

## 地下水揚水に伴う影響圏の水理学的検討について

高瀬 信忠\* 布本 博\*\*

### On the Hydraulic Study of the Influence Circle Accompanying Pumping Ground Water

by

Nobutada TAKASE and Hiroshi NUNOMOTO

#### Abstract

The rain water and thaw water which penetrated into the ground fill a gap of the underground earth, and flow through the stratum of least resistance under the influence of gravity. If the rain water and thaw water meet with impermeability layer, they will stay on it and shape water-bearing stratum. This is so-called ground water. The vertical shaft which are made in order to pump ground water from water-bearing stratum in the ground, is so-called a well. If the water of this well is pumped out successively, the ground water level will drop and soon become a constant water level, and also keep a constant pumping capacity. This is so-called pumping capacity of a well.

In this paper, we study the ground water level, pumping capacity and the influence circle accompanying pumping ground water from the aspect of hydraulics ect., as a study of allowable limit in the ground water development in order to discuss that we are able to use the ground water to the full extent. By this study, we analyze that there are some very interesting relations between them. The result obtained here would contribute much to the pumping capacity of the ground water etc. that the hydraulic characters in the ground water are discussed at present.

#### 1. はじめに

地中に浸透した雨水や融雪水は、地下の土砂の間隙を満たし、重力の作用で抵抗の少ない地層を流れることになり、もし不透水層に出会うと、水はその上に停滞して滞水層を作るわけであるが、これが地下水である。地下の含水層から地下水を汲み上げるために設ける堅坑を井戸というが、水理学では深さの大小に関係なく、井戸の底が不透水層に達するものを深井戸、達しないものを浅井戸と呼んでいる。また、上下の不浸透層にはさまった含水層から、被圧地下水を汲み上げる井戸を掘抜井戸というが、井戸の水を連続的に汲み上げると地下水面が低下し、やがて一定の水位となって汲み上げ量も一定となる。これが井戸の揚水量といわれるもので、地下水揚水に伴う影響圏は通常井戸の半径の

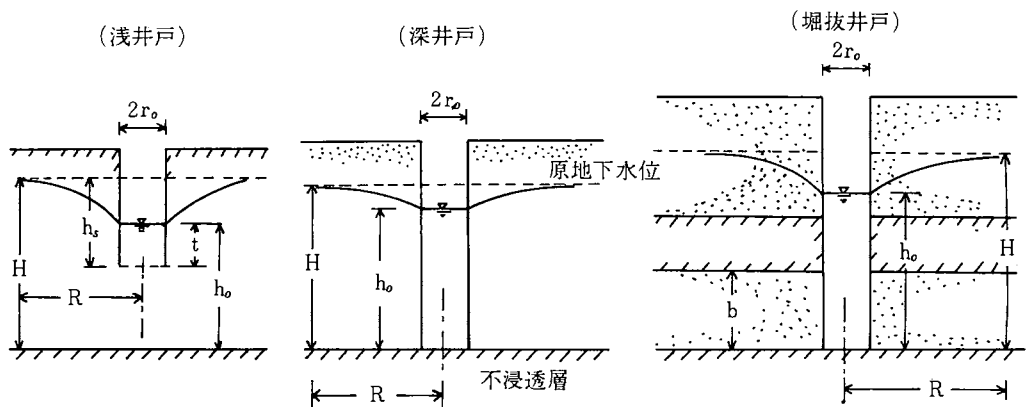
\* 土木工学科 \*\* 石川工業高等専門学校

3000~5000倍,または500~1000m程度とみられているが<sup>1)</sup>,いまだに未解決の問題となっている。とくに土地開発や工業化が進むにつれて,全国的にも地下水の汲み上げによる水位の低下や地盤沈下などの進行が問題となっている現状である。

地下水は,われわれ人類の生存に不可欠な水資源の源泉となるものであり,そして水資源については最も恵まれているわが国ではあるが,とくに地下水においては最近枯<sup>こ</sup>渴<sup>かつ</sup>しており,そのため今日では各地で地下水汲み上げの規制が行なわれるようになってきている。本論文では,地下水はどこまで利用できるか,すなわち地下水開発許容限界の一研究として,地下水位,揚水量および影響圏などについて水理学的な面からの検討を加えたものである。

## 2. 井戸の揚水量公式

浅井戸,深井戸,堀抜井戸は第1図に示すとおりで,各井戸の揚水量は一般に次式が用いられている<sup>2)</sup>。



第1図 各井戸の断面図

### 1) 浅井戸

フォルヒハイマー (Forchheimer) 公式

$$Q = \frac{\pi k}{2.30 \log_{10} \frac{R}{r_0}} \cdot \frac{H^2 - h_0^2}{\left(\frac{h_0}{t + 0.5r_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_0}{2h_0 - t}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (1)$$

ドグリー (de Glee) 公式

$$Q = \frac{4\pi k(H - h_0)}{\frac{4.6}{h_s} \log_{10} \frac{\pi h_s}{2r_0} + \frac{0.20}{H}} \quad (2)$$

### 2) 深井戸

$$Q = \frac{\pi k(H^2 - h_0^2)}{2.30 \log_{10} \frac{R}{r_0}} \quad (3)$$

## 3) 堀抜井戸

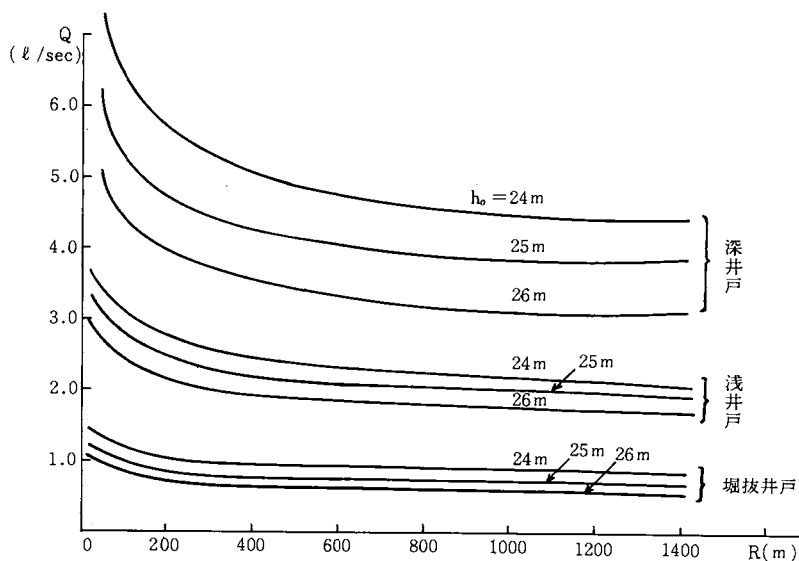
$$Q = \frac{2\pi kb(H-h_0)}{2.30 \log_{10} \frac{R}{r_0}} \quad (4)$$

ここに、 $Q$ は揚水量、 $R$ は影響圏（影響半径）、 $k$ は透水係数、 $r_0$ は井戸の半径、 $H$ は滞水層の下端から最初の水面までの高さ、 $b$ は堀抜井戸における被圧滞水層の厚さ、 $h_0$ は井戸の水位、 $t$ は浅井戸における井底から水位までの高さ、 $h_0$ は浅井戸における井底から地下面までの高さであるが、水理学的検討を行なうために井戸の直径、地下水位などは次のように仮定した。

井戸の直径( $2r_0$ )=30 cm, 地下水位( $H$ )=30 m, 浸透係数( $k$ )= $0.4 \times 10^{-4}$  m/sec,  $t = 5$  m,  $b = 5$  mとし、また地下水位および井戸の直径が変化した場合などについても同様に検討を行なってみた。

3. 揚水量 ( $Q$ ) と影響圏 ( $R$ ) との関係

井戸の水位 ( $h_0$ ) が 24 m, 25 m, 26 m の場合における各井戸（浅井戸においてはフォルヒハイマー公式）の  $Q \sim R$  の関係を第2図に示してあるが、傾向としてはどの井戸も同じで、 $R$  の小さい間は  $Q$

第2図  $Q$  と  $R$  の関係

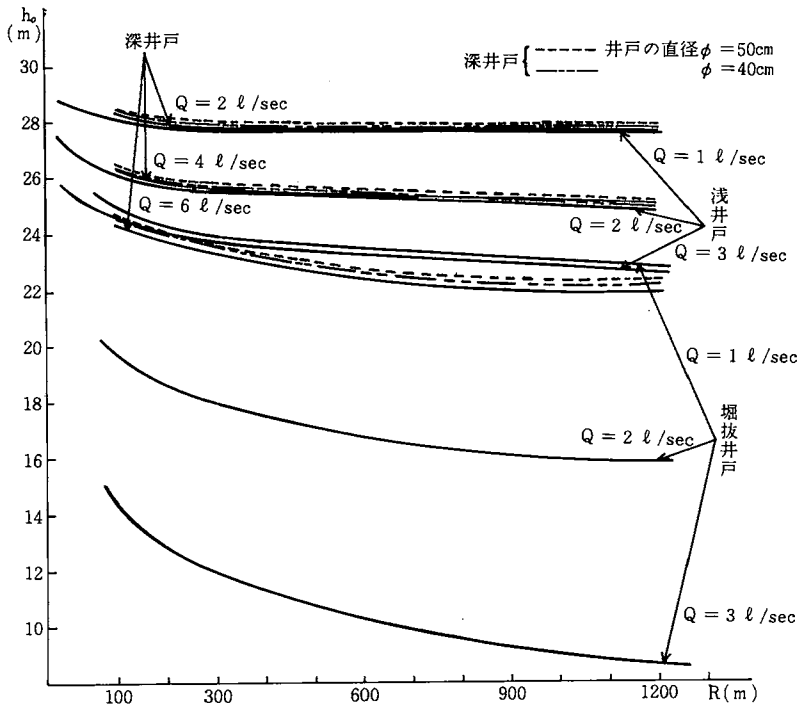
の変化が大きく、 $R$  が大きくなるにつれて  $Q$  はほぼ一定値をとるようになっている。堀抜井戸は深井戸に比べ水位の変化は揚水量に与える影響は小さく、僅かな影響半径で一定の揚水量をとるようになっており、また同水位に対して揚水量は非常に小さい値となっている。一方、浅井戸は深井戸と堀抜井戸のほぼ中間的な値である。井戸への地下水流入量は深井戸は不浸透層まで達しているので  $Q$  は最も大きくなることは当然予想できるが、浅井戸、堀抜井戸の場合は  $t$  および  $b$  に大きく左右されるようである。もし、浅井戸、堀抜井戸の揚水量  $Q$  が同じようになるには、(1)と(4)式が等しいという条件より

$$b = \frac{H+h_0}{2\left(\frac{h_0}{t+0.5r_0}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{h_0}{2h_0-t}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (5)$$

の関係が満足しなければならず、例えば井戸の水位が 24 m の場合には  $b$  は 14.36 m もなければ浅井戸の揚水量に等しくならないことになる。すなわち、同じ井戸水位に対しての揚水量は深井戸が最も大きく、浅井戸、掘抜井戸の順となることが認められる。

#### 4. 井戸の水位 ( $h_0$ ) と影響圏 ( $R$ ) との関係

第 3 図は  $h_0 \sim R$  の関係を示したもので、浅井戸、掘抜井戸では  $Q$  が 1 l/sec, 2 l/sec, 3 l/sec の場合、

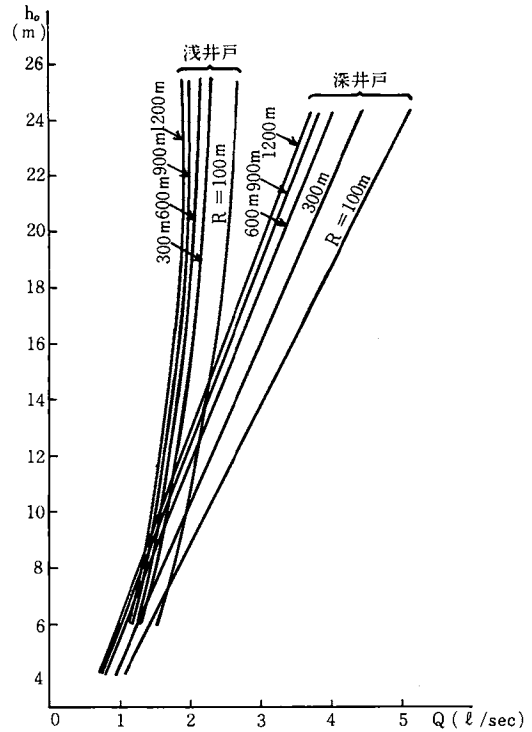


第 3 図  $h_0$  と  $R$  の関係

深井戸では  $Q$  が 2 l/sec, 4 l/sec, 6 l/sec の場合のものである。揚水する場合、深井戸では僅かの低下であるのに対して掘抜井戸はかなり大きく低下するようで、井戸水位は同じ揚水量に対して深井戸、浅井戸、掘抜井戸の順に低下していることがわかる。例えば、 $Q = 2$  l/sec および  $R = 1000$  m に対する各井戸の  $h_0$  は深井戸では約 27.55 m、浅井戸では約 25.12 m、掘抜井戸では約 16.0 m である。また、井戸の大きさ（直径）の影響をみるため、深井戸の場合について  $r_0$ （半径）が 20 cm, 25 cm の場合に関する影響をみたのが同じく第 3 図に点線で示されているが、非常に小さいことがわかるであろう。

## 5. 井戸の水位 ( $h_0$ ) と揚水量 ( $R$ ) との関係

第4図、第5図は影響圏 $R$ が100 m, 300 m, 600 m, 900 m, 1,200 mの場合について  $h_0$  と  $Q$  の関係を示したもので、第4図における浅井戸は  $t$  が5 mで一定とし、 $h_0$  が変化する場合のものである。 $h_0$  の小さい間は $Q$ に僅かながら影響を及ぼすが  $h_0$  が大きくなると $Q$ がほぼ一定値をとるようになる。深井戸では  $h_0$  が浅井戸と同様に变化する場合のものであるが、直線的な傾向を示し影響半径  $R$  が大きくなるにつれて急勾配となっている。第5図は前述のとおり、 $H=30$  m,  $t=5$  m,  $b=5$  mが一定で  $h_0$  が変化する場合のもので、どの井戸も  $h_0$  の減少につれて流量が増加の傾向を示している。浅井戸では僅かではあるが凹曲線の下降、深井戸では凸曲線の下降、掘抜井戸では直線的な下降を示していることがわかる。深井戸の場合については、とくに井戸の大きさ(直径)の影響をみるため、半径  $r_0$  が20 cm, 25 cmの場合について同図に点線で示した。これより井戸の径が大きくなるにつれて $Q$ に対する  $h_0$  の値は大きくなっていることがわかるであろう。また井戸の水位  $h_0$  が大きい間は径の大きさによる影響は小さいが、 $h_0$  の低下に伴い顕著になっていることもわかる。

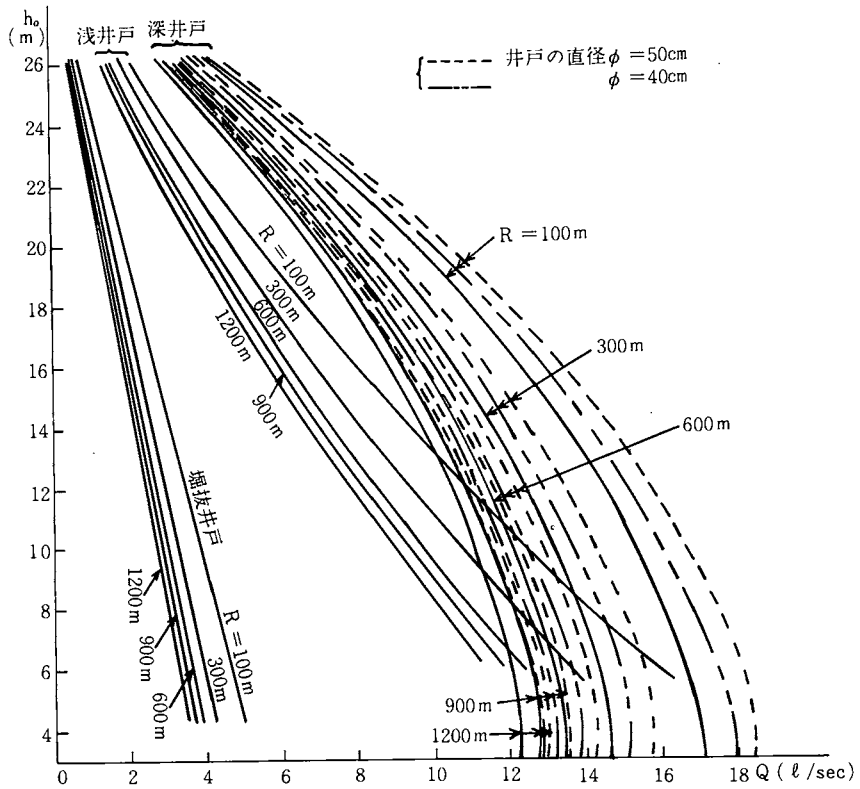


第4図  $h_0$  と  $Q$  の関係 (その1)

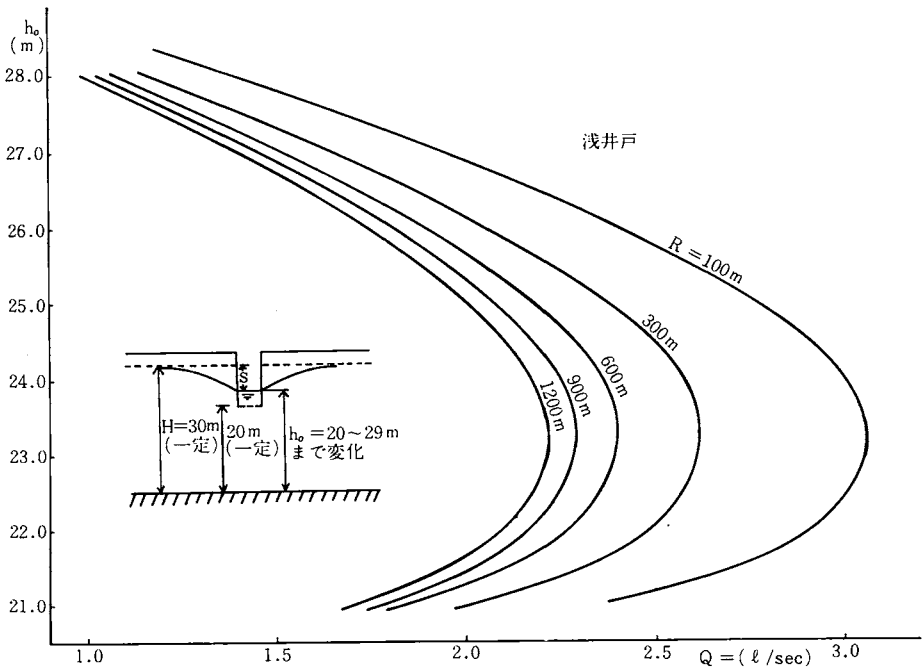
第6図は浅井戸における $H$ が30 mで一定、 $t$ は $h_0$ と共に变化する場合のもので水位  $h_0$  の減少につれ $Q$ は増大するが、 $h_0$ が23 mをピークとして減少する傾向が認められる。これは  $h_0$  が23 mを境として減少すると井筒の集水面積が小さくなり(井筒の下端水位を20 mの一定と仮定しているため)、集水面積に制約されて $Q$ が減少するものと考えられる。したがって  $Q$ の減少する部分にまで(1)式を適用して差し支えないか否かについては問題があるであろうが、大変興味深いことのようにも思われる。第7図は浅井戸におけるドグリー公式を適用した場合のもので $H$ が30 mで一定とし、水位  $h_0$  が変化する場合のもので、第1図における  $h_0$  が10 m, 15 m, 20 mについて検討したものであるが、その結果は直線関係で表わされ、 $h_0$ の低下に伴う $Q$ の影響が非常に大きいことを示している。

## 6. 井戸の合理的配置について

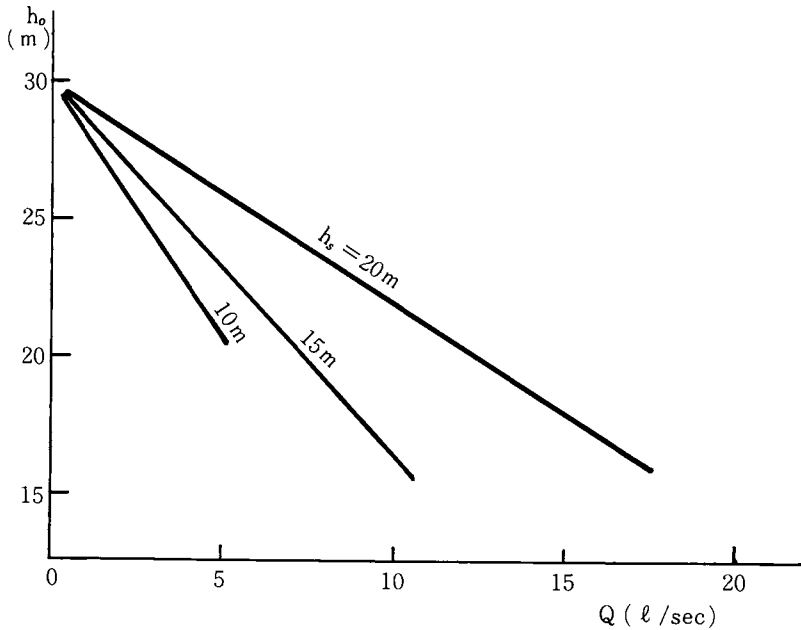
前述の第4図および第5図などからも浅井戸1本あたりの揚水量は、深井戸のそれに比べて著しく少なくなっていることがわかる。もし同程度の揚水を求めようとするならば、数か所に分散して井戸を設置しなくてはならないことになる。この場合に問題になるのは井戸の相互干渉であろうが、ここでは浅井戸を例として井戸の合理的配置について考えてみよう。



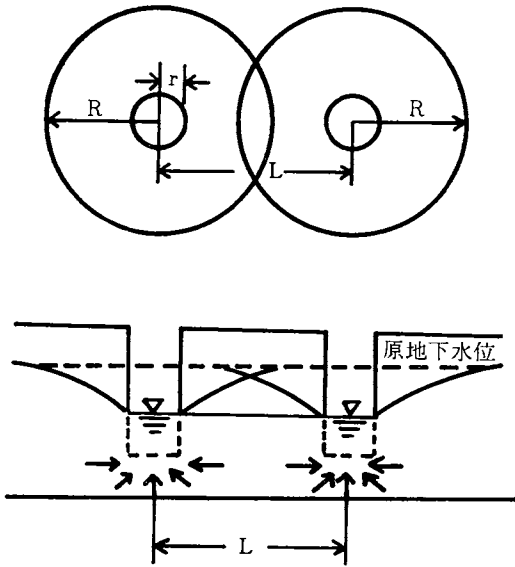
第5図  $h_0$  と  $Q$  の関係 (その2)



第6図  $h_0$  と  $Q$  の関係 (その3)



第7図  $h_0$  と  $Q$  の関係 (ドグリー公式によるもの)



第8図 井戸の干渉

いま、第8図に示すとおり、井戸の中心間隔が井戸の影響圏(半径  $R$  の円)より大きいときは、これらの井戸から水を同時に汲み上げても流量には変化がないが、中心間隔が影響圏より小さいときは影響圏は互に干渉して、井戸の間における地下水位が著しく低下し流量が減少することとなる。井戸の影響圏についての考え方として、最近では井戸理論から影響圏を決定するより、相互干渉を容認したうえ相互干渉による不利益と、井戸に接近させて設置する利益とを経済的な見地から判断する方向に変わってきているようである。しかし、井戸の配置を合理的に計画するためには、影響圏を考慮に入れて設定するのも重要なものと思われる。

浅井戸の場合、井戸内水位の低下量と揚水量および影響圏との間には一種の最適解が存在するであろうが、この場合、相互に干渉しない井

戸間隔 ( $L = 2R$ ) を 200 m にしたい時、最大揚水量を得たいとすれば、水位低下量をどこに求めたらよいかという問題に対しては、 $L = 2R = 200$  m、すなわち、第6図より  $R = 100$  m における  $Q$  の最大値に対する  $h_0 = 23$  m であるから、

$$s = H - h_0 = 30\text{m} - 23\text{m} = 7\text{m}$$

で、井戸内水位 ( $s$ ) は 7 m となり、最大揚水量は同じく第6図より 3.07 l/sec となる。この図より  $h_0$

を固定して考えた場合は、影響圏 $R$ が増大しても最大揚水量 $Q$ の減少は、それ程大きいものでないことがわかるであろう。しかし、最大揚水量を求めるためには、ただ単に水位低下の増大だけでは目的を達成することのできないことはもちろんであり、いろいろな条件での最適解が存在するものと思われる。

地下水揚水に伴う採水技術の井戸理論は、未だ検討すべき問題点も多いのであるが、井戸を中心として任意の半径 $R'$ をもつ1つの円筒を考えると、この円筒の周囲や底の面を通して井戸に流れ込む水量は、井戸から汲み上げる揚水量に等しいわけであるけれども、汲み上げる揚水量が多くなれば井戸付近の水面勾配が大きくなって、これに対処してゆくものと思われる。

## 7. お わ り に

都市開発や工業化が進むにつれ、北陸地方でも地下水の汲み上げによる地下水位の低下や塩水化の問題、地盤沈下や酸欠空気発生の危険性が深刻化していると指摘した、北陸地下水研究会（会長、塚野善蔵福井大学名誉教授）の水の報告書が先日発表された<sup>3)</sup>。石川県内では最近10年間に金沢市の地下水位が15 mも下がり、七尾市では最近3年間に17cmの地盤沈下が起きていること、将来は東京などで発生している地下における酸欠状態の恐れが指摘され、水利用のあり方を考え直すよう同報告書は訴えている。地下水資源の開発と利用や保全には、常に科学的で正当な裏付けが必要であるが、地下水位の低下や地盤沈下などの災害を防ぐためには、地下水揚水に伴う影響圏を把握することが先決問題となるであろう。しかし、この影響圏 $R$ の値を正確に知ることは難しいのであるが(1), (3), (4)式からもわかる通り、 $R$ は式中において対数関数として入っているため、 $Q$ の値にそれ程大きな影響を与えないように考えられるが、一般に $R$ は $r_0$ の約3000~5000倍、または約500~1000 m位といわれていることは前述した通りである。しかし、あくまでもこれは影響の少しでも及ぶ区域内であって、大きな影響の及ぶ区域は地下水の流れる水面勾配などから考えて、ある程度の範囲に限られるであろうとも思われる。なお、地下水揚水に伴う影響が人家などに及ぼす影響がとくに心配であれば、人家などを少し離れて地下水揚水機場などを作ることも考えなければならぬであろう。本研究によって、地下水揚水量( $Q$ )、地下水位( $h_0$ )や影響圏( $R$ )などの間には非常に興味のある関係がみいだされたのであるが、このような地下水の水理学的特性が現在問題となっている地下水揚水の面などに寄与するところが少なくないものと考えられる。

最後に本研究を進めるに当って、北陸地下水研究会および北陸さく井業協会の御援助と御協力をいただいたことを付記し、関係者各位に対して深甚の謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎：水理学（標準土木工学講座6），コロナ社，昭和32年6月。
- 2) 土木学会：水理公式集（昭和38年増補改訂版），昭和38年8月。
- 3) 北陸地下水研究会：北陸地方の地下水資源（その現状と対策），昭和49年2月。

（昭和49年5月9日受理）