

通り斜面からの流入により水深がどんどん上がるが、平坦地部分では流動は起こらず降雨は全く停滞してしまう結果となる。これに対し著者らの近似では、斜面からの流入により平坦地でも水面勾配がつき下方斜面への流出が起きている様子が計算される。

5 三次元モデルによるケーススタディ

ここでは、本論で述べた手法による地表流と地下水流の結合の適切さ、再現性、計算の安定性などをチェックするため、小流域の3次元モデルにより行った幾つかのケーススタディの結果を示す。

図-11は流域をコーナーポイント型の格子で分割したものである。全格子数は4000(平面的に20×20、深度方向に10)で、第1層は気層、第2層が地表格子、第3層以下が地層部分であり、図-11は第3層の上面、即ち地表面を表示している。側方は分水嶺を連ねた閉境界であり、谷からの出口(格子位置(9,1,2))には河川流量の計測点がおかれ、この地点は淀みなく流出を起こすように孔隙率は非常に大きく(1.0×10^{30})設定されて

る。尚、計算河川流量はこの格子の全ての面を通して入り込む流量の和とする。

5.1 日データを使った河川流出マッチング

この地域で得られている日降雨データおよび河川流量データの内、ある年の1月1日から12月31日までの366日分(図-12)を使い観測値と計算結果とのマッチングを試みた。

まず本流域の流出解析の初期水理条件(初期の地下水位分布、具体的には圧力分布と飽和率分布)を作り出す必要がある。その方法として、ここでは非常に高い地下水位(出口標高約96mより40m高い値)を領域全面に与え、1月の平均雨量(約1.2mm/day)を継続的に与えながら、圧力及び飽和率の再配分による斜面での地下水流出、河川の形成過程を計算し、数百日後に河川流量が観測流量約350m³/day(1月1日時点)にまで減退した時点初期状態とした。この初期状態から、日降雨データ(観測降雨量-蒸発散量)を与えて、1年間の流出挙動を1日ステップで計算した。蒸発散量は1月と12月が最低(0.5mm/day)、7、8、9月が最大(2.6mm/day)で他の月はほぼ直線的に補完して与えてある。図-12に示した計算結果は、

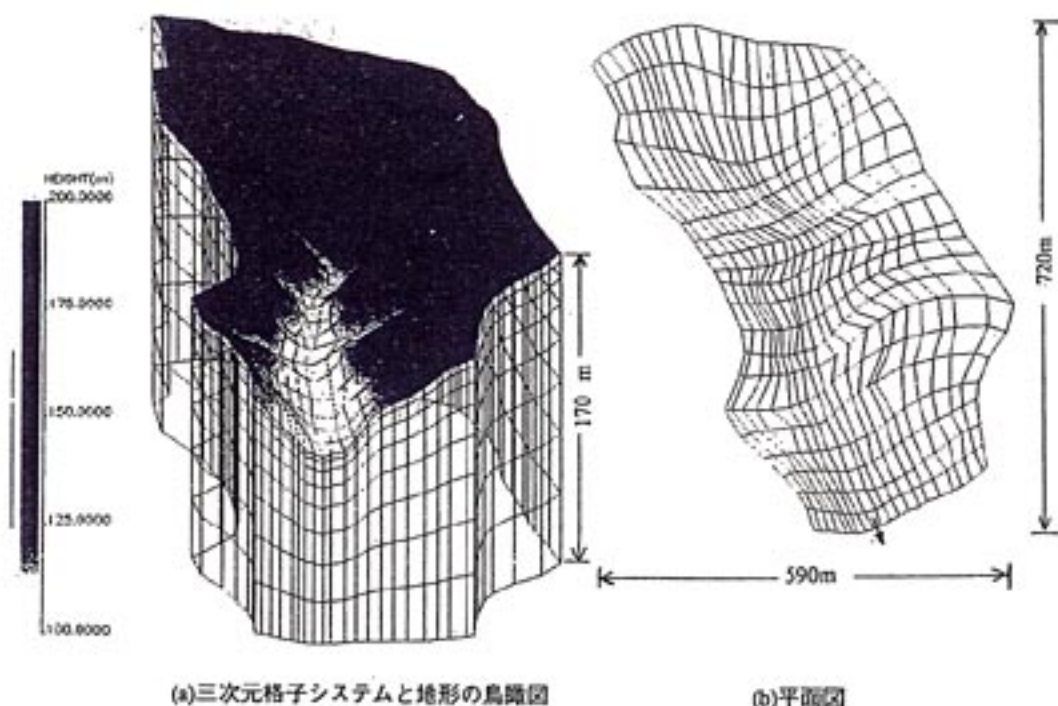


図-11 三次元流域モデルの格子システムと地表地形

Fig.11 Grid system and geometry of a 3-D model used for case studies.

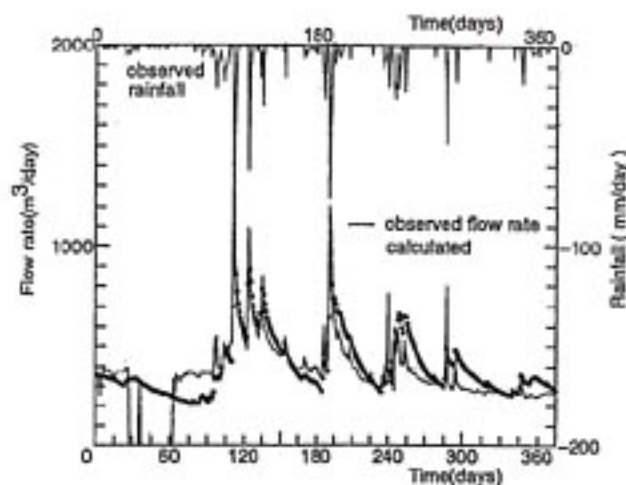


図-12 日データを使ったハイドログラフマッチングの結果

Fig.12 Result of hydrograph matching for daily observation.

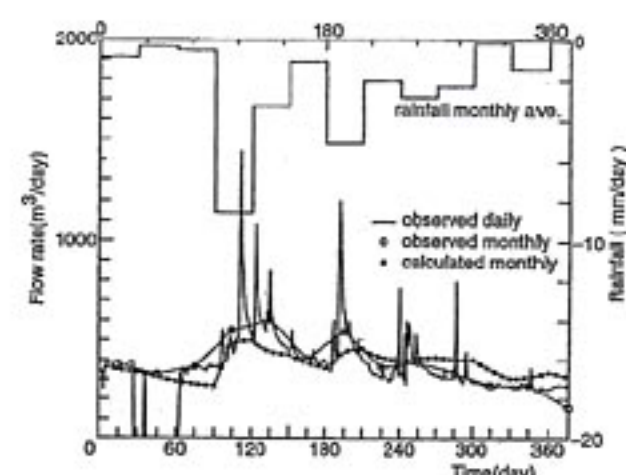


図-13 月平均データを使ったハイドログラフマッチングの結果

Fig.13 Result of hydrograph matching for monthly averaged data.

幾度ものセンシティブリティ計算の後に比較的良く実測値を再現できたもので、パラメータの組み合わせは、地表直下の地層(第3層)の浸透率50darcy(透水係数約 5×10^{-2} cm/s)、それより下部の地層の浸透率100md(透水係数約 10^{-4} cm/s)、孔隙率0.1、マンニングの粗度係数 0.025×10^3 (地表全面を林地とした)、となっている。地表直下の浸透率をこれだけ大きくしたのは速い側方流を合わせるため、流出解析上は特に大きな値ではないようである(例えば、塚本、1992、7章)。細かい流量の跳躍などは離散化の大きさもあり再現が難しいが、この流域の流出挙動はかなり良く追跡されていると思われる。2月後半から3月中の部分(約45日から90日まで)では計算値が観測値よりかなり低いが、この部分では融雪量を考えていないため、実際には次年度同時期に5~6.5mm/dayに相当する融雪量が観測されており、それを考えると2月後半からは計算流量は増加し観測値に良く合う。他の部分での両者の食い違いは、観測データ自体の信頼性、本流域での蒸発散量の見積と共、離散化の粗さ、モデル設定(パラメータの組み合わせや流域内の分布)の不具合、などによるものと考えられ、残念ながらその追求は難しい。

5.2 月平均データを使った河川流出マッチング

実際の広域や長期のシミュレーションなどでは

離散化が粗くなり、日データに見られる細かい変動の再現性は期待できない。実用的には、月平均された降雨を入力として月平均河川流出量などの大まかなマッチングをすることが必要となるであろう。図-13は月平均データを用いた場合のマッチング結果である。月平均観測流量をある程度再現するためには、日データのマッチングで使用した地表付近の浸透率では合わなかったため、計算では地表付近の浸透率5000md(透水係数約 5×10^{-3} cm/s)を使用した。試行錯誤を繰り返せば、もう少しマッチングできると考えられる。

5.3 地表面が不透透の場合の水系模様の形成

地表流が発生する極端な場合として、この流域の地表面が浸透性を持たない場合(第2層と第3層の間の浸透率が0)を設定して計算したものが図-14であり、地表面上の色が濃い程水深が大きく、側面は色が濃い程水飽和率が高い。この計算では全ての降雨は低地に向かって流れ中央低地で合流し、谷の出口で流出する。3月末(90日)の少雨時には小さな谷筋の地表流は降雨後すぐに消え中央低地部に小さな河川を形成するが、7月末(210日)の降雨時には小さな谷筋に沿って地表流が見られ、中央低地の河川も大きくなる。12月末(360日)の少雨時には、再び中央低地部のみを地表流が流れる状態に戻る。現実的には、地表の浸

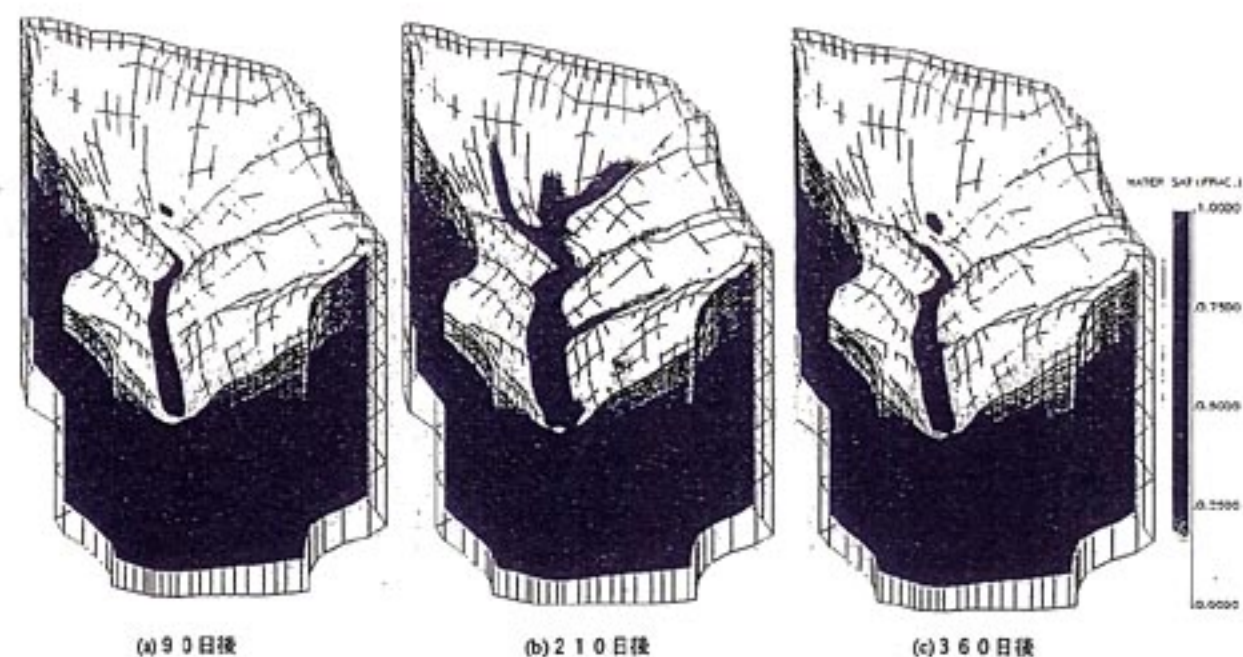


図-14 地表面の不浸透性を想定した場合の河川系形成過程の計算例
 Fig.14 Result of an example calculation-schematic views of pattern of river and surface flow formed on impervious surface.

透性のある流域で、図-14の210日時点のような状況が発生することはよほどの豪雨時以外は考えられないであろう。

5.4 地下空洞開削に伴う河川流出量の変化

次に、日データとマッチングされたモデルを使い、この流域の地下に空洞が開削された場合の河川流出への影響についての計算を試みた。簡単のため、空洞はこの領域の中央部(地表からの深度約50m)に180日目に格子(10,10,8)の位置に一気に開削されるものとする。空洞は大気圧下で、孔隙率と浸透率が非常に大きく、毛管圧力0の空間として与えられている。この設定は、空洞が通気されており、空洞への湧水は常にポンプアップされ流域外へ排出されている状況に対応する。この場合の計算結果を図-15に示す。180日時点での開削から暫くたつと、空洞湧水により地下浸透量が増加し、空洞がない場合に比べ河川流出量が大きく減少する様子がシミュレートされている。

5.5 ダム湖湛水過程のシミュレーション

この流域の出口部にダム(不浸透の壁)が建設された状況を想定して、5.1でマッチングされたモ

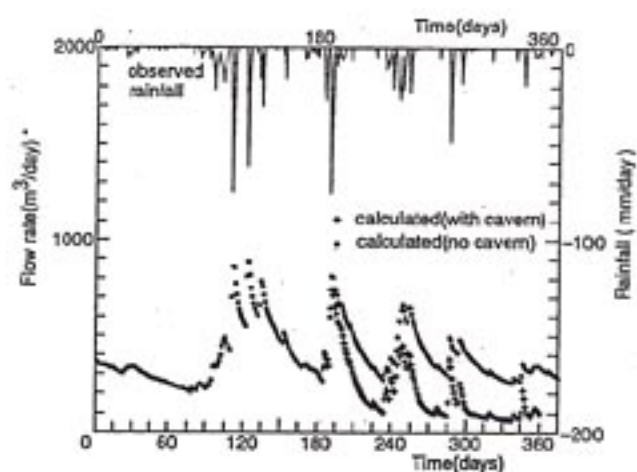


図-15 地下空洞開削を想定した場合の流出量の変化
 Fig.15 Result of an example calculation-change in hydrograph performances for the case of construction of underground cavern.

デルを使い、日降雨データを与えて1年間の計算を行った結果を図-16に示す。図-16では、地表部では濃いほど水深が大きく、地下では濃いほど水飽和率が高い様に表示されている。中央低地にダム湖が形成され、湛水開始30日後から12月末

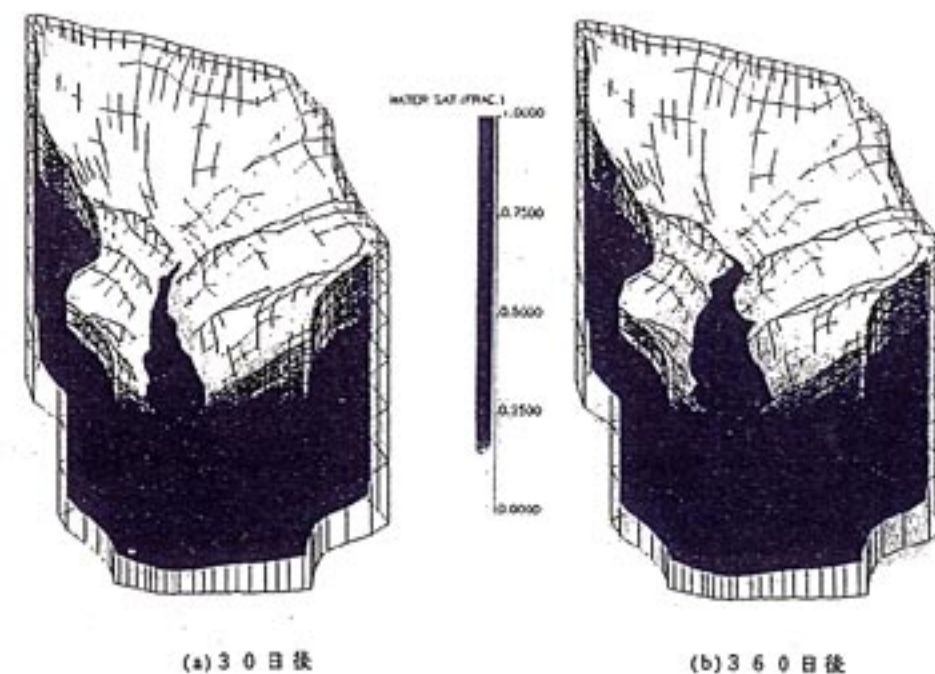


図-16 ダム建設を想定した場合のダム湖形成過程の計算例
 Fig.16 Result of an example calculation-schematic views of lake formation process by dam construction.

(360日後)まで貯水量が増加した様子がわかる。ダム建設のボーリング調査では地下の三次元的な物性データがかなり詳しく得られるから、河川流出データ、地下水データなどと合わせたこの種の予測シミュレーションが役に立つことが考えられる。

5.6 シミュレータのパフォーマンスについて

ここでは、小流域の降雨データ、ハイドログラフを用いてマッチング及びいくつかの計算を行った。開発したシミュレータはハイドログラフの形を再現出来ると共に、地下施設の建設、ダムの建設など人工的变化に対応して、対象流域の地下水と地表水の挙動変化を追跡し得るものと考えられる。

この種の水理計算においては、影響するパラメータ(地表付近の土壌・地下地層の浸透率、孔隙率、蒸発量の見積、相対浸透率、毛管圧力)が多く、信頼性のある3次元流域モデルを作るためのマッチング過程では数値計算の安定性、速さが問題となる。ケーススタディにおいては、降雨量が多い場合および第3層(地表直下の地層格子)の浸透率がある程度以上大きくなるとニュートン反

復計算が十分収斂しない状況が見られたが、結果は妥当なものであった。また降雨の少ない時期には、数十日程度まで時間刻みを伸ばしても、大きな不安定性は現れなかった。計算速度はモデル設定によるが、例えば、日データのマッチングでは1ステップ(時間刻み1日)当たり60秒程度(4000個の格子)、必要主記憶領域は12000個の格子分割まで対応できるモジュールで約12MBであった(使用ワークステーション: OMRON DATA GENERAL社製LUNA2010、CPUはMC88110(50MHz)、FORTRANプログラムはオブティマイズなしでコンパイル)。

6 結論

本研究では地表と地下の陸水系の挙動を包括的にモデル化し広域を3次元的に解析するためのシミュレーション技術の開発を行った。結論として以下の諸点が挙げられる。

- (1) 地下水流動を2成分2相流体系としてモデル化すると共に、地表流に関する Manning 型の式をそれと同一形式に変換することで、両者を結合して解析する手法を提案した。

- (2) 提案した手法を基に3次元数値シミュレータを作成すると共に、様々な水文・水理現象を表現するための機能、高速処理の方法を組み入れた。
- (3) 開発したシミュレーション手法を典型的な単一斜面モデル、複数斜面モデルの地表流解析に適用し、他法との比較検討を行うと共に、実流域の降雨流出解析に適用し実測のハイドログラフに追従する計算が可能であることを示した。また、地下空河の開削やダム建設を想定した計算例から、地表と地下の流れの三次元的相互干渉が追跡できることを示した。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)06452358 代表者 登坂博行)によるものである。

本研究にあたり、様々な地質的、水理的観点からご助言、督励いただいたジャパンエナジー 故小島康司氏に感謝を捧げる次第である。

参考文献

- 大西外明(1990):「最新 水理学I, II」, 森北出版, 184p, 161p.
- 岡本明夫, 登坂博行, 小島圭二, 山石毅, 谷藤吉郎, 小林仁(1995):建設全期間にわたる地下石油備蓄基地周辺の水文・水理挙動再現シミュレーション, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 91-94.
- 塚本良則編(1992):「森林水文学」, 文永堂出版, 319p.
- 登坂博行(1988):油層シミュレーションにおいて空間離散化に調和する疑似関数を自動生成する手法に関して, その1 動的垂直相漸移の概念による方向別疑似関数の自動生成手法, 石油技術協会誌, 53-5, 348-356.
- 登坂博行(1989):油層シミュレーションにおいて空間離散化に調和する疑似関数を自動生成する手法に関して, その2 疑似関数自動生成手法の詳細及び離散化誤差と疑似関数に関する一般的議論, 石油技術協会誌, 54-3, 231-239.
- 日野幹男, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫(1989):「洪水の数値予報」, 森北出版, 252p.
- フヤコーン, P. S., ビンダー, G. F. [赤井浩一訳監修](1987):「地下水解析の基礎と応用上, 下巻」, 現代工学社, 232p, 472p.
- Aziz, K. and Settari, A. (1983): Petroleum Reservoir Simulation, Elsevier Applied Science Publishers, 476p.
- Cheshire, I. M., Appleyard, J. R., and Banks, D. Banks (1980): An efficient fully-implicit simulator, European offshore petroleum conference, EUR 179, 325-333.
- Jacks, H. H., Smith, O. J. E., and Mattax, C. C. (1973): The modeling of a three-dimensional reservoir with a two-dimensional reservoir simulator-The use of dynamic pseudo functions, SPEJ (June), 175-185.
- Peaceman, D. W. (1983): Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with nonsquare gridblocks and anisotropic permeability, SPEJ (June), 531-543.
- Tosaka, H., and Matsumoto, Y. (1987): Efficient reservoir simulation by the successive explicitization process, Journal of Japan Association of Petroleum Technology, 52-4, 307-313.
- Vinsome, P. K. W. (1976): Orthomin, an iterative method for solving sparse banded sets of simultaneous linear equations, SPE 5729.

(受付:1996年1月25日、受理:1996年9月6日)