

裏磐梯地域の地下水流動の推定および将来予測

西牧祐香・柴崎直明（福島大学・共生システム理工学類）

要 旨

裏磐梯地域の銅沼，弥六沼，毘沙門沼で水位の連続観測を実施した．銅沼では2012年8～9月に水位が平均1.9 cm/dayで低下し，弥六沼および毘沙門沼の水位は同年10月下旬から11月にかけて緩やかに水位が上昇した．これら3つの沼での水質分析結果と福島県環境センターの水質分析結果から地下水流動を推定した．裏磐梯地域の3次元地下水流動解析を行い，定常計算および年別・月別の非定常計算を行った．その結果，弥六沼や毘沙門沼付近では崩壊後約30年で，銅沼付近では約36年でほぼ定常状態に達すると計算された．弥六沼と毘沙門沼では，季節により地下水から沼への地下水流入があることを示唆する結果が得られた．

I. はじめに

かつて磐梯山には，小磐梯山という峰が存在したが，1888年（明治21年）の水蒸気爆発で起きた山体崩壊により消失した．また，この山体崩壊により，桧原湖や小野川湖，秋元湖，五色沼湖沼群が形成されるなど，地形が大きく変化した．地下を流れる地下水は，地表面を流れる地表水よりも流速が遅い．したがって，地下水の観点から考えると，1888年に山体崩壊が起きてから現在までの125年間は決して長い時間ではない．地形や地質構造の急激な変化により，地下水の流動が変化しはじめたと考えれば，まだ裏磐梯地域の地下水流動は定常状態に達していない可能性がある．

そこで，本研究では，銅沼，弥六沼，毘沙門沼の水位の連続観測，湖沼の水質分析，および3次元地下水流動解析を実施した．それらの結果から，銅沼や五色沼湖沼群，桧原湖などと地下水との交流関係を検討し，現在までの地下水流動の再現および将来の地下水流動の予測を行った．

II. 銅沼，弥六沼，毘沙門沼の水位観測

1. 水位観測方法

本研究では，銅沼，弥六沼，毘沙門沼の水位の連続観測を行った．水位計の設置位置を図1に示す．水位観測は，水圧式自記水位計（応用地質（株）

製 S&DLmini : 10 m レンジ）を各地点に設置し，30分間隔で水位と水温を連続的に観測した．弥六沼は2012年7月12日から，銅沼と毘沙門沼は2012年8月3日から観測を開始した．水位計は，水面近くの木の根元にステンレスワイヤーでくりつけ，沼底に沈めるように設置した．また，裏磐梯ビジターセンターにバロメータ（応用地質（株）製 S&DLmini Barometer）を設置し，大気圧と気温を観測した．水位データはこのバロメータの大気圧データを用いて補正した．

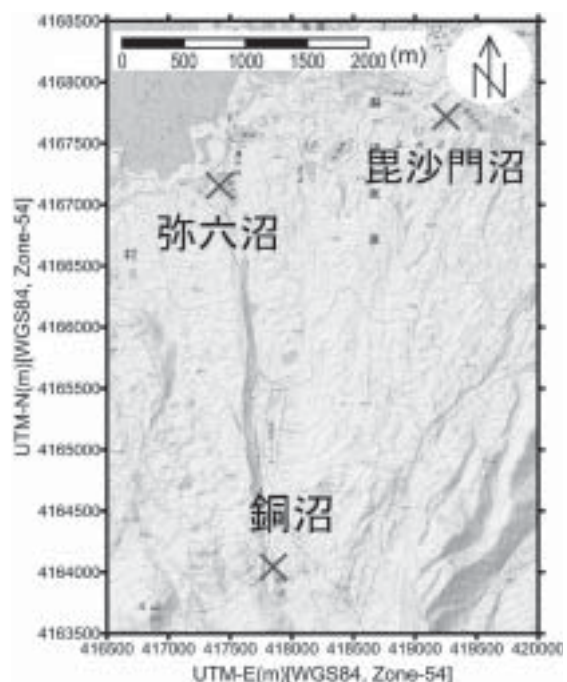


図1 自記水位計設置位置

2. 水位観測結果

図2に、銅沼、弥六沼、毘沙門沼の水位観測結果のグラフを示す。このグラフに示す水位は、それぞれの水位計の設置位置（深度）を基準にしたものである。3地点の水位計設置深度は異なるため、このグラフは3つの沼それぞれの水位変動パターンおよび変動幅を示していることになる。

銅沼では2012年夏から秋にかけて水位が急激に低下し、水位計が水面より上に出ってしまったため、同年8月3～28日と9月4～9日の計30日間の水位しか計測できなかった。この期間、降雨により2回ほど水位が5cmほど上昇したが、8月3日から9月9日までの水位低下量は62cmであり、無降雨期の平均水位低下速度を求めると1.9cm/dayとなる。2012年7～11月の弥六沼の水位変動幅は約50cmあるのに対し、毘沙門沼は約10cmと小さい。降水量と水位の関係をみると、弥六沼では降水量が多いにも関わらず水位上昇がわずかであるところが7～9月にみられる。一方、10月下旬から11月にかけての時期には、弥六沼の水位は降水量と比較して大きな水位上昇がみられ、毘沙門沼でも水位がゆるやかに上昇する傾向が認められる。これらは、この時期に地下水が沼に流入していることを示唆している。

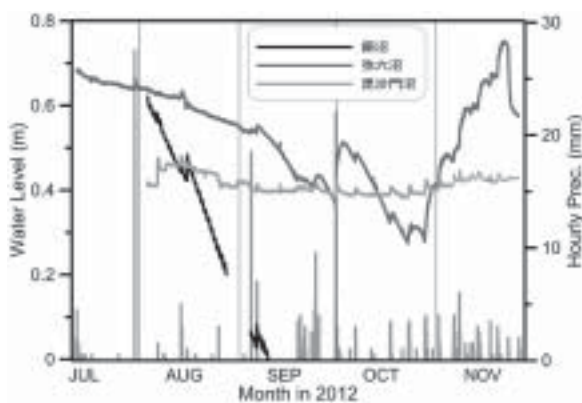


図2 銅沼、弥六沼、毘沙門沼の水位グラフ

III. 水質分析

1. 水質分析方法

3つの沼の岸辺から金属製のバケツで沼の水を

汲み、プラスチック製のバケツに2/3ほど採水した。室内分析用のサンプルは、滅菌処理済の採水瓶100cc（サンセイ医療器材（株）製）に空気が入らないように密閉し、室内分析を行うまでは冷蔵庫に保管した。室内分析は、イオンクロマトグラフィーで主要イオン、モリブデン黄法でSiを測定し、pH4.8アルカリ度滴定法で重炭酸イオンを測定した。

2. 水質分析結果

3つの沼で2012年5～11月に4回実施した室内分析の結果を図3のトリリニアダイアグラムに示す。また、福島県環境センターが2012年6月15日と19日に採水し、室内分析を行った結果を図4のパターンダイアグラムに示す。これを裏磐梯地域で作成した1.0kmメッシュの切谷面図（柴崎ほか、2012）と重ねた。

銅沼を含む五色沼湖沼群の水質はアルカリ土類非炭酸塩型を示し、温泉水に似た水質である。銅沼から瑠璃沼、青沼、弁天沼方面にかけて溶存量の比較的多い水が分布しており、切谷面から推定した地下水流動方向と調和的である。また、毘沙門沼西方の赤沼の水質は銅沼系の水質によく似た組成を示すことから、銅沼系の水質を示す地下水が裏磐梯スキー場付近で分岐して北東に流動している可能性がある。次項で述べる地下水流動解析では、このような地下水流動がモデルで再現できるかどうかを検討した。

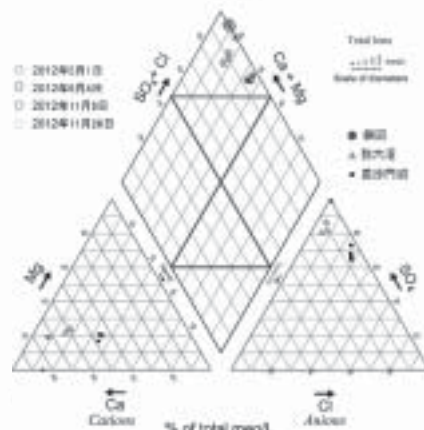


図3 3つの沼のトリリニアダイアグラム

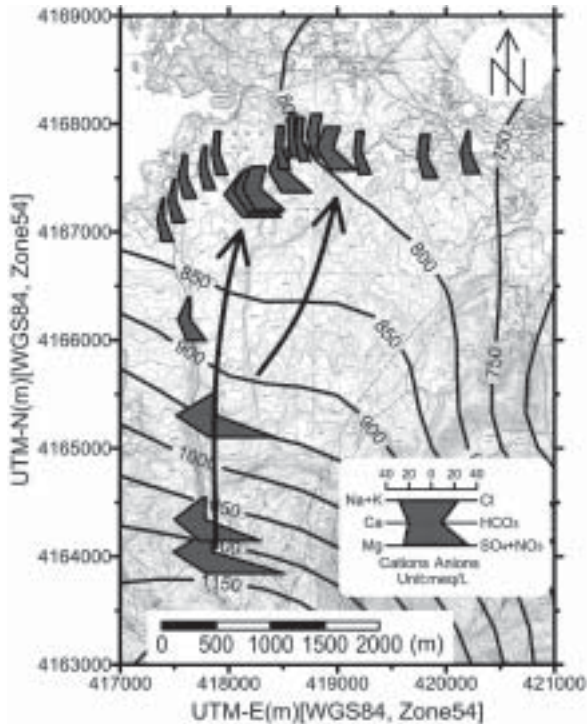


図4 裏磐梯地域のパターンダイアグラムと切谷面から推定した地下水流動方向
 水質データは福島県環境センターが2012年6月15・19日に採水し分析したもの。切谷面等高線の単位は標高(m)。

方向の範囲は、標高 1,850 m から 350 m とした。モデルの層厚は、標高 1850~1150 m を 100 m、標高 1150~850 m を 25 m、標高 850~650 m を 10 m、標高 650~450 m を 50 m、標高 450~350 m を 100 m と設定し、合計 44 層に分割した。モデルのフレームワークを図 6 に示す。

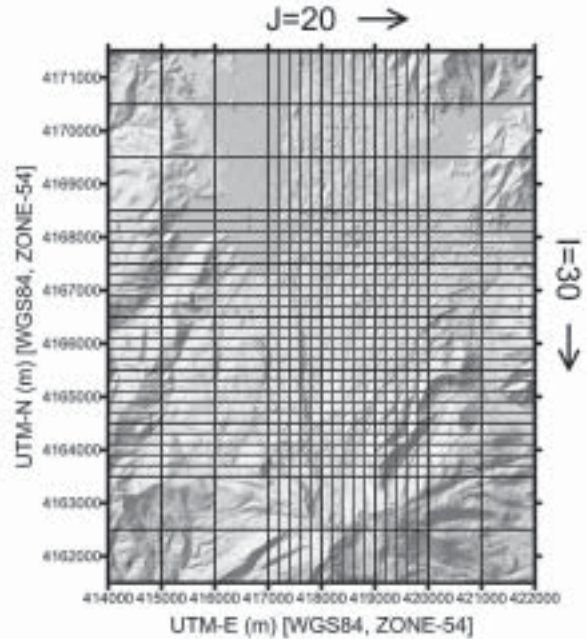


図5 地下水モデルの範囲とグリッド分割図

IV. 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

3次元の地下水流動シミュレーション解析は、Processing Modflow Ver. 8.0 (以下PM8, Simcore社製) を用いて行った。計算は、(1) 1888年の崩壊以前の地下水位分布を推定するための定常計算、(2) 崩壊後から現在までの地下水流動の変化を再現するための年別非定常計算 (1888~2012年の125年間)、そして、(3) 桧原湖など裏磐梯3湖の日別水位データがある2007年以降について季節変動を再現するための月別非定常計算 (2007~2012年の72ヵ月間) の3種類について行った。

モデル化した範囲は、図5に示すような南北方向10 km、東西方向8 kmの範囲である。平面的には1 kmごとのグリッドに分割し、さらに銅沼から五色沼湖沼群の範囲については200 mごとのグリッドに分割した。また、モデル化した垂直

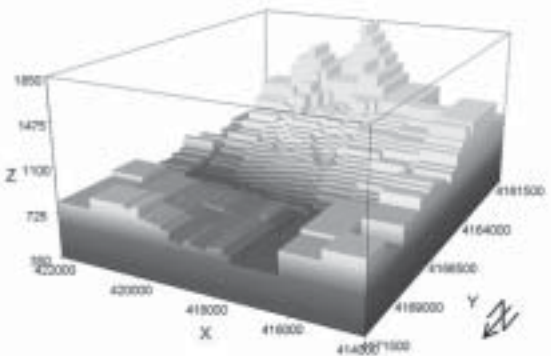


図6 地下水モデルのフレームワーク
 推定した1888年以前の旧地形の場合

2) モデル構造と初期水位

モデルの地層区分は、崩壊前から存在していた地山と1888年の崩壊による岩屑なだれ堆積物の2種類に区分した。定常計算では、モデル構造を地山のみとし、モデルのフレームワークを1888年以前の地形面標高分布を推定して設定した。こ

の地形面標高は、1888年以前の鳥瞰図（磐梯山噴火記念館から収集）および水越ほか（1997）をもとに、1888年の岩屑なだれの範囲の等高線を推定した。推定した1888年以前の等高線を図7に示す。1888年以前の定常計算の初期水位は、推定した1888年以前の地形面標高を与えた。

125年間の年別非定常計算では、図8に示すようにモデルの計算セルを地山と堆積物に区分した。また、崩壊後の地形（現在の地形等高線）を図9に示す。初期水位は、定常計算による最終計算水位を与えた。2007年からの月別非定常計算においても地山と堆積物を区分し、初期水位は年別非定常計算による2006年終了時の計算水位を与えた。

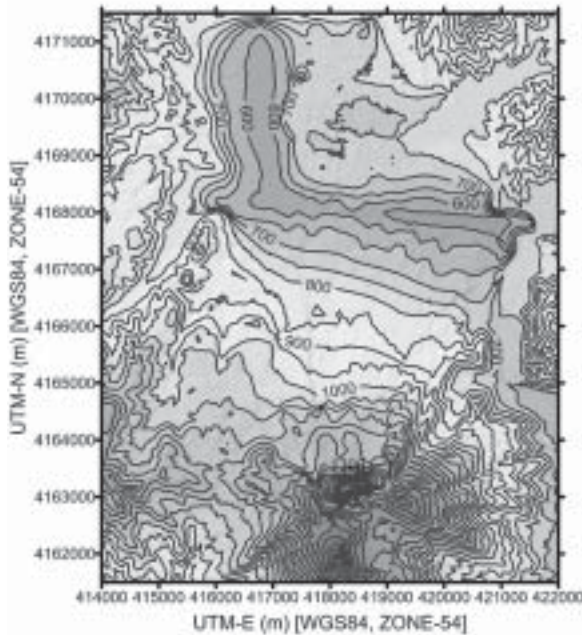


図7 1888年以前の地形等高線図

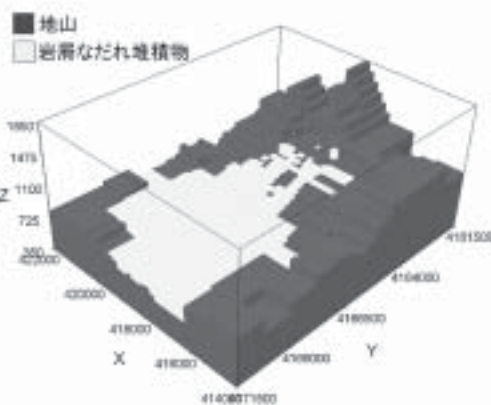


図8 崩壊後の地山と堆積物の区分

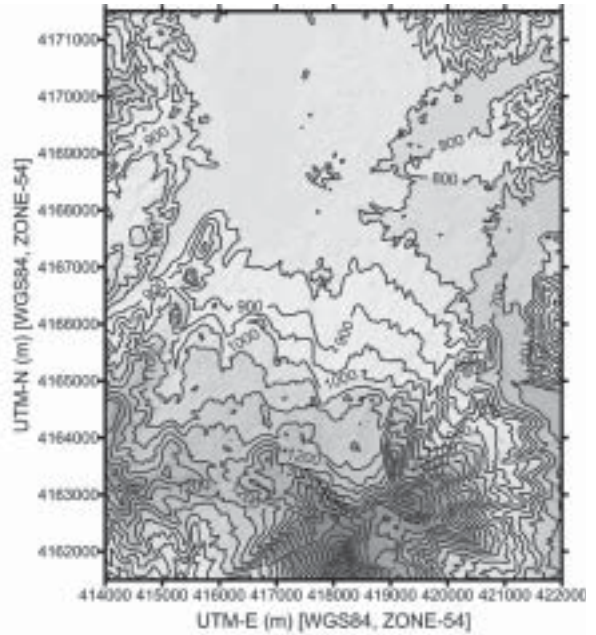


図9 現在の地形等高線図

国土地理院基盤地図情報 10 m メッシュ (標高)

3) 帯水層係数

帯水層係数は、地山と堆積物で値を変え、裏磐梯スキー場の東側の尾根の部分には、地山の透水係数を低くした。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地山の透水係数を設定した。東北農政局農村計画部資源課 (2005) は、磐梯山西側に位置する第四紀火山である雄国山 (猫魔火山) 西麓の喜多方市塩川地区をモデル地区に設定し、火山山麓の有効な地下水開発の検討を目的として、揚水試験やボーリング掘削などの調査を実施した。本研究の調査対象地域は塩川地区から距離が近く、地質条件も似ていると考えられることから、塩川地区の結果をもとに透水係数を推定した。東北農政局農村計画部資源課 (2005) は深度 185 m の試掘井で揚水試験を実施し、タイスの標準曲線法、ヤコブの直線解析法、および回復法の3種類で透水量係数を求めた。その透水量係数をストレナー長 (104.5 m) で割り、透水係数を求めた (表 1)。本研究では、3つの透水係数

値の平均値を採用した。

表 1 揚水試験結果による帯水層係数

	透水量係数(m ² /day)	透水係数(m/day)
タイスの標準曲線法	35.9	0.34
ヤコブ直線解析法	58.6	0.56
回復法	89.7	0.86
平均		0.59

透水量係数は東北農政局(2005)による。得られた平均値 0.6 m/day を地山の水平方向の透水係数とした。

1888年の崩壊による岩層なだれ堆積物の水平方向の透水係数については、具体的なデータが得られなかったため、堆積物の層相や後述する年別非定常計算時の検証計算結果を踏まえて 0.2 m/day を設定した。

垂直方向の透水係数は、地山が水平方向の 20 分の 1 の値、岩層なだれ堆積物が水平方向の透水係数の 10 分の 1 と仮定した。裏磐梯スキー場の東側の尾根の部分には、水平方向の透水係数を地山の 6000 分の 1 (=1.0E-4 m/day)、垂直方向の透水係数をその 20 分の 1 にした。

比貯留量は、どの層も一律に代表的な値である、0.0001 を入力した。有効間隙率(=比浸出量)は、Bair and Lahm (2006) の代表的な地層の間隙率の分布範囲と比浸出量の代表値をもとに決定した。以上のようにして求め、モデルに入力した帯水層係数を表 2 に示した。

表 2 設定した帯水層係数

帯水層係数		地山	崩積土
透水係数(横方向)	m/day	0.6	0.2
透水係数(縦方向)	m/day	0.03	0.02
比貯留量	m ⁻¹	0.0001	0.0001
有効間隙率		0.05	0.1
比浸出量		0.05	0.1

4) 境界条件

境界条件としては、定常計算では、旧地形の谷で川があった部分に固定水頭境界を設置し、それを挟むように排水境界を設定した(図 10)。固定水頭境界および排水境界の水位は、推定した旧地形面標高と同じ値を与えた。

125 年間の非定常計算では、崩壊により誕生した主な湖沼において適切な境界条件の設定することを検討した。中央防災会議災害教訓の継承に関する専門調査会(2005)によると、1888年の崩壊から 1~2 年の間に、現在の桧原湖、小野川湖、秋元湖、五色沼など多くの湖沼が誕生し、1890 年の年末にはほとんどの湖沼が現在の姿になっていた、とされている。しかし、湖沼の誕生は崩壊した堆積物が主に表流水をせき止めたためと考えられる。そこで、125 年間の非定常計算のモデルには、平面的に現在の主な湖沼に該当する一番上位の計算セルに後述する涵養量を与え、計算地下水水位が湖沼自体を表すセルの標高まで上昇した時から時間変化指定水位境界を設定することとした。また、地表面を表す一番上のセルには、水位上昇時の地下水を排出させるための排水境界を設定した。なお、これらの境界条件の水位は、現在の湖沼面の標高または地形面と同じ標高を与えた。

6 年間の月別非定常計算では、125 年間の非定常計算時に設定した上記の境界条件に加えて、弥六沼と毘沙門沼に地下水と地表水(沼水)の交流関係を表現するための河川境界を設置した(図 11)。時間変化指定水位境界の水位には、桧原湖、小野川湖、秋元湖の月別水位を与えた。弥六沼と毘沙門沼の河川境界には、水面の標高値を一定に与えた。

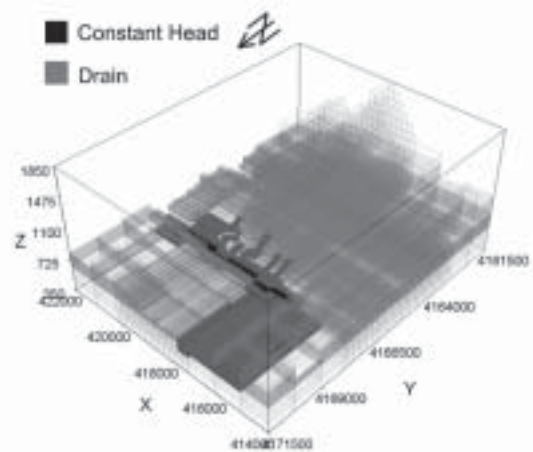


図 10 崩壊前の定常計算の境界条件

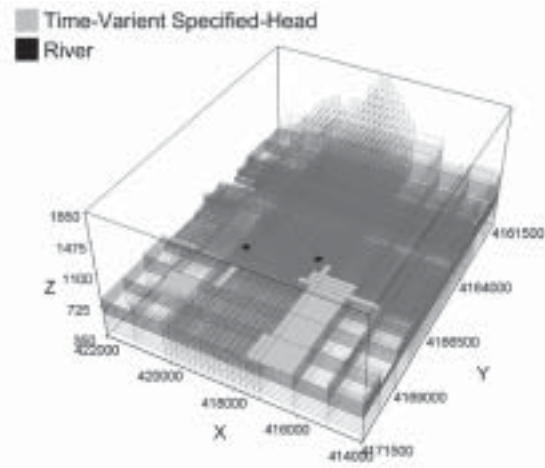


図 11 崩壊後の月別非定常計算の境界条件
2007年以降の境界条件を示す。なお、全域の地表部に与えた排水条件は省略した。

5) 地下水涵養量

モデルに入力する涵養量は、降水量からソーンズウェイト法で求めた可能蒸発散量を引いたもので、地表流出を考慮しその半分の値に土地利用ごとの涵養量比率(表3)をかけた値を入力した。ソーンズウェイト法では気象観測所桧原の月別気温のデータを用いた。桧原のデータがあるのは1973年からであるため、それ以前の気温のデータは、桧原と若松および福島との月別気温の相関を求め、回帰式により推定した値を用いた。なお、古くからの気象データがある福島でも実測値は1890年以降しかない。そのため、年別の地下水涵養量が算出できたのは、1890～2012年までの123年間である。崩壊前の定常計算には、この123年間の平均涵養量を与えた。125年間の非定常計算では、1888年と1889年の涵養量は123年間の平均値を入力し、それ以降は算出した年別涵養量を与えた。2007年からの月別涵養量は、桧原の気象データから算出したものを与えた。

土地利用ごとの涵養量比率は、国土交通省(2004)の流出係数をもとに設定した。崩壊前の定常計算では、モデル化範囲の土地利用はすべて森林であると仮定した。崩壊後の土地利用は、土地利用の変化を4時期に分けて、土地利用別の涵養量を与えた。

また、降水からの涵養量とは別に、崩壊後形成された湖沼から地下浸透が発生し地下水を涵養していたと推測し、銅沼、桧原湖、小野川湖、秋元湖では一律の0.015 m/dayを涵養量として与えた。さらに、裏磐梯スキー場付近の凹地は、両側の斜面から地表水が集まり、他よりも涵養が多いと考えられるので、約0.07 m/dayと大きめの涵養量を入力した。磐梯山の山頂部に近い標高が高い地域では、高度効果により標高の低いところに比べて降水量が多いと仮定し、実際には土地利用区分は荒地であるが、森林と同じ涵養量を入れた。

なお、裏磐梯地域では大規模な地下水揚水の情報は得られなかったため、モデルには地下水揚水量を入力しなかった。

表 3 土地利用ごとの涵養量比率

ラベル	土地利用種	涵養量比率	実際の涵養量比率
1	田	0.6	0.75
2	その他の農用地	0.6	0.75
5	森林	0.8	(基準)1
6	荒地	0.5	0.625
7	建物用地	0.1	0.125
9	幹線交通用地	0.05	0.0625
11	その他の用地	0.7	0.875
12	河川池および湖沼	0	0

国土交通省(2004)の流出係数をもとに設定した。

2. 定常計算

定常計算で使用した初期水位を図12に、また、定常計算による計算最終水位を図13に示す。定常計算は時間が無限大に経過した後の水位であるため、初期水位に見られた地下水面の凹凸はなくなり、大略的な旧地形と調和的で緩やかな地下水面が現れる。ただし、旧地形の谷付近では、設定した境界条件により地下水が排出されるため計算地下水面が低くなる。

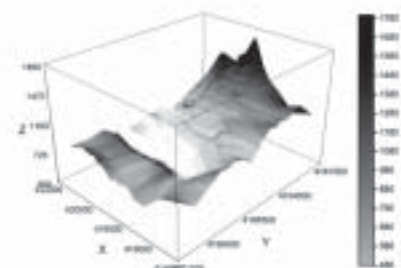


図 12 崩壊前の定常計算の初期水位

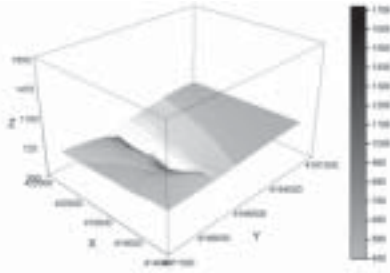


図 13 定常計算による最終計算水位

3. 非定常計算

1) 125 年間の非定常計算 (1888~2012 年)

図 13 に示した定常計算による最終計算水位を、125年間の非定常計算の初期水位として入力した。銅沼、弥六沼および毘沙門沼での計算水位変動グラフを図 14 に示す。また、計算最上部セルの最終計算水位分布 (2012 年) を図 15 に示す。

この計算によると、弥六沼および毘沙門沼における計算水位は、崩壊後から約 13 年の間まで急速に上昇し、その後緩やかな上昇に転じて、約 30 年後にほぼ定常状態に達する。桧原湖をはじめ大きな湖沼では 13 年後に計算水位が現在の湖の水位まで回復する。その後は、モデルでは湖と地下水が連続した条件となり、計算水位は年別の涵養量の増減に応じて変動するようになる。

最終計算水位分布の形状をみると、五色沼湖沼群から磐梯山山体側に向かって緩やかに地下水表面が高くなる。銅沼付近においては、初期水位の標高 797 m から 125 年間で 123 m 上昇して、最終水位は 920 m となる。銅沼付近で水位がほぼ定常状態に達するまでに約 36 年かかり、弥六沼や毘沙門沼と比べて定常状態に達するまでに時間がかかる。

なお、モデルではモデル化範囲東部の長瀬川沿いの低標高部に排水条件を設定しているが、地山の水平方向の透水係数が一律に 0.6 m/day を与えた場合には、モデル計算では大量の水がこの排水条件から排出された。実際には長瀬川地域で地下水が湧泉などにより大量に湧出している場所はないため、モデルの検証過程でモデル東部の地山

の透水係数を前述のように小さくした。

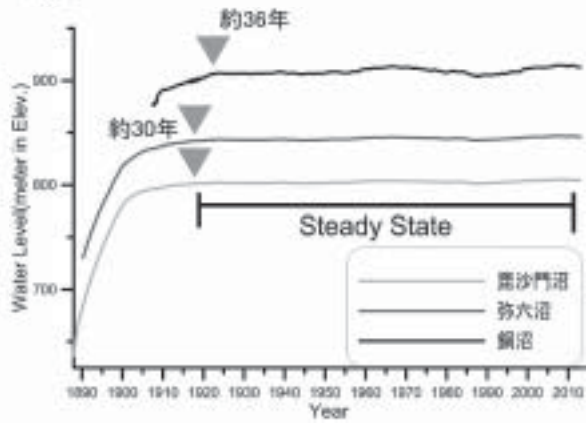


図 14 125 年間非定常計算による計算水位

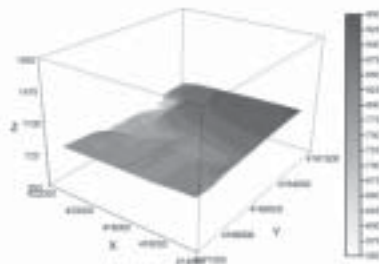


図 15 年別非定常計算による最終計算水位

2) 72 ヶ月間の非定常計算 (2007~2012 年)

この非定常計算の初期水位は、125年間の非定常計算による 2006 年の最終水位とした。それを図 16 に示す。

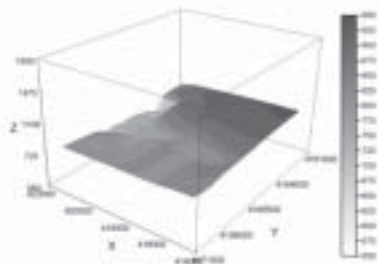


図 16 月別非定常計算における初期水位

図 17~19 には、銅沼、弥六沼、毘沙門沼の実測水位と計算水位のグラフをそれぞれ示す。なお、グラフに示した期間は、沼の水位の実測記録がある 2012 年の該当期間である。モデルの計算上、銅沼では銅沼の水と地下水は直接連続しておらず、沼の実測水位と計算地下水位には約 190 m の水位差がある。しかし、観測期間の実測沼水位と計算地下水位の低減パターンおよび低下量はよ

く似ている。弥六沼では、沼の実測水位と計算地下水位には約 11 m の水位差がある。地下水モデルによる計算は月別であるため個々の降水に対応した計算水位は表現できないが、2012 年 7～10 月の計算水位の低下傾向と 11 月の上昇傾向は実測沼水位と調和的である。毘沙門沼では、沼の実測水位と計算地下水位には約 0.5 m の水位差があるが、他の沼と比べてその差は小さい。地下水モデルによる計算は月別であるため、ここでも個々の降水に対応した計算水位は表現できないが、2012 年 7 月の計算水位の低下傾向と 11 月の上昇傾向は実測の沼水位と調和的である。

沼の水位は降水や上流からの地表水の流出入、さらには人為的な水位操作等により複雑に変動するが、降水とは直接的な関係が認められない緩やかな水位変動は、本研究によるモデル計算水位でも認められる。このことから、モデル計算によっても弥六沼、毘沙門沼において季節的に地下水の流入があることが示唆される。

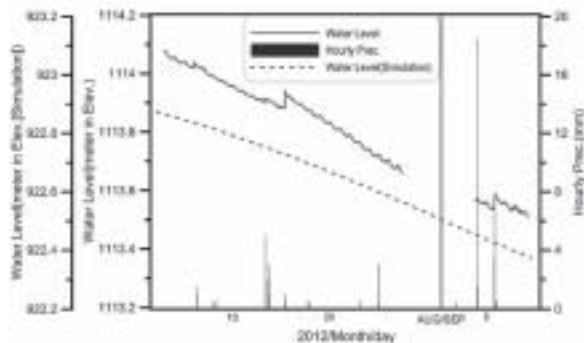


図 17 銅沼の実測水位と計算水位

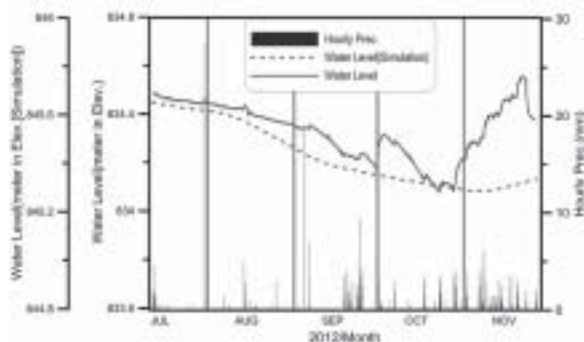


図 18 弥六沼の実測水位と計算水位

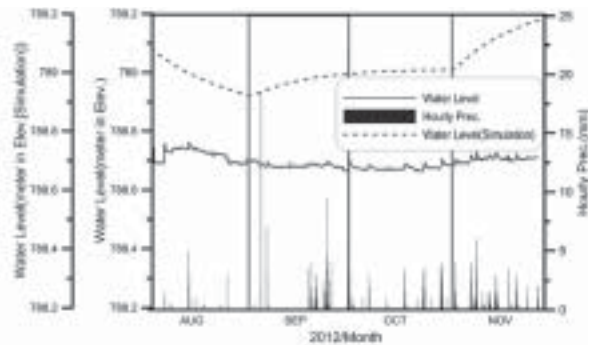


図 19 毘沙門沼の実測水位と計算水位

4. 粒子追跡計算

米国地質調査所 (USGS) が開発した MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) による計算地下水位を使用して、PM8 に付属している粒子追跡ソフト PMPATH により、移流による粒子追跡計算を行った。前述した 125 年間の年別非常計算による 2012 年の計算水位を利用して、銅沼および毘沙門沼付近に計算上の粒子を配置した。粒子追跡による計算結果を図 20 に示す。

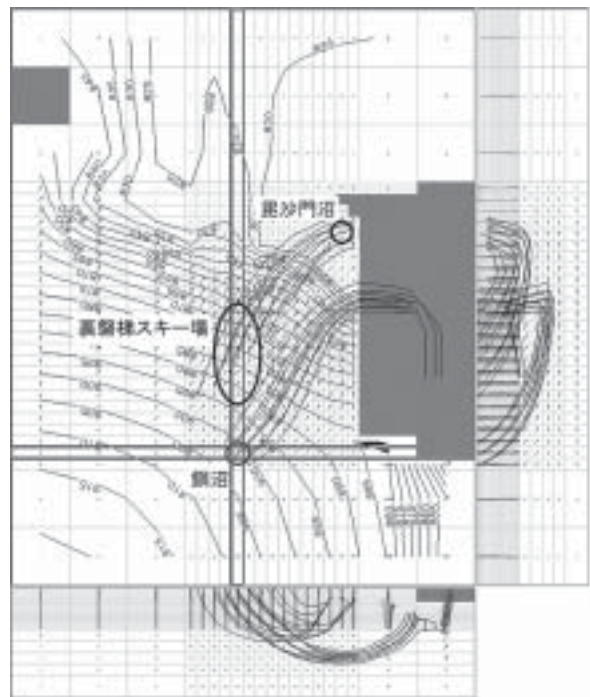


図 20 計算水位を使用した粒子追跡計算

矢印は地下水流速ベクトル、等高線は計算水位 (単位: 標高 m) を示す。断面線の交点は銅沼付近である。銅沼にはモデル 22 層、毘沙門沼には 26 層に粒子を配置した。粒子追跡計算では、計算水位は定常状態と仮定した。

これによると、銅沼付近のモデル 22 層に配置した粒子は、地下水流動に沿って北北東から北東方向に向かって移動し、毘沙門沼南方で東に向きを変える。一方、毘沙門沼付近のモデル 26 層に配置した粒子を、地下水流動の流れとは反対の上流側に向かって追跡すると、裏磐梯スキー場付近からの地下水であることがわかる。すなわち、スキー場付近の地下水は北東方向に流動し、毘沙門沼付近に到達することがモデル計算でも示された。なお、粒子追跡計算により、スキー場付近から毘沙門沼までの移動時間を計算すると、粒子の移動経路やその距離にもよるが、移動に 90~230 年程度かかり、平均的には 140 年程度かかると予測された。

以上の結果から、柴崎ほか (2012) が予察的に検討した地形および水質からみた地下水流動方向が、本研究で実施した 3 次元地下水流動モデル解析によっても再現されることが明らかになった。

V. まとめと今後の課題

本研究では、裏磐梯地域の銅沼、弥六沼、毘沙門沼に水圧式自記水位計を設置して、2012 年から沼の水位の連続観測を実施した。その結果、銅沼では 2012 年 8~9 月に水位が平均 1.9 cm/day で低下したことが確認された。弥六沼および毘沙門沼の水位は降水や地表水の流出入、人為的水位操作等で複雑に変動するが、2012 年 10 月下旬から 11 月にかけて緩やかに水位が上昇した。

これら 3 つの沼での水質分析の結果、いずれも水質組成はアルカリ土類非炭酸塩型を示し、温泉水に似た水質であることが確認された。また、福島県環境センターが 2012 年に実施した水質分析結果を解析し、銅沼から瑠璃沼、青沼、弁天沼方面にかけて溶存量の比較的多い水が分布しており、切谷面から推定した地下水流動方向と調和的であることが確認された。

裏磐梯地域の湖沼と地下水との交流関係や、

1888 年の崩壊後から現在にいたる地下水流動の変化を検討するために、3 次元地下水流動解析を行った。地下水流動解析には、MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) を改良して不圧地下水の水位上昇や非活性セルの湿潤化の再現性が良くなった MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) を使用し、崩壊前の旧地形時の地下水位分布を推定するための定常計算と、1888 年崩壊直後から 2012 年までの 125 年間の年別非定常計算、および 2007 年から 2012 年までの 6 年間 (=72 ヶ月間) の月別非定常計算を実施した。その結果、弥六沼や毘沙門沼付近では計算地下水位が崩壊後約 30 年でほぼ定常状態になることが計算された。一方、銅沼付近ではほぼ定常状態に達するまでに約 36 年かかると計算された。2007 年からの月別非定常計算では気象データから推定した月別地下水涵養量と桧原湖、小野川湖、秋元湖の月別水位をモデルに入力し、2012 年の計算地下水位を 3 つの沼で実測した水位と比較した。その結果、銅沼や弥六沼では計算地下水位は沼の実測水位よりも低くなるが、毘沙門沼では計算地下水位と実測沼水位が 0.5 m 程度の差で再現できた。弥六沼と毘沙門沼での月別計算水位変動パターンは、実測による緩やかな沼水位の変動パターンと調和的であり、2012 年 11 月には実測水位、計算水位とも地下水から沼への地下水流入があることを示唆する結果を示した。

以上のように、本研究では現地での沼の水位観測や水質分析、地下水流動解析を行い、裏磐梯地域での現在までの地下水流動とその将来を大まかに検討することができた。しかし、このような研究の成果をさらに精度良くするためには、次のような課題がある。

- ① 水文地質学的データの充実、とくに地山および崩壊による堆積物の層相区分や層相別の帯水層係数の実測と時間的・空間的分布の推定
- ② 湖沼の水位、水質だけではなく、地下水観

測孔設置による深度別地下水位の連続観測および水質定期分析の実施

- ③ 地形、地質、土地利用別の地下水涵養量の精度のよい推定
- ④ 1888年崩壊前の旧地形および地下水位分布の精度のよい推定
- ⑤ 地表水および地下水両方の水収支と水量・水質両面からの相互関係・交流関係の解明

謝辞

本研究では、資料収集や現地調査において、福島県環境センターの皆様、裏磐梯ビジターセンターの金野志帆様、磐梯山噴火記念館の佐藤公様、国土地理院の小荒井衛様、裏磐梯高原ホテルの皆様、福島大学大学院共生システム理工学研究科実践推進教育センター特任教授の佐藤一男様、福島大学理工学群共生システム理工学類の長橋良隆教授、横尾善之准教授にご協力をいただいた。

水質分析やサンプリングの方法については、福島大学大学院共生システム理工学研究科特任助教授の藪崎志穂様にご指導いただいた。

シミュレーション解析を進めるにあたり、福島大学大学院共生システム理工学研究科後期博士課程1年の佐藤真一さんからご協力を得た。

本研究を支えてくださいました皆様に厚く感謝を申し上げます。

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.

中央防災会議災害教訓の継承に関する専門調査会 (2005) 1888 磐梯山噴火報告書. 184 p.

Harbaugh, A.W. (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-

A16, variously p.

国土交通省 (2004) 流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示. 平成 16 年国土交通省告示第 521 号.

McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988) A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1, 586p.

水越博子・村上広史・星野 実 (1997) 1888 年小磐梯崩壊前後の地形図から求めた差分量. 国土地理院時報, 87, 56-67.

柴崎直明・西牧祐香・遠藤尚美・増子恵美 (2012) 裏磐梯地域における地下水流動解析のための基礎的研究～地形および水質からみた地下水流動の予察的検討～. 裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告書, 裏磐梯環境調査 1, 19-22.

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.