

水文モデルの精度向上に向けた 現地水文観測の重要性

IMPORTANCE OF HYDROLOGIC FIELD STUDIES FOR THE IMPROVEMENTS OF THE HYDROLOGIC MODELS

呉 修一¹・大原憲明²
Shuichi KURE and Noriaki OHARA

¹正会員 博士 (工学) カリフォルニア大学デービス校 (One Shields Ave, Davis, CA95616, USA)

²正会員 Ph.D. カリフォルニア大学デービス校 (One Shields Ave, Davis, CA95616, USA)

Field study is an essential component of hydrologic science because all hydrological studies must be conducted by such observation-based knowledge of real watersheds. In this paper several studies related to hillslope runoff processes were reviewed, and the importance of connections between field studies and modeling activities to improve hydrologic models was discussed. As an example, the results of the field study (Ohara et al., 2011) focused on the role of snow in runoff processes were presented in the paper. In this field study, a field site at Ward Creek watershed, Lake Tahoe Basin, California was built for observations of overland flow, subsurface stormflow, and channel flow, simultaneously with atmospheric measurements in order to examine the hydrology at a snow-covered hillslope.

Key Words : *Field observation, hillslope hydrology, snowmelt, overland flow, subsurface flow*

1. はじめに

河川流量データは、河川治水・利水・環境計画の策定に向けた基礎情報であるとともに、リアルタイムの河川流量データはリアルタイム洪水予測や洪水予報システムにおけるシステム変数のアップデートなどにおいて重要な役割を果たす。また、河川流量データは、流域における大気、境界層、地表面、地中などにおける複雑な気象・水文素過程のアウトプットであり、流域水文特性を端的に示す指標である。よって、河川流量データは流域の流出・保水特性や環境特性の解明に必要不可欠となる。例えば、流域における土地利用・被覆状態や人為活動の変化や気候変動などがどのように河川流況に影響を与えたかを議論する際には、長期流量データが必要となる。また、非常に多くの降雨流出解析モデルが開発されており、河川流量データに基づくキャリブレーション・バリデーションされたモデルを用いることで、基本高水流量の算定や流域特性の解明など非常に多岐にわたる解析が

行われている。このような状況を考えた場合に、河川流量観測の精度向上は非常に重要なトピックである。

河川流量以外にも、降水、蒸発散などの気象因子や斜面流出成分、各種水質成分などの水文・水質データも非常に重要である。例えば、呉ら¹⁾、山角ら²⁾は、荒川、隅田川、神田川および日本橋川の都市河川感潮域において水質の時空間分布特性に関して現地採水を行うとともに ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler : 超音波ドップラー多層流向流速計) を用いることで、感潮域における水理・水質機構の複雑性を示すと同時に、日本橋川の出水時に下水のオーバーフローに伴い溶存酸素濃度が減少する事を明らかにしている。このような現地観測は、河川流況および水質環境を解明するのみならず、地元住民とデータを共有し議論することで、都市河川再生に伴う街づくりに向けた大きな機運を生じ、地元住民の注目を河川に集める事に大いに役立っている。

また、近年大いに注目されている気候変動の予測計算で用いられる GCM (General Circulation Model) や RCM (Regional Climate Model) の精度向上に向けて、地表面フ

ラックスなどを集中的に観測する試みが世界各地で行われている（例えば、FIFE³、CASES⁴、EFEDA⁵、琵琶湖プロジェクト^{6,7}、荒川プロジェクト^{8,9}など）。このような観測プロジェクトは、空間的に密に測定されたデータの乏しい気象因子などを集中的に観測することで、その時空間分布特性を明らかにするとともに、気象計算領域グリッド内のフラックスなどのパラメタリゼーションを改良することに大きく貢献するだろう。

ここで、現地水理・水文観測の主要な目的は、複雑な自然現象を解明するという点であることを再度確認したい。例えば、単一斜面や小流域における現地水文観測や散水実験などは、降雨流出過程の解明および降雨流出モデルの発展に大きく寄与してきた。現地観測結果より明らかにされた重要な流出プロセスを組み込むことで、物理過程に基づく降雨流出モデルの開発が行われてきている。流出モデルの発展に関する詳細なレビューは、例えば、Kavvas¹⁰、Kampf et al.¹¹、呉¹²などを参照されたい。このような物理モデルを用いることで、流域の市街化や森林の伐採などの土地利用・被覆状態の変化が水循環過程に与える影響や、地中水と地表水の相互作用の影響、人為活動が水循環に与える影響などに対する解析が可能となる。例えば、赤羽¹³は、土壌・地形特性に基づく降雨流出モデルを用いることで、里山の市街化が表面流、中間流に与える影響を定量的に評価している。また、木内¹⁴は、分布物理型水循環モデルであるWEPモデルを用い、農地と都市が混在する流域に適用することで、農地が水循環に及ぼすインパクトを定量的に評価している。その他にも物理流出モデルを用いた水文・水質解析が非常に多岐にわたり行われている（例えば、佐山・寶¹⁵、呉¹⁶、手計¹⁷、宮本¹⁸など）。

このような、降雨流出モデルの発展・開発には、単一斜面や小流域における現地水文観測結果が非常に大きく貢献してきた。よって、本論文では、斜面流出過程に関する現地観測に着目することで、水文モデルの更なる発展に向けた現地水文観測の重要性を議論する。最初に、斜面流出プロセスに関連した現地観測のレビューを行うとともに、その一例としてOhara¹⁹の現地観測結果を紹介する。これにより、河川流量精度向上とともに、今後の水文学の発展に向けて現地水文観測が担う役割を再認識したいと考える。本論文集のタイトルは「河川流量観測の新時代」であり河川流量観測の精度向上に向けたポイントに言及することが重要と考えるが、この点に関しては他の執筆者に一任し、著者らはモデリングの観点から斜面流出プロセスに関する現地観測に着目するとともに今後どのような水文データ整備が必要かなどの点に言及することにしたい。

なお、参考文献 Ohara¹⁹ は本論文中に度々登場するため、これ以降は Ohara(2011)と表記することで、他の文献との区別をはかる。

2. 斜面流出プロセスに着目した現地観測

従来までの降雨と流量の応答関数を求めるだけのシステム工学として降雨流出を扱うのではなく、純然たる物理過程に基づき降雨流出機構を解明するという「物理水文学」の取り組みは現地水文観測結果に基づき発展してきた。このような物理水文学の取り組みは、流域に降った雨水がどのような経路をたどり流域末端に達するかという疑問に答えるだけでなく、概念モデルから物理モデルへの降雨流出モデルの変遷に大いに寄与してきた。

斜面現地観測で得られた最も大きな成果の一つは、出水時のハイドログラフを形成する主成分はHorton型の表面流ではなく中間流である事の発見であろう。Tsukamoto²⁰、Hursh and Brater²¹らの試験地における観測結果により、直接流出では中間流が卓越するという理論的根拠が確立した。また、降雨流出の成分分離の問題に関して、トレーサーとして種々の物質を用いた研究が、例えば、海老瀬²²、竹内²³、Sklash and Farvolden²⁴によって行われている。これらの研究からも表面流ではなく中間流の寄与が大きいことが示されている。

しかしながら、大規模出水時には河川近傍の飽和面近くにおいて表面流の発生が考えられる。これは流域全体から表面流が生じるのではなく、流域の一部から表面流もしくは直接流出全体が生じるということである。Betson²⁵は降雨量が流域の浸透能を超過したとき一部の飽和域から流出は生じるという部分流出寄与域(Partial source area)の考えを提案した。Hewlett²⁶は流出寄与域が降雨とともに変動し、流域流出量の変動に対応するという変動流出寄与域(Variable source area)の考えを提案した。それに先立ち高棹²⁷は表土層内をダルシー型の中間流領域とみなし、水深が表土層を超える時表面流が生じこれをkinematic waveとして取り扱い、流出過程を総合的に表現する解析的方法を確立している。これは、Betson²⁵、Hewlett²⁶が提案する部分流出寄与域の考え方を理論的に説明したものと認められる。

このような現地観測と同時に散水実験を通じ単一斜面を実スケールで再現しようとする試みも多くなされてきた。吉野²⁸は多摩ニュータウンにおいて散水実験としてはかなりの空間スケールを有する20m×20mの粗造成地および林地斜面において散水実験を行い、山地、都市域の流出特性の違いと土壌の初期水分状態が流出特性に占める要因の大きさを示した。また、山田²⁹は室内散水実験および多層土壌で構成される斜面における屋外散水実験を行うことにより流出経路の解明を試み、降雨流出経路は雨水の鉛直浸透に始まり透水係数の異なる土層境界面としての不浸透面で飽和帯が発生し、押し流すように飽和側方流が形成されることを明らかにした。ここで、土壌の初期水分状態が降雨流出に与える影響は非線形であり、その影響が大きいことは昔からよく知られている。

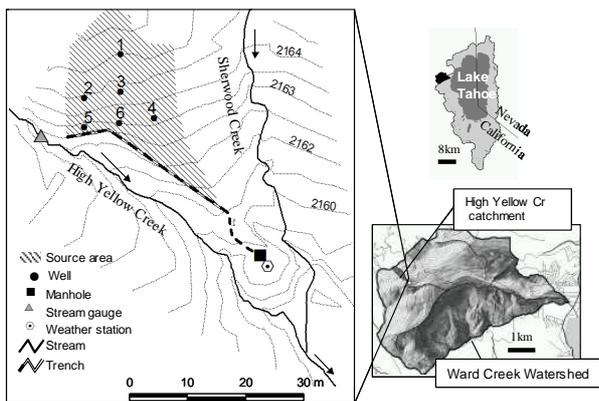


図-1 現地観測サイトの概要 (Oharaら, 2011)

このような土壌の初期水分状態を「古い水」の存在と称し、古い水の流出寄与割合や滞留時間に関する観測や理論的解析が行われている（例えば、Kirchner³⁰⁾、佐山ら³¹⁾）。Sayama and McDonnell³²⁾は、流出成分の時空間起源に応じたハイドログラフの分離手法を、土壌水分などが非常に密に観測された複数の流域に適用することで、部分流出寄与域や変動流出寄与域の概念を実測値およびモデル解析結果より理論的に証明するとともに、流水の滞留時間に影響を与える要因に関して検討を行っている。

この他にも、パイプ流の存在（例えば、McDonnell³³⁾）が出水に大きな影響を与えることや、岩盤浸透水が基底流量などに大きく寄与していることなど（例えば、Uchidaら^{34),35)}）の非常に重要な知見が現地観測より発見されている。

このような現地水文観測と降雨流出モデルの関係は、浅野ら³⁶⁾に詳しく記述されており、斜面観測の知見とモデリングの問題点が詳細に議論されている。また、Oharaら(2011)では、雪層を伴う斜面流出プロセスに関する現地観測が詳しく記述されているので、これらも参照されたい。

3. 雪層が斜面降雨流出プロセスに与える影響

本章では、Oharaら(2011)にて得られた斜面流出プロセスに関する現地観測結果を紹介することで、今後の現地水文観測とモデリングの同時進行および有機的な結合の重要性を議論する。この現地観測の目的は、冬季から春季に積雪が存在する小流域に着目し、雪層の存在する斜面における降雨・融雪流出プロセスを解明するとともに、雪層の有無が表面流の発生に与える影響を明らかにすることである。

(1) 現地観測サイト

対象とした小流域は、米国カリフォルニア州に位置するTahoe湖流域内のWard Creek流域(26.4km²)である(図-1)。Ward Creek流域は、シエラネバダ山脈に見られる

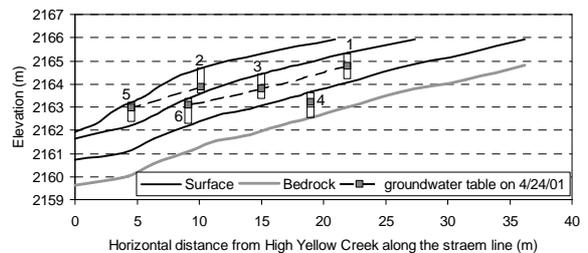


図-2 対象斜面の縦断面図および仮設井戸の位置 (Oharaら, 2011)

典型的な小流域であり、比較的に高標高に位置する。例えば、流域内の標高2160m地点における冬季の降水の90%が降雪である。流域内の積雪深は冬季から春季にかけて3mを超える部分が大半である。シエラネバダ山脈からの融雪水はカリフォルニア州における主要な水資源であると同時に、冬季から春季にかけての融雪流出を伴う洪水は大きな問題となっている。カリフォルニア州の水政策に関しては、例えば、浅野³⁷⁾などに詳しく記述されているので、そちらを参照されたい。

従来から、Tahoe湖流域における土砂浸食に伴い発生した浮遊砂の湖内流入に伴い、Tahoe湖の水質汚染が問題となっている。土砂浸食は、河床浸食、ガリー浸食および斜面における表面流の発生に伴う浸食であることが多くの研究から既に指摘されている（例えば、Kroll³⁸⁾、Simonら³⁹⁾、Kavvasら⁴⁰⁾、Rothら⁴¹⁾）。よって、Oharaら(2011)では、雪層を伴う単一斜面において、表面流の発生機構に着目し現地観測を行うことで、斜面における降雨・融雪流出プロセスを解明するとともにTahoe湖流域における土砂浸食メカニズムを明らかにすることを目的としている。

(2) 観測の概要

対象としたWard Creek流域内の観測サイトは、集水面積12,400m²、勾配約16%の流域の代表的な斜面である。地表面から難透水面(Bedrock)までは、現地調査結果より2層(Root zone and Consolidated layer)に区分できることが明らかにされている(図-2,3)。また、米国農務省(USDA)で公表されている土質調査結果より、対象斜面の飽和透水係数の値は36-360mm/hであり、非常に透水性の高い斜面であると言える。この斜面特性に基づき本観測では、表面流(Overland flow)、浅い中間流(Rootzone discharge)、深い中間流(Consolidated layer discharge)を対象とし、継続的な測定が行われている。

図-1に示されるように中間流を測定するためのトレンチがHigh Yellow Creekに沿って設置され、下流側に位置するマンホールへと接続されている。このマンホール内に設置された測定器を基に、2成分の中間流が測定される。また、トレンチの地中部には、ポリエチレンシートと排水パイプが2層の中間流を分離するために設置されている(図-3)。表面流の計測は、樋をトレンチの上斜

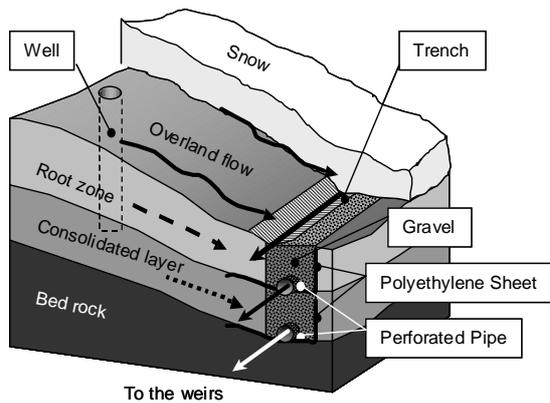


図-3 表面流および中間流の観測システムの概略図 (Oharaら, 2011)

面側に設置することで行っている。この樋は雪の重みに十分耐えられる強度を有するとともに、他の物質の流入を防ぐためにネットで覆われている。斜面流出成分の他にも、High Yellow Creekの流量も同時に測定されている。図-4に表面流測定のためのトレンチ、表面流および中間流測定のためのマンホール内部および河川流量測定のための堰の写真を示す。斜面流量の計測は、ボックスへの流入水量を圧力変換器を通じて水位へと換算し、この水位から流量を算定している。水位から流量への変換はキャリブレーションされた水位・流量曲線を用いて行われる。

更に、土壌水分量の空間分布を評価するために、6箇所に仮井戸を掘削し、そこでの水位を圧力水頭から算定している。これは、対象とする表面流が、Hortonタイプの表面流のみではなく高棹タイプの表面流 (Dunneタイプ、もしくは復帰流など)も想定しており、土壌水分量情報が非常に重要なためである。また現地の地表面熱交換量を測定するため、微気象観測タワーが設置されている。これにより、降水、日射量、気温(2m, 5m)、湿度(2m, 5m)、地表面温度などが同時に測定されている。これらの気象情報は、融雪量などを算定する際に用いられる。

(3) 積雪を伴う地域における小規模流量観測の留意点

当観測地は積雪量が多く、厳冬期には管理のために近づくことも容易ではないため、すべての観測を自動化している。図-4でも示されているように積雪からYellow High Creekの堰を守るために頑丈な覆いを設置している。また流量観測用の堰近傍の水が凍らないように配慮するとともに、温度観測を同時に行いデータが有効であることを確認した。幸い北部カリフォルニアでは雪が断熱材の働きをすることにより、融雪の季節(3月～5月)には地表近くが氷点下に達することはなかった。また、マンホール内に流量観測機器を設置することは勾配を確保するとともに、凍結を防ぐ意味においても有効であることが確認された。



図-4 表面流集水用のトレンチ (左上)、表面流測定用のマンホール内部 (右上)、中間流測定用のマンホール内部 (左下) および河川流量観測用の堰 (右下) の写真 (Oharaら, 2011)

(4) 融雪量の算定

積雪層から地表面へ供給される水量を算定するため、Watershed Environmental Hydrology (WEHY) Model (Ohara and Kavvas⁴²⁾, Kavvasら¹⁰⁾の融雪モジュールが使用されている。本モジュールは、積雪の3層を考慮した熱収支モデルである。入力データは、観測された降水量、正味放射量、全天日射量、気温、地表面温度、風速、相対湿度などが用いられている。モデルのキャリブレーションにはカリフォルニア州水資源局 (California Department of Water Resources) が提供する実測の積雪情報が用いられた。

(5) 観測結果の概要

Oharaら(2011)で示された観測結果の一例として、3つの代表的な出水イベントを紹介する。イベントの特徴は、Case1(2001/05/13-17): Snow-Free Runoff (降雨のみ、積雪および融雪無し)、Case2(2000/04/30-05/05): Snowmelt Runoff (融雪のみ、降雨無し)そしてCase3(2000/05/06-10): Rain-on-Snow Runoff (降雨、融雪ともにあり)である。

図-5に、Case1のイベントで測定された斜面流出量および地下水位の時系列を示す。この出水は、総降雨量27mmであり、シエラネバダ山脈においては中規模の流出イベントである。この出水は5月に流域内の積雪が融雪に伴い消失して間もない間に生じたものであり、流域内土壌水分はある程度湿潤状態であると考えられる。図-5に示されるよう、この規模の降雨では地下水位の上昇は顕著ではなく、表面流の発生は確認できず全ての斜面流出成分は中間流で構成されていた。

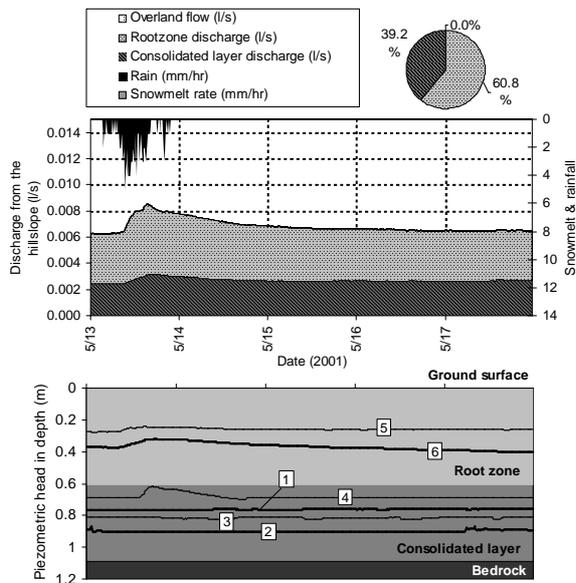


図-5 観測された降雨量、斜面流出量および地下水位の時系列 (Case1: Snow-Free Runoff) (Oharaら, 2011)

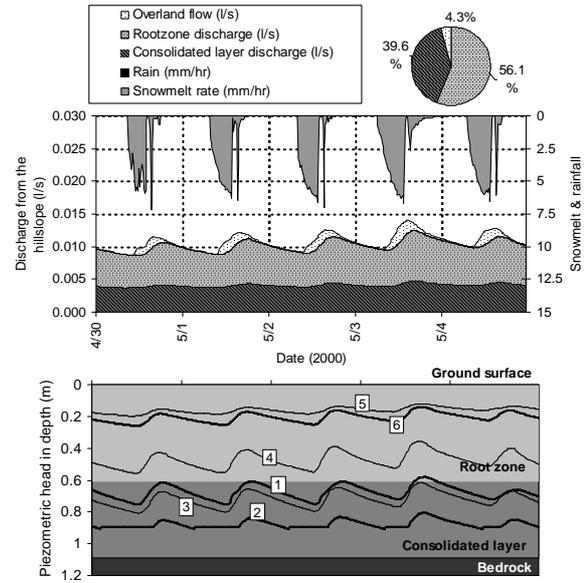


図-6 観測された斜面流出量、地下水位の時系列および算定された融雪量 (Case2: Snowmelt Runoff) (Oharaら, 2011)

図-6に、Case2のイベントで測定された斜面流出量および地下水位の時系列を示す。図に示されたハイドログラフは本流域における融雪期の典型例であり、融雪量、斜面流出量、地下水位が気温の日変動に応じて変動していることがわかる。ここで、図-6で示される融雪量は、WEHYモデルの融雪モジュールから算定されたものであることに注意されたい。図-6に示されるよう、このイベントでは表面流が発生しており、積雪が存在し融雪が生じる状況では、全流出量のうち表面流のしめる割合は5%程度であることがわかる。ここで非常に興味深い点は、地下水位の上昇はさほど顕著ではなく、この表面流は高棹タイプの表面流では無いと考えられることである。融雪量のイベント平均は33mmであり、Case1のイベントと比較して大きな違いは無く、地下水位データから土壤の初期水分量に関しても大きな違いは無いと思われる。このような状況から、積雪の存在が表面流の発生に寄与していることが考えられる。この現象に関して、Oharaら(2011)では、雪層と地表層の透水係数の相違と、雪層下部における毛管作用に伴い、飽和側方流が雪層下部にて発生しているものと説明している。この観測結果に基づき、積雪を有する斜面における降雨・融雪流出プロセスは、図-7に示すように考えることができることが示されている。つまり、雪層が透水性の高い表層土と同様の働きをし、ここで生じる飽和側方流が、表面流を形成しているのである。この雪層内の表面流の存在が、春季の洪水ピーク流量や斜面の土砂浸食に与える影響は少なくないであろう。

図-8に、Case3の出水例を示す。この出水は、総降雨量98mmの雨を伴う大きな出水であり、この地域で大きな洪水を生じさせた。図-8に示されるよう、降雨に伴い地下水位が上昇し、トレンチ付近の土壤が飽和に達して

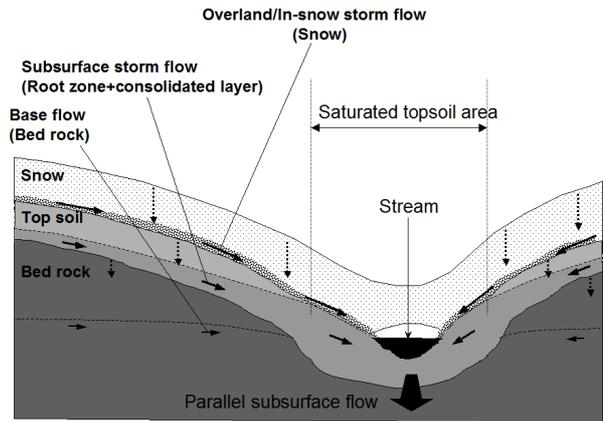


図-7 雪層を有する斜面における降雨・融雪流出プロセスの概念図 (Oharaら, 2011)

いることがわかる。この時の融雪量は、総降雨量98mmに対して、33.7mmであった。ここで、現地微気象観測データから算定された地表面の熱収支データからも、出水に寄与した融雪は少ないことが示されている。これは、降雨時には雲の存在により短波放射量が制限される点、高標高および降雨時の低い気温と高湿度が地表面の熱交換フラックスを抑制する点などが影響していると考えられる。この結果は、Marksら⁴³⁾が示した、融雪の出水への寄与は標高の増加に伴い減少するという観測結果とも合致するものである。これによりシエラネバダ山脈における標高の高い地域では、降雨時の融雪が洪水への寄与する割合は比較的少ないことが示された。

(6) 現地観測の重要性

Oharaら(2011)では、上記で紹介した観測結果以外にも、High Yellow Creekにおいてピーク時に流出に寄与する斜

面長は13.2-15.1m 程度であることを算定することで、従来から提案されている部分流出寄与域理論の妥当性を示している。更に、高標高流域においては雨滴が融雪に与える熱量は少ないことを示している。また、雪層内の飽和側方流が表面流を構成している事を示したことで、雪層の存在しない出水イベントよりも雪層の存在する出水イベントのほうが斜面における土砂浸食が大きい事を明らかにしたHarr⁴⁴⁾の観測結果の理論的根拠を示したと考えられる。これは、雪層内をふくむ表面流の流下速度は、浅い中間流などよりも早い為、多くの斜面浸食を生じやすいためと考えられる。また、このような雪層が存在する場合の表面流の発生を考慮した流出モデルは著者らの知る限り存在しない。応答の早い表面流の存在はシエラネバダ山脈水系で生じる洪水に少なからず影響を与えると考えられるため、これらをモデリングに組み込むことが北部カリフォルニア州の洪水を計算する際に重要なポイントとなるであろう。

このように、現地水文観測結果と水文モデルの構造を比較検討し有機的に結合することで、新しい知見の解明のみならず、更に物理性の高い水文モデルの構築が可能となる。水文データベースの充実、計算機能力の飛躍的な向上、リモートセンシング技術の向上に伴うGISデータの充実により、対象流域を一度も訪れることなく、小規模から大規模流域を対象とした降雨流出計算が可能な時代になっている。しかしながら、降雨流出計算におけるスケーリングの問題などは未解決の大きな課題であるし、地表面水文プロセス、地中水、地下水などの動的相互作用が長期流出計算へ与える影響などは未知な点が多い。昨今の降雨流出計算モデルに期待されるものは、過去の出水イベントを再現するのみではなく、気候変動下における将来の水循環予測であったり、物理的に起こり得る最大規模の洪水である可能最大流量(PMF: Probable Maximum Flood)などを算定することである。このような地表面・気候条件が変化する下での長期流出計算や物理的に可能な最大洪水量を算定する際には、既存のモデルには組み込まれていない流出プロセス(例えば、本章で紹介した雪層中を流れる飽和側方流)が非常に大きな役割を果たす可能性が存在し、このようなプロセスをモデルに組み込むことがモデルの不確実性を軽減するうえで重要になるであろう。

以上により、今後も現象の解明および更なる物理水文モデルの発展・改良に向けて現地観測や散水実験などは必要不可欠であり、そのために今一度「単一斜面」に戻り流出プロセスを再確認することが重要であると著者らは考える。

4. 水文学の今後の更なる発展に向けた水文観測

の重要性

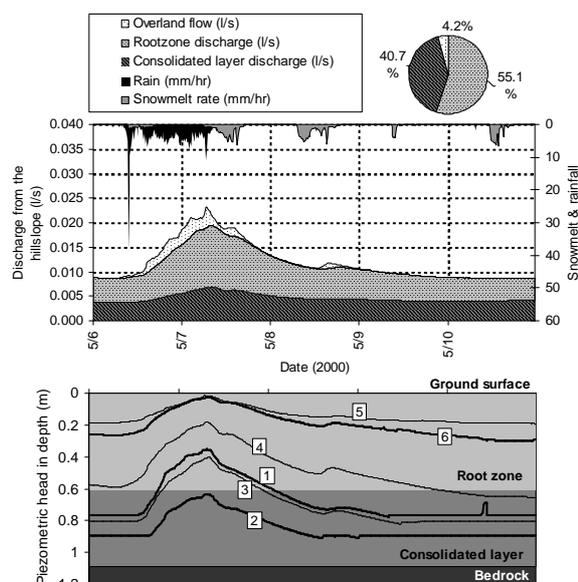


図-8 観測された降雨量、斜面流出量、地下水位の時系列および算定された融雪量 (Case3: Rain-on-Snow Runoff) (Oharaら, 2011)

今後の水文モデルの更なる発展に向けて水文観測が重要である事は上記した。水文観測においても今後特に重要な点は、

- 測定精度の向上
- 観測データの共有、データベース化
- 短期集中観測ネットワークの充実

であると考えている。

測定精度向上の重要性は、本論文集のメインピックであり、著者らがここで言及する必要もないであろう。しかしながら一つ指摘したい点は、過去の長期データを校正する事を考慮した上で、測定精度の向上に取り組む事が重要だという点である。地球温暖化や人為活動の影響が流域水循環に与える影響を議論するためには、長期流量データが必要不可欠である。このようなデータを議論する際には、観測データに多少の精度不足が含まれているように、あまり気にすることなく長期のトレンドを見ることが多い。これは長期間のデータに対してある種の基準化を行うことで測定誤差などは無視できるものと考えられるためである。こういった状況を考えた場合、観測手法の変更や測定精度の向上に伴い、長期観測データのトレンドが変化することが生じては本末転倒である。過去の測定手法・データに対して校正を行う事を踏まえ、各種条件の基で測定精度の向上を行うことが重要であろう。また、測定精度向上と同時並行で、未だに豪雨災害が頻発している2級河川や水文データの不足した流域などにおけるデータの充実に向けて、安価かつ簡易に水文データの長期計測が可能となる手法の開発も非常に重要である。

観測データの共有、データベース化に関しては、国土交通省の水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)

や気象庁のアメダス(<http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>)などの広域かつ長期的なデータベースとは別に、各研究者や民間企業、自治体などが個別に行っている現地観測のデータを共有しデータベース化する事が非常に重要ではないかと考える。国際水文科学連合(IAHS)が精力的に推進しているPUB (Predictions in Ungauged Basins)プロジェクト(例えば、Sivapalan⁴⁵⁾, Sivapalanら⁴⁶⁾)では、水文データの不足した流域における洪水予測に向けて、現地観測データや解析結果の共有が試みられている。このような取り組みが、河川流量観測の新時代に向けても必要なのではないかと考える。その第一歩の情報共有として、本論文集が果たす役割は非常に大きいと考える。今後の更なる情報・データ共有のために国や水文・水資源学会、土木学会や若手研究者の精力的なリーダーシップと献身的な協力体制が必要不可欠となるであろう。

最後に短期集中観測ネットワークの充実の必要性に関して述べる。現地観測は人的労働力、機材、時間、予算などが必要となり、これらを一つの研究室でカバーすることは非常に困難な場合が多い。よって、予算がある機関は予算を、機材がある機関は機材を、人員がある機関は人員を、アイデアがある機関はアイデアを提供することで、各研究機関が協力のもと短期集中観測ネットワークを構築することが非常に重要であると考えられる。例えば、日本では琵琶湖プロジェクトや、雲物理過程の解明に向け旧炭坑の長大立坑を使用した実スケール実験が行われたマジックモンキープロジェクト(例えば、山田ら⁴⁷⁾, 笹尾ら⁴⁸⁾)などがこの考えの基で行われてきた。学術論文執筆のために、データや機材を抱え込む時代は既に終末を迎えており、これからはデータ・アイデアを共有することで協力していく時代である。この効率化により、多種多様な条件を考慮した現地観測・実験の実施が数多く可能となり、学術論文数、学術的知見の新発見や社会への貢献なども従来より増えるものと考えられる。

このようにして整備される水文データを使用し様々な解析を行うことも重要である。現在、国土交通省を中心に水・物質循環解析ソフトウェアの共通プラットフォーム「CommonMP (Common Modeling Platform for Water-material circulation analysis)」の開発が精力的になされており(例えば、山田⁴⁹⁾)、既に実際に使用できる段階となっている。このCommonMPで使用できる要素モデルを用い、整備された水文データの解析を行う。解析結果から、水文データおよび要素モデルの何が不十分であるのかを議論する事で、更なる要素モデルの開発およびCommonMPへの実装を進める。また新しい要素モデルを駆使するためにはどのような水文データの充実が必要なのかを議論することも可能となる。このように、CommonMPと新しい時代の水文観測データベースが共に成長していくことが、新たな知見の発見に大きく寄与するとともに、水文学の更なる向上に向けて非常に重要である。

参考文献

- 1) 呉 修一, 渡邊暁人, 多田直人, 山田 正: 都市河川感潮域における水質の空間分布特性に関する現地観測, 土木学会水工学論文集, Vol.52, pp.1105-1110, 2008.
- 2) 山角康樹, 浅見龍一, 山田 正, 井上智夫: 都市河川感潮域における水質の変動特性に関する現地観測, 土木学会水工学論文集, Vol.55, pp.1669-1674, 2011.
- 3) Sellers, P.J. and Hall, F. G.: *FIFE in 1992: Results, Scientific Gains, and Future Research Directions*, J. Geophys. Res., Vol.97, No.D17, pp.19091-19109, 1992.
- 4) LeMone, M.A., Grossmann, R. RL., Coulter, R. L., Wesley, M. L., Klazura, G. E., Poulos, G. S., Blumen, W., Lundquist, J. K., Cuenca, R. H., Kelly, S. F., Brandes, E. A., Oncley, S. P., McMillen, R. T. and Hicks, B. B.: *Land-Atmosphere interaction research, early results, and opportunities in the Walnut river watershed in Southeast Kansas : CASES and ABLs*, Amr. Meteorol. Soc., Vol.81, pp.757-779, 2000.
- 5) Jochum, M.A.O., de Bruin, H.A.R., Holtslag, A.A.M. and Belmonte, A.C.: *Area-Averaged Surface Fluxes in a Semiarid Region with Partly Irrigated Land: Lessons Learned from EFEDA*, J. Appl. Meteor., Vol.45, pp.856-874, 2006.
- 6) 田中賢治, 中北英一, 池淵周一: 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 土木学会水工学論文集, Vol.42, pp.79-84, 1998.
- 7) 玉川一郎, 田中賢治, 石田祐宣, 樋口篤志, 松島 大, 浅沼 順, 小野圭介, 多田 毅, 林 泰一, 石川祐彦, 田中広樹, 檜山哲哉, 岩田 徹, 田中健路, 中北英一, CAPS 観測グループ: 琵琶湖プロジェクト2002年フラックス面的集中観測 (Catch A Plume by SATs : CAPS) : その概要: 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.4, pp.392-400, 2004.
- 8) 加藤拓磨, 小田村康幸, 山田 正: 河川からの風が都市の熱環境に与える緩和効果, 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp.295-300, 2009.
- 9) 大野修平, 岩本進太郎, 加藤拓磨, 山田 正, 井上智夫: 都市部における河川周辺の気温特性と熱環境緩和効果, 土木学会水工学論文集, Vol.55, pp.343-348, 2011.
- 10) Kavvas, M.L., Z.Q. Chen, C. Dogrul, J.Y. Yoon, N. Ohara, L. Liang, H. Aksoy, M.L. Anderson, J. Yoshitani, K. Fukami and T. Matsuura: *Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model, based on upscaled conservation equations: hydrologic module*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.9, No.6, 450-464, 2004.
- 11) Kampf, S. K., and S. J. Burges: *A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models*, Water Resour. Res., **43**, W05423, doi:10.1029/2006WR005370, 2007.
- 12) 呉 修一, 山田 正, 吉川秀夫: 有効降雨の推定に関する研究, 土木学会論文集B, Vol. **65**, No.3, pp.231-245, 2009.
- 13) 赤羽祐也, 呉 修一, 山田 正: 都市流域における現地流量観測と都市化が洪水流出特性に与える影響, 土木学会水工学論文集, Vol.52, pp.481-486, 2008.
- 14) 木内 豪, 賈 仰文, 戸嶋光映, 吉谷純一, 倪 广恒: 農地と都市が混在する流域における WEP MODEL を用いた水循環解析, 土木学会水工学論文集, Vol.46, pp.283-288, 2008.
- 15) 佐山敬洋, 寶 馨: 斜面侵食を対象とする分布型土砂流出モデル, 土木学会論文集, 726/II-62, pp.1-9, 2003.
- 16) 呉 修一, 北村知里, 江花 亮, 山田 正: 小流域における水質ハイドログラフの形成過程に関する研究, 土木学会

- 水工学論文集, 49, pp.157-162, 2005.
- 17) 手計太一, 吉谷純一, スヴァンピモル チャンチャイ, 宮本守, 山田 正: 数値実験を利用した大ダムの持つ治水・利水効果の検証—タイ王国・Chao Phraya 川流域を対象として—, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 3, pp.145-155, 2007.
 - 18) 宮本 守, 木内 豪: 感潮域における都市河川の水・熱輸送特性と下水処理水が河川水温に与える影響, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 4, pp.291-302, 2007.
 - 19) Ohara, N., M.L. Kavvas, D. Easton, E.C. Dogrul, J.Y. Yoon and Z.Q. Chen: *Role of Snow in Runoff Processes in a Subalpine Hillslope: Field Study in the Ward Creek Watershed, Lake Tahoe, California, during 2000 and 2001 Water Years*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.16, No.6, 521-533, 2011.
 - 20) Tsukamoto, Y. : *An experiment on subsurface flow*, J. Jpn. Soc. Forestry, Vol.43, pp.61-68, 1961.
 - 21) Hursh, C. R., Brater, E. F. : *Separating storm hydrographs from small drainage area into surface and subsurface flow*, Trans. Am. Geophys. Union, pp.863-870, 1941.
 - 22) 海老瀬潜一, 宗宮 功, 平野良雄: タンク流出モデルを用いた降雨時流出負荷量解析, 用水と廃水, Vol.12, pp.1422-1432, 1979.
 - 23) 竹内邦良, 坂本 康, 本郷善彦: NO₃ をトレーサーに用いた流出成分分離の可能性について, 土木学会水理講演会論文集, Vol.27, pp.405-413, 1983.
 - 24) Sklash, M.G. and Farvolden, R.N. : *The role of the groundwater in storm runoff*, J. Hydrol., Vol.43, pp.45-65, 1979.
 - 25) Betson, R. P. : *What is watershed runoff?*, J. Geophys. Res., Vol.69, No.8, pp.1541-1552, 1964.
 - 26) Hewlett, J. D.: *Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds*, US Dept. Agric., Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, Station Paper No.132, 1961.
 - 27) 高棹琢馬: 出水現象の生起場とその変化過程, 京大防災研究所年報, No.6, pp.166-180, 1963.
 - 28) 吉野文雄: 現地実験による表面流出の研究, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp.59-68, 1983.
 - 29) 山田 正, 日野幹雄, 藤田光一: 小試験地における雨水の流出機構に関する研究, 土木学会水理講演会論文集, Vol.26, pp.229-236, 1982.
 - 30) Kirchner J.W.: *A double paradox in catchment hydrology and geochemistry*, Hydrological Processes, Vol.17, pp.871-874, 2003.
 - 31) 佐山敬洋, 辰巳恵子, 立川康人, 寶 薫: 分布型流出モデルにおける流水の時空間分布起源に応じたハイドログラフ分離法, 水文・水資源学会誌, Vol.20, No.3, pp.214-225, 2007.
 - 32) Sayama, T. and J.J. McDonnell: *A new time-space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale*, Water Resour. Res., Vol.45, W07401, doi:10.1029/2008WR007549, 2009.
 - 33) McDonnell J.J.: *A rationale for old water discharge through macropores in a steep humid catchment*, Water Resour. Res., Vol.26, pp.2821-2832, 1990.
 - 34) Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte, and T. Mizuyama: *Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope*, Water Resour. Res., Vol.39, 1018, doi:10.1029/2002WR001298, 2003a.
 - 35) Uchida, T., Y. Asano, N. Ohte, and T. Mizuyama: *Analysis of flowpath dynamics in a steep unchanneled hollow in the Tanakami Mountains of Japan*, Hydrol. Process., Vol.17, pp.417-430, 2003a.
 - 36) 浅野友子, 内田太郎, ジェフリー マクドネル: *Variable Source Area Concept* の次なる斜面水文過程の概念構築に向けた近年の試み: 斜面に降った雨はどこへ行くか?, 水文・水資源学会誌, Vol. 18, No. 4, pp.459-468, 2005.
 - 37) 浅野 孝: カレント・トピックス—海外の水管理政策動向— (第 1 回), 日本河川協会, 雑誌河川, 2008 年 5 月号, pp.71-74, 2008.
 - 38) Kroll, C. G.: *Sediment Discharge from Highway Cut-Slopes in the Lake Tahoe Basin, California, U.S.* Geological Survey Water Resources Investigations 76-19, Prepared in Cooperation with the California Department of Transportation Division of Highways, 1976.
 - 39) Simon, A., E. Langendoen, R. Bingner, R. Wells, A. Heins, N. Jokay and I. Jaramillo: *Draft Final Lake Tahoe Basin Framework Implementation Study: Sediment Loadings and Channel Erosion*, USDA-Agricultural Research Service, Channel and Watershed Processes Research Unit, National Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, 2003.
 - 40) Kavvas, M.L., J. Yoon, Z. Q. Chen, L. Liang, E. C. Dogrul, N. Ohara, H. Aksoy, M. L. Anderson, J. Reuter, and S. Hackley.: *Watershed Environmental Hydrology Model: Environmental Module and Its Application to a California Watershed*, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 261-272, 2006.
 - 41) Roth, J. T. Thayer, A. Breibart, J. O'Connell, W. Christensen, S. Norman: *Monitoring Program Annual Report*, USDA Forest Service, Lake Tahoe Basin Management Unit, 2006.
 - 42) Ohara, N. and M.L. Kavvas: *Field observations and numerical model experiments for the snowmelt process at a field site*, Advances in Water Resources, Vol.29, pp.194-211, 2006.
 - 43) Marks, D., J. Kimball, D. Tingey, and T. Link.: *The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood*, Hydrol. Process. Vol.12, pp.1569-1587, 1998.
 - 44) Harr, R.D.: *Some Characteristics and Consequences of Snowmelt During Rainfall in Western Oregon*, Journal of Hydrology, Vol.53, pp.277-304, 1981.
 - 45) Sivapalan, M.: *Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology*, Hydrol. Process., Vol.17, pp.3163-3170, 2003.
 - 46) Sivapalan, M., K. Takeuchi, S.W. Franks, V.K.Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J.J. McDonnell, E.M. Mendiondo, P.E. O'Connell, T. Oki, J.W. Pomeroy, D. Schertzer, S. Uhlenbrook and E. Zehe: *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins(PUB 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*, Hydrol. Sci. J., Vol.48, No.6, pp.857-880, 2003.
 - 47) 山田 正, 日比野忠史, 深和岳人, 松浦正典, 藤吉康志, 播磨屋敏生, 稲毛正昭, 中津川誠: 実スケールの雲物理実験と降雨モデルによる雲の微物理過程の考察, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.1-13, 1995.
 - 48) 笹尾将登, 土屋修一, 山田 正: 実スケール雲物理実験における時空間変化する粒子数濃度と雲水量の関係, 土木学会水工学論文集, Vol.51, pp.319-324, 2007.
 - 49) 山田 正: *CommonMP* プロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性, 河川流量観測の新時代, Vol.1, pp.1-6, 2010.