

P1 火山体における水循環機構のモデル化

ー調査事例に基づく知見の総合と数理モデル構築へ向けた概念モデルの提案ー

東京大学農学部 芝野博文

1. はじめに

メラピ火山、磐梯山を対象に水収支に関する調査が砂防学会のプロジェクトとして進行中である。これまでの調査で集積された知見は、火山体の水循環上の部分に関するものであった。今後、最終的な目標であるモデルによる現象の再現を行なうためにも、そこに至るまでの調査の焦点を絞らねばならない。あるいは調査項目を補充するためにも、火山体の特性を取り入れた水循環モデルを作成してこれらの知見を総合することが必要である。本講演では、火山体の水循環上の各素過程を数値的に再現可能な数理モデル作成を指向して、その前段階である概念モデルの提案をおこなう。

2. 「火山体水収支研究」からの知見の整理

図-1に調査対象地であるメラピ火山の地形図を示す。同図上には観測機器の配置状況、水収支を複数の河川を一括して考えるべく設定した扇形の流域界、収支を調べる等高線方向の鉛直横断面である検査面(CHK1, CHK2)を表示した。検査面では河川流量、浅層地下水流量が求められる。扇形流域に流入される降水、そこからの出力である蒸発散は独立に求められ、検査面での流出量との長期間の収支が検討される。この収支の残差が深部浸透により系外に流去する量である。以上が現地調査による長期的な水収支推定の大枠であるが、この論に沿う形で現在までの知見を整理してみると、

- 1) 火山体の形状は円錐形をなすかあるいは部分的に円錐形をなす。このような形状の火山体では、山腹の縦断形状は勾配の急変点を境に山岳部と山麓部にわかれる。
- 2) 勾配の急変点より少し山麓に下った地点では多くの湧水が分布する。湧水点は年間を通じて(雨季と乾季にかかわらず)その位置は不変であり、流量も安定している。河谷の開析の程度に応じて湧水点が標準的な位置よりは上流あるいは下流に移行する。
- 3) 山麓部では河川が常時流水を有し、周囲の浅層の地下水からかん養を受ける得水河川(effluent stream)となる。
- 4) 山岳部では地下水位は深く、河川は主に高水時のみ流水をもつ形態が多く、周囲の帯水層をかん養する失水河川(influent stream)となる。このかん養量は、河道の面積が流域に比較して相対的に狭いこと、かん養が生じている時間が短いことから、量的には無視しうる。
- 5) 山岳部での河流は稀に発生する高強度の降雨によってもたらされる一時的なものである。河流の起源は部分的に分布する低浸透能域を流下する表面流によって生成される。これは刻々変化する火山活動によって変化する。
- 6) 山麓部での河流は流下にとまって基底流量を増大させるがその増分は周囲の浅層地下水からのかん養によって大部分が説明される。
- 7) 山麓部での河川水の降雨に対応した直接流出成分は土地利用の形態に応じて大きく異なる。土地利用が水田の場合は、極めて鋭い応答特性を示す。

- 8) 浅層地下水は自由地下水面を有し、地表から自由地下水面までは不飽和帯となる。地表からかん養される水分は鉛直不飽和浸透流となる。
- 9) 浅層地下水のさらに深部に深層地下水の存在が十分に予想される。深層地下水の流動は浅層地下水の水位分布によって規定される流動とは独立に流動するものの浅層地下水との水の交流が予想され、ひいては河流の基底流量を規定している。

3. モデルによる表現目標

分布型の流出モデルを組立ことを目標にしているため、短期的な高水流出を任意の点で任意の時刻で再現することが可能である。加えて、次の項目が表現できよう。

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1) 地域別の蒸発散量と地域別の降水量 | 2) 不飽和域の鉛直方向水分分布とその経時変化 |
| 3) 土地利用に対応した地表流と浸透流 | 4) 任意の河道上の点で降雨に対応した短期出水 |
| 5) 任意の点での浅層地下水位とその経時変化 | |

4. モデルの構造の概要

- 1) 火山体の形状を活かし、かつ、火山噴出物の分布状況を容易に区分できる方法として図-2のような格子を考える。それぞれの格子は山頂からの放射方向の辺と円周方向の辺とで囲まれている。円周方向は等高線に対応し、放射方向は落水線と一致する。
- 2) それぞれのセルは鉛直方向に図-3のような構造を持つ。上から、地表、不飽和帯、浅層地下水上部、浅層地下水下部、深層地下水におおまかに区分する。
- 3) 河道は図-2のように放射方向と等高線方向の経路で表現し河床の深さを放射方向で与える。等高線方向はそれらをつなぐ傾斜した河床として表現する。高水時の流水の移動はkinematicな流れとする。
- 4) 地表では土地利用に応じて不飽和浸透流に関するパラメータを与える。地表が水田の場合や山岳部の急勾配区域で新鮮な火山噴出物からなるところはkinematicな流れが表面地形に応じて発生する。ただし、微細な地形に対応した現実的な水位変化や表面流の追跡のためにはセルをさらに細分した微細セルを設定する。
- 5) 浅層地下水に到達するまでは不飽和鉛直浸透を表現するリチャーズ式を用いる。セルの不飽和領域では自由地下水面までの距離は自由地下水面の変動に応じて変化する。
- 6) 浅層地下水は切谷面を境に上部と下部に分離する。無降雨時に河川に流水が確認される場合は切谷面の上部に自由地下水面が形成される(図-4)。図-4a、図-4bには雨季と乾季を想定した自由地下水面の形状を模式的に示した。
- 7) 自由地下水面の等高線方向の横断面形状は図-4に示した横向きの放物線である。一つのセルの右辺と左辺で河道の標高が異なる時は地下水面は図のように相反する方向をもつ二つの地下水面形として近似的に与えられる。その頂点の等高線方向での位置は切谷面の勾配に依存して決定される。また、頂点の鉛直方向の位置はセルの水収支に対応して自在にその位置を変化させる。セルの水収支は雨水の浸透、水田からの浸透、蒸発散、近接するセルからの流入流出、深層地下水からの流入あるいは深層地下水への流出によって支配される。
- 8) 切谷面より下部には側方に流動しないで縦断方向にのみ流下する浅層地下水成分を置く。その最下

端は地下構造の情報がない限り、地表下 $H[m]$ という定数を与える。当面 H は、メラピ火山で50m程度が適当かと判断される。また、検査面の最下端は深度 H とする。

- 9) 厚さ H の浅層地下水は縦断勾配の急変点から上流側では地中に埋もれる形で連続しているという仮説を設ける。図-5に示したようにこの部分は自由地下水面とその水面が変動する範囲である厚さ H の部分に対応している。この部分は浅層地下水と呼ぶには相応しくないので、山体深部最上層地下水と仮称しておく。
- 10) 山麓部では浅層地下水の下部には深層地下水が表層の地形とは無関係な広がりをもって存在している。その広がりをモデル上に表現することは現在ではできないが、検査面を切って流下する複数の河川の基底流量の大小を決定している要因としてその存在を位置づけることができる。地下の地質学的な層位の探査が可能になった段階で初めてモデル中に具体的な形で取り込むことが可能である。
- 11) 深層の地下水の存在は検査面において年間の水収支を考慮する必要はあるが、短期流出にはほとんど影響を与えない。

5. モデルの満足すべき条件

水位観測点を各所に設けているが、これは検査面での水収支を算定するだけでなく、モデルの妥当性を調べる基本資料を与えている。次の項目が再現される程度即ち適合度に応じてモデルの評価があたえられる。

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1) 検査面における長期的水収支 | 2) 水位観測点における短期流出ハイドログラフ |
| 3) 観測井における長期的・短期的水位変化 | |

6. 数理モデル構築へ向けて

モデルを実像に近いものに仕上げるためには、セルを細かく切って現実の地形に近い構造にすること、土壌物理性に関する各パラメータと表面流や河流を表現するkinematicな流れの各パラメータなどを各セルごとに現地での測定値を基に与えることもさることながら、モデルの構造自体について常に検討を重ねていかねばならない。完成された集中型モデルをあてはめてそこから得られる情報をフィードバックすることも重要な作業であろう。セルは第一段階では粗く、演算を実行する場合の時間間隔も大きくし、その後、段階的にモデルの構造自体にも改良を加えていくことになる。

7. 謝辞

本研究は科学技術庁からの砂防学会の受託研究「火山地域における土砂災害の予測手法の開発に関する国際共同研究」のうち「火山体の水収支に関する研究」の一部として行なった。また、砂防学会ワークショップ「火山体の水循環機構の解明とその調査法に関する研究」での討論を通じて多くのヒントが得られた。末筆ながら、次の方々には特記して深甚の謝意を表する次第である。

福島義宏氏（京都大学）、土屋 智氏（静岡大学）、太田岳史氏（岩手大学）、
窪田順平氏（東京農工大学）、田中隆文氏（名古屋大学）、越智士郎氏（宇都宮大学）

legend

- ▽ River water level using water pressure sensor and data logger
- ▽ River water level using simple recorder
- Well water level using pore pressure meter and data logger
- Well water level using simple recorder
- ▽ River discharge monitoring video camera set
- Rain gauge (Kripen) and Meteorological station (G. Maron)
- Pore pressure and soil moisture

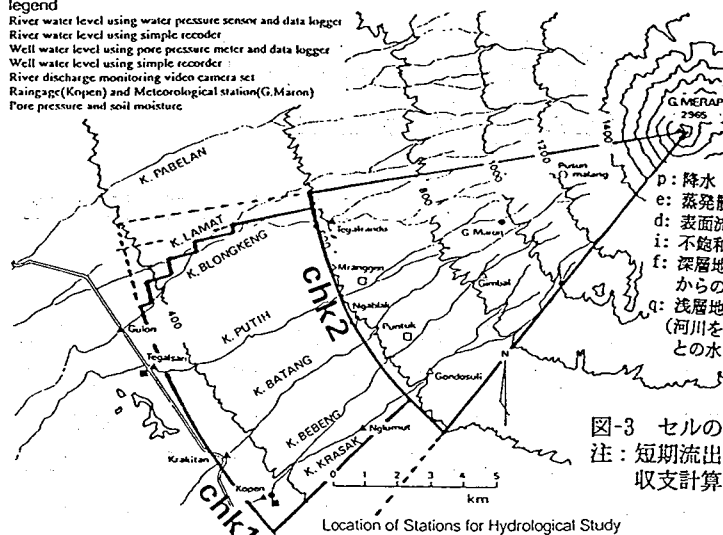


図-1 メラピ火山南西域の地形と流域区分

注：長期的な水収支をとる検査面が標高400m, 600mにある
各種の測器はこの検査面に沿う形で配置されている

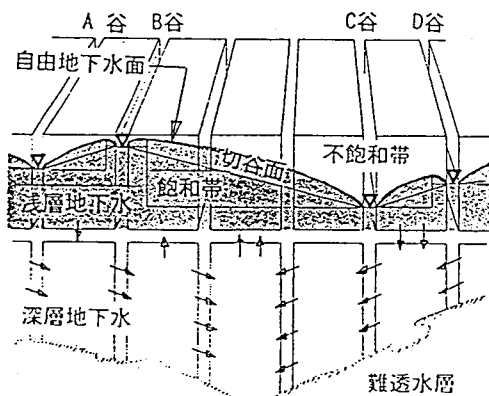


図-4 地下水の側方流れ・鉛直流れおよび河川との交流

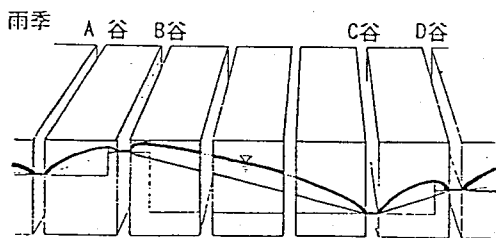


図-4a 雨季における自由地下水表面

注：すべての河川は周囲の帯水層からかん養されている

図-5 山腹縦断形状と浅層地下水および山体深部最上層地下水
注：山体深部最上層地下水は収支計算を行なうための便宜上の領域である。

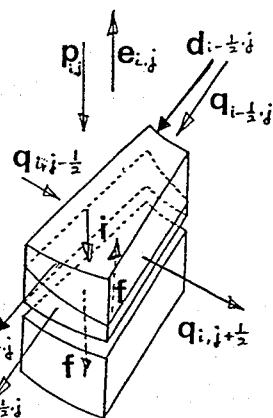
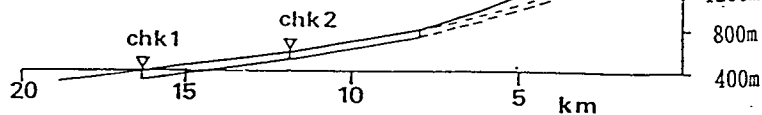


図-3 セルの立体構造と水収支

注：短期流出は上部の浅層地下水に関してのみ
収支計算をおこない、各フラックスを求める

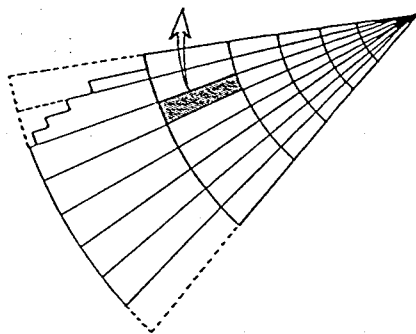


図-2 流域の細分とセル

注：溪流は放射方向と等高線方向をなぞって表現する。

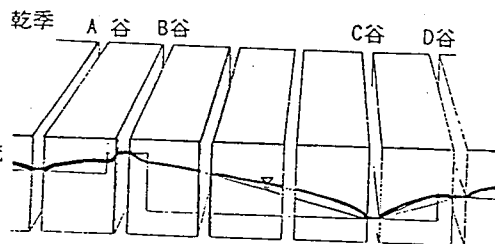


図-4b 乾季における自由地下水表面

注：B谷では周囲からのかん養はなく失水河川の様相を呈する