



JP0750160

# 地理情報システムによる広域地下水 流動範囲の設定方法に関する検討 (受託研究)

Boundary Delineation for Regional Groundwater Flow through Geographic  
Information System  
(Contract Research)

山川 正 宗像 雅広 木村 英雄 兵頭 浩\*

Tadashi YAMAKAWA, Masahiro MUNAKATA, Hideo KIMURA and Hiroshi HYODO\*

安全研究センター  
廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ

Waste Disposal and Decommissioning Safety Research Group  
Nuclear Safety Research Center

JAEA  
Research

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

地理情報システムによる広域地下水流動範囲の設定方法に関する検討  
(受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター  
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット  
山川 正\*、宗像 雅広、木村 英雄、兵頭 浩\*

(2007年2月6日受理)

放射性廃棄物の地層処分では、人間社会への核種移行を評価することが安全評価上重要である。地質事象のうち火山・マグマ活動、地震活動、地質構造の変形、熱水活動は、それらの事象に伴う水文学・水文地質学的変化を介して処分システム領域の水文学的な境界条件や地質単元の水文学的性質に影響を及ぼす可能性がある。したがって、地質事象の変化を時間的にも空間的にも包含する広域の地下水流動は地層処分の安全性のための研究として不可欠である。地下水流動研究については、既に国内において東濃鉱山や釜石、幌延など研究事例は多数あるものの、広域を対象とした地下水流動研究やその広域の範囲を設定するような研究事例は少ないのが現状である。

本研究では、地形学、水文学、地質学を対象とした既往データを利用して、広域地下水流動の及ぶ範囲いわゆる広域地下水流動範囲を設定する方法について検討することを目的とした。対象地区は、広域地下水流動に及ぼす複雑な要因の少ない堆積岩分布地域および結晶質岩分布地域のうち、結晶質岩が広域に分布しかつ集水盆地の形態が地形的に明瞭である阿武隈山地都路地区を選定した。使用したデータは地形図、数値地図、衛星データ、地質図、地形分類図、土壤図、土地利用現況図など9種類である。これらの既往データから地理情報システム(Geographic Information System; GIS)を利用して、広域地下水流動に関する主題図として地形特徴区分、地表状態区分、土地被覆区分、地質・地質構造区分および風化殻分布の5種類を作成した。この主題図を用いて、流動に影響を及ぼす地形要因、涵養条件、断裂の評価、ポテンシャル流の4項目を検討した。これらの結果を統合して、主に地表関連データから推定できる広域地下水流動範囲の設定を行なった。

その結果、都路村水盆の広域地下水流動範囲は、従来それを取り囲む尾根によって境されるとされてきたが、ポテンシャル流や断裂の存在を考慮すると、大滝根山および常葉町水盆北部を含む地域に拡張されると理解すべきであることがわかった。

---

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院の委託により実施した研究成果の一部である  
原子力科学研究所(駐在)〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\* 出向職員(三菱マテリアル資源開発株式会社)

\* 三菱マテリアル資源開発株式会社

Boundary Delineation for Regional Groundwater Flow  
through Geographic Information System  
(Contract Research)

Tadashi YAMAKAWA\*, Masahiro MUNAKATA, Hideo KIMURA and Hiroshi HYODO\*

Nuclear Facilities Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 6, 2007)

Radionuclide migration toward the human environment is to be assessed as the part of long-term safety assessments of geologic disposal of radioactive waste. Geologic processes, which include volcanic activity, hydrothermal activity, seismicity and deformation, bring about hydrogeologic changes in the regional groundwater flow system around a repository site. Groundwater flow systems in Japan have been studied in several sites such as Tono mine, Kamaishi mine and Horonobe area, but methodology of studies in these sites does not have fully developed.

This study was conducted to develop methodologies of boundary delineation for regional groundwater flow systems. Geographic Information System, GIS, was applied using available topographic, hydrologic and geologic data for an area of interest. Miyakoji in the Abukuma Mountains was selected as the area, for the reason of its simple geologic setting formed by granitic rocks and topographically gentle hills of drainage basin. Data used in this study cover topographic sheets, digital elevation model, satellite imagery, geologic maps, topographic classification maps, soil distribution maps and landuse maps. Through the GIS techniques using these data, thematic maps on topographic features, surface conditions, land coverage, geology and geologic structure and weathered crust were developed, and these thematic maps were further applied to extract four factors affecting the regional groundwater flows: topographic condition, precipitation recharge, fracture characteristics and potential flows.

The present study revealed that, taking the potential groundwater flows and characteristics of fractured zones in the area into consideration, the groundwater flow system in Miyakoji drainage basin should be bounded by the Otakine Mountain and the northern part of Tokoha Drainage Basin. The delineated area is larger than understood before.

**Keywords:** Geologic Disposal, Regional Groundwater Flow, Geographic Information System, Miyakoji, Granite, Satellite Imagery, Thematic Maps, Potential Flow, Fractures

---

Studies reported in this paper were supported in part by the Nuclear and industrial safety Agency in Ministry of Economy, Trade and Industry.

\* Research staff on loan (Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corporation)

\* Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corporation

## 目 次

1.はじめに	1
2.研究方法	1
2.1 対象地区	1
2.2 用語について	2
2.3 研究の流れ	2
2.4 使用データ	2
2.5 データ前処理	2
3.広域地下水流动に関する主題図の作成	3
3.1 対象領域の設定	3
3.2 地形特徴区分	4
3.3 地表状態区分	4
3.4 植活性度による土地被覆区分	5
3.5 地質・地質構造区分	6
3.6 風化殻	7
4.広域地下水流动に影響を及ぼす要因の検討	8
4.1 降雨量に影響を及ぼす地形要因	8
4.2 活性層の分布による涵養条件	9
4.3 断裂の評価	9
4.4 ポテンシャル流を想定した最大影響範囲	10
5.広域地下水流动範囲の設定手法	10
6.考察	11
7.まとめ	12
参考文献	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Methodology.....	1
2.1 Study area .....	1
2.2 Definition of jargons.....	2
2.3 Flowchart of the study .....	2
2.4 Data used.....	2
2.5 Pre-processing.....	2
3. Generation of thematic maps regarding regional groundwater flow.....	3
3.1 Delineation of study area .....	3
3.2 Thematic map of topography .....	4
3.3 Thematic map of surface characteristics.....	4
3.4 Thematic map of surface coverage.....	5
3.5 Thematic map of geology and geologic structures .....	6
3.6 Thematic map of weather crusts.....	7
4. Factors delineating regional groundwater flow .....	8
4.1 Topographic factor for precipitation.....	8
4.2 Groundwater charging condition of hydrologic activity zone.....	9
4.3 Evaluation of fractures.....	9
4.4 Maximum groundwater region effected by potential flow .....	10
5. Estimation of regional groundwater flow area.....	10
6. Discussion.....	11
7. Summary .....	12
References .....	13

## 1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、人間社会への核種移行を評価することが安全性を評価する上で重要である。安全評価においては、地質事象の長期にわたる時間的な変動および広域にわたる空間的な変動を特定する必要がある。地質事象のうち火山・マグマ活動、地震活動、地質構造の変形、熱水活動については、地質の変化に伴う水文学・水文地質学的変化を介して処分システム領域に影響を及ぼすケースがある。したがって地下水流动に着目すると、地質事象の変化を時間的にも空間的にも包含する広域の地下水流动は地層処分の安全性のための研究として不可欠である。地下水流动研究については、既に国内において東濃鉱山や釜石、幌延など研究事例は多数あるものの、広域を対象とした地下水流动研究やその広域の範囲を設定するような研究事例は少ないのが現状である。本研究では広域地下水流动メカニズム解明へのアプローチの1つとして、広域地下水流动の及ぶ範囲を取り上げ、調査の初期段階で収集できる既往の知見やデータを利用して広域地下水流动の影響範囲の設定方法を検討したものである。研究対象とした地域は、類型化された内陸型結晶質岩地域である阿武隈山地・都路地区である。

これまでの研究では、広域地下水流动の及ぶ範囲は地形的な尾根によって境される集水盆を対象として実施してきた。これは Toth の理論<sup>注1)</sup>による地下水流动では、尾根の位置でその地下が深度と共に地下水の等ポテンシャル面を形成し、地下水の出入りのない不透水境界として取り扱えることに基づいている。しかしながら、この条件は地形特徴のみに基づくものであり、広域地下水流动の場合には地域の大地形、降雨条件、涵養条件、断裂の評価などの条件が考慮されていない。そこで、種々の観点からの既往の知見やデータを最大限に利用して、広域地下水流动の及ぶ範囲を設定すると共に、調査の初期段階にこれらデータを GIS などの手法で整備しておく必要性がある。

このような背景から、本研究では広域地下水流动の概念に基づいて、地形学、水文学、地質学を対象として広域地下水流动の及ぶ範囲の設定に関する手法の検討を目的とした。

## 2. 研究方法

### 2.1 対象地区

対象地区は類型化された内陸型結晶質岩分布地域かつ集水盆の形態が地形的に明瞭であることを要件として、阿武隈山地都路（みやこじ）地区を選定した。

都路地区は福島県田村市に位置し、周囲を尾根に囲まれた流域面積  $117 \text{ km}^2$  の北西 - 南東方向に伸長した集水盆である。対象地区内の最高峰は桧山（標高 992.5 m）、最低標高点は流出口に当たる古道川発電所（標高 280 m）であり、北東方向に向かって開けた地形を示す。また、阿武隈山地の最高峰である大滝根山（標高 1,182 m）が対象地区縁辺より約 6 km 南西方に位置する。主な水系は古道川で、対象地区外の高瀬川に古道川発電所付近で合流する。地質は古期堆積岩類中に定置した白亜紀花崗岩類より構成される。古期堆積岩類は結晶片岩類からなり、極めて狭小に

<sup>注1)</sup> 地下水流动の基礎式を使い、様々な境界条件の下でモデルを解析的に解き、地下水の形態と地下水流动系の関係を明らかにした（地下水ハンドブック、1985）。

分布する。花崗岩類はその岩石的な特徴から3種類に区分され、対象地区ほぼ全域に分布する。地区内の断裂は古道断層（地質断層）がNW-SE方向に伸長するが、その他の断裂は知られていない。なお、対象地区の位置図は、後述の図2を参照されたい。

## 2.2 用語について

本研究での広域地下水流动の及ぶ範囲とは、地層処分における処分坑道領域およびその周囲の母岩領域を含む深度において、地下水流动が処分坑道領域およびその周囲の母岩領域に影響を及ぼす地下水の流动範囲と規定する（以降「広域地下水流动範囲」と呼称する）。ここでは押しながら地表下約1,000m程度の深度に対する地下水の流动範囲とする。

## 2.3 研究の流れ

本研究は収集した地表関連データを利用し、地形分野・水文分野・地質分野における広域地下水流动に関連する主題図を作成した。主題図は地形特徴区分、地表状態区分、土地被覆区分、地質・地質構造区分および風化殻分布の5種類からなる。これらの主題図を用いて流动に影響を及ぼす要因の検討を行なった。その観点は地形要因、涵養条件、断裂の評価およびポテンシャル流推定の4項目である。この結果を統合して、地表関連データから推定できる地下水流动範囲の設定を行なった。研究の流れを図1に示した。

## 2.4 使用データ

本研究に利用した既往データを表1に示した。これらのデータは日本国内において、どの地域でも入手できる一般的なものを選定した。

## 2.5 データ前処理

データは以降の処理・解析に供するため、測地系と投影法<sup>注1)</sup>を日本測地系2000（Japanese Geodetic Datum 2000: JGD2000）：ゾーン54（Zone54）、横軸円筒図法（Universal Transverse Mercator: UTM）に統一した。また、データフォーマットは米国ERSDAS社製画像解析ソフトウェアImagine<sup>®</sup>並びに米国ESRI社GISソフトウェアArcinfo<sup>®</sup>を利用してのことから、これらに適合するフォーマットとした。

### （1）図画データ

表層地質図などの「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」<sup>(3)-(8)</sup>図画データは、各図画コーナーの緯度・経度に地図座標を付加し、外周の余白を切り取った後にデジタルモザイク処理を行った。

### （2）衛星データ

オリジナルデータをImagine<sup>®</sup>にインポートし、濃度ストレッチ処理<sup>注2)</sup>およびエッジ強調処

<sup>注1)</sup> 座標を持った地球上のフィーチャは、測地系と投影法を指定することによりその位置を決定することができる。測地系と投影法は、目的に応じて選定や変換が可能である。

<sup>注2)</sup> 衛星画像のバンドデータでは濃度範囲が一部の領域に偏っていることが多く、この濃度範囲を広げて強調すること。

理<sup>注1)</sup>を施した。

### (3) 数値地図

緯度・経度のメッシュデータをUTM/X、Y、Z座標データに変換し、補間計算による正方格子ラスターデータを生成した。

### (4) 紙面データ

解像度300dpiでA/D変換を行い、以降図画データと同様の操作によってラスターデータを生成した。これを図幅に記載されている緯度経度座標を利用してUTMに投影した。

## 3. 広域地下水流动に関する主題図の作成

### 3.1 対象領域の設定

都路地区における地下水流动を論じるためには、その縁辺部の境界領域の地下水流动特性が明らかにされている必要がある。しかしながら、調査初期段階ではこれらの情報が欠落しているために、ここでは便宜的に都路地区の周辺を取り囲む同等規模の集水盆を抽出し、これらの集水盆を含む範囲を対象領域とした。

このために、50mメッシュ標高(Digital Elevation Model: DEM:)データを使用して、落水線による擬似水系を生成させ、その水系次数<sup>注2)</sup>によって同等規模の集水盆を定量的に把握した。その結果、対象領域は次の集水盆(名称は旧町村名を付した仮称)で構成されることとなり、それらの領域を図2に示した。

#### 対象領域を構成する集水盆

- 都路村水盆(ターゲットとする集水盆)
- 葛尾村水盆(隣接する集水盆)
- 船引町水盆(隣接する集水盆)
- 常葉町水盆(隣接する集水盆)
- 川内町水盆(隣接する集水盆) 以上5集水盆

なお、川内町水盆では末端次数がほかの集水盆よりも1次高い。これは川内町水盆の中央部で東西方向に1つの小さな分水嶺があるためである。水系次数の観点では、この領域を削除すべきであるが、ほかの集水盆に比較して流域面積が小さくなること、中央の分水嶺が地形的に低い標高を持つことから判断して、ここではこの領域を含めて1つの集水盆として以降の処理・解析に供した。

注1) 衛星画像のバンドデータに含まれる濃度の急激な変化部がエッジであり、フィルタ処理によりこのエッジを強調させる処理のこと。

注2) 河域地形の特徴は計量地形学の分野で取り扱われ、その経験則として河道数・河道長・集水面積および河道勾配の4つの地形則がある。このうち河道数が水系次数に相当し、上流より1次水系、2次水系、3次水系などと呼ばれる。水系次数と集水面積には一定の相関が認められる。

### 3.2 地形特徴区分

既存の地形分類情報に基づいて、地下水の浸透に大きく関与すると思われる要素をまとめて地形特徴区分図を作成した。また、ASTER<sup>注1)</sup> (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) フォールスカラー画像<sup>注2)</sup> を用いて地形に大きな改変が無いことを確認し、改変がある場合には適正な修正を施した。地形特徴区分に当たっては、地下水の浸透に大きく関与すると思われる要素を以下の項目で取りまとめた。

- 山地緩斜面（既存地形分類図での区分：山頂緩斜面、山腹緩斜面、山麓緩斜面）
- 山地一般斜面（既存地形分類図での区分：一般斜面）
- 台地（既存地形分類図での区分：台地・丘陵地）
- 低地（既存地形分類図での区分：低地）
- 急崖（既存地形分類図での区分：急斜面、崖）
- 崩壊地形（既存地形分類図での区分：地すべり地形）

作成した地形特徴区分を図3に示した。山地緩斜面、台地、低地は緩やかな地形であり、山地一般斜面、急崖、崩壊地形は急峻な地形である。この区分では船引町水盆、常葉町水盆は山地一般斜面が70%前後、台地、低地は合わせて20%を超えることから、比較的緩やかな地形特徴を示す。一方、葛尾村水盆は山地一般斜面が80%を超え、緩斜面および台地、低地を合わせて15%程度であり比較的急峻な地形が卓越する。

この地形特徴区分図は、既存の地形図、空中写真、衛星画像などを利用して地形の特徴を定性的に捉えたものである。これに対して、地形特徴を定量的に把握・解析するために、DEMを用いて標高分布、傾斜、方位、起伏量の各地形特徴量を算出した。集水盆地毎にその平均値、最大値、最小値、標準偏差、モードの各統計量を算出して表2にまとめた。なお、方位についてはモードのみを記載した<sup>(9)</sup>。

### 3.3 地表状態区分

現況の土地利用現況図、土壤図を利用して、降雨の浸透に大きく寄与すると考えられる要素を抽出して地表状態図を作成した。地表状態図は土地利用区分図と土壤図の2つから成る。

土地利用区分図は、以下の8種類の地表状態を区分した。

- 水田
- 畑（普通畠、果樹園、桑畠、牧草地）
- 針葉樹林（人工、天然）

<sup>注1)</sup> 1998年に打ち上げられた国産の高空間分解能・高スペクトル分解能光学センサで、地表の観測に優れ、多くの技術分野で利用されている。

<sup>注2)</sup> 画像データの任意の3バンドに色の三原色である青、緑、赤を割り当てて色合成した画像のこと。したがって、作成された画像の色調は自然の色とは異なる。自然の色に合わせた場合にはトゥルーカラー画像、似せた場合にはナチュラルカラー画像とそれぞれ呼ばれる。

- 広葉樹林（混交林含む）
- 草地（原野、荒地）
- 裸地
- 市街地
- 水域

地表状態図（土地利用区分）を図4に示した。土壤図は、降雨が地下に浸透して地下水となる過程において、地表付近で一時的に地表水をトラップする役目を果たす活性層（A層）<sup>注1)</sup>の存在と、そこから地表水が地下に浸透し易いか否かの指標となる粘土層（グライ土層）の存在を指標として、以下の5種類の土壤を区分した<sup>(10)</sup>。

- 褐色森林土（活性層が発達し、地下への浸透能力もある）
- 黒ボク土（活性層が非常に発達し、地下への浸透能力もある）
- 低地土（活性層があまり発達せず、水はけが良い）
- グライ土（活性層は存在するが、水はけが悪く地下への浸透能力は低い）
- 裸地・露岩・市街地など（活性層が未発達であり地下への浸透能力も低い）

地表状態図（土壤区分）を図5に示した。

### 3.4 植生活性度による土地被覆区分

地表状態図作成において使用した2時期のASTERデータから、植生活性度を示す指標の1つとなる正規化植生指標NDVI<sup>注2)</sup>（Normalized Difference Vegetation Index）を計算し、この特徴から土地利用区分を試みた。

ASTER フォールスカラー画像は、可視・近赤外領域の波長帯のバンド1、2、3にそれぞれ青、緑、赤を割り当てた色合成画像である。ASTER のバンド2は可視領域（波長：0.63～0.69 μm）で、この波長帯での植生の分光反射率は0.2以下である。一方、バンド3の近赤外領域（波長：0.76～0.86 μm）では、植生の分光反射率は0.6を超える。これは葉体に含まれるクロロフィルの反射特性であり、植生の活性度が高い場合には近赤外領域の光をより強く反射するようになる。この特性を利用して、バンド2と3のデータから以下の式によるNDVIが計算される<sup>(11)</sup>。

$$\text{NDVI} = (\text{Bn.3} - \text{Bn.2}) / (\text{Bn.3} + \text{Bn.2}) \quad \text{Bn. : バンドの DN 値}$$

<sup>注1)</sup> 中間流出機構を司る地表面土壤のこと。林草地には団粒構造をした数cm～数10cmの樹草の腐敗した層があり、間隙率が極めて大きい。降雨は重力水となって山腹表層に沿って側方浸透流を形成し、これが表面流・地下水の元となる。

<sup>注2)</sup> 衛星画像の多バンドデータから求められる植生の有無・多少・活性度を示す指標の代表的なものである。種々の植生状態に対応するように様々な植生指標が開発されている。なお、活性度とは、植物活性の度合いを示す尺度である。

2 時期の ASRTER フォールスカラー画像および NDVI 画像を図 6 に示した。2002 年 9 月 20 日の画像は初秋の落葉前であり、植生が十分繁茂している時期であることから、0.3 以上の高い指数を示す山間部と、それ以下の低い指数を示す市街地などが明瞭に区分できる。一方、2003 年 5 月 2 日の画像は春の雪解け後の状態であり、初秋の画像とは異なり山間部に指数の高い部分と低い部分が区分できる。これは常緑樹と落葉樹の反射率の相違を示しており、市街地は双方の画像で大きな変化は認められない。

それぞれの NDVI 画像のヒストグラムを図 7 に示した。これを見ると、9 月のデータでは高い部分に値が集中しているのに対して、5 月のデータではその値が比較的幅広い範囲で分布していることがわかる。また、9 月のデータでは NDVI 値 0.5 付近にモードがあり、NDVI 値 0.35 付近に別の小さなモードがある。また 5 月のデータでは NDVI 値 0.25 にモードがあり、NDVI 値 0 付近に別の小さなモードが存在する。これらのモードと画像との関係を調べると、9 月の NDVI 値 0.35 と 5 月の NDVI 値 0 の値はいずれも山間部と平野部の境界にほぼ相当し、5 月の NDVI 値 0.25 は、山間部植生の色調変化部分にほぼ相当することがわかった。これらの値をそれぞれの NDVI 値に対する閾値として、表 3 に示すような区分が可能となった。

2003 年 5 月の ASTER フォールスカラー画像と比較すると、山間部のわずかな色調の相違や市街地の状況などを良く区分していることがわかる。また、地表状態図（土地利用区分）と比較すると、林地（針葉樹、広葉樹、混交林）の分布が区分 1、2 にほぼ相当しており、その中でも広葉樹の分布がおおむね落葉樹の分布（区分 2）に対応する。区分 3 の領域は、平野部と山地部の間に多く見られる山裾の開発地域である。

本研究の対象地区では、既存資料として土地利用区分図や土壤図などが整備されているが、既存資料が充分でない地域でのデータ補間や最新の開発状況などの情報補充として、衛星データを使った土地利用区分が充分に活用できる。

### 3.5 地質・地質構造区分

既存の地質図および表層地質図から、地下水流动に大きく関与する要素をまとめて地質・地質構造図として取りまとめた。記載した内容は地質区分、断層、リニアメント<sup>注1)</sup>の 3 項目である。

表層地質区分では、表層地質図<sup>(3)-(8)</sup>を参考にして 13 の地質単元区分を行った。ただし、各種の第四紀未固結堆積物については細分せず、1 つの地質単元とした。

断層については、表層地質図<sup>(3)-(8)</sup>に記載されているものと、20 万分の 1 地質図<sup>(2)</sup>に記載されているもの双方を参考にして、確認断層・推定断層の 2 区分を設定した。なお、本対象地区では破碎帶の記載は見られなかった。

リニアメントについては、ASTER フォールスカラー画像を利用して、写真地質学的手法による抽出を実施した。抽出にあたっては以下の判断基準を設定した。

- 明瞭なリニアメント：リニアメントの存在を示す地形特徴が明瞭であるもので、“直線

---

<sup>注1)</sup> 断裂の可能性のある地表の線状の構造を指す。衛星画像や空中写真を利用して抽出されることが多い。

状の水系流路”、“傾斜変換点の連続”、“直線状の谷”の3つに区分した。

- 不明瞭なリニアメント：リニアメントの直線状の形態が不明瞭で、地形特徴が曖昧なもの。
- その他 : 一部で認められた環状構造。

作成した地質・地質構造図を図8に示した。対象地区は、そのほとんどが白亜紀の花崗岩類で構成される。3種類の花崗岩（花崗岩質岩石1、2、3）が貫入した時期はほぼ同時期であると考えられており、花崗岩質岩石1は花崗閃緑岩、同2は黒雲母花崗岩、同3は角閃石黒雲母花崗閃緑岩である<sup>(3)-(8)</sup>。これらの花崗岩類は、河床付近を除くといずれも風化が著しく、広範囲にマサ化しており、場所によって地表下数10mに達するところがあると記載されている<sup>(6)ほか</sup>。また、常葉町水盆南部には年代不詳の石灰岩・頁岩を主体とする堆積岩類が一部に分布する。

断層はほぼE-W方向に発達し、一部にそれと斜交するNE-SW方向、NW-SE方向のものが認められる。都路村水盆の中央西部にほぼE-W方向に伸張する断層は、花崗岩類を境する確認された断層として記載されている<sup>(2)</sup>。また、桧山断層・古道断層として、粘土化帯を伴った遮水壁を形成する断層としての記載もある<sup>(12)</sup>。対象地区東縁には畠川破碎帯から派生したと考えられる南北方向の推定断層が見られる。

リニアメントはE-W～WNW-ESE方向、NE-SW方向に連続ならびに断続するゾーンが認められる。明瞭なリニアメントのうち直線状の水系流路を示すものは、地質図記載の断層に一致する傾向にある。不明瞭なリニアメントは地域全般に分布するが、一部でその密度が低下する。

### 3.6 風化殻

対象地区は花崗岩が主体であることから、花崗岩特有の風化が報告されている。花崗岩の風化層は地下数10mにも達し、山地における帶水層の役割を果たす。

遠藤ほか<sup>(13)</sup>は、都路村水盆周辺における地形図の接法面図の標高区分から、I区（標高800～1,100m）、II区（標高600～700m）、III区（標高300～600m）の3つのゾーンに区分し、I区とIII区では風化花崗岩が、II区ではマサ<sup>注1)</sup>が卓越して分布していることを示した。そこで、改めて都路村水盆周辺についてDEMから接法面図（検索半径：500m）を作成し、I区とIII区およびII区に相当する標高の区分を行い、風化殻分布図<sup>(13)</sup>および地域区分図<sup>(14)</sup>との比較を行った。その結果、中程度の風化帯が桧山から大滝根山にかけての区域、古道から北西方向（楨梨子）および南方向に伸びる水系沿い、剣持山に至る区域などに分布し、いずれも接法面図上の風化度の低い地域に相当している。一方、鎌倉山から田代、馬洗戸、剣持山西部にかけての風化度の高い区域は、接法面図上の標高570～750mに良く対応する。また、檜山から大滝根山にかけての風化花崗岩分布域は標高が高く低風化度の区域に相当し、古道および上川内付近は標高が低く高風化度の区域に相当している。

そこで、花崗岩の分布する地域について、接法面図上で標高570～750mは最も風化度が高いマサの分布区域、それ以外の地域は風化度のやや低い風化花崗岩の区域であると仮定し、対象地

<sup>注1)</sup> 花崗岩類岩石が風化を被ると鉱物粒からなる砂状の物質に変化する。この砂をマサとよび、その過程をマサ化と呼ぶ。

区全域に拡張した。マサの分布を地質・地質構造区分図上に重ねて図9に示した。各集水盆における風化花崗岩とマサの分布面積と集水盆全体に対する比率を算出すると、いずれの集水盆でも風化花崗岩、マサともにほぼ同等の面積比で分布しているが、葛尾村水盆ではマサが比較的広く分布する傾向にあった。

#### 4. 広域地下水流动に影響を及ぼす要因の検討

本項では、上記で作成した主題図を利用して、広域地下水流动に影響を及ぼす要因について検討した。検討項目は降雨量に影響を及ぼす地形要因、活性層の分布による涵養条件、断裂の評価、ポテンシャル流<sup>注1)</sup>を想定した最大影響範囲の4項目である。特に地形特徴については、従来その統計量についての議論が行なわれているが、この項目はポテンシャル流を想定した最大影響範囲に包含されるため、ここでは降雨量に影響を及ぼす地形要因として利用した。

##### 4.1 降雨量に影響を及ぼす地形要因

湿度を含んだ大気が山地斜面に沿って上昇する時、上昇した大気は断熱膨張により冷却され、水蒸気の凝縮が降雨をもたらす。集水盆を取り囲む斜面の傾斜・方位と卓越風の関係は、集水盆への降雨の供給に少なからず影響を及ぼす。ここでは先に検討した地形特徴を利用して、降雨に影響を及ぼす地形特徴について検討した。

降雨メカニズムを地形の観点から捉えると、谷が狭く急峻であるほど降雨に至る雲の発生は高まり、逆に谷が広くなだらかであるほど雲の発生は抑制されると仮定する。地上開度( $\phi$ )と斜面傾斜( $\theta$ )を用いて、次式による地形の急峻さを指標Stで定義した。

$$St = ((\cos(\phi/2)+1) \times \sin(\theta)) / 2$$

地上開度は0~360度の範囲を示し、地上開度=0で最大、地上開度=360で最小となる。また、斜面傾斜は急である場合に最大値、平坦である場合に最小値をとるよう斜面傾斜の正弦をとった。この結果、Stは0から1の範囲で地形の急峻さを表現できる。この値が小さい場合は地上開度が大きく傾斜が小さい平地のような開けた地形を示し、逆に値が大きい場合は地上開度が小さく傾斜が大きい谷のような閉じた地形を示す。このStを便宜上“地形峻度”と呼ぶこととする。地形峻度図を図10に示した。

この図を見ると、谷の奥深くの急斜面の部分で高い値を示していることがわかる。各集水盆について、方位別にこの統計量(平均値、最大値、最小値、標準偏差、モード)を表4にまとめた。また、この集計結果から、集水盆毎の方位別地形峻度をレーダーチャートにプロットして図11を作成した。

その結果、都路、船引、川内の各集水盆は、ほぼ同規模で南北に伸びた橢円の分布を示した。このことは、これら3つの集水盆の主要な水系が東西方向に伸びていることを表わす。一方、葛

<sup>注1)</sup> 流体ポテンシャルによる地下水の流れを指す。流体ポテンシャルは重力・圧力・速度の各ポテンシャルによって決定され、地下水はポテンシャルの高い所から低い所に向かって移動する。

尾村水盆と常葉町水盆はN～SW方向に高い値を示した。特に常葉町水盆では集水盆の東部から南部にかけて大滝根山をはじめとする高い山地が連なり、急峻なW～N方向の斜面分布が現れているものと解釈できる。葛尾村水盆では、同集水盆北部中央のE-W方向に連なる南北斜面が、ほかの地域の一般的な斜面よりも急峻であることを意味する。

一方、表5に、対象地区に近いアメダス観測点“川内”における2000年から2004年までの最大風速時の風向の平均方位と降水量の平均値を示した。降水量が100mmを超える4月から10月にかけての風向は、おおむねSEからSSW方向である。これは、夏の太平洋高気圧が湿った南風をもたらしているためである。常葉町水盆ではSW方向の斜面で地形峻度が高いことから、降雨量が多くなることが推定される。

#### 4.2 活性層の分布による涵養条件

地表の降雨は、表面流として水系に流出するものと、活性層にトラップされて中間流となるもの、中間流から浸透して地下水となるものがある。活性層の発達が悪い場合、降雨はそのまま表面流として水系に流下し、地下に浸透する量は僅かとなる。一方、活性層が発達する場合、降雨は一時的に活性層に蓄えられた後、地下まで浸透して地下水となる。活性層の存在は降雨による涵養を左右する重要な指標である<sup>(14)</sup>。

作成した地表状態図から、活性層が発達していると推定される区分として、土地利用区分では林地、土壤区分では褐色森林土および黒ボク土が該当する。しかしながら、双方の図面におけるそれらの分布を比較すると、土壤区分における褐色森林土および黒ボク土は、土地利用区分における林地以外の領域も多く含み、両者は必ずしも一致した分布とはなっていない。これは区分の観点が異なることから生じた結果と解釈される。

そこで、より確実性の高い領域を抽出する観点から、土地利用区分における林地であり、かつ土壤区分における褐色森林土および黒ボク土の分布を示す領域を活性層が発達する地域と仮定して、各集水盆における活性層分布域を抽出した。活性層の抽出結果および活性層発達域の面積と対集水盆面積比を図12および表6にそれぞれ示した。

その結果、川内町水盆で活性層の分布率が高く、船引町水盆および常葉町水盆で低いことがわかる。また、都路村水盆および葛尾村水盆はそれらの中間の値を示した。船引町水盆および常葉町水盆では市街地や水田、畑地が広がっていることから活性層の発達が悪く、この傾向は後述の各集水盆の地形特徴とも関連する。

#### 4.3 断裂の評価

既存地質図に記載されている断層、推定断層およびASTER フォールスカラー画像から抽出したリニアメントを用いて、断裂データの分布密度<sup>注1)</sup>を定量化した。この処理におけるラスターデータのピクセルサイズは25m、断裂の影響範囲は半径250m(21×21格子の積算フィルタに相当)に設定している。作成した断裂密度図を図13に示した。

<sup>注1)</sup> 断裂の密度は、通常一定面積中の断裂の地表軌跡長で表現される。したがって、その単位はkm/km<sup>2</sup>→km<sup>-1</sup>となる。

その結果、対象地区内葛尾村水盆、船引町水盆、常葉町水盆のほぼ全域、都路村水盆北部および川内町水盆南東部に高密度帯が集中した。一方、川内町水盆北西部、都路村水盆南部は低密度帯となった。この低密度帯は、花崗岩質岩石2の分布域に相当しており、花崗岩質岩石の物性との係わりの可能性が指摘できる。集水盆別の断裂系密度と集水盆面積比の統計量を参照すると、上記の結果は統計量と良い整合を示し、都路村水盆と川内町水盆で断裂系密度がほかの集水盆より低い値を示した。

なお、マサの分布と断裂の高密度帯は相反的に分布する傾向があり、この観点では常葉町水盆の南東部から川内町水盆の北西部にかけての地域および都路村水盆東部については、特異な地域といえる。

#### 4.4 ポテンシャル流を想定した最大影響範囲

対象地区的広域地下水流动はポテンシャル流を基本とし、表層近くの断裂および風化によって形成されたマサ化部分が帶水層になる可能性が指摘されている。さらに、広域地下水流动シミュレーションの最も基本的なパターンでは、大滝根山から古道への広域地下水流动が想定されている<sup>(15)</sup>。したがって、ポテンシャル流を想定して地下水の流动経路の水平距離と勾配を利用した幾何特徴から、ポテンシャル流による最大影響範囲を見積もることが可能と考えられる。大滝根山から古道への広域地下水流动の幾何特徴を図14に示した。

古道の大滝根山に対する仰角は3.84度であることから、大滝根山から伏角3.84度で見下ろしたときに、その面よりも下にある地点ではポテンシャル流としての影響を受けると仮定する。この仮定に基づいて、各集水盆の境界（分水嶺）にある標高の高い山を6箇所選定し、その範囲を計算した。山頂からの影響範囲のうち、大滝根山の例を図15に示した。

その結果、日山、移ヶ岳、矢大臣山および万太郎山については、その影響範囲は都路村水盆の分水嶺を越えないという結果となった。鎌倉岳は常葉町水盆と都路村水盆の境界にあることから、都路村水盆の内部に対して影響を及ぼす。さらに、全く隣接していない葛尾村水盆南部の沢に対しても、船引町水盆との境界線の尾根を越えて影響が及んでいることがわかる。一方、大滝根山は都路村水盆とは隔たった位置にあるが、その影響は都路村水盆南西部の広い範囲に及ぶ。特にこの地域では水系の傾斜に沿うように、3次水系にまで影響範囲が広がる。

#### 5. 広域地下水流动範囲の設定手法

本研究では、地形・水文・地質分野における既往データを利用し、広域地下水流动に関連する主題図の作成およびこれらに基づく流动影響要因の検討を行なった。これらの結果を用いて、調査初期段階における広域地下水流动範囲の設定手法について検討する。

先ず流动影響要因<sup>注1)</sup>毎に都路村集水盆とそれを取り巻く他の集水盆との係わりについて検討する。

<sup>注1)</sup> 流動影響要因として、本研究では①降雨量への地形特徴、②活性層の分布、③マサの分布、④断裂の高密度帯、⑤ポテンシャル流の5項目を取り扱った。

降雨量に影響を及ぼす地形要因としての地形峻度は、尾根付近で高く、特に大滝根山周辺や鎌倉岳から移ヶ岳にかけての南斜面で高い傾向にある。したがって常葉水盆北部・南部および川内町水盆西部で、相対的に大量の降水量が期待できる。

活性層の分布では、川内村水盆と葛尾村水盆で高い値を示し、少なくともこれらの地区では地表の涵養における必要条件を備えている。先の大滝根山周辺や鎌倉岳から移ヶ岳にかけての南斜面では活性層が認められ、充分な涵養機能を有していることが伺える。活性層と共に、主題図の作成で取り扱ったマサの分布は、花崗岩地域の地下水の中間流および地下水貯留に関し重要な役割を担う。マサの分布は基本的に尾根付近にし、特に葛尾村水盆ではマサが比較的広く分布する傾向にある。

断裂は現段階ではそれらの性状が判明していないため、安全サイドからの判断では地下水の水みちとしての可能性を検討すべきである。都路村水盆の境界を切断する断裂の高密度帯は、都路村水盆西部から常葉町水盆のほぼ全域、および都路水盆南東部から葛尾村水盆東部にかけての地域である。なお、断裂の高密度帯とマサの分布は相反的に分布する傾向がある。

ポテンシャル流については、地形データを利用しながら地下水流动そのものを対象にその影響範囲を検討したものである。影響の範囲は、大滝根山が都路村水盆南西部の広い範囲に及び、移ヶ岳は都路地区そのものへの影響はないものの、常葉水盆の北部（断裂高密度帯に相当）に影響を及ぼしている。

これらの要因の影響の程度を考察しながら、地域毎にその特徴を表7にまとめた。

この表より、常葉水盆北部および川内町水盆西部が、都路村集水盆に影響を及ぼす地域として抽出できる。それらの特徴は次のように推察される。

- ポテンシャル流：大滝根山⇒都路村水盆（地域最高峰であり、接峰面図で都路村水盆へ向かう緩斜面を形成）
- 断裂中の地下水の移動：移ヶ岳⇒都路村水盆（涵養された地下水は、断裂を水みちとして移動）

この結果を地図上で確認すると、図16のようになる。一般的には都路村水盆の地下水流动範囲は、それを取り囲む尾根（同図中黄色細線）によって境されるが、本研究の結果、大滝根山および常葉町水盆北部を含む地域（同図中赤色太線）に拡張すべきことが判明した。

## 6. 考察

本研究では、既往のデータのみを利用して、調査初期段階の地下水流动範囲の設定を行なった。地層処分では処分地点が広域地下水流动のどのような場（例えば涵養域・流出域など）にあるかは、その地域の地下水流动特性を知る上で極めて重要である。しかしながら、調査初期段階ではこれらの詳細な情報を取得することは困難あると考えられるため、先ずどのような地下水流动の場であっても、処分地点を含む1つの集水領域を特定することによって、以降の調査方針を的確に立案することができる。

本研究の内容を発展させるためには、個々の既往データの精度や要因の種類、さらには付加すべきデータの議論が当然されるべきであるが、ここではそのうち特に重要と考えられるポテンシ

ヤル流を想定した最大影響範囲の見積りと、本研究結果をどのように次の調査に反映させるかについて考察する。

#### (1) ポテンシャル流を想定した最大影響範囲の見積り

これまでに調査・研究された結晶質岩地域における広域地下水流动に関する既往流动シミュレーション結果を表8にまとめた。また、その幾何学的特徴を図17に示した。

これらは地質環境などの相違、流动モデルの精度、利用コードの違いなどはあるが、地下水流动の影響範囲を特定する指針の1つと考えることができる。それによると、流动水平距離と標高差（涵養域と流出域の標高差）には一定の関係が認められ、ここでは  $y = 0.1082x + 524.25$  で直線近似された。これを流动水平距離（m）と地形傾斜あるいは伏角（°）の関係にプロットすると、同図中右のような関係（青色の点は水平距離1,000 mあたりの地形傾斜を示す）となり、これらを満足するような範囲で広域地下水の流动が期待できる。しかしながら、これまでの調査・研究の事例が少なく、今後これを拡充する必要がある。

#### (2) 本研究結果の反映方法

本研究結果の反映方法として、最も重要と考えられるのが広域地下水流动シミュレーションである。当然のことながら、これまでの既往データの取りまとめは、シミュレーションにおける基礎データとして活用することができ、シミュレーションの結果は広域地下水流动範囲を検証すると共に範囲の設定にフィードバックすることができると予想される。ここで大きな課題となるのは、本研究結果で得られた広域地下水流动範囲における縁辺部の境界領域の設定方法である。境界領域が目的とする集水盆の外側で別の尾根である場合には、恐らく Toth の流动概念に基づき、その尾根を不透水境界あるいは等ポテンシャル境界として設定することができる。しかしながら、尾根や河川ではなくそれらの中間の斜面ではどのように取り扱うべきかの課題が残る。本研究の例でも、確かに大滝根山から都路村水盆への影響はポテンシャル流として解釈できるが、その正確な境界は決定することが困難である。このような場合には、現段階ではそれを包含する外側の尾根あるいは谷を境界とせざるを得ないであろう。今後の研究の進展と共に、これらの解釈が拡充されていくことが望まれる。

### 7. まとめ

広域地下水流动範囲の評価手法に関わる研究の結果は、次のようにまとめられる。

- 既往データを活用して、広域地下水流动範囲の設定に重要と考えられる項目を、地形・水文・地質分野から選定し、地形特徴区分、地表状態区分、土地被覆区分、地質・地質構造区分、風化各分布の5項目の主題図を作成した。
- これらの主題図に基づいて、広域地下水流动に影響を及ぼす要因を検討し、地形要因、涵養条件、断裂の評価、ポテンシャル流推定を行い、広域地下水流动範囲の設定を実施した。
- その結果、都路村水盆の地下水流动範囲は、従来それを取り囲む尾根によって境されるとされてきたが、ポテンシャル流や断裂の存在を考慮すると、大滝根山および常葉町水盆北部を含む地域に拡張されると理解すべきであることがわかった。

### 参考文献

- (1) 久保和也、柳沢幸夫、吉岡敏和、高橋浩：浪江及び磐城富岡地域の地質・地域地質研究報告（5万分の1 地質図幅、地質調査所、pp.1-104、1994.
- (2) 久保和也、柳沢幸夫、山元孝弘、駒澤正夫、広島俊男、須藤定久：20万分の1 地質図幅「福島」、産業技術総合研究所地質調査総合センター、2003.
- (3) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 原町・大甕、福島県、pp.1-53、1990.
- (4) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 浪江・磐城富岡、福島県、pp.1-57、1991.
- (5) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 川前・井出、福島県、pp.1-61、1993.
- (6) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 川俣、福島県、pp.1-43、1988.
- (7) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 常葉、福島県、pp.1-66、1995.
- (8) 福島県農地林務部：土地分類基本調査 小野新町、福島県、pp.1-65、1996.
- (9) 日本地形学連合・技術講習会実行委員会：DEM データ処理技術講習会、1998.
- (10) 農耕地土壤分類委員会：農耕地土壤分類、第3次改訂版、農業環境技術研究所、No.17、1995.
- (11) (財)資源・環境観測解析センター：資源・環境リモートセンシング実用シリーズ③、地球観測データからの情報抽出、2003.
- (12) 農業用地下水研究グループ：日本の地下水、地球社、pp.224-227、1986.
- (13) 遠藤則夫、木宮一邦：中部阿武隈山地の花こう岩類風化殻の分布状態と黒雲母の風化変質、応用地質、Vol.28、No.3、1987.
- (14) 金丸昭治、高棹琢馬：朝倉土木工学講座4、水文学、朝倉書店、1976.
- (15) 東北農政局計画部：農業用地下水調査 大滝根北東地区調査報告書－花コウ岩中の地下水－、pp.1-53、1978.
- (16) 東北農政局計画部：花崗岩地帯（南部阿武隈山地）における岩盤地下水について、阿武隈南部地区 中山間大規模（岩盤）地下水開発調査報告書、pp.1-206、1990.
- (17) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成14年度報告－、pp.3-4～3-16、2003.

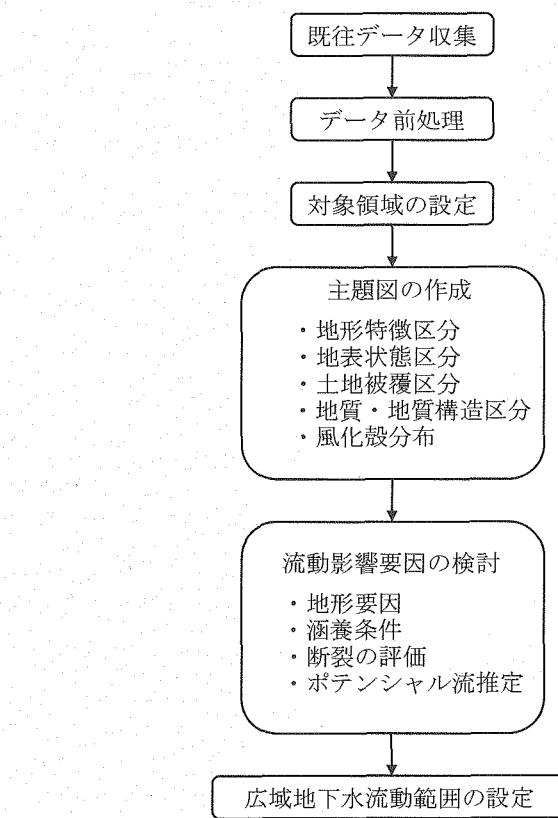
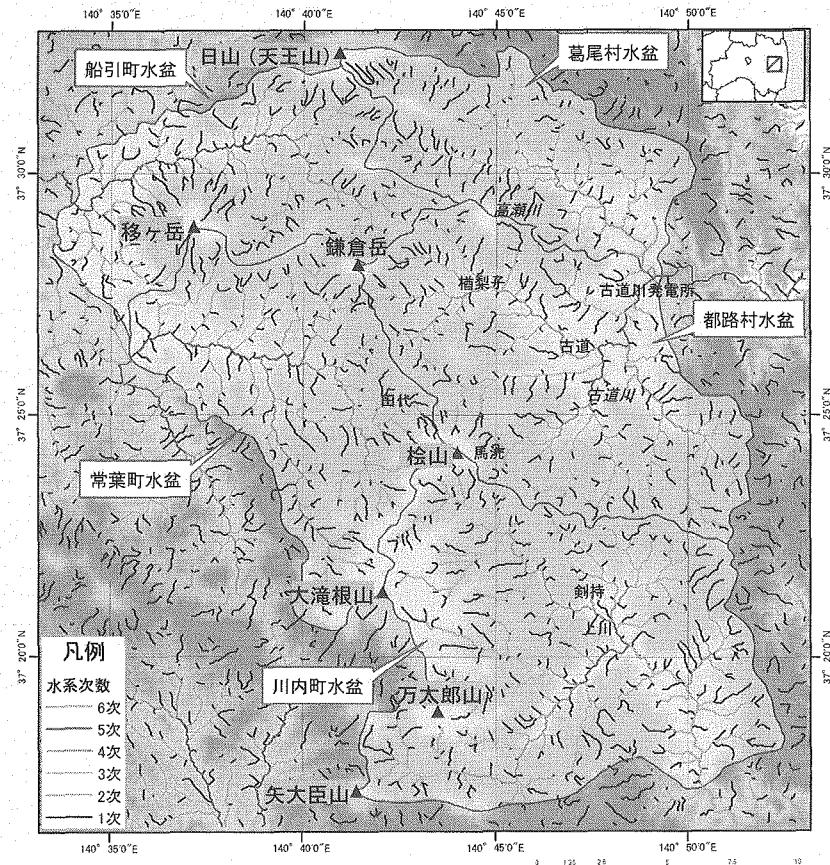


図1 研究の流れ



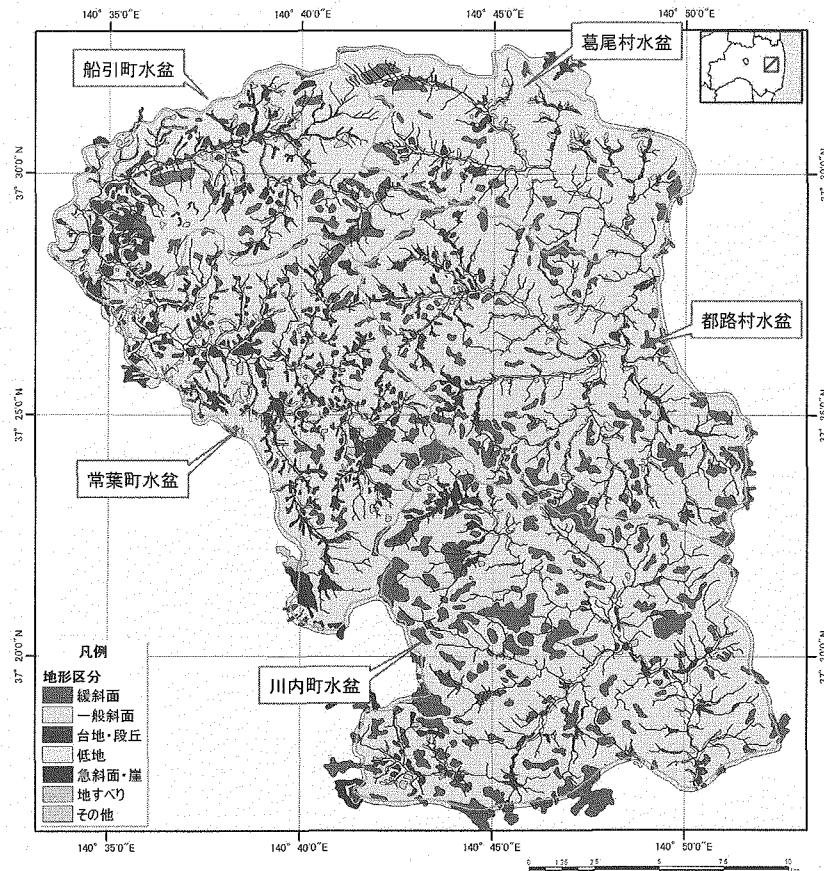


図3 地形特徴区分図

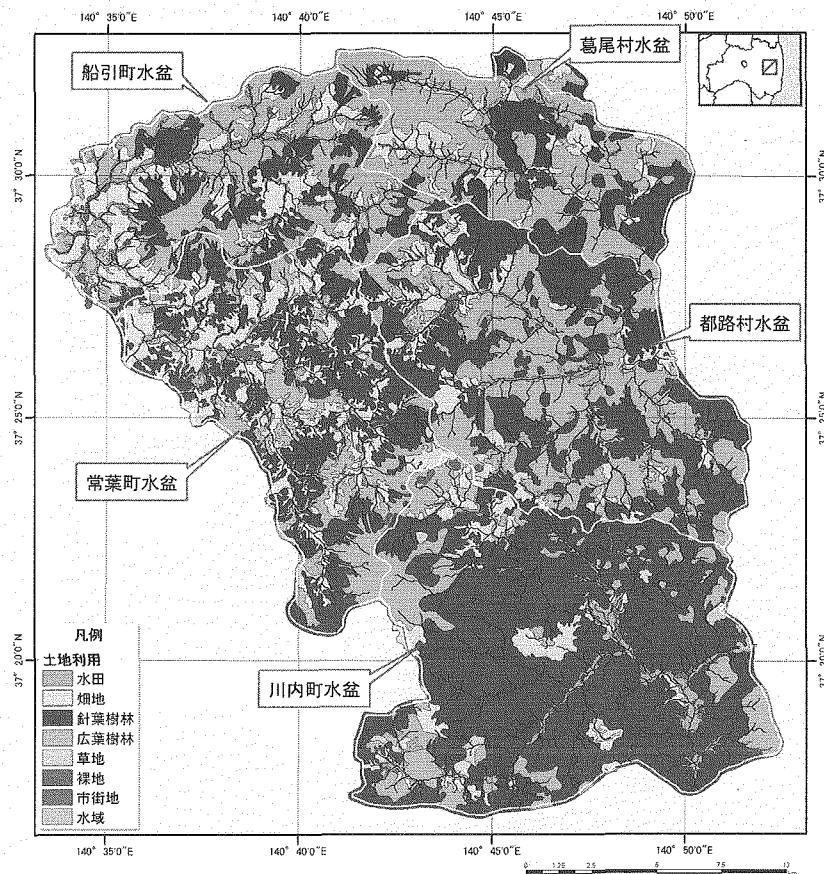


図4 地表状態図（土地利用区分）

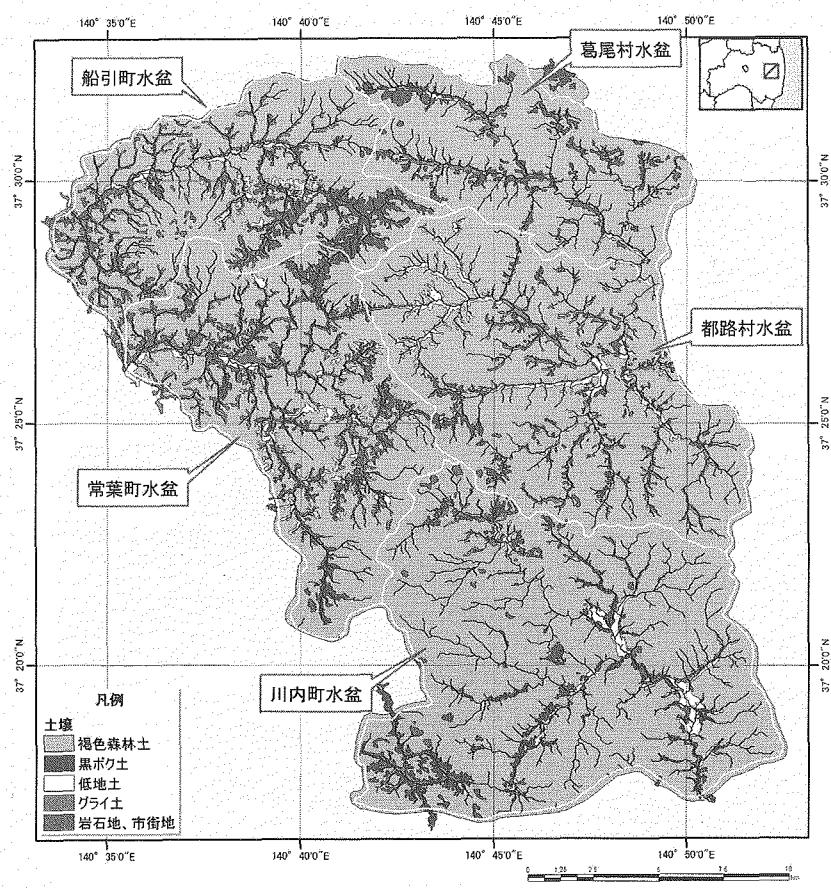


図5 地表状態図（土壤区分）

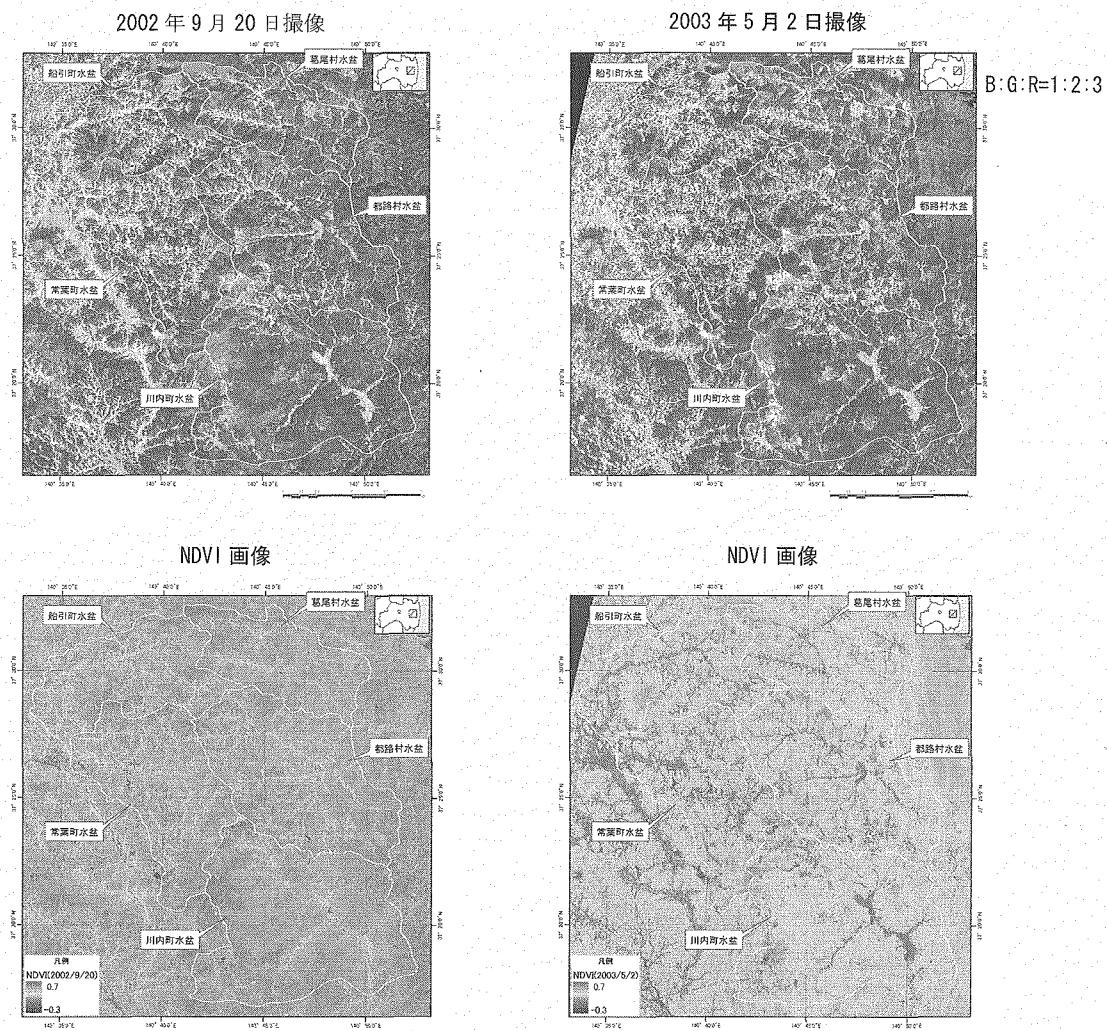


図 6 ASTER 画像の処理

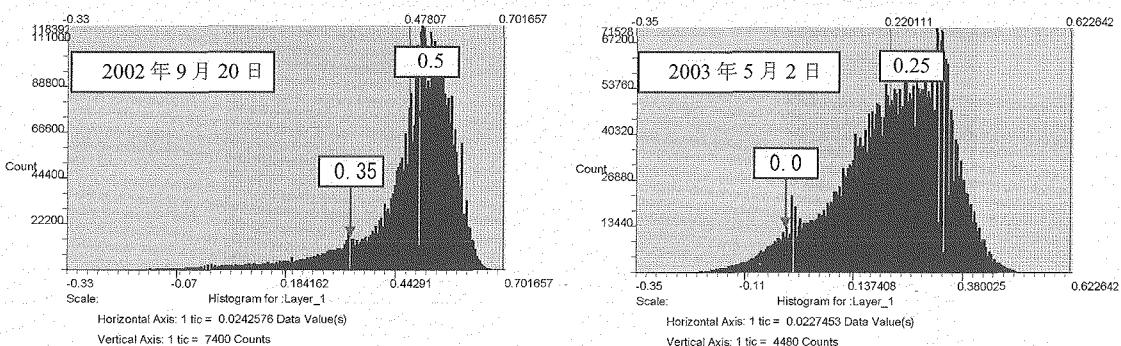


図 7 NDVI 画像のヒストグラム

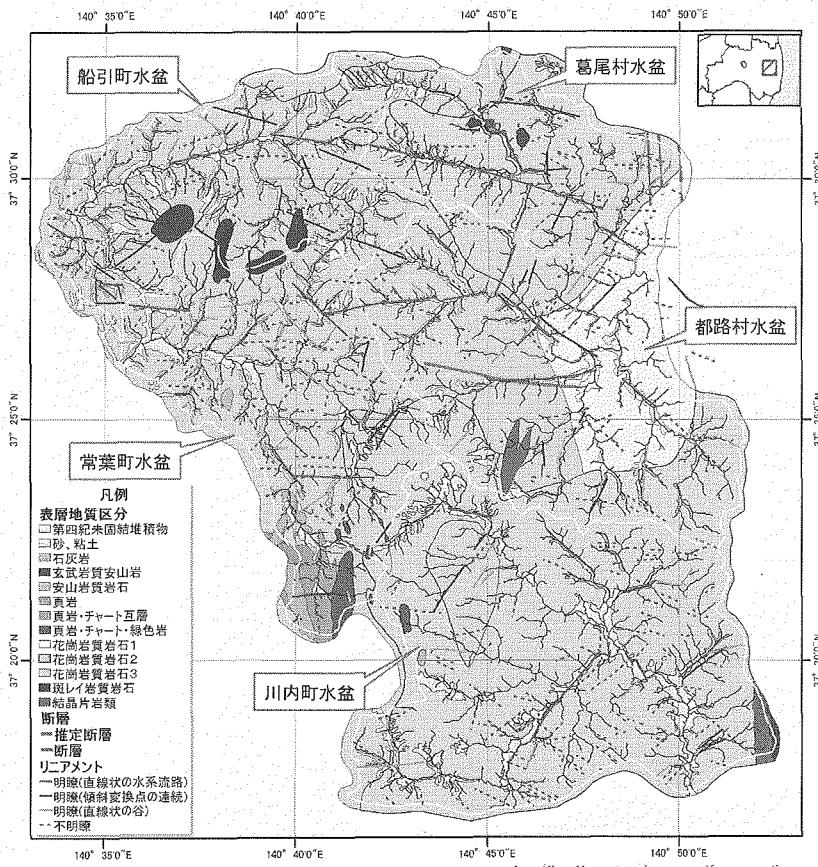


図8 地質・地質構造図

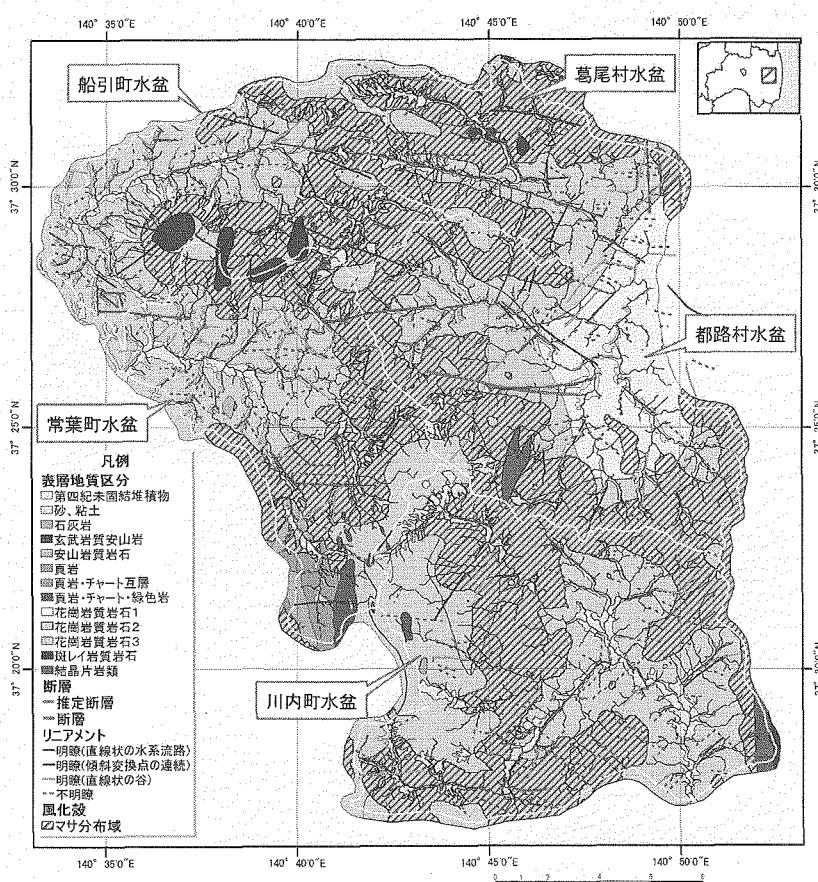


図9 地質・地質構造図とマサの推定分布域

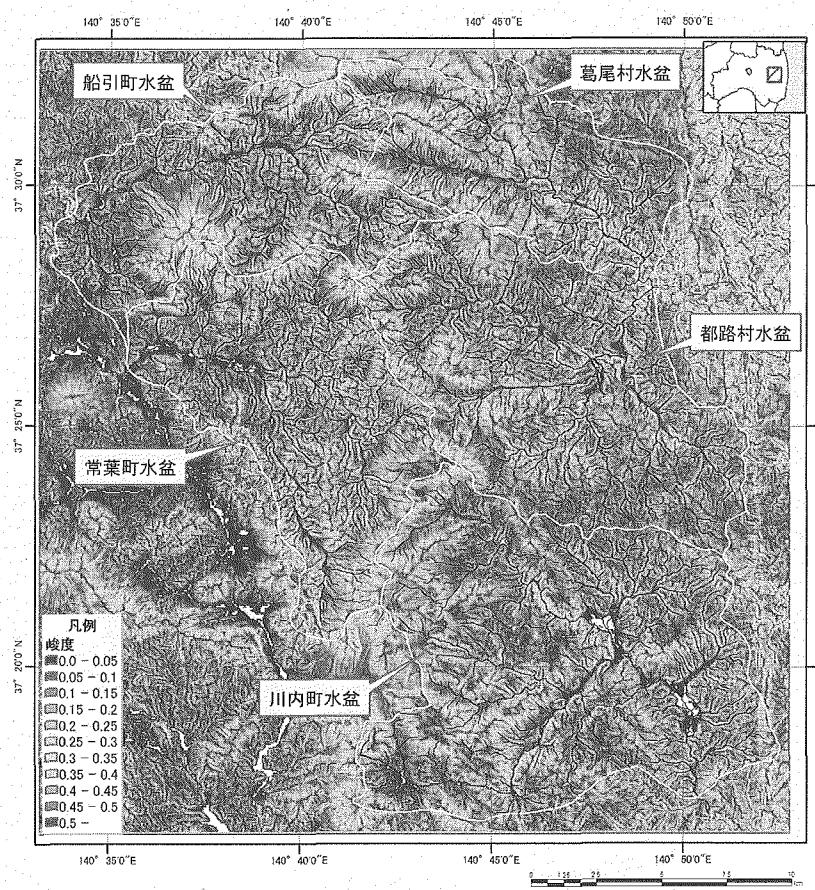


図 10 地形峻度図

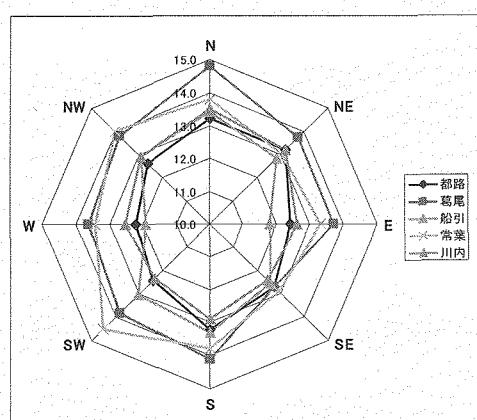
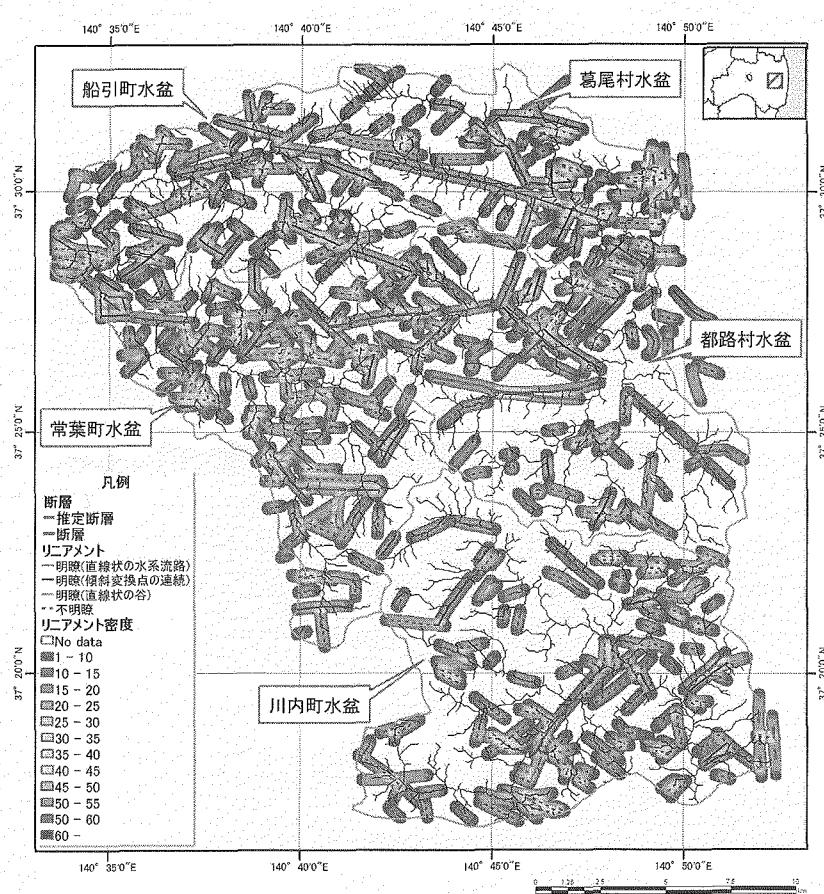
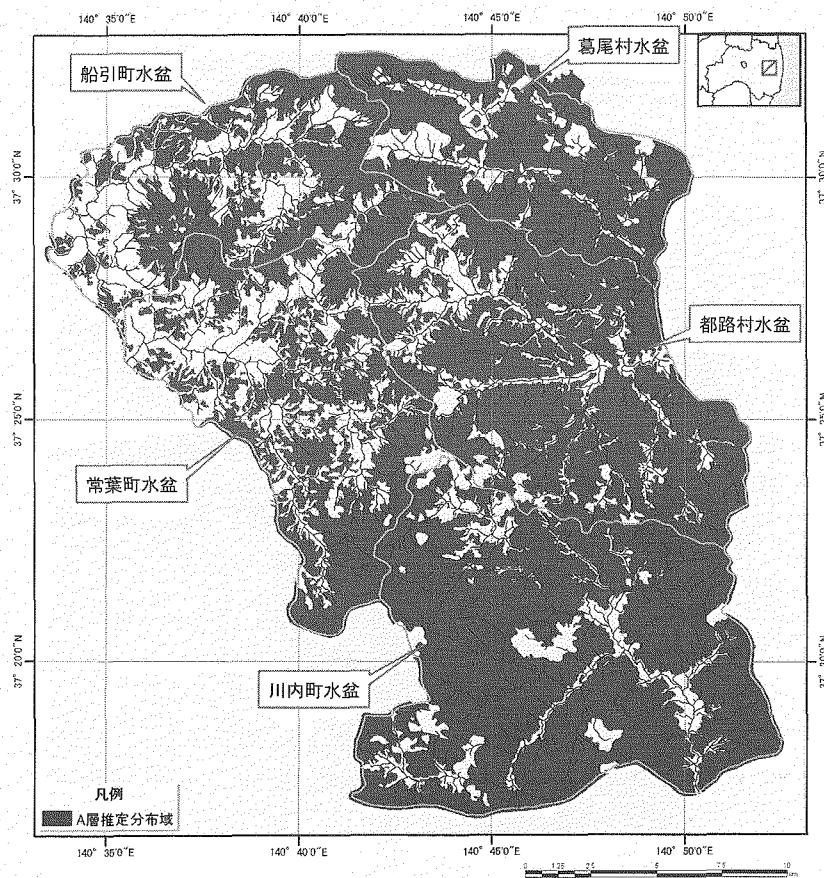


図 11 方位別地形峻度分布チャート



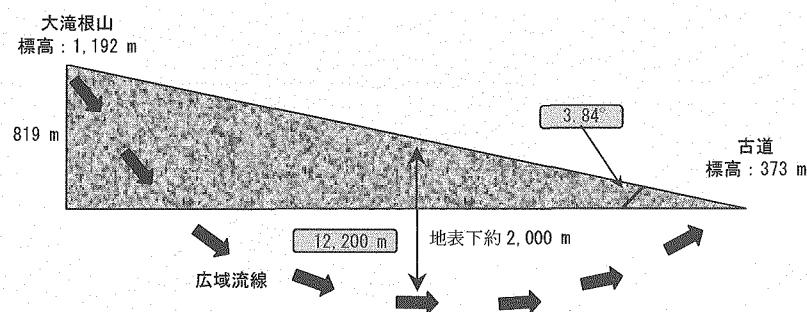


図 14 大滝根山と古道の広域地下水流动における幾何特徴

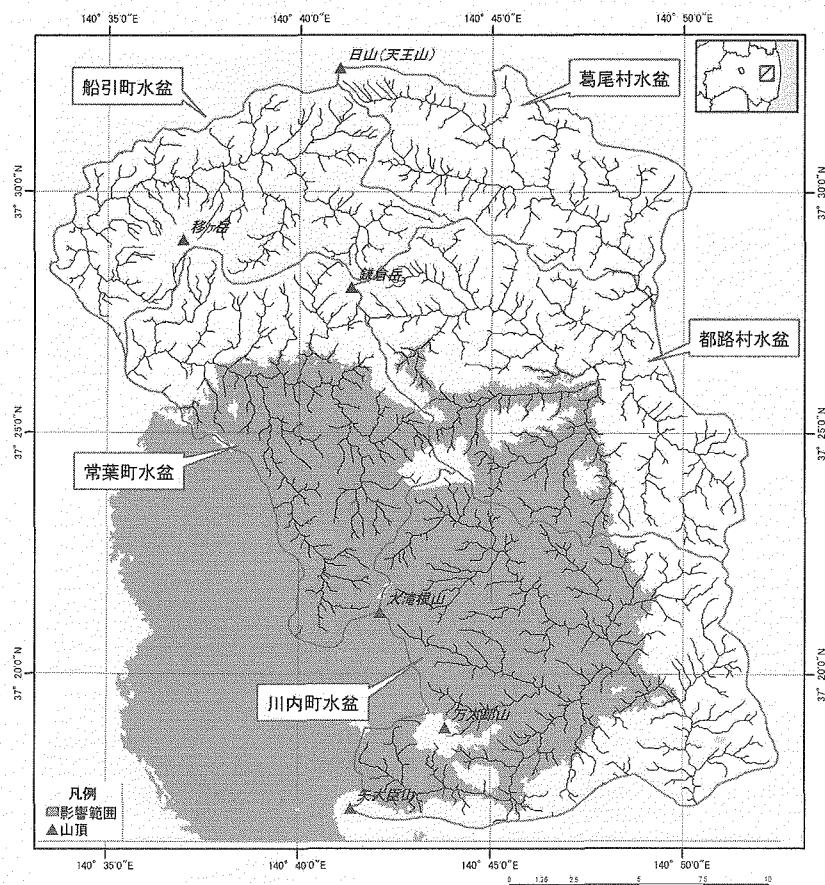


図 15 山頂からの影響範囲（大滝根山）

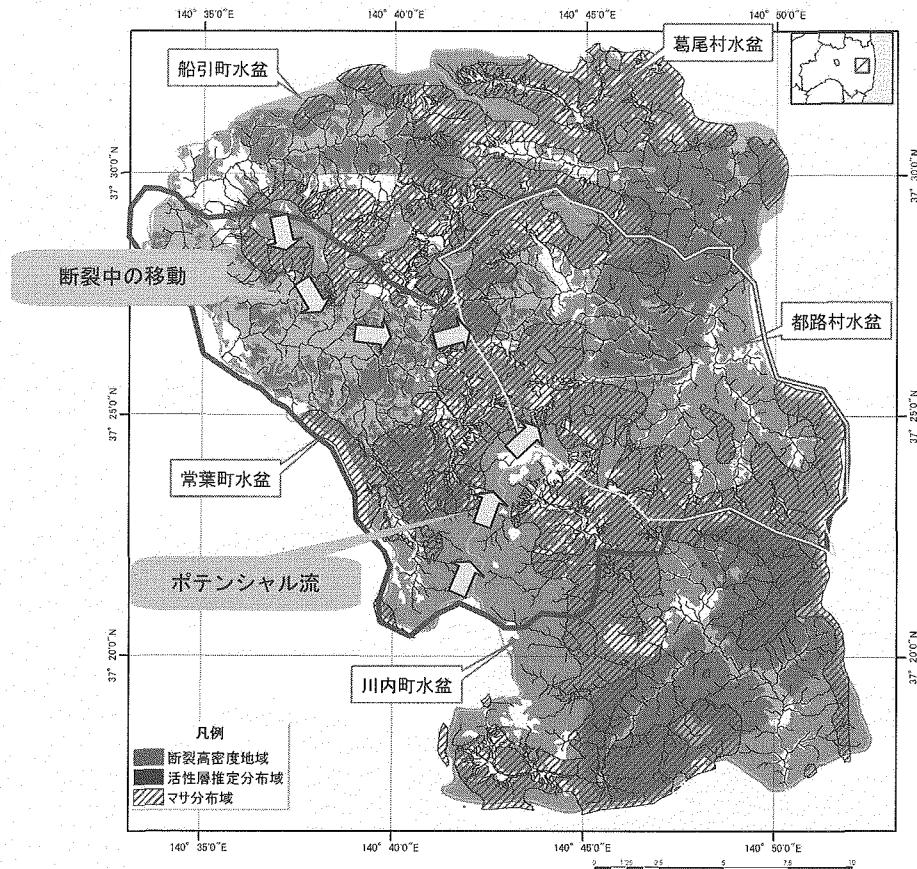
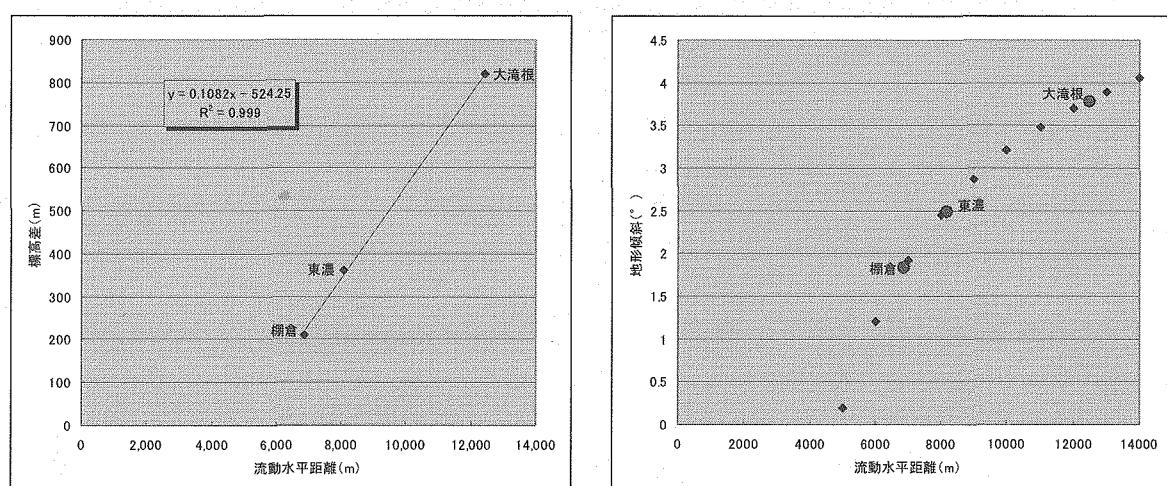


図 16 広域地下水水流動範囲設定図



註) 青色の点は水平流動距離 1,000 m 毎に地形傾斜を  
プロットしたもの。

図 17 広域地下水水流動の幾何学的特徴

表1 使用データ一覧

データの種類	データの名称	縮尺など	データタイプ	出典
地形図	「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」	1:50,000	ラスター	国土地理院
数値地図	50m メッシュ (標高)	1:25,000 相当	メッシュ	国土地理院
衛星データ	(夏期データ) ASTER データ、取得年月日 2002/09/20、オルソ画像 (冬期データ) ASTER データ、取得年月日 2003/05/02、オルソ画像	15 m 地上分解能 (可視・近赤外バンド)	ラスター	財団法人資源・環境観測解析センター
地質図	「浪江及び磐城富岡」 <sup>(1)</sup>	1:50,000	紙面データ	地質調査総合センター
地質図	「福島」 <sup>(2)</sup>	1:200,000	紙面データ	地質調査総合センター
地形分類図	「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」 <sup>(3)-(8)</sup>	1:50,000	ラスター	国土交通省
表層地質図	「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」 <sup>(3)-(8)</sup>	1:50,000	ラスター	国土交通省
土壤図	「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」 <sup>(3)-(8)</sup>	1:50,000	ラスター	国土交通省
土地利用現況図	「原町」、「浪江」、「川前」、「川俣」、「常葉」、「小野新町」 <sup>(3)-(8)</sup>	1:50,000	ラスター	国土交通省

表2 DEM による地形特徴量の統計量

水盆名		都路	葛尾	船引	常葉	川内
標高(m)	平均値	545.7	573.0	555.7	593.8	617.0
	最大値	985.6	1,050.6	978.1	1,187.5	1,187.5
	最小値	288.5	270.5	381.7	406.0	377.1
	標準偏差	95.5	107.8	111.6	130.0	137.9
	モード	560.5	556.2	437.3	512.2	568.1
傾斜(度)	平均値	10.7	11.7	10.8	11.4	10.9
	最大値	36.0	35.0	36.0	42.0	35.0
	最小値	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	標準偏差	5.1	5.4	5.6	5.8	5.4
	モード	10.0	10.0	10.0	10.0	8.9
方位(度)	モード	32.4	181.6	321.0	226.7	59.1
起伏量 (m)	平均値	28.7	30.5	28.6	30.4	28.5
	最大値	87.4	88.8	94.5	122.7	85.4
	最小値	0.9	1.6	0.9	0.4	0.2
	標準偏差	11.1	11.9	12.8	13.3	12.1
	モード	24.3	27.2	23.0	28.4	23.1

註) 方位は北を 0 度として時計回り 360 度法標記。

表3 NDVIによる被覆区分

データ取得年月日	区分番号	1	2	3	4	5
2002年9月	閾値	NDVI $\geq$ 0.35	NDVI $\geq$ 0.35	NDVI $\geq$ 0.35	NDVI<0.35	NDVI<0.35
2003年5月	閾値	NDVI $\geq$ 0.25	0.25>NDVI $\geq$ 0.0	NDVI<0.0	NDVI $\geq$ 0.0	NDVI $\geq$ 0.0
区分理由		夏期・冬期共にNDVI値が高い。	夏期にNDVI値が高いが、冬期には低下する。	2003年にNDVI値が極端に低下(裸地と同等)する。	夏期にNDVI値が低下し、冬期にやや低いNDVI値を示す。	夏期・冬期共にNDVI値が低い。
被覆区分		常緑樹林	落葉樹林	開発地	畠地など	裸地、市街地

註) 2002年の閾値と2003年の閾値は、常にAND条件とした。

表4 地形峻度の方位別統計量

水盆名		都路	葛尾	船引	常葉	川内
N	平均値	13.2	14.8	13.4	13.8	13.5
	最大値	46.9	51.1	15.5	47.6	40.8
	最小値	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5
	標準偏差	7.1	7.8	7.4	7.8	7.3
	モード	10.8	10.4	7.1	15.1	11.0
NE	平均値	13.2	13.7	12.8	13.0	13.2
	最大値	45.0	44.4	40.1	56.2	48.6
	最小値	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4
	標準偏差	7.1	7.6	6.9	7.8	7.2
	モード	12.7	11.2	13.4	11.2	9.5
E	平均値	12.4	13.7	11.8	13.3	12.6
	最大値	47.5	47.9	43.1	57.1	45.0
	最小値	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4
	標準偏差	6.8	7.1	6.9	7.4	7.0
	モード	9.5	11.5	10.6	9.2	10.4
SE	平均値	12.7	12.7	12.5	12.9	12.4
	最大値	46.8	43.0	49.3	51.4	42.3
	最小値	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5
	標準偏差	6.8	6.9	7.6	7.3	6.9
	モード	9.2	11.5	6.8	11.5	8.8
S	平均値	13.2	14.1	13.3	13.8	12.9
	最大値	48.2	56.6	48.0	62.7	47.6
	最小値	0.5	0.4	0.6	0.4	0.4
	標準偏差	7.2	7.2	8.0	8.5	7.2
	モード	11.0	12.0	10.0	7.6	8.4
SW	平均値	12.4	13.8	13.0	14.5	12.3
	最大値	42.1	55.8	43.9	64.3	47.5
	最小値	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
	標準偏差	6.2	7.0	7.7	8.4	7.0
	モード	11.1	12.5	9.5	12.9	11.4
W	平均値	12.2	13.6	11.9	13.4	12.5
	最大値	45.3	48.4	50.3	62.7	41.9
	最小値	0.5	0.6	0.4	0.6	0.6
	標準偏差	6.3	7.4	6.9	7.7	7.0
	モード	12.4	15.6	10.5	10.8	10.0
NW	平均値	12.6	13.8	12.9	14.0	12.9
	最大値	52.8	51.2	46.3	53.7	3.4
	最小値	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4
	標準偏差	7.0	7.0	7.2	7.9	7.2
	モード	10.4	17.3	8.7	9.5	10.7

表5 アメダス観測点“川内”の月別平均風向と平均降水量

	風向	降雨量 (mm)		風向	降雨量 (mm)
1月	W	97.0	7月	SE	219.4
2月	ENE	20.6	8月	SSE	123.2
3月	WNW	90.4	9月	SSW	217.8
4月	SE	100.2	10月	SSW	217.0
5月	SE	103.8	11月	WSW	86.2
6月	SE	116.8	12月	WNW	41.4

註) 2000年から2004年までの平均値。風向は月最大風速時の風向を使用。

表6 活性層発達域の面積と対集水盆面積比

集水盆名	都路	葛尾	船引	常葉	川内
流域面積(km <sup>2</sup> )	117.0	63.7	78.5	94.0	149.4
活性層分布面積(km <sup>2</sup> )	91.8	50.2	45.0	53.7	126.2
活性層分布面積比(%)	78.5	78.7	57.3	57.1	84.5

表7 広域地下水流动における周囲の集水盆の影響の程度

流动影響要因	影響度	葛尾村 水盆	船引町 水盆	常葉町 水盆		川内町 水盆		備考
				北部	南部	東部	西部	
降雨量への地形特徴	小	×	×	○	×	×	○	
活性層の分布	大	○	×	○	×	○	○	
マサの分布	中	○	×	○	○	×	○	
断裂の高密度帯	大	×	×	○	×	×	×	都路村水盆へ連続
ポテンシャル流	大	×	×	×	×	×	○	

註) 影響度: 相対的大きさ、○: 該当する、×: 該当せず

表 8 広域地下水流動に関する既往流動シミュレーション結果

地域名	流出域	涵養域	流動水平距離	深度	備考
棚倉 <sup>(16)</sup> (阿武隈山地、内陸型結晶質岩)	干泥(温泉) 標高 518m	那倉 標高 729m	6,876m	約-500mGL	流出域に遮水壁となるNNW-SSE方向の断層あり
大滝根 <sup>(15)</sup> (阿武隈山地、内陸型結晶質岩)	古道 標高 373m	大滝根山 標高 1,192m	12,441m	約-2,000mGL	断層の影響なし 風化による岩石の透水性を3層構造として設定
東濃 <sup>(17)</sup> (東濃花崗岩、内陸型準結晶質岩)	研究所用地 標高 180m	高根山 標高 541m	8,085m	約-2,000mGL 以浅	標高-2kmGLの流動は 広域ローカルスケールに相当

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
立体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量)濃度	モル每立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$	$m \cdot m^{-1}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$	$m^2 \cdot m^{-2}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$	$s^{-1}$
压力	ニュートン	N	$N \cdot m^2$	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$N \cdot m$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率	ワット	W	$J/s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C		$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラード	F		$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω		$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	シemens	S		$V/A$
磁束密度	エーバ	Wb		$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H		$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		$K$
光束	ルクス	lx	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	$lm/m^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy		$m^2 \cdot s^{-2}$
分与、カーマ				
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv		$J/kg$
人線量当量、組織線量当量				$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際に、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$N/m$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンロビ	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	Gy	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg = 10^{-7} J$
ダイニ	dyn	$1 dyn = 10^{-5} N$
ボルト	P	$1 P = 1 dyn \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストップ	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
チル	sb	$1 sb = 1 cd/m^2 = 10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲ	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$
X線単位		$1 X unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
トーラ	Torr	$1 Torr = (101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101325 Pa$
カリ	cal	$1 cal = 1 J = 10^4 erg$
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$