割をもっている。しかし、今日こういった観測成果が関連事象・問題の追究に十分活用されているか、さらに活用され得る体制にまで整理・解析されているかという点になると疑問がある。地下水位資料にしても、浅層の場合流出・低水解析の一端として研究されている向きもあるが、本来の意味における深層地下水に関してはそれがあまりなされていない現状にある。その一因は、地下水自体の地域性、地質的・水理的複雑さにもあるが、今日ほど観測資料が蓄積されていなかったことにも一端があるように思う。實際上、こういった資料が水理解析に必ずしも有効とは限らないが、われわれの生活環境を含む広域地下水を考える場合、極めて重要な情報を与えてくれる。

こういった観点から、著者らはいままで地盤・地下水位を含む山積した資料を総合的に整理・統合して少しでも普遍的結果を得ようと努力してきた。その一環として、今回は地下水位変動の水文の性質・特性について検討し、さらに水位変動とそれにかかわる地盤変動の時系列的特性を統計的に考えてみたので報告したい。

1. 地下水位変動の性質とその変動要因

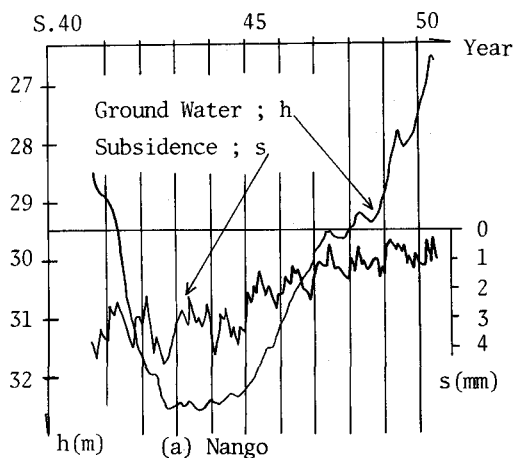
(1) 変動の性質

一口に地下水と言ってもそれは見方によって大いに違ってくる。たとえば、水理学的に水に重点をおいてそれを見れば、地盤・地層は多孔体と考えられ、他方地質の立場を強調すれば、水は地盤・地層に付随したものという見方もできる。いずれの立場をとるにしても、地盤と水の両者を分離して考える範囲には限りがあり、特に、比較的大きい揺らぎをもつ地下水を対象とする場合、この点は明確である。実際に、地盤・地層の複雑さ、地下水形態の多様性に加え、それらの系に多くの外的要因が付加され、それら相互が有機的に関係し合っているのが実態である。

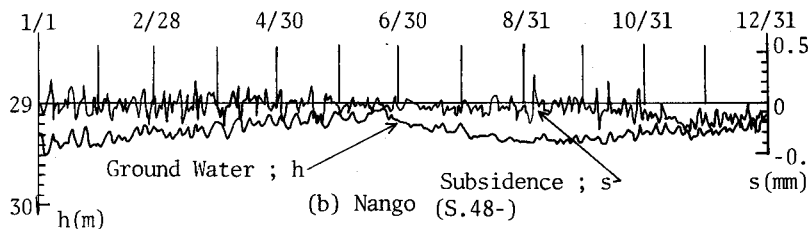
そこで、まず関東、大阪平野の地下水位観測結果の傾向の大略を説明し、つぎにそれらに關与する要因について分析してみる。

時間的に変動する諸現象の測定値は、長期傾向、周期性、短期微小変動各成分の和の形で表われていると考えてよいが、地盤変動や地下水位観測結果もその例外ではない。わが国各地で計測されている地下水位観測結果の多くはつぎに要約するような変動の性質をもつと考えられる（もっとも、このような変動性質をもつ地域に観測井が多いこともあるが）。

まず、長期傾向、周期変動はともに basin 規模と揚水に見合った規模をもち、前者の変動 scale は大きく、ゆっくりと数年ないし数十年で変動しており、後者はほぼ一年周期で変動していると見てよい。ある地域に注目すれば、長期変動そのものは basin へ外から供給され得る水の絶対量が時間的にほぼ一定であるから、水文環をはずれたその地域の地下水利用度に支配され、景気変動のような社会活動に依存している。したがって、過去数十年の地下水長期変動は工業・建築物用、水道揚水とそれにかかわる工業用・ビル用揚水の規制に関する法律との両者によって、ほとんどその変動 pattern が規定されていると言っても過言では

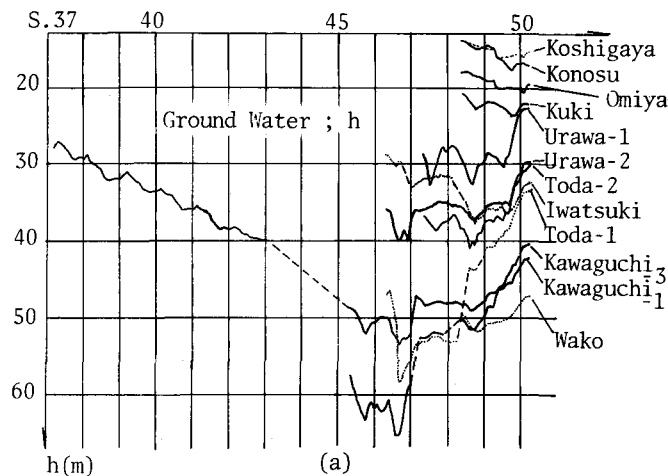


(a) Nango

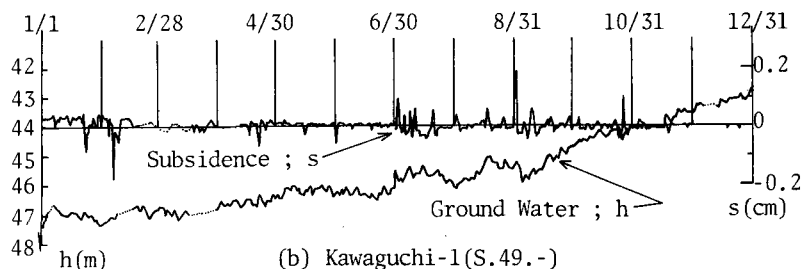


(b) Nango (S.48-)

図-1 大阪府大東市南郷観測井による水位・地盤長期変動と短期微小変動



(a)



(b) Kawaguchi-1(S.49-)

図-2 埼玉県下観測井による水位・地盤長期変動と短期微小変動

ない。実際に、大概の都市で人口増加、社会活動の拡大に従い、地下水位は周期・微小変動を伴いながら急激に低下する。それによって社会的弊害が顕著となり、揚水の法的規制が施こされると一時的に回復、上昇に向かう。しかし、現状では法的規制が十分徹底するまでには短かくて数年を要するので、その後水位は徐々に涵養上昇する形態をとる。法的規制が施こされて後、数十年経過してようやく自然の水文循環の一環として水位は変動するようになる。ここで注意したいのは、こういった水位の長期変動の pattern の原点は、同一 basin でも地域によって違い、都市化・地域の社会活動などの

tempo によって違う。

たとえば、東京、大阪などでは水位はかなり回復・涵養しており、地盤上昇をもたらしている所もあるが、地域によっては

現在水位低下が始まっている所も少なくない。

図-1(a)、図-2(a)はこういった地下水位長期変動 pattern の例を示したもので、図-1(a)は大阪府大東市南郷観測井の管頭下水位・地盤沈下経年変化を、また図-2(a)は埼玉県下のそれを示す。大阪市内の観測の大半は昭和37年ごろに水位の最低を記録しているが¹⁾、周辺の大東市では昭和43年が最低となり6年の遅れがあり、また埼玉県ではさらに数年の遅れが認められる。

したがって、結果的に地下水位の長期変動は水需要の程度と法的規制をぬきにしては考えられないのである。

つぎに、周期変動に着目すると、図-1(a)、図-2(a)からも判かるが、主に季節変動に代表される。元来、水文循環内の地下水位変動もやはり季節変動をもち、冬期に上

昇し、夏期に低下する性質をもっているが（裏日本では若干phase がづれるが）、水需要もこれに従って増減するため、これが変動振幅の増減を加速する形をとっている。この変動は水需要が大きければ、ほとんどそれ自体で決まり、そうでなければ自然変動と水需要変動の peak に若干の phase lag を伴ないながら変動する。

さらに、日程度の短期微小変動はその性質をつかみにくい。詳しく観測記録を見れば、1日の変動の中に数時間、数十分の変動があり、数cmから数十cmで常に変動し、降雨直後にゆっくり変化している。極めて短時間に地震によっても変動しており、また、特に揚水の著しい地域では、一日、一週間で変動していることもある。一般に、時系列的に random 性が強いように思われるが、次に述べるような要因とも結びついて（図-1(b)、図-2(b)に日変動が示されている）。

(2) 変動要因

(1)でも述べたように、地下水位変動は、長期傾向、周期性、微小変動の各成分に一応分けて性質をつかむことができるが、ここではこれらに關与する要因について考えてみる。

いま、地質、地形等の条件を固定すれば、地下水位変動に影響する要因は主に、気象的要因（降水、気圧、気温等）、水理・水文的要因（河海・湖沼・河川の条件、浸透、流出等）、地物的要因（地震、天文潮、地殻潮汐、常時微動等）、さらに人的要因（揚水、漏水、交通、土木工事等）とに分けられる。浅層地下水の場合には気象的要因に敏感であるが、深層地下水の場合は全体の規模からいって必ずしも短期間に大きな影響は与えないものと思われる。水理・水文的要因は概して局所性が強い。地物的要因の中で地震、天文潮の影響は観測によって確かめられるが、地殻潮汐、常時微動については明確な実測はない。こういった要因の中で水位変動に何が支配的影響を与えるかは、対象地域の規模と時間 scale で違ってくるが、地下水の循環速度から考えれば、自然要因より人的要因の方が支配的作用をもつものと考えられる。しかし、各要因の地下水位変動への量的評価については計測法の開発を含め今後の研究に期待するところが多い。

最近、著者らは観測井によって水位観測を行なった場合、気圧変動が水位のそれになんかなり影響しているという事実を明らかにした。^{②, ③} われわれは本年4月より、図-4（図中●印の位置）に示した埼玉県下の三カ所に気圧計を設置し、自記録より気圧と水位の相関を調べた。その二例が図-3に示されている。これらの計算は4月中旬より6月末まで、水位と気圧の自記録を二時間毎に読みとり、両者の傾向変動を三次曲線回帰とし、各々の時刻における両者の偏差をとり出し、水位偏差 H' 、気圧偏差 P' を plot したものである。両者、浦和-1（深度150m）、越谷（深度600m）ともに気圧と水位にいい相関がある。相関係数は、前者で0.440、後者で0.880であり、気圧と水位変動間には時差は認められず、気圧の変化に即応して応答すると考えてよい。これらの結果から、井戸内水位は気圧によってかなり影響を受けていると推察される（この他、二本の観測井で同じ計算を行なったが、やはり同様の相関があった）。つまり、気圧が上昇すれば、井戸内水位は数cmから数十cmの下がり、逆に、気圧が下がれば、水位は上昇するという結果になっている。こういった現象が単に観測井内のみに起こるのか、あるいは地下水帯全体で生じているのか不明である。

以上のことから判かるが、物理的に地下水位変動に關与する要因を明示することは容易でない。そういった意味をも含め、われわれは当面次のべるように地下水位の短期変動

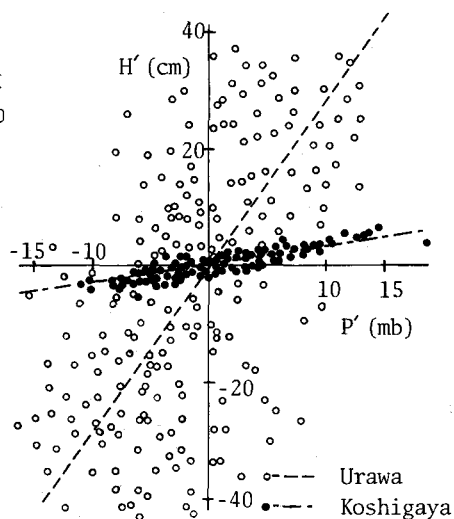


図-3 浦和・越谷井の気圧と水位の相関

の分析を時系列的に統計的計算に委ねてみた。

2. 水位・地盤変動の時系列的特性

1. で述べたように、深層地下水位の長期傾向、周期変動はほとんど人的要因によると考えられるが、比較的短期間の日変動程度の成因には物理的に不明なところが多い。そこで、地盤変動との関連も考え、日平均地下水位、日地盤変動量の時系列特性および相互の統計的性質を計算し、検討を行なった。

計算の対象としたのは、埼玉県下、浦和-1観測井(深度 $D=150^m$ 、期間 $T=S.49.1.1\sim$ 、資料数 $N=320$)他8井の計9井、千葉県下、船橋井($D=70^m$ 、 $T=S.49.3.1\sim$ 、 $N=296$)他3井の計4井、さらに大阪府下、大東市南郷井($D=50^m$ 、 $T=S.47.1.2.1\sim$ 、 $N=427$)他1井の計2井であった(埼玉県と千葉県下の観測井の位置については図-4参照)。

いま、地下水位と地盤変動の観測値をそれぞれ $S(t)$ 、 $H(t)$ とすると、各々の自己相関関数 $C_S(\tau)$ 、 $C_H(\tau)$ は定常化変動について、

$$S(t) = \hat{S} + s, \quad H(t) = \hat{H} + h, \quad (1)$$

と書くことができ、自己相関係数 $R_S(\tau)$ 、 $R_H(\tau)$ は $C_S(0)$ 、 $C_H(0)$ で割った値となる。ここで、 $\hat{S}$ 、 $\hat{H}$ 長期変動、 s 、 h : 変動成分、 --- : 時間平均である。

定常化変動成分の power spectrum $P_S(f)$ 、 $P_H(f)$ は $C_S(\tau)$ 、 $C_H(\tau)$ の Fourier 変換として、two sided spectrum をとれば、

$$P_S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_S(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (3)$$

$$P_H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_H(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (4)$$

で表わされる。ここに、 f : 周波数である。

さらに、相互相関関数 $D_{sh}(\tau)$ 、cross spectrum $P_{sh}(f)$ は、

$$D_{sh}(\tau) = \overline{s(t)h(t+\tau)}, \quad (5) \quad P_{sh}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} D_{sh}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (6)$$

と書けて、相互相関係数 $R_{sh}(\tau)$ も同様に定義できる。

また、地下水位変動 $h(t)$ とそれによって起こる地盤変動 $S(t)$ の応答系に外部からはいる noise の度合や現象のもつ非線形性の程度を表わす量として coherence は式(7)で定義される。ここに、 $P_{SS}(f)$ 、 $P_{HH}(f)$ はそれぞれ、 $S(t)$ 、 $h(t)$ の spectrum を表わす。

$$\gamma_{sh}^2(f) = \frac{|P_{sh}(f)|^2}{P_{SS}(f) \cdot P_{HH}(f)}, \quad (7)$$

このような統計量を定常化変動について計算するためには、非定常長期変動成分を観測値から除去する必要がある。今回の計算では実測変動の性質を考慮

した上、実測変動から区間31日の単純移動平均値を引いて定常化変動とした。計算結果は便宜上、大阪府南郷井、千葉県船橋井、および埼玉県浦和-1井のそれぞれについて、地下水位自己相関、地盤変動自己相関、地下水位・地盤変動相互相関、地盤変動 spectrum、水位変動 spectrum、cross spectrum、

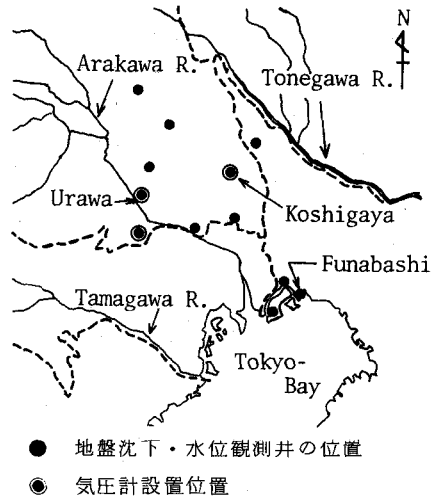


図-4 計算の対象となる観測井の位置

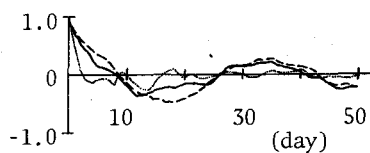


図-5 地下水位自己相関

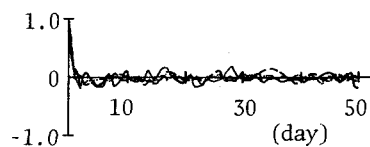


図-6 地盤変動自己相関

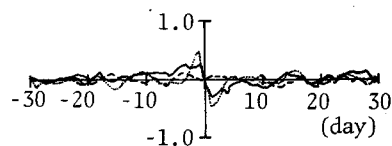


図-7 地下水位・地盤変動相互相関

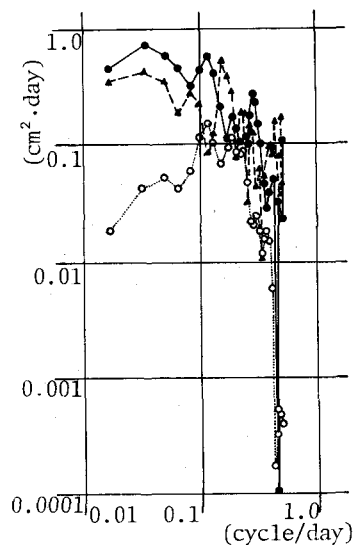


図-10 cross spectrum

記号の説明

- 、—— : 船橋井
- ▲、----- : 浦和-1井
- 、..... : 南郷井

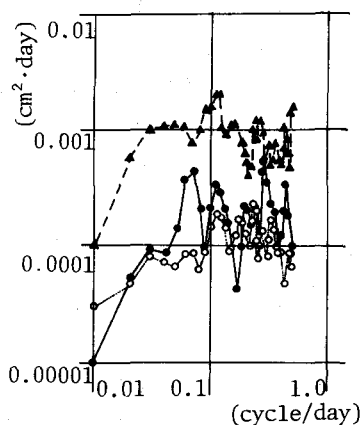


図-8 地盤変動 spectrum

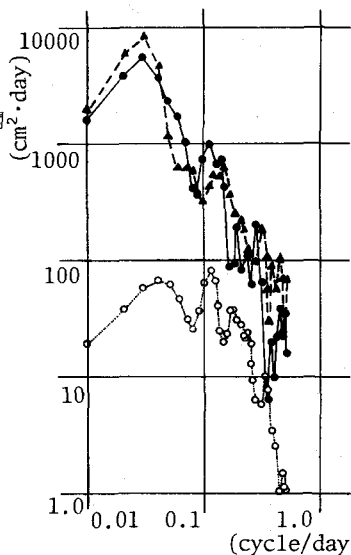


図-9 水位変動 spectrum

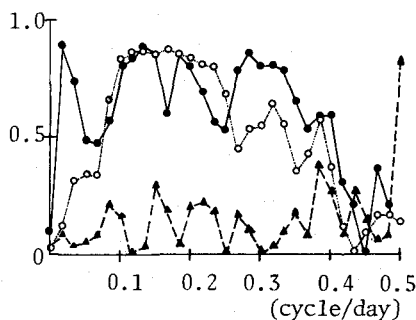


図-11 coherence

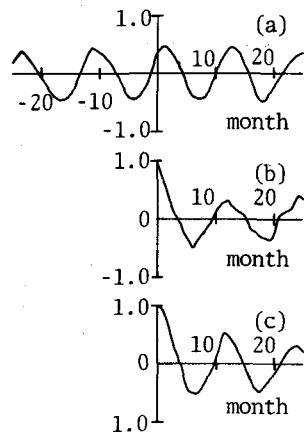


図-12 月平均水位と月沈下量による相関（南郷井の場合）

(a): 相互相関

(b): 地盤沈下の自己相関

(c): 地下水位の自己相関

さらに、coherence を図-5から図-11に示した。また、すでに佐藤⁴⁾が報告している月平均水位と月沈下量の相関を参考のため、図-12に示しておいた。

これら計算結果は極めて興味深いもので、順次変動の性質を考えてみる。まず、図-5に注目すると、南郷、浦和-1、船橋井ともに地下水位変動はある程度の周期性をもっており、変動規模も地盤変動に比べれば大きい。また、図-6の地盤変動の場合、周期性が全くないとはいえないが、変動scaleが小さくかなりrandom性が強いように読みとれる。図-7の地下水位・地盤変動相互相関から、地下水位変動と地盤変動の時系列相関は必ずしも高い

とはいえないが、船橋の0.3、南郷の0.5と1日程度の時差をもって相関が認められるのは興味深い。しかし、浦和の場合はほとんど相関はない。同じ観測井で時間scaleを月平均にとった場合の相関が図-12に示されているが、この場合は図-7に比べ明確な周期性(季節変動)をもち変動の性質も捉え易い。

つぎに、図-8、9のspectrumに着目して変動成分の周波数構成を考えてみる。地盤変動と水位変動のspectrumを比較すれば、各々の変動の性質が明らかで、前者は卓越波数がなく、高周波成分の全体に占める割合が大きい。一方、後者の水位は、浦和-1と船橋井が極めて似たspectrum分布をとり、0.04 cycle/day付近に卓越波数帯があり、かなりゆっくりとした変動と考えてよからう。さらに、図-11のcoherenceから、船橋、南郷井の場合、いずれも地下水位変動と地盤変動の応答性には線型性が認められ、応答系へのnoiseも小さい。しかしながら、浦和-1井の場合にはほとんど線型性はなく、評価すべき時系列の統計的意義はないように思われる。

以上の3地点における計算と他地点の計算結果とから今回の日水位・地盤変動の時系列特性をつぎのように要約することが出来る。まず、大阪、関東いずれも水位変動の時間scaleは地盤変動のそれより大きい。地下水位と地盤変動の相関はどの地域でもあまり高くないが、地域的にはむしろ大阪の観測の方が関東のものより高い相関をとった。このことは同様に、coherenceの値についても言えることである⁵⁾。つぎに、観測井の深度の面から見ると概して、100m内外の観測井としては比較的浅いものの方が地下水位と地盤変動の相関が高く、両者の線型性も大きいことが判った。この点は、観測精度と観測井の構造に関係しているものと思われる。つまり、現在用いられている二重管式の観測井によっては数百mの深い層までの沈下を測ろうとすると、内管自体の温度伸縮、centralizerと外管との摩擦抵抗などによる誤差を生じやすくなり、深度は浅い方がよいことは確かである。そのため深層の沈下を高い精度で観測しうる方法の開発が望まれる。

3. 結 語

近年、わが国では地盤沈下・地下水位観測井の数がふえ、それらによる資料は多く山積されてきている。しかし、これらの貴重な資料はあまり十分活用されないままに半ば義務的に測られ、眠っていることが多く、一日も早く整理、統合、解析し、普遍的な形にまとめておかなければならない。著者らは、この主旨にそって今回は地下水位・地盤日変動の時系列特性について検討したが、ある程度変動の性質が明らかにされたものと思う。特に、水位と地盤変動の時系列相関がそれら変動の時間scaleを日程度にとると非常に小さくなり、他の要因から影響を受け易く、random性を増し、水位と地盤は独立に運動するようになるという新しい知見を得た。また、気圧変動と地下水位変動とはかなり高い相関をもつことが判明し、それが短期地下水位変動に重要な影響を与えているのではないかと考えられる。今後、地下水資源のbasi内での統合管理体制確立への努力がなされるものと思うが⁶⁾、観測systemの再検討、有機的な揚水管理system、basin内の水理simulationなどに関連し、今回報告したような基礎的な性質の把握を前提に、地下水の適正利用の可能性を予測する必要がある。

最後に、本研究を進めるに当たり、資料収集に協力された埼玉県環境部水質規制課、大阪府生活環境部公害室水質課、および千葉県公害研究所の各位に深甚の謝意を表わす次第である。

参考文献・資料

- 1): 佐藤邦明、大阪平野の地下水位変動について、第18回水理講演会、S.48.2
- 2): 佐藤邦明・大塚孝雄、降雨による観測井地下水位の変動について、第30回土木学会年講、S.50.10
- 3): " "、気圧と地下水位変動の関係について、第3回土木学会関東支部年講、S.51.1
- 4): 佐藤邦明、地下水位変動と地盤沈下の時系列相関について、第11回自然災害シンポジウム、S.49.10
- 5): 佐藤邦明・渡辺邦夫、地下水位・地盤沈下時系列の統計的特性について、地下水学会、S.50.10
- 6): 通産省、首都圏地下水理総合大規模調査報告、S.50.