

# 湖水位の低下にもとづく沿岸農耕地の 農業水利上の影響圏について

末沢慶康・北村孝次郎<sup>※</sup>・豊国永次（農業工学研究室）

Yosiyasu SUEZAWA, Kogiro KITAMURA and Eiji TOYOKUNI

On Study of the Influence Circle of Agriculture (Irrigation)  
on Lake Coast due to the Falling of Lake Water Level.

## I ま え が き

湖水の開発と発展のために、これが単一あるいは多くの目的（発電、洪水調節、工業用水、かんがい用水など）に供せられる場合、一般に湖の利用水深は増大し、時期的に大巾の湖面低下がおこってくる。このような湖水低下は、湖岸に農耕地がひらけているときは、それらの農業水利にどのような影響を与えるであろうか。

まず、かんがい初期に湖面低下が回復していない場合、湖水を用水源とする湖面直接利用農耕地はもちろんのこと、湖沿岸の地下水を水源とする地下水利用地域においても取水に支障がおこってくる。また、湖面低下に伴って地下水位の低下する地帯においては、一般に浸透量の増加が考えられるから、水田用水量が大きくなって従来のかんがい水量では不足する田区が生じてくることがある。

このような現象は湖水の多目的開発において、特に電力と競合して冬季発電により湖水位が低下し、かんがい初期にまだ湖面低下が回復しない場合や、洪水調節のためにかんがい期中に湖面低下をはかる場合などにおこるものである。

非かんがい期に湖面低下がある場合は、これとは逆に湖沿岸の農耕地の排水はよくなり裏作物には好影響を与えるが、湖水を放流する河道沿岸の農耕地は流量増大のために排水不良をきたすであろう。

湖水をかん養している水源は降雨、湖にそそぐ諸河川及び湖周囲より流入する地下水などである。この地下水には自由地下水面をもって流れる不圧地下水と、不透水層の間にはさまれて圧力を受ける被圧地下水とがある。

本文では、この地下水について、湖水位低下に伴い沿岸地下水がどのように低下するか、そしてこの地下水低下に関連して取水施設におこる支障ならびに用水量増加の問題を、不圧地下水についてのみ取扱うことにする。

そして、不圧地下水低下により農業水利上、特に取水施設と用水量増加に影響を与える範囲を推定しようとするものである。

## II 湖水位低下が沿岸農耕地に及ぼす影響

湖水位が低下する場合、干陸地ならびに湖沿岸一帯に舟航、船着き場、漁業、井戸水、陸上交通、農業など多くの問題がおこってくるが、ここでは沿岸農耕地の農業水利上にかんする影響が、いかなる範囲に及んでくるかを考えてみることに限定する。なお、地下水は不圧地下水についてのみ考えることは前述の通りである。

その1は、湖水を直接水源とする湖面直接利用地域で、湖面低下によって既設の取水施設に支障がおこってくるものである。すなわち、ポンプで取水している場合は、ポンプの吸水槽の床面を低下させるか吸水管の延長をはかるか、また水路で導水している場合にはさらに深く水路を掘削しなければ導水できない事態が生じてくる。その2は、湖沿岸の地下水利用地域であって、湖水位の低下に伴い地下水が下降するので、湖面直接利用地域と同様に取水施設に支障がおこってくる。しかも、この場合地下水位の従前の高さとは異なる深さ、ならびに土性、地下構造のいかんによっては、水田用水量が従前より増大することが考えられる。

この取水施設に対する支障及び用水量増加の問題は、湖水位の低下に伴い地下水位の低下する範囲に及ぶことが一応考えられる。実際の問題取扱においては、過去のかんがい期平均湖水位ないしかんがい期最低平均湖水位に対する地下水位曲線と、湖水開発によって低下が想定できる計画湖水位に対する地下水位曲線とを比較対照して、従来のポンプの吸水管の延長、用水量問題について検討しなければならない。そして、それらの施設が改修あるいは新設を要する範囲を影響圏とみなすべきであろう。このように考えた場合、湖面低下に伴って低下するであろう地下水位曲線をいかにして算定するかを解明す

※ 農林省京都農地事務局

ることが最も重要な問題である。

### III 湖水位低下に伴い地下水位低下による農業水利上の影響圏の決定

#### (A) 湖水位低下に伴い地下水位低下による取水施設への影響圏の決定

##### (1) 地下水流の方程式

地下水流を不定流とみなした一般的な場合について、地下水流動の基礎式は次の如く表示される。いま x 軸を不透層に、Z 軸を鉛直上方にとり、単位巾に対する地下水流量を q とし、任意時間における地下水流の状態を示すと図-1 の如くなる。

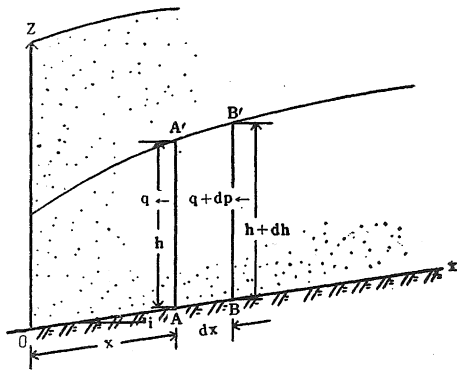


図-1 地下水が不定流な場合

水面こう配は、

$$I = i + \frac{\partial h}{\partial x}$$

であり、断面 AA', BB' なる単位巾の部分に dt 時間に出入する水量につき考えると、AA' 断面を通過して dt 時間に流出する水量は、

$$q dt = k h \left( i + \frac{\partial h}{\partial x} \right) dt$$

BB' 断面を通過して dt 時間に流入する水量は、

$$\left( q + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) dt = q dt + k \left\{ i \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} dx dt$$

dt 時間に両断面間に残留する水量は、

$$\left( q + \frac{\partial q}{\partial x} \right) dt - q dt = k \left\{ i \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} dx dt$$

である。この残留水量により水面が dh だけ上昇したとすれば、実際に増加した水容積は  $\lambda \cdot dh \cdot dx$  である。ここに  $\lambda$  は空隙率である。

$$\lambda dh dx = k \left\{ i \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} dx dt$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\lambda} \left\{ i \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

これは運動方程式として Darcy の式を用いた地下水不定流の基礎式である。不透層が水平であれば  $i = 0$  であるから、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\lambda} \left\{ \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

さらに、右辺第 1 項が第 2 項に比して無視できるときは

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\lambda} h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \dots \dots \dots (3)$$

(1)式~(3)式を初期条件、境界条件を与えて h につき解けば、各時刻、各場所の水位および流速を求めることができる。

次に、地下水流動が定常状態とみなされる場合には次の如くなる。

Darcy の法則より、

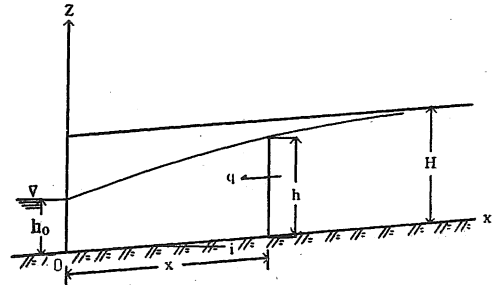


図-2 地下水が定流な場合 (不透水層が傾斜する場合)

$$V = k \left( i + \frac{dh}{dx} \right)$$

$$q = k h \left( i + \frac{dh}{dx} \right) \dots \dots \dots (4)$$

これを、境界条件  $\begin{cases} x = 0, & h = h_0 \\ x = \infty, & h = H \end{cases}$

を入れて解くと、(4)式は次の如く変数分離型になるから、

$$i dx = \frac{k i h dh}{q - k i h} = \frac{q dh}{q - k i h} - dh$$

これを積分すると、

$$i x = -\frac{q}{k i} \ln(q - k i h) + \frac{q}{k i} - h + C$$

$x = 0$  で  $h = h_0$  の条件より積分常数 C を求めると、

$$C = \frac{q}{k i} \ln(q - k i h_0) + h_0 - \frac{q}{k i}$$

$$\therefore i x = \frac{q}{k i} \ln \frac{q - k i h}{q - k i h_0} - (h - h_0)$$

また、 $x = \infty$  で  $h = H$  の条件より、 $H = \frac{q}{k i}$  の関係が導かれる。

したがって、

$$i \ x = H \ln \frac{H-h_0}{H-h} - (h-h_0) \dots\dots\dots(4)$$

が誘導される。

次に、不透水層が水平な場合には次式の如くなる。

岸より  $x$  なる距離における鉛直面で、単位巾あたりの地下水流量を  $q$  とし、Darcy法則を適用すると、

$$V = k \frac{dh}{dx}$$

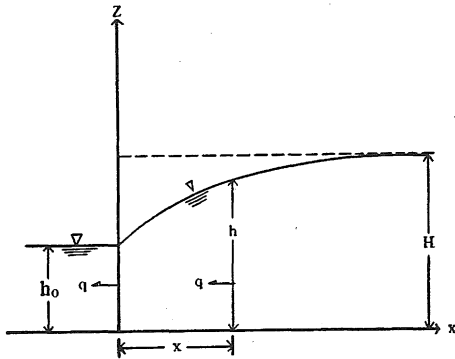


図-3 地下水が定流な場合（不透水層が水平な場合）

$$q = k h \frac{dh}{dx} = \frac{k}{2} \frac{dh^2}{dx} \dots\dots\dots(5)$$

これを、境界条件  $\begin{cases} x=0, h=h_0 \\ x=l, h=H \end{cases}$

を入れて解く。

すなわち、(5)式を積分すると、

$$q x = \frac{k}{2} h^2 + C$$

$x=0, h=h_0$  の条件より、

$$q x = \frac{k}{2} (h^2 - h_0^2) \dots\dots\dots(a)$$

また  $x=l, h=H$  の条件より、

$$q (x-l) = \frac{k}{2} (h^2 - H^2) \dots\dots\dots(b)$$

この(a), (b)両式より  $q$  を消すと、距離  $x$  と水位  $h$  との関係を示す式

$$h^2 = h_0^2 + \frac{(H^2 - h_0^2)}{l} x \dots\dots\dots(6)$$

がえられる。

また(a)式の  $x=l, h=H$  を入れると

$$H^2 - h_0^2 = \frac{2q}{k} l \dots\dots\dots(7)$$

(7)式は境界条件  $x=0$  で  $h=h_0$ 、 $x=l$  で  $h=H$  に対応する定常な地下水流量  $q$  との関係を示す式である。

(2) 算定式の検討

前項において誘導した地下水流に関する方程式は土性の均一性、不透水層の直線的变化、流れの  $x$  軸方向のみ

の一次元流などの諸仮定を含むものである。

ところで実際の自然流域をみる場合、上記いずれの仮定も厳密には満たされないものであるが、土性の均一性、不透水層の直線的变化の仮定は地域の平均値をとれば実用上差支えなからう。また一次元流としての仮定も、沼沢、河川、ゆう水などの影響とか地形の複雑性のある地域をのぞいては、一様なこう配で湖岸にいたるなだらかな地域については近似的に成立つたろう。地下水の流動は、降雨の地中浸入による地下水位への影響と、河川の直接流出量、地下水流出量、湖水面上の降雨、湖水面上の蒸発、湖水の貯留能力、湖水の流出能力などによる湖水位への影響とを考慮すれば、不定流として取扱うことが合理的である。しかし、このような複雑な問題の解明は個々の未解決を解明してえられるものである。そこで、本文では大規模なかつ貯水能力の大きい湖水では湖水位の変動が緩慢であり、かつ地下水流が定常とみなされる場合は、(4)式が成立するものとして検討をすすめていくこととする。

この(4)式を用いて湖岸から上流にいたる地下水曲線を推定する場合は、不透水層こう配  $i$ 、水位低下のおよばない湖岸より遠くへだたった地点での地下水深  $H$ 、座標原点における水深  $h_0$  をあらかじめ求めておく必要がある。

(a) 不透水層こう配( $i$ )の決定

試掘、電気探査などにより湖岸に直角な測線上の各測点の透水層の厚さを調査し、これらを結んでその測線の不透水層のこう配とする。

(b) 水位低下のおよばない地下水深  $H$  の決定

井戸観測、電気探査などによる地下水位資料から、湖岸より  $500m \sim 1,000m$  以遠にある井戸観測水位の平均値をだして  $H$  とする。

(c) 原点における水深  $h_0$  の決定

まずかんがい期最高湖水位線と水位低下のおよばない地下水位  $H$  の延長線との交点を求める。この交点を通る鉛直線が不透水層と交わる点を原点にとる。したがって  $h_0$  はこの原点から水面までの高さである。

(3) 湖水位と地下水位実測値との関係

まず、湖水位と観測井戸水位とのグラフから両者の日の変動状態を比較して、両者間に相関性の認められる井戸のみを採用し、それらの井戸の存する地域を大体影響範囲とみなす。ついで、この地域について、観測井戸の地下水位と上記の算定式に各項の実測値を代入して求めた地下水位とを対比検討する。その結果よく一致する井戸と、地形の錯雑性や河川、沼沢、ゆう水、人工のせきなどの影響であまりよく合わぬ井戸とがわかる。しかしながら、これらのあまりよく一致しない井戸は特殊な

条件下にあるものとみなすことができよう。したがって、相関性の認められる地域に対してはさきに求めた計算式があてはまるものと考えて、計画低下湖水位に対して湖岸地域内における地下水位曲線を推定することができる。

#### (4) 影響圏の決定

上述のごとく特殊な局地的影響をうけている以外の地域で、地下水位実測値と計算値とがよく一致すればその地域においては計算式の妥当性が実証されたわけであるから、(4)式を用いて計画の低下湖水位に対する地下水位曲線を算定することができる。一方、過去のかんがい期湖水位の資料から、かんがい期平均最低湖水位に対する地下水位曲線を算定することができる。これらの2つの地下水位曲線を対比してその影響地域に存するポンプの吸水管の余裕などを勘案して実用的な影響圏を決定すればよい。しかし、実際の場合に湖水位と地下水位との変動に相関性が見受けられても、観測地下水位曲線と(4)式によって算出した地下水位曲線とが一致しないことがある。しかし、湖水位変動に応ずる観測地下水位の変動量すなわち水位差と、それと同様な湖水位変動に応じて(4)式で算出した水位差とが一致することがある。すなわち、湖水位低下に伴ってさがる地下水位の低下量を知る上においては、(4)式の実用性が認められる。(V応用例参照)

#### (B) 地下水位低下による水田用水量増加圏の決定

##### (1) 地下水位の低下にもとづく水田用水量の増加

水田用水量は水面蒸発、葉面蒸発、地中浸透量の総和されたものであるから、地下水位の低下により水田用水量の影響を受けるのは地中浸透の項である。一般に地中浸透量は土性、土層の構成状態、土層の圧密程度などに著しく左右されるが、一面地下水位の位置により影響を受けることは大島一志氏、富士岡義一氏もすでに指摘するところである。その研究結果の本文に関係するところを要約すれば次のごとくである。

大島氏がびわ湖沿岸地域の地下水位と地中浸透量との関係を室内実験、ほ場試験によって考察した結果は次のようである。①地下水の低下につれて浸透量は一般に増加するが、地下水位が地表に近いところで低下するときは浸透量の増加率が大きく、地表から次第に深くなるにつれ増加率が減し一定値に近づく指数関数曲線で表示できる。②土壌の土性が埴質であるほど、また圧密度の大きいほど同一の地下水位に対応する浸透量は小さい。③表土層がその下の土層より埴質な場合、地下水位に対応する浸透量は下の土層よりも表土層の影響をつよく受ける。

また、富士岡氏は「土壌の鉛直降下浸透における負圧

発生機構に関する研究」により、普通の水田では、表土の下にやや不透水性の盤が形成されているから、このような場合には浸透量は不透層に左右され、あまり地下水位の昇降には影響されないと述べている。

#### (2) 地下水位の低下にもとづく水田用水量増加圏の決定

さきに求めた、湖水位に伴い地下水位の変動する影響圏内において土性、地下構造、減水深などの現地調査の結果に、上記の研究結果を参考にして用水量増加圏をきめればよい。なお、この場合室内実験やほ場試験を必要とすることが多いであろう。

### IV 調査観測事項

既に述べてきた湖水位低下に伴う沿岸地下水位の低下する影響圏及び用水量増加圏をきめるために要する調査、観測事項について述べる。

まず、地下水位低下の影響圏を概略見当ずけて、その圏内において次の諸調査を必要とする。

農業水利現況調査、湖周辺の深淺測量、地域内の標高関係調査、地下構造調査、土壌調査と用水量調査。

またこれと並行して次の観測が必要である。

湖水位観測、井戸水位観測、河川水位観測。

主な調査、観測項目について説明を加える。

#### (1) 農業水利現況調査

湖水位低下に伴う沿岸農地の農業水利に及ぼす影響を知るには、まず農業水利の現況を適確につかんでおかなければならない。この調査を大きく水源別に分類すれば、湖水の直接利用地域、地下水利用地域及びその他の水源利用地域である。

第1の湖面直接利用地域は湖水位低下に直接関係し、揚水施設の吸水槽、吸水管の改修、揚程増加による動力の増強、導水路の掘削など直接影響するとみられる地域である。

第2の地下水利用地域は湖水位低下により地下水位の低下をきたし、第1の場合とほぼ同様な影響が考えられる地域である。

第3の地域は湖水位低下と直接的な影響はないとみられる地域である。

第1の地域についてはポンプ、直接湖水取入の別に個所数とかんがい面積を、第2の地域については地下水利用ポンプの個所数とかんがい面積を調査するとともに、揚水施設の規模とくにポンプの型式、吸水管の長さ、原動機の馬力、導水施設などを調べる必要がある。

#### (2) 土壌調査および用水量調査

この調査は地下水位の低下に伴う用水量増加圏の決定

に関連して必要となってくるものである。土壌調査は地表下の1米位迄の柱状図が必要なので、湖岸に適当な間隔に直角をなす測線を設け、その線上に適当な間隔に試掘点を選び、土壌の柱状状態を調査する。もちろん土性図があれば重要な参考資料になる。用水量調査は一般に行われている減水深の実測で、地下水低下による用水量増加算定の基礎となる。

(3) 深淺測量調査

この調査は湖水位低下時にいかほどの干陸があるかということ、既存農業水利施設（湖面直接利用のための構造物）の改修、干拓計画など地域全体の総合的な農業水利計画の樹立に必要である。この場合、湖水の計画低水位よりいくらかの余裕をみこんで、深淺測量をおこない等深線図をつくる。

(4) 標高関係の基礎調査

湖水位、地下水位、地盤及び農業水利施設の正確な標高関係を知るために、正しい水準点をもとに水準測量をおこない、標高関係を検討しておく必要がある。

(5) 地下構造調査

測線を湖岸線にほぼ直交するようにとり、その線上に適当な間隔に測点を選ぶ。この測点において試掘や電気探査をおこない、不圧状態にある地下水層の厚さおよび不透水層のこう配を求める。

(6) 湖水位観測および井戸水位観測（地下水調査）

地下構造調査と同様に湖岸線に直交しかつ適当な間隔をもつ測線上に、既設井戸あるいは新設井戸を適当な間隔に設ける。かくして、湖水位を毎日定刻に観測し、両者の値を1つのグラフに画いて比較検討する。その結果、両者の水位変動に相関性がみられる場合は、湖水位の変動に応じて地下水位が変動する地域とし、両者の間に相関性の見られない場合は一応影響しない地域とみなす。ここで注意すべきことは、湖水位変動との相関性のない、ないしはうすい井戸に河川沿岸、湖沼の附近、地形地勢の急変するところか、村落その他諸施設に近接していて、これらの影響が湖水位のそれよりも強力にはたかっている場合が多い。したがって、かかる諸原因をたしかめた上は観測続行の必要はなくなり、影響範囲を縮めていけばよい。

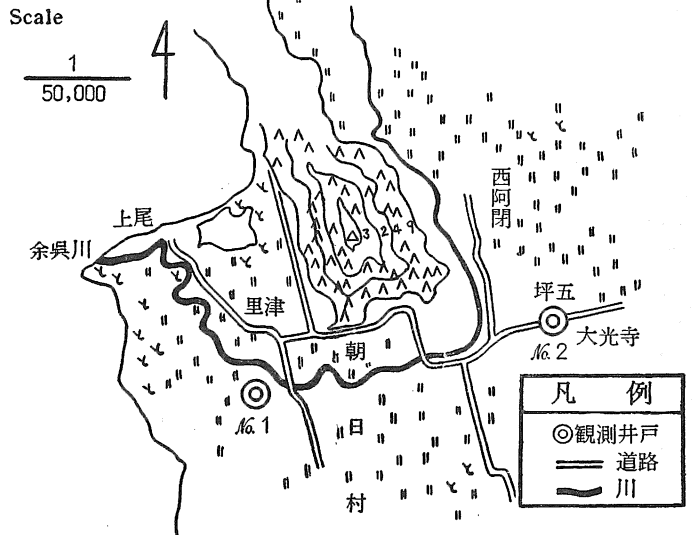
縮小された影響圏において、さらに測線

数を増したり、測線上の観測井戸数を増して観測の完全をはかるべきである。

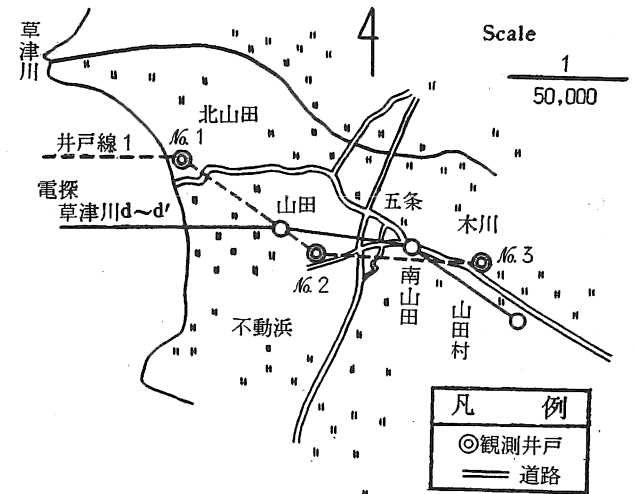
前節にのべた算定式は、上記の局所的諸影響をうけた井戸をのぞいて、その他の相関性の認められる井戸に適用できるのである。

V 応 用 例

びわ湖を利水、治水の両面より総合開発する計画があり、農林省京都農地事務局において湖水位低下に伴う湖岸農地におよぼす影響調査が行われ、同時にそれに対する方策がたてられた。ここにその調査資料をもととして湖水位と地下水位との相関性のない場合（図一4-a、



図一4-a びわ湖水位と地下水位とに相関性のない土地の平面図



図一5-a びわ湖水位と地下水位とに相関性のある土地の平面図

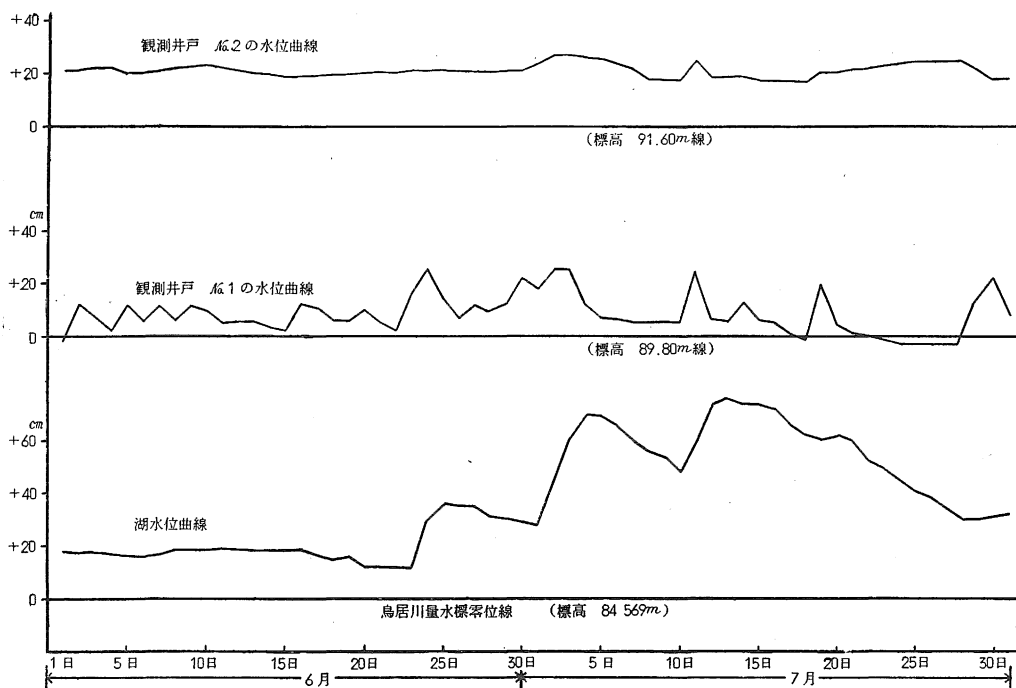


図-4-b 図-4-aの観測井戸水位とびわ湖水位との関係

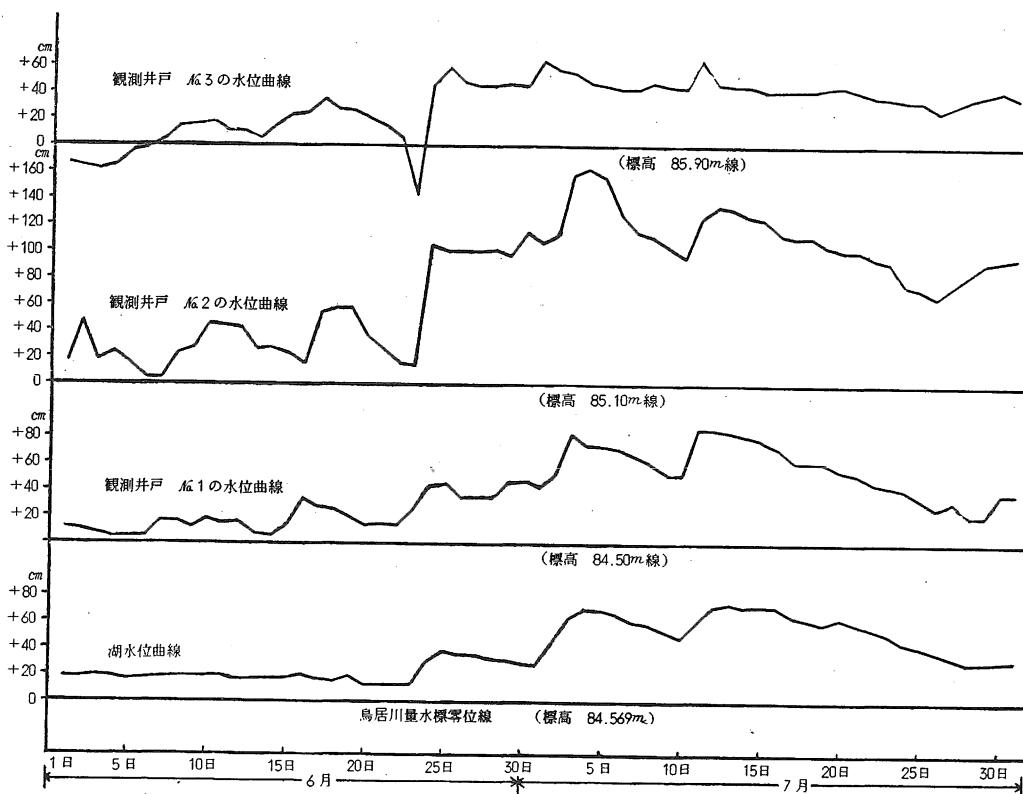


図-5-b 図-5-aの観測井戸水位とびわ湖水位との関係

4-b), 湖水位と地下水位との相関性の高い場合 (図-5-a, 5-b) をかかげた。

つぎに, 相関性の高い場合, 湖水位+60cmに対する湖岸農地の地下水位と, 湖水位-7cmに対する湖岸農地の地下水位との水位差を, 計算値と実測値について対比し, 表-1および図-6に示した。

なお, 図-6は, びわ湖水位を総合開発のために, たとえば1.30m低下する場合, 過去昭和5~21年のかんがい期平均湖水位 (+23cm) に対して低下する水位差すなわち1.53mに対して(4)'式によって算出した地下水位曲線と, 湖水位+0.23mに対する算定地下水位曲線との差を示すものである。

### 参 考 文 献

- (1) 物部長穂：水理学 1953.
- (2) 永井荘七郎：水理学 1957.
- (3) 農林省京都農地事務局：びわ湖総合開発計画書 (未公表)
- (4) 大島一志：地下水位の変化に基く水田用水 (特に地中浸透量) の相対的増減関係とその動態に関する研究. 農業土木研究. 21巻1号. 1953.
- (5) 大島一志：地下水位の変化に基く水田用水 (特に地中浸透量) の相対的増減関係とその動態に関する研究 (II). 農業土木研究. 21巻6号. 1954.
- (6) 富士岡義一：土壤の鉛直降下浸透における負圧発生機構に関する研究 (II). 農業土木研究. 23巻5号. 1955.

表-1 昭和27年7月21日および9月6日のびわ湖水位±67cm変化時の地下水位観測値と計算値

井戸番号	湖岸よりの距離	直線番号	電探測線名	実 測 値			計 算 値		
				7月21日水位高 (+60)	9月6日水位高 (-7)	水 位 差	7月21日水位高 (+60)	9月6日水位高 (-7)	水 位 差
1	100	1	草津川	85.124	84.474	65.0	85.382	84.740	64.2
2	700	1		85.980	85.391	58.9	86.650	86.140	51.0
3	1,900	1		87.800	87.490	31.0	89.165	88.83	33.5

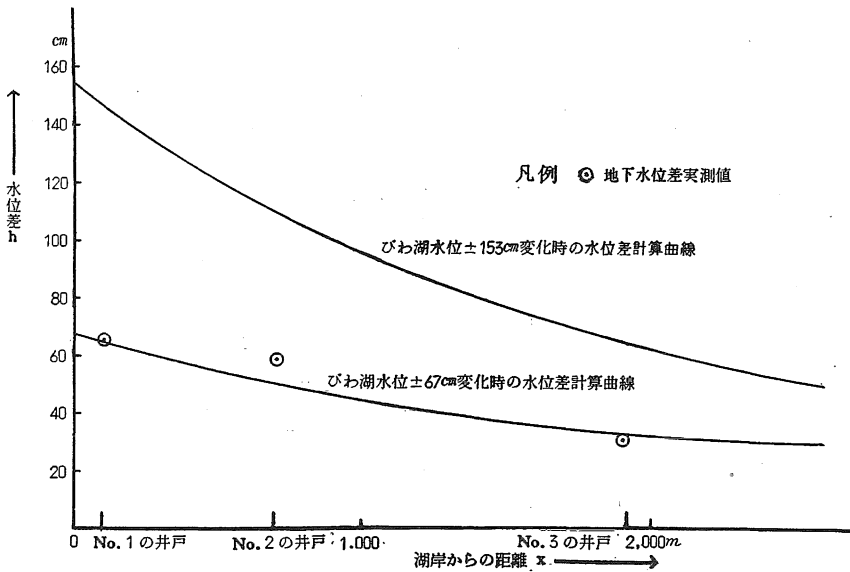


図-6 びわ湖水位低下による沿岸地下水位の低下量の計算値と実測値の比較及び湖水位153cm低下の場合の地下水位計算曲線