

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	奥野 日出
学位授与の日付	平成23年11月30日	
論文名	地下構造可視化に基づく地下水賦存の解明と実用的な揚水井モデルの構築に関する研究 －環境資源としての揚水井の適正な調査及び管理に向けて－	
論文審査委員	主査	小山 修平
	副査	堀野 治彦
	副査	増田 昇
	副査	山田 宏之

論文要旨

第1章 研究の背景と目的

近年、全国の地域地下水盆では、地下水の採取規制により地下水位が回復し、地盤沈下は沈静化の傾向にある。しかしながら、現在も生活用水、農・工業用水の深井戸利用は多く、豪雪地域の消雪用地下水並びに渇水期の地下水利用の急増によって地盤沈下が生じる場合もある。また、今後の地下水利用の合理化やニーズの変化（いわゆる名水や健康水として活用）に伴い、健全な水循環を保全するための地下水管理に関する再整備が不可欠となっている。さらに、地域地下水管理には、水環境保全の観点から地下水汚染防止も重要であり、地下水の採取規制と合わせて自然流下ないし揚水に伴う地下水流動のシミュレーションや涵養機能の把握が必要となっている。したがって、地下水の保全目標は、地域全体の地下水位の維持、水質保全及び地盤沈下の防止などであり、それには適正な揚水量のあり方に注目する必要がある。適正な揚水量とは一般に井戸から汲み上げられる層流域での最大量(限界揚水量)に安全率を乗じた揚水量をいい、その値に地方条例で規制された低減揚水量が適正な揚水量である。限界揚水量を超えた過剰揚水は、帯水層を乱し井戸周囲の間隙を塞いで井戸構造を劣化させる。この被害とは別に、地域全体の地下水位を下げて地盤沈下を起こす場合があり、これが近年、発生した全国での地盤沈下の原因であるといわれている。従来、揚水による被害の原因は、井戸の基礎理論となる従来の井戸公式と地盤構成モデルが自然地盤の条件を満たしていないことや最も重要な限界揚水量を高精度で推定できる実用的な解析手法が確立されていないことによるものである。したがって、本研究では、好適な地下構造可視化技術を用いて地下水盆下の地下水賦存状態を明らかにし、実際の揚水挙動が井戸理論に整合しない結果に対して、その問題解決法として実用的な揚水井モデルと井戸損失式を構築することである。さらに、地域地下水盆の流動形態は、広域・中間・局所と多様であることから、地域の地下水環境保全を目標とし、揚水に

おける周辺地下水の状態を把握するために実用的かつ基本的なシミュレーションモデルを作成し検討する。

第2章 研究手法

第2章の前半は、井戸理論に基づき地下水流動の影響圏内の井戸について、層流域が成り立つ平衡説と非平衡説における理論展開から求められる実用性と問題点を示した。この両井戸理論説は、共に単純な単層貫通井モデルであることから、実際の地下構造をなす多種多様な地質構成に対する実用井戸モデルには、そのまま適用し難いため、後半では多様な地質地下構造を、より精度良く調査できる手法の特徴と精度の限界を明らかにした。次に、地下構造可視化技術として垂直電気探査法や電磁探査法（CSAMT）などと実際の地質試料を採取するボーリング調査及び地下水量を知るための揚水試験について述べた。これらから、多様な地域の地下水盆地の地下構造と地下水賦存量を把握できる地下水調査として好適な技法を得ることができたと考えられる。

第3章 典型的な盆地下の水理地質構造解析の調査事例その1

ー滋賀県湖北盆地下の地下水賦存についてー

第3章では、第2章で示した垂直電気探査法とボーリング調査、揚水試験によって典型的な滋賀県湖北小盆地の地下構造と地下水賦存を解明し、消雪用水の深井戸に関する地下水管理と地域環境保全に関する基礎資料をまとめた。当地域では、予め既往地質資料の評価により、比較的水平的多層構造をなす地下構造を可視化するには、探査深度100mが可能な垂直電気探査法が相応しいと判断した。次に、ここでは中生代堆積岩類、火成岩類、新生代更新世・完新世の地層における測定物理定数として電気比抵抗値(地下構造可視化成果)を計測すると共に、ボーリング調査と合わせて地域の地質構成を明らかにした。また、ボーリング調査時と揚水試験によって帯水層での水理定数を把握した。さらに、地下水流動モデルに必要な地下水ポテンシャルと地下水涵養について、降雨量、蒸発散量及び水田の減水深から影響要因を抽出し、揚水と水循環機構の関係を明らかにした。

第4章 典型的な盆地下の水理地質構造解析の調査事例その2

ー兵庫県淡路島中部台地下の地下水賦存についてー

第4章では、花崗岩地帯の小盆地を代表する兵庫県淡路島中部における台地下の地下構造と地下水賦存を第2章に示した電磁探査法(CSAMT)により解明し、農業用水の深井戸に関する地下水管理と地域環境保全に関する基礎資料をまとめた。当地域では地質踏査による東西の花崗岩類の上昇地塊に挟まる大阪層群の相対的沈降に起因する基盤起伏が想定されたため、今まで地下水調査の公表事例がほとんど無い電磁探査法(CSAMT)を採用し調査した結果、地下水盆地の形状と断層・リニアメント構造を捉えることができた。これより、基盤岩凹部の断層・撓曲が隣接する位置を水源開発地点に選定した結果、豊富な地下水賦存量を確認することができた。また、既設井戸の台帳より資料分析を行い、区分された小盆地での揚水源が地形地質の要因に支配されるという地域特性を見いだした。さらに、第3章と同様に、地下水涵養と水循環機構に関して、降雨量、蒸発散量及び水田の減水深による影響要因を示し揚水と水循環機構の関係を明らかにし、実用的な揚水井モデルの構築に向けて基礎資料を得ることができた。

第5章 地域地下水環境保全に関する揚水井モデルと井戸損失式の提案

井戸公式は、一般に井戸理論の平衡説及び非平衡説を問わず完全貫通井としてモデル化されている。しかしながら、全国井戸台帳によると、深井戸は帯水層の地質構成に基づき、多層スクリーンを有する不完全貫通井戸が多く、これは施工コスト面を踏まえて、さく井から得られる複数の帯水層によって豊富な揚水量が得られることと、目標とする揚水量の確保は、できるところまでのさく井深さで十分あるという考えに基づいている。この井戸構造に関しては、20世紀初期に国内外の多くの論文・報文などに示されているが、これらは穏やかな層流での公式に留まり、また、地下水管理に有効な水理定数の具体的な指標が見あたらない。すなわち、本来、地下水流の状態変化と透水係数の異方性を表わすべきであるが、これらの値を高精度で測定することが極めて難しいからである。

そこで、本章では、平均透水係数と井戸孔の深さより透水量係数に対して補正係数を用いることを基本とした新しい揚水井モデルを構築し実用かつ合理的な解析方法を導いた。特に、地下水関連の研究者らの数多い事例からも単層モデルの理論解析が実際に適合しなかったこと、すなわち帯水層の厚さが半無限で一定でないため適合しなかった単層モデルを実用的な多層モデルに改良した。この結果、今まで代表的な非平衡説に関する乱流域と区別ができ、井戸構造の要素と地域固有の水理特性値を反映できる平衡説に沿った非線形層流式を構築した。本式を用いることで、地域地下水盆において浅井戸、深井戸に関係なく過剰揚水を発生させない安全な設計揚水量を導くことができた。すなわち、本揚水井モデルと井戸損失式は実用性に適合し、深井戸の長期使用の確立と地域地下水保全に寄与できることを明らかにした。

第6章 地域地下水流動シミュレーションによる水理保全と今後の揚水試験法の在り方

地域の水環境保全と新たな水源開発が必要な地域では、モニタリングとシミュレーションが可能な帯水層モデルを作成しておくことが望まれる。このため、既設井戸や新設井戸との相互干渉を避け、過剰揚水による恒常的かつ傾斜的な水位低下や井戸性能の経年劣化を防止し、地域の水環境を損なわないような適正な揚水量の管理に十分な配慮が必要である。本章では、地域の地下水盆に適用でき基本となる原型の帯水層に関する諸要因の整理を行い、井戸の稼動状況から水環境状態を把握するために、基本モデルに対し準3次元有限要素法による地下水シミュレーションを行った。これは、井戸枯れや地盤沈下等の地下水問題の有無、新設井戸計画、掘削工事に対する影響などの評価を地下水流動や水頭変化等より予測するために有効であると考えられる。今後は精度の高い境界条件を踏まえて地域地下水のモニタリングシステムを構築しなければならないことが分かった。

第7章 結論

現状、揚水試験は、常に適用できる技法が確立されている訳ではない。本来、揚水試験は揚水による地下水流のみならず自然地下水流においても平衡状態はなく、非平衡状態において半無限に一定と考える時点で揚水試験での地下水流が層流域か乱流域かを判断し限界揚水量を決定する必要がある。特に、段階揚水試験法について改善が求められている。これには段階揚水の終了付近における水位の低下速度を検証し評価すること、すなわち、本論文で提起した非線形井戸損失曲線より比湧出量を表す式の微分値を用いて限界揚水量を求めるとや揚水量の変化に伴う地下水流速の変化を把握し評価する方向性もあると考えられる。これらの評価の基礎的な指針として、本論文では、主として実証的な観点から地下水の基本的な調査・管理に関する実用的な揚水井モデル及び井戸損失式などを提起したが、これらの成果は、揚水井の設

計・施工に有用であると同時に、広く地域の環境資源としての地下水調査並びに、その適正な管理に資するものであると考えられる。

審査結果の要旨

近年、全国の地域地下水盆では、地下水の採取規制によって地下水位が回復し、地盤沈下は沈静化の方向にある。しかしながら、現在も生活用水、防災用水、農・工業用水及び新たなニーズ（いわゆる名水や健康水など）において井戸の利用は多く、特に、豪雪地域においては、消雪及び渇水期の用水として地下水の利用が急増し、現行の井戸だけではなく、本来、適正な揚水量で設計・施工されていると考えられる新設井戸においても数年程度で井戸枯れや周辺の地盤沈下が生じる場合がある。従来、これらの被害に対する基本的な要因は、不十分な地下構造の推定に基づく地下水涵養量、地域の水循環に関わる水収支計算の不備及び多くの研究者・技術者から問題点を指摘されながら、長年、揚水井の設計・施工に用いられている地質・地下構造を含めた揚水井モデルと、このモデルから導かれた井戸公式（井戸損失式）であるといわれている。

一般に、地下水の保全目標は、井戸枯れが生じないような地域全体の地下水位の維持、水質保全及び地盤沈下の防止などであり、それには適正な揚水量の在り方に注目する必要がある。この適正な揚水量とは、井戸から汲み上げられる層流域での最大量(限界揚水量)に安全率を乗じた揚水量をいい、その値に地方条例で規制された低減揚水量を考慮して設定されるものである。したがって、本研究の目的は、主として、この限界揚水量を決めるために最も重要な揚水井モデルと井戸損失式に着目し、最新の地下構造可視化技術を適用し事例調査から得られた代表的な地下構造に基づき、現場の揚水井の設計・施工に容易に反映可能な実用的な揚水井モデルと井戸損失式を新たに構築することである。実証例を通して実用的な揚水井モデルと井戸損失式を構築し検証に至るまでの各研究段階は以下に示す通りである。

1. 先ず、地下水流動の影響圏内の井戸について既存の二つの井戸理論の基本的な仮定を示し、層流域が成り立つ平衡説及び非平衡説における実用性の限界と基本的な問題点を明らかにしている。この両井戸理論説は、共に単純な単層貫通井（揚水井が完全に滞水層に達する）モデルであり、実際の多種多様な地質・地下構造に対応できていないことから、ここでは、実際の地質・地下構造を揚水井モデルに反映させるために、より精度良く調査できる探査技法の導入を提示している。特に、地下水探査として、ほとんど前例のない電磁探査法（CSAMT）及び地下水量を知るための揚水試験について述べ、CSAMTが多様な地域の地下水盆の地下構造と地下水賦存量を把握できる地下水調査に適した技法であることと、垂直電気探査法との使用範囲の相違を提起している。
2. 滋賀県湖北地域における小盆地の地下構造は、既存の地質資料から典型的な水平多層構造が予測されたことから、探査深度 100m が可能な垂直電気探査法が相応しいと判断し、当該地層の測定物理定数として電気比抵抗値の計測を行い、ボーリング調査と合わせて地域の地質構成を的確に明らかにしている。
3. 次に、複雑な地下構造が予測される典型的な盆地下の水理地質構造解析の調査事例として花崗岩地帯の小盆地を代表する兵庫県淡路島中部では CSAMT を導入し、台地下の詳細な地下構造と地

下水賦存を明らかにしている。特に、当地域では、地下水探査に前例のない CSAMT を用いて揚水井の位置を選定し、豊富な地下水賦存量を確認することができている。この事例調査を通して、比較的狭い地域においても詳細な地質・地下構造可視化の必要性を提起し、小盆地での揚水源が複雑な地形地質の要因に支配されるという地域特性に関する知見を得ている。さらに、前事例を含む二つの代表的な調査事例におけるボーリング調査時と揚水試験によって帯水層での水理定数を把握し、新たな揚水井モデルと井戸損失式に向けて有用な基礎資料を取りまとめている。

4. 井戸損失式は、一般に井戸理論の平衡説及び非平衡説を問わず完全貫通井としてモデル化されている。しかしながら、全国井戸台帳によると、深井戸は帯水層の地質構成に基づき、多層スクリーンを有する不完全貫通井が多く、これは施工コスト面を踏まえて、さく井から得られる複数の帯水層によって短期的には豊富な揚水量が得られることと、目標とする揚水量の確保は、できるところまでのさく井深さで十分あるという考えに基づいている。この揚水井モデルは、常に穏やかな層流での公式活用に留まり、また、地下水管理に有効な水理定数の具体的な指標が示されていない。すなわち、本来、少なくとも地下水流の状態変化と透水係数の異方性を表わすべきであるが、現状、これらの値を高精度で測定することは、極めて難しいといえる。そこで、本研究では、先述の代表的な調査事例に基づき平均透水係数と井戸孔の深さより透水量係数に対して補正係数を用いることを基本とした新しい揚水井モデルを構築し、実用かつ合理的な解析方法を導いている。特に、先述の事例調査結果並びに単層の揚水井モデルの理論解析が実際とは適合しないという多くの地下水関連の研究者らの指摘も踏まえて、ここでは帯水層の厚さが半無限の単層モデルを実用的な多層モデルに改良している。この結果、代表的な非平衡説に関する乱流域と区別ができ、井戸構造の要素と地域固有の水理特性値を反映できる平衡説に沿った極めて実用的な非線形層流式を構築し、その妥当性を観測井（揚水井の周囲に設置した地下水位観測専用の井戸）を用いて検証している。この検証結果から新たに構築した揚水井モデルと井戸損失式を用いることで、地域地下水盆において揚水井を設置する場合、過剰な揚水を発生させない安全な設計揚水量が設定できることを明らかにしている。すなわち、本揚水井モデルと井戸損失式を適用することで、揚水井の長期の安定的な使用の確立と地域地下水の保全に寄与できることを提示している。

5. 地域の地下水盆に適用でき、その原型となる帯水層に関する諸要因の整理を行い、基本となる揚水井モデルに対して準3次元有限要素法による地下水シミュレーションを実施することで、当該シミュレーションが地下水流動や水頭変化等から井戸枯れ、地域の地下水問題の有無、新設井戸計画及び掘削工事に対する影響などの予測と評価に有効であることを明らかにしている。

以上のように、本研究では、長い間、揚水井の限界揚水量を高精度で推定できる実用的な揚水井モデル及び井戸損失式が存在しなかったことに着目し、地下水の合理的な調査・管理に通じる極めて実用的な揚水井モデル及び井戸損失式を新たに構築し、その有効性を主に実証例を通して明らかにしている。これらの成果は、単に揚水井の設計・施工に寄与するだけでなく、広く環境資源としての地下水調査並びに、その適正な管理に資するものである。本研究成果は、揚水井に関する地下構造可視化と地下水調査に新たな展開を提示し、土地環境情報学並びに緑地環境科学分野の発展に大きく寄与するものであると考えられる。よって、学力確認の結果と合わせて、博士（緑地環境科学）の学位を授与することを適当と認める。