

猪苗代平野における地下水流動の予察的シミュレーション解析

佐藤真一（福島大学・大学院共生システム理工学研究科）・柴崎直明（福島大学・共生システム理工学類）

要 旨

磐梯山の南側から急峻な地形勾配を経て地下水が猪苗代湖へと流出する猪苗代平野において、現況の地下水流動を明らかにするために 3 次元地下水流動シミュレーションモデルによる予察的シミュレーション解析を行った。既存資料および既往研究にもとづく地下地質状況をモデルに入力して月別非定常計算を行った。この結果から、現地調査で確認された自噴井戸の分布と概ね調和的な地下水位分布が再現された。そして、猪苗代平野から猪苗代湖の湖底面への地下水流出量は $12,000 \text{ m}^3/\text{day}$ と算出された。この結果によると、湖から流出がない場合の地下水流入による猪苗代湖の水位上昇量は $0.12 \text{ mm}/\text{day}$ となる。そして、猪苗代湖の湖底面で流出量が多い範囲は湖底面標高が急激に低くなる地域だと推定された。

I. はじめに

磐梯山の南麓と猪苗代湖の間に広がる猪苗代平野では上流部から長瀬川が流れており、その水が猪苗代湖へ流入する。既往研究では猪苗代平野の地下水について水質の観点から研究が進められてきた。千葉（1983）によると猪苗代平野の地下水を東部、中部、西部の 3 つに区分している。このように地下水の流動系は複雑であることが予想される。本研究では、近年の猪苗代湖の水質変化に影響を与えている可能性がある表流水と地下水の水収支について、今後さらに詳細な研究を進めるために地下水流動の予察的シミュレーション解析を行った。

II. 対象地域概要

図 1 に本研究の対象地域における表層地質図を示す。この地質図は産業技術総合研究所地質調査総合センター（2011）による 20 万分の 1 日本シームレス地質図を使用した。長橋・廣瀬（2013）は猪苗代湖の湖心付近でのオールコアボーリング調査による岩相層序を報告した。これによると、湖底面から深度 27.6 m の掘削結果からその深度まで湖底堆積物が確認された。この調査では猪苗

代湖湖底堆積物の基底面までは掘削されていない。鈴木（1987）は会津盆地および猪苗代湖周辺における東西方向の地質断面図を示した。この断面図をもとに、後述する地下水モデルの範囲について作成した地質断面図を図 2 に示す。

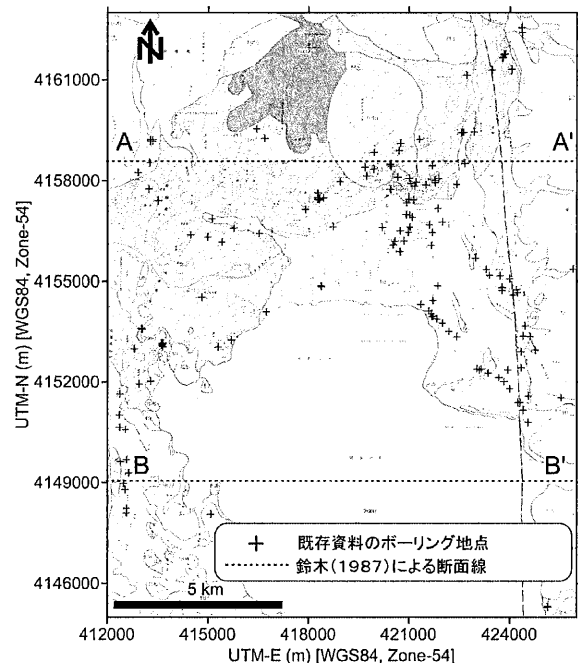


図 1 既存資料によるボーリング調査地点の位置と文献による地質断面線位置

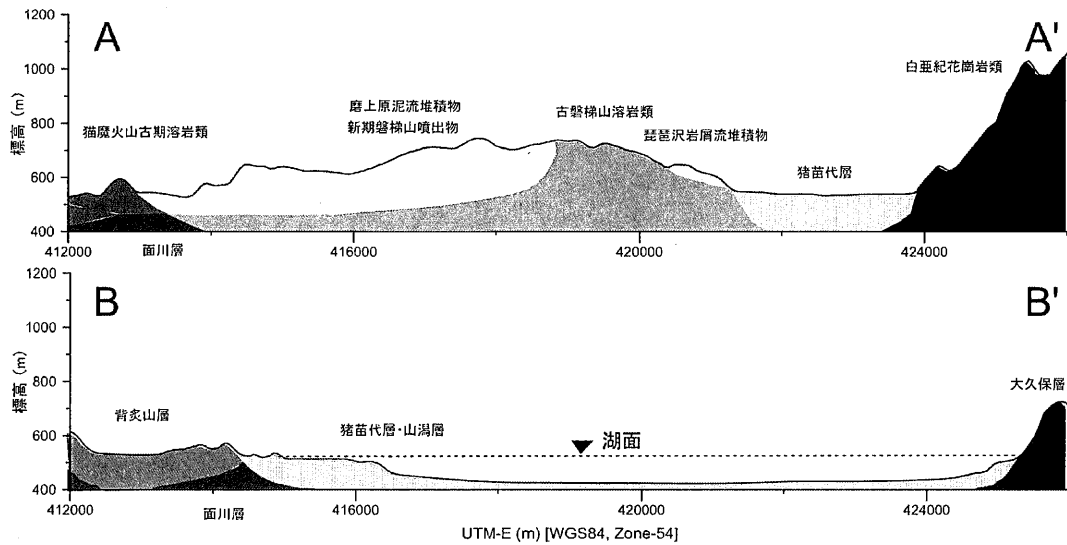


図2 調査対象地域の地質断面図（東西）
（鈴木（1987）の地質断面図をもとに作成）

III. 研究手法

1. 現地調査の概要

現地調査では既存井戸の分布を把握し、とくに猪苗代平野における自噴井戸の分布範囲を把握した。そして、猪苗代平野における自噴井戸（主に民家の井戸）の水量を調査した。この結果を後述の3次元地下水流動シミュレーションモデルによる地下水流動の現況再現確認に使用した。

2. 既存資料の収集・解析

猪苗代平野の地下地質状況を把握するために、これまでに行われた井戸掘削およびボーリング調査に関する既存資料を収集し、整理した。その結果から帯水層の分布状況を把握して帯水層区分を行い、それをモデルに反映させた。

3. モデルによるシミュレーション

猪苗代平野の地下水流動を検討するために、3次元地下水流動シミュレーションソフトを用いて対象地域の地下水モデルを作成した。このモデルによる地下水流動の解析結果から、猪苗代湖への地下水流出量を推定した。

IV. 現地調査結果

1. 現地調査の結果

現地調査では猪苗代平野において既存井戸の水量と水質を調査した。図3に現地調査および既存資料から確認された自噴井戸の分布を示す。この図を見ると、猪苗代平野を流れる長瀬川の周辺や、平野の中央部付近で自噴井戸が多く分布していることが確認された。

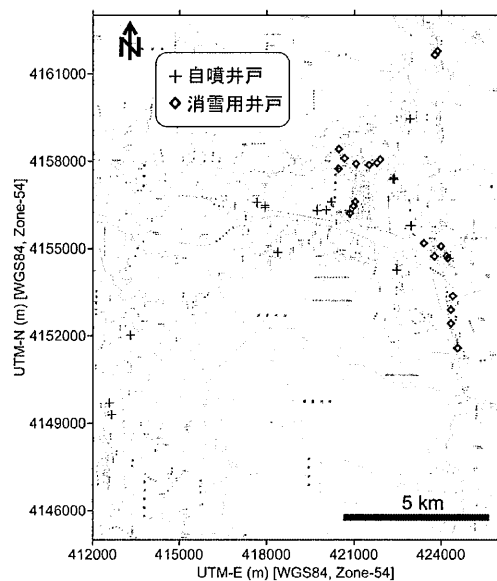


図3 現地調査および既存資料による自噴井戸と消雪用井戸の位置

V. 地下水流動シミュレーション解析

1. モデルの概要

1) モデル区分とモデル化範囲

本研究で地下水流動を解析するために、解析ソフトとして Processing Modflow Ver.8.0(以下、PM8, Simcore 社製) を用いた。モデルによる計算は、最初に自然状態の地下水流動を再現するために涵養量のみを入力して定常計算を行った。そのあとに、現在までの地下水流動を再現するために月別非定常計算を行った。非定常計算の計算期間は1977年1月から2013年12月までの37年間(444ヵ月間)とした。なお、計算開始時期は、モデルに入力する涵養量の推定に必要な気象データが得られ始めた1977年とした。

モデル化した範囲は、図1に示す南北方向18 km、東西方向14 kmの地域である。平面的には250 mごとのグリッドに分割した。垂直方向の範囲は磐梯山の山頂付近の標高1,800 mから、猪苗代湖の湖底堆積物のほとんどを含む標高400 mまでとした。モデル層の層厚はモデル上面から標高1,000 mまでを100 m、標高1,000~800 mまでを50 m、標高800~600 mまでを20 m、標高600~550 mまでを10 m、標高550~400 mまでを5 mと設定し、合計57層に分割した。

2) モデルの構造

このモデルの計算領域は地形面および猪苗代湖の湖底面より下の範囲とした。モデルに入力した地形面の標高データは国土地理院の基盤地図情報の10 mメッシュデータを用いた。湖底面の標高データは国土地理院の2万5千分の1地形図(図幅名:猪苗代, 関都, 山潟, 原, 岩代福島)に掲載されている猪苗代湖の湖底等深線をデジタル化してグリッドデータ化した。そして、地形面標高データと合成した。上記の手順で作成した標高分布図を図4に示す。この図から湖底面標高分布をみると、長瀬川が形成する三角州(デルタ)の形状が読み取れる。図5にモデルのフレームワークを示す。

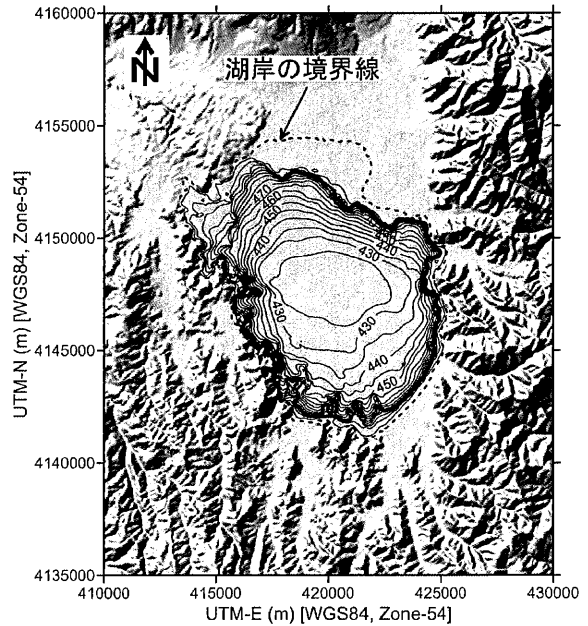


図4 猪苗代湖の湖底面標高分布

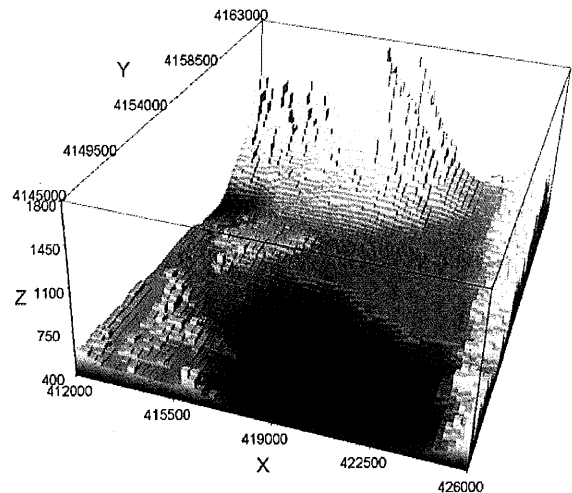


図5 モデルのフレームワーク

3) 初期水位

定常計算の初期水位を入力するために、地形標高データをもとにモデル範囲の切谷面図(1 kmメッシュ)を作成した。そして、各計算セルの中心座標の切谷面標高を定常計算の初期水位とした。図6に定常計算の初期水位の分布を示す。

1977年1月からの月別非定常計算については、定常計算の最終計算水位を初期水位として与えた。

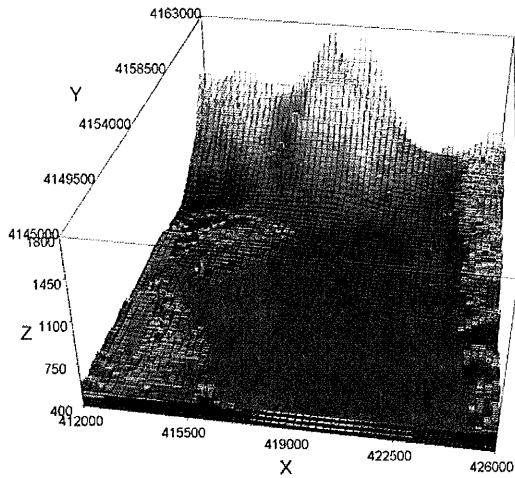


図6 定常計算における初期水位の分布

4) モデルの地層区分と入力した帯水層係数

図2に示した地質断面図および既往研究,そして,既存資料によるボーリング調査結果を参考にしてモデルに入力する地層区分を行った.なお,収集した井戸掘削資料およびボーリング調査地点の位置を図1に示した.

今回作成したモデルの地層区分の種類を表1に示す.モデル範囲内で帯水層が分布すると推定される更新世以降の地層を,(A)琵琶沢岩屑流堆積物,(B)猪苗代層,(C)磐梯火山新期噴出物,(D)翁島岩屑なだれ堆積物,(E)古磐梯火山溶岩類,(F)猫魔火山古期溶岩類,(G)背炙山層の7つに区分した.なお,中新統およびそれ以前の堆積物については,ほとんど地下水の流動がないと推定されることから不透水基盤とした.図7に今回作成したモデルの地層区分の分布を示す.

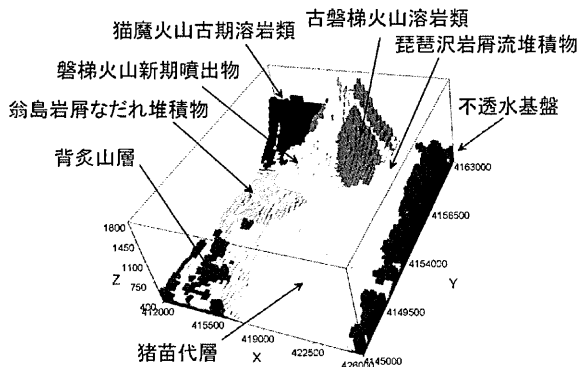


図7 モデルに入力した地層区分の分布

表1の地質区分の種類ごとに設定した帯水層係数を表2に示す.まず,水平方向の透水係数は,Bair and Lahm (2006)による代表的な地層の透水係数の範囲を参考に概略値を推定した.つぎに,東北農政局農村計画部資源課(2005)の塩川地区調査報告書にもとづいて,「(F)猫魔火山古期溶岩類」の透水係数を設定した.具体的には,揚水試験から得られた透水量係数を西牧・柴崎(2013)が計算したように「(B)猪苗代層」については全国さく井協会(2013)の「猪苗代盆地の比湧出量分布」をもとに,消雪用井戸のストレラーの平均値で割った値を入力した.そのほかの地層は,実測値が得られていないことから一般的な値を設定した.垂直方向の透水係数は,それぞれの層相を考慮して水平方向の透水係数との比率を設定して入力した.比貯留量は,代表的な値である,0.0001を入力し,C層よりも古い堆積物はそれよりも小さな値を入力した.有効間隙率(=比浸出量)は,Bair and Lahm (2006)による代表的な地層の比浸出量値をもとに入力した.そのほかの地層については,実測値が得られていないことから一般的な値を設定した.

垂直方向の透水係数は,それぞれの地層の層相を考慮して水平方向の透水係数との比率を設定して入力した.

比貯留量は,代表的な値である,0.0001を入力した.C層よりも古い堆積物についてはそれよりも小さな値を入力した.有効間隙率(=比浸出量)は,Bair and Lahm (2006)による代表的な地層の比浸出量値をもとに入力した.

表1 モデルの地層区分の種類

地質時代	地層名	主な層相	地層番号	
第四紀	完新世	琵琶沢岩屑流堆積物	火山砕屑物	A
	更新世	猪苗代層	砂・礫・泥	B
		磐梯火山新期噴出物	溶岩・火山砕屑物	C
		翁島岩屑なだれ堆積物	泥・砂・礫	D
		古磐梯火山溶岩類	溶岩・火山砕屑物	E
		猫魔火山古期溶岩類	溶岩・火山砕屑物	F
		背炙山層	火山砕屑物・礫・砂	G

(全国さく井協会(2013)の「猪苗代盆地の地質構成」を参考にして作成)

表 2 モデルに入力した帯水層係数

帯水層係数	単位	モデルの地層区分						
		A	B	C	D	E	F	G
透水係数 (水平方向)	m/day	1.50	2.00	1.00	0.20	0.70	0.60	0.10
透水係数 (垂直方向)	m/day	0.38	0.50	0.33	0.05	0.07	0.15	0.03
比貯留量	m ⁻¹	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	5.00E-05	1.00E-05	5.00E-05	1.00E-05
有効間隙率	-	0.20	0.25	0.10	0.05	0.08	0.90	0.02
比透水量	-	0.20	0.25	0.10	0.05	0.08	0.90	0.02

5) 境界条件

境界条件は、定常計算・非定常計算ともに、長瀬川、日橋川、および猪苗代湖の湖底面に該当する計算セルに、PM8 の一般水頭境界を設定した。また、モデル側面で、モデル範囲外へ流域界が及ぶ計算セルについては排水境界を設定し、モデル範囲外への流出を考慮した。図 8 に設定した境界条件の位置を示す。

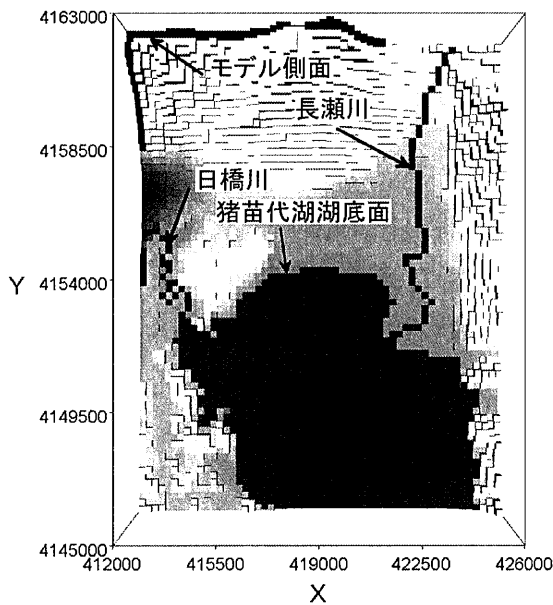


図 8 モデルに設定した境界条件

6) 地下水涵養量

涵養量の算出に必要な可能蒸発散量を、気象庁の猪苗代観測所の気温データ(気象庁 HP, 2013) を使用してソーンスウェイト法で推定した。図 9 に推定した 1977~2013 年までの可能蒸発散量について、その月別値を示す。

つぎに、この可能蒸発散量をタンクモデルに入

力して地下水涵養量を計算した。推定した年間地下水涵養量は、370~830 mm で、平均値は 606 mm である。なお、このタンクモデルの妥当性を評価するためには地下水位の連続観測記録が必要である。現在、柴崎研究室では本プロジェクトの活動で猪苗代湖の湖岸付近(八屋敷地区)で、地下水位の連続観測を開始したところである。今後はこの実測記録をもとにタンクモデルによる涵養量推定値の検証が可能になる。

タンクモデルにより得られた地下水涵養量はモデル範囲の土地利用を考慮して、水田以外の地域に入力した。水田地域については灌漑期間に地下水涵養量の増加が予想されることから、水田の圃場整備に採用される一般的な減水深を参考に、10 mm/day の浸透量を与えた。非灌漑期間についてはタンクモデルによる計算値を与えた。土地利用については国土交通省国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを用いた。モデル範囲において上記の土地利用データは 5 時期分(1976 年, 1987 年, 1991 年, 1997 年, 2006 年)存在することから、非定常計算では土地利用の変遷に合わせて各計算セルの涵養量を該当セルの土地利用に応じて与えた。以上の手順で推定した 1977~2013 年までの地下水涵養量の月別値を図 10 に示す。

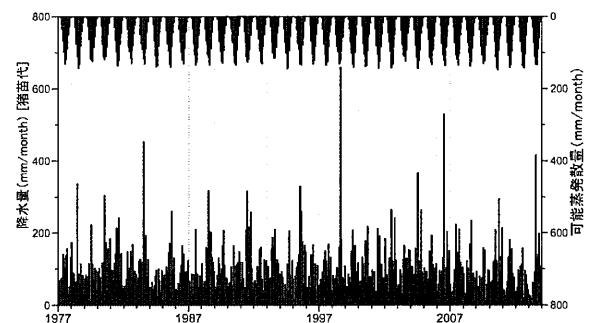


図 9 月別降水量と推定した可能蒸発散量 (上の棒グラフが可能蒸発散量で、下が降水量。)

7) 地下水揚水量

地下水揚水量については、猪苗代平野において

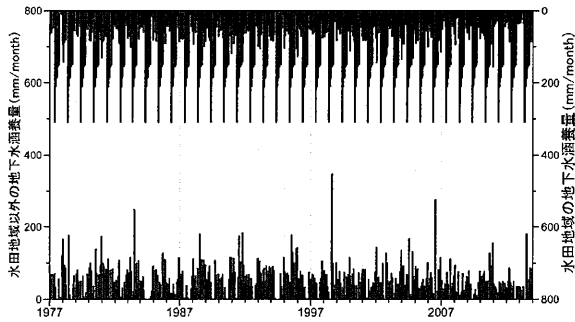


図 10 月別地下水涵養量の推定値

(上の棒グラフが水田の涵養量で下がそれ以外.)

主な利用源である冬期の消雪用井戸からの揚水量をモデルに入力した。福島県喜多方建設事務所および猪苗代土木出張所、その他関係機関から資料が得られた消雪用井戸の位置を図 3 に示した。

モデル範囲において現状で 25 本の消雪用井戸が稼働していると推定される。それぞれの井戸からの揚水量については実測値が得られなかった。しかし、喜多方建設事務所が 2006～2010 年の期間に消雪用井戸の稼働による電力量の記録をもとにした井戸ごとの揚水量を推定している。この推定値がある期間についてはその値を用いて、推定値がない期間についてはこの値をもとに気象条件を考慮して揚水量を推定した。まず、気象庁（猪苗代観測所）の降雪量、降水量、日平均気温の観測記録をもとに月別の降雪日数を推定した。つぎに、前述の揚水量推定値をもとに、その月の推定降雪日数と揚水量推定値がない年の同じ月の推定降雪日数との比率から全期間の揚水量を推定した。図 11 に 1977 年 1 月以降の消雪用井戸の推定地下水揚水量を示す。

井戸ごとに推定した地下水揚水量をそれぞれのストレーナー深度に該当する計算セルに割り振った。揚水セルに該当するセルの層厚と同セルの透水係数（水平方向）の積から各セルの透水量係数を計算して、それぞれを足し合わせて井戸ごとの透水量係数を求めた。そして、井戸ごとの透水量係数とその井戸の各揚水セルの透水量係数との透水量係数を求めた。そして、井戸ごとの透

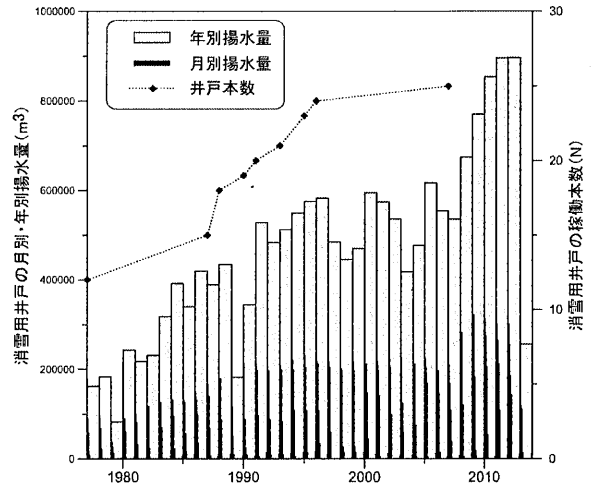


図 11 推定した地下水揚水量

水量係数とその井戸の各揚水セルの透水量係数の比を求めて、その比から各井戸の揚水量を垂直方向に割り振った。

2. 定常計算

定常計算による計算最終水位を図 12 に示す。定常計算の結果、初期水位にみられた磐梯山から猪苗代平野にかけての大きな水位差が解消されて、より緩やかな水位分布になった。猪苗代平野中央部や西側の地形勾配が緩やかに変化する地域では、定常計算による地下水面が地形面よりも高くなった（水位は約 520 m）。これは図 3 の現地調査および既存資料から確認された自噴井戸周辺で計算水位が地形面よりも高くなっている。

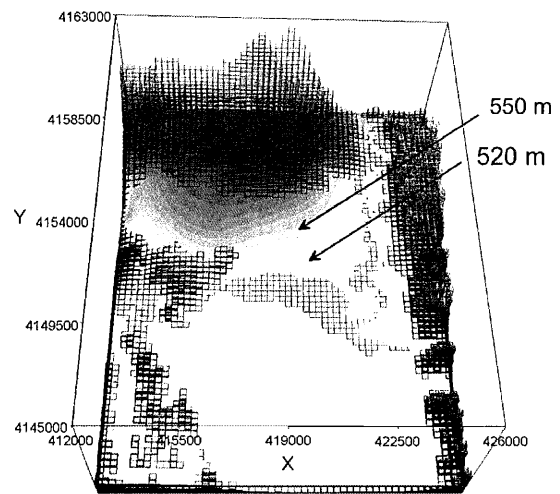


図 12 定常計算結果の水位分布

3. 非定常計算

図 12 に示した定常計算による最終計算水位を、37 年間 (444 ヶ月間) の月別非定常計算の初期水位として入力した。この計算による最終水位 (2013 年 12 月) の分布を図 13 に示す。猪苗代平野付近の水位分布を見ると、自噴井戸周辺で計算水位が地形面よりも高くなっている。この結果から、本研究で作成したモデルで、猪苗代平野における自噴帯の再現は概ねできたと考えられる。磐梯山のふもと周辺については計算水位が高くなる傾向にある。現地調査により自噴井戸を所有する住民からの自噴量の変化を確認したところ季節変化があり、雪解け時期の 4 月ごろが最も大きいと確認された。地下水位変動の経年変化および季節変化について計算結果を確認したところ、季節変動について大きな差が確認されなかった。現在のところ地下水位の連続観測記録がないことから、検証は難しいが、この点についてはさらにモデルの改良が必要だと考えられる。

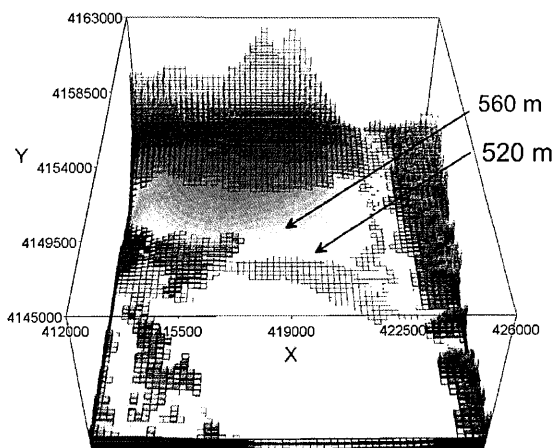


図 13 非定常計算結果の水位分布

つぎに、この月別非定常計算結果をもとに、猪苗代平野から猪苗代湖への地下水流出量を計算した。モデル範囲の猪苗代湖底面に設定した境界条件 (一般水頭境界) のセルから猪苗代湖へ排出される総量を計算したところ、地下水流出量に顕著な季節変化や経年変化は確認できなかった。計

算期間最終の 2013 年 12 月における地下水流出量は $12,000 \text{ m}^3/\text{day}$ であった。この流出量を猪苗代湖の面積 (103.3 km^2) で割ると、地下水流出による猪苗代湖の水位上昇量は 0.12 mm/day と計算される。既往研究では猪苗代湖への地下水流出量は明らかになっていない。地下水流出量が季節的に変化する可能性はあると予想されたが、モデルでは地下水流出量の季節変化はほとんどあられなかった。

それから、地下水流出量について猪苗代湖の湖底面の標高とも比較を行った。この結果によると、猪苗代平野の湖岸付近から湖底標高が浅く平坦な部分では地下水流出量が小さいのに対し、それより南側の急激に湖底面標高が低くなる部分では地下水流出量が大きくなった。

VI. まとめと今後の課題

猪苗代平野における現地調査、既存資料の解析、および 3 次元地下水流動シミュレーションモデルによる地下水流動の解析から以下のことが明らかになった。

- 1) 既存資料および現地調査結果から猪苗代平野における、地形面が急に緩やかになる地域での自噴井戸の分布が確認された。
- 2) 地下水流動のシミュレーション解析により、既存資料および現地調査結果から把握された自噴帯の分布がモデル上でも再現された。
- 3) 磐梯山から猪苗代平野にかけての地下水流動は地形の変化による導水勾配から猪苗代湖および周辺への流れが発生すると確認された。
- 4) 猪苗代平野から猪苗代湖への地下水流出量がシミュレーションモデル解析により明らかになった。
- 5) 猪苗代湖の湖底での地下水流出量は湖底標高が急激に低くなる地域で大きいことが明らかになった。

本研究の課題としてはシミュレーションモデルの現況再現に対する妥当性を検証することで

ある。本研究で計算された猪苗代湖への地下水流出量を評価するうえで、モデルの妥当性が重要となる。今後、モデルの妥当性を評価するために実測の地下水位記録と比較することが重要である。また、帯水層区分および入力する帯水層係数についても今後、現況に近い値の検討、もしくは実測値を得る必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、福島県喜多方建設事務所および猪苗代土木出張所から井戸掘削資料や消雪用井戸に関する資料を提供していただいた。井戸掘削資料やボーリング調査結果の収集には福島大学研究プロジェクト型実践教育推進センター特任教授の中馬教允先生、福島大学人間発達文化学類准教授の中村洋介先生に大変お世話になった。既存資料の収集・整理および現地調査の一部について福島大学柴崎研究室4年の古田美桜子さんに協力していただいた。以上の皆様に厚く感謝申し上げます。

引用文献

- Bair, E. S. and Lahm, T. D. (2006) Practical Problems in Groundwater Hydrology. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 168p, ISBN 0-13-145667-9.
- 千葉 茂 (1983) 猪苗代平野の地下水の水質. 福島大学理科報告, 33, 25-34.
- 気象庁 HP (2013): 気象観測データ.
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/obsmenu.html>
- 長橋良隆・廣瀬孝太郎 (2013) 猪苗代湖湖底堆積物の掘削の概要とコア試料の岩相層序. 福島大学地域創造, 24(2), 55-61.
- 西牧祐香・柴崎直明 (2013) 裏磐梯地域の地下水流動の推定および将来予測. 共生のシステム, 13, 48-57.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2011): 20万分の1日本シームレス地質図データベース, 2011年6月29日版.
- 鈴木敬治 (1987) グリーンタフ堆積盆の発生とその分化. URBAN KUBOTA, 26, 4-11.
- 東北農政局農村計画部資源課 (2005) 塩川地区調査報告書—第四紀火山山麓の地下水開発—. 86p.
- 全国さく井協会 (2013) 猪苗代盆地. 福島県地質・地下水分布図説明書, 44-50.