

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？

Searching for “post” Variable Source Area Concept of Rainfall-Runoff Response in Headwater.
 Where does Water Go When it Rains?

浅野友子¹⁾ 内田太郎²⁾ ジェフリー マクドネル³⁾

Yuko ASANO Taro UCHIDA Jeffery J. McDONNELL

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

2) 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management

3) オレゴン州立大学森林工学科

Department of Forest Engineering, Oregon State University

1930年代の Horton の一連の研究以降、斜面水文に関わる研究者は、“斜面に降った雨はどのように流出するのか”という課題に取り組んできた。1950～60年代には、塚本や Hewlett ら森林水文学者が Horton の概念に変わるものとして変動流出域概念 (variable source area concept) を提唱し、これは今日、数多くの雨水流出モデルの基礎的な仮定・近似となっている。しかしながら、その後、特に環太平洋地域で行われた自然斜面での物理水文観測と同位体や水質等を用いたトレーサー手法を組み合わせた観測研究により、長期間斜面中に貯留されていた水が降雨時に素早く流出し、大きなハイドログラフの変動を生じさせることが明らかとなり、変動流出域概念は雨水流出過程の実態を十分に表現していないことが示されてきた。そこで、本総説は McDonnell (2003, Hydrological Processes, 17, pp. 1869-1875) を基に、1960年代以降の斜面水文観測の成果について概観し、変動流出域概念と自然斜面での観測成果のギャップを検討した。さらに、近年の観測結果を雨水流出モデルへ反映する試みについて紹介した上で、山地水文過程の概念化の課題を整理し、今後の方向性について提言した。

キーワード：降雨・流出モデル，斜面水文学，トレーサー，非線形性，変動流出域概念

“Where does water go when it rains on hillslope?” Researchers have worked on this question since studies by Horton in 1930s. Studies by forest hydrologists like Tsukamoto and Hewlett in the 1950s and 60s in forested upland catchments presented an alternative to infiltration excess theory in the form of the variable source area theory (VSA). This theory has been the basis for many topographically based conceptual rainfall-runoff models used today. Recent observations and monitoring of natural hillslopes in many areas of the Pacific Rim have begun to observe that VSA does not adequately explain the types of behaviors now uncovered through combined use of hydrometric, isotopic and geochemical measurements: threshold subsurface stormflow initiation, hysteresis in the hillslope-catchment discharge relation, dominance of vertical and lateral preferential flow and rapid mobilization of old water. Based on McDonnell (2003, Hydrological Processes, 17, pp. 1869-1875) this commentary summarizes advances in hillslope hydrology since 1960's, and examines the applicability of several VSA assumptions used in our current rainfall-runoff models. Further, we present recent challenges to introduce qualitative field information to rainfall-runoff models. Then, we try to summarize some possible ways forward to for how we as a community might develop a “post” variable source area concept.

Key words : Rainfall-runoff modeling, Hillslope hydrology, T tracer, non-linearity, Variable source area concept

はじめに

山地斜面における流出機構に関する研究は1930年

代の Horton による研究(Horton, 1933)以来、日本、北米、ヨーロッパを中心に山地小流域・斜面における観測を主な手段として進められてきた。特に、

1) 科学の森教育研究センター 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, 113-8657, Japan

2) 危機管理技術研究センター 〒305-0804 つくば市大字旭 1 番 Tsukuba, Ibaragi, 305-0804 Japan

3) 97331-4316 オレゴン州コバリス 015Peavy Hall, Corvallis, Oregon, 97331-4316, USA

1960年代に入って、今なお大きな影響を及ぼす研究がなされ多くの論文が発表された(塚本, 1961; Betson, 1964; Whipkey, 1965 など)。中でも, Cap-pus (1960)(Ambroise, 2004 参照), Tsukamoto (1963)やHewlett and Hibbert (1967)は, 山地流域における流出形成場が降雨規模により変動するとした変動流出域概念(Variable source area concept)を提唱し, 現在の雨水流出モデルの核となるプロセスを明らかにした。同時にHewlettは, 斜面水文学で解明すべき課題として, 次の3課題を提示した。

降水は流域内のどこに貯留されるのか? または流出するのか?

降水が地表面に達してから溪流に到達するまでにはどのような経路をたどるのか?

降水が地表面に達してから溪流に到達するまでにどのくらいの時間がかかるのか?

これらの課題はIHD(International Hydrologic Decade; 1965~1974年)以降, 世界各地で行われた詳細な斜面水文観測により検討されてきた(岡本, 1972, 1973; Kirkby, 1978 など)。さらに, 現地斜面の観測は数多くの観測技術革新(トレーサーの活用法の確立など)をもたらし, 特に, 1990年代以降, 国内外において, 観測技術の進歩により数多くの詳細な斜面水文観測がなされ, 多くの知見が蓄積されてきた(内田, 2004など)。その結果, 今日になってもHewlettが提示した3つの課題に対する完全な解答が得られているとはいいがたいものの, 山地源流域における流出水の流出源や流出経路, 滞留時間は, 半世紀前に変動流出域概念が提唱された当時に想定されていたものとは, かなり異なっていることが明らかにされてきた。

一方, 近年, 山地流域における雨水-流出モデルに関する研究では, パラメータの決定手法やパラメータ及びモデルの不確実性の分析手法等において数多くの成果が得られているものの(Beven, 2000; 2001a; Sivapalan, 2003), 山地流域の雨水-流出モデルの基本構造は, 変動流出域概念が提示された1960年代の知見に則しているものも少なくなく, 近年の水文観測の成果が十分に反映されていない。すなわち, 現在用いられている山地流域のモデルの多くは, 複雑な雨水-流出過程を, 1960年代に提案された変動流出域の概念に基づき, 数学的に近似している(Beven, 2000)。また, 雨水-流出モデルに関する研究の多くは, Hewlettが示した3課題の解明などの山地の雨水-流出過程の解明に十分に寄与し

ているとはいいがたく, 過去50年の斜面水文過程の理解は主として「観測」によってもたらされてきたように思われる。

そこで, 本総説では, Hydrological Processesに掲載された論説(McDonnell, 2003)を基に, IHD以降, 特に1990年代以降の斜面水文観測の成果と, 現在多くの山地源流域の雨水-流出モデルに用いられている仮定・近似とを比較検証し, モデル中の仮定・近似の妥当性を検討することを目的とする。その上で, 近年の観測結果に基づき提案された新しいモデルについて紹介する。

・IHD以降の観測研究の代表的な成果

IHD以降の水文観測研究は, トレーサーを用い, 流出水, 地下水の滞留時間や, 流出源を推定する技術が開発されたこと(Sklash and Farvolden, 1979; Hooper *et al.*, 1990), 時空間分解能の高い土壌水分量, 地下水位の観測が可能となったこと(例えば, Montgomery *et al.*, 1997; 西口ら, 2005)により大きく進歩した。その結果得られた成果の多くは, IHD当時に提案された雨水-流出過程の概念と, 雨水流出過程の実態は大きく異なるものであることを示していた。そこで, 以下に, その中でも注目すべき違いについて概説する。

1. 「古い水」が卓越する洪水流出

IHD以降の理解の進歩の中でも, 降雨時の流出水の大部分が降雨前から斜面に貯留されていた水(以下では「古い水」とよぶ)で占められていることが地質, 植生によらずほぼ共通していることが明らかにされたこと(Pearce, 1990; Buttle, 1994)は, 最も重要なことのひとつであろう。Sklash and Farvolden (1979)などによって示された降雨時の流出水が「古い水」によって占められているとしたこの発見は, その後の斜面水文観測に多大な影響を及ぼした。この結果は, 日本国内においても追試され, 多くの流域で「古い水」が卓越していることが確認された(辻村・田中, 1996; 一柳・加藤, 1998など)。

2. 「非線形」な応答をする雨水-流出過程

Kirchner (2003)などが指摘しているように, Sklash and Farvolden (1979)以降の斜面水文研究は, 1960~70年代に提案されたホートン型地表流, 飽和地表流や浅い地中流等の先駆的な概念モデル(例えば, 高棹, 1963; Dunne and Black, 1970; Wey-

man, 1973; 小川, 1977など)では説明できない, 長期間斜面に貯留された水が, 降雨時にすばやく流出し, 大きなハイドログラフの変動を生じさせる機構を明らかにすることに重点がおかれてきた(例えば, Abdul and Gillham, 1984; McDonnell, 1990; Bishop *et al.*, 1991など). その結果, 長期間斜面に貯留された水が, 降雨時にすばやく流出し, 大きなハイドログラフの変動を生じさせる機構として, トランスミッシビティー・フィードバック (Bishop *et al.*, 1991) やパイプ流 (McDonnell, 1990), 岩盤の割れ目中の流れ (Anderson *et al.*, 1997) の存在が明らかにされてきた. 特に, 氷河の影響を受けていない森林斜面においては, パイプと呼ばれる斜面に平行に土壌-岩盤境界面上に発達した大孔隙がしばしば存在し, 雨水-流出機構に大きな影響を及ぼしていることが明らかにされてきた (田中ら, 1984; Tanaka *et al.*, 1988; 北原, 1996; Uchida *et al.*, 2001; Uchida *et al.*, 2004).

また, トランスミッシビティー・フィードバックやパイプ流といった現象は, 総降雨量, 降雨強度がある一定値 (閾値) を超えたとき, はじめて寄与する現象であることが明らかにされてきた (Sidle *et al.*, 1995; Uchida *et al.*, 1999). その結果, 総降雨量-総流出量関係は非線形性の強い, 閾値を持つような関係になることが世界各地で共通して報告されてきた (福 嶋・武居, 1981; Tani, 1997; Noguchi *et al.*, 2001; Tromp van-Meerveld and McDonnell, 2004).

観測研究の成果に基づくモデル中の「仮定」の検証

先にも述べたように, 現在, 構築・提案されている雨水-流出モデルの多くは, IHD 当時の観測に基づき記述された概念モデル (例えば, Hewlett and Hibbert, 1967; Dunne, 1978) に基づいているように思われる (窪田ら, 1988; Wigmosta *et al.*, 1994など). この理由として, IHD 当時の概念モデルは普遍的かつシンプルであったためであると考えられる. 一方, 前章で述べたような IHD 以降に行われた「長期間斜面中に貯留されていた水が, 降雨時にすばやく流出し, 大きなハイドログラフの変動を生じさせる機構」の解明を目的に行われた観測に基づき提示された概念モデルの多くが, 複雑なプロセスを非常に詳細に記述すること, 観測した斜面に特徴的なプロセスを記述することに終始している. そのため,

新しい普遍的な (適用範囲が明確な) 山地斜面雨水流出過程の概念を提示するのに至っていないのが実情であり, IHD 以降の観測研究によってもたらされた知見が雨水-流出モデルに十分に反映されてきていない (Beven, 2001b). そこで, ここでは現在, 山地の雨水-流出モデルの多くで採用されている次の3つの「仮定・近似」について, 観測研究の成果と照らし合わせて検証する.

飽和透水係数は深さに依存して小さくなり, 岩盤は不透水である (透水性の「深さ依存性」, 岩盤の「不透水性」).

地中流の方向は表面地形によって表現できる (土層中の側方流の「表面地形依存性」).

流域内の地下水位の変動は全ての地点で同期している (地下水位変動の「同時性」).

1. 透水性の「深さ依存性」, 岩盤の「不透水性」

変動流出域概念やその概念に基づいて構築されたモデルにおいては通常, 土壌層中の水流のみを対象とし, モデル化されている. 例えば, TOPMODEL においては, アメリカの H. J. Andrews 試験林における土壌飽和透水係数の鉛直分布の測定結果を参考にし, 深さにともなって土壌の透水性が指数関数的に低下するという数学的な近似をさせることによって計算領域を制限している. 実際, 斜面の土壌飽和透水係数の測定結果からは, 土壌の透水性が深さに伴って単調に低下することが多く報告されている (例えば塚本, 1961; Harr, 1977).

しかし, 土壌が完全に不透水ではない岩盤の上を覆っているとき (一般的には, そうする場合のほうが多いと考えられる), 岩盤内のプロセスも斜面の雨水-流出過程において重要な役割を果たしていることが近年明らかにされてきた. 以前より, 岩盤中の水流が山地の雨水流出過程に影響を及ぼすことは知られていたが (例えば, 小葉竹, 1979), 近年, 詳細に水収支を検討した結果, 土層中に浸透してきた雨水が, 岩盤表面に到達したとき, 一部は次節 (2.) で述べるように, 飽和帯を形成し岩盤表面に沿って流下するが, 多くの部分は岩盤中に降下浸透することが明らかにされた (例えば, 寺嶋ら, 1994; 勝山ら, 2004).

滋賀県田上山地の不動寺, 裸地谷試験地で行われた同位体比を用いた平均滞留時間に関する研究では, 斜面の有効貯水量は土壌層の貯水量に比べてはるかに大きく, 岩盤中の水の貯水量を無視することがで

きないことを示している(例えば Asano *et al.*, 2002). また, 不動寺の結果から, 基底流出時の流出ハイドログラフの大部分は一度岩盤中に浸透した水であることが明らかにされてきた(Uchida *et al.*, 2003ab). さらに, 岩盤から土壤層中に「復帰」する地下水の流れが, 土壤層内の飽和帯地下水帯の形成・消長(例えば, Montgomery *et al.*, 1997; Uchida *et al.*, 2002), 斜面からの流出水の洪水ハイドログラフの形状(Onda *et al.*, 2001; 宮田ら, 2003)に大きく寄与することがあることが示されてきた. さらに, 岩盤の亀裂と土壤-岩盤境界面上の流出経路との連結については, 染料を用いたトレーサー試験でも確認されてきている(Noguchi *et al.*, 1999). 岩盤中の水流が山地の雨水流出現象に及ぼす影響については十分に一般化されているとはいいがたいが, その重要性が多くの斜面で確認されてきた. 特に, アメリカの西海岸(例えば Wilson *et al.*, 1987; Montgomery *et al.*, 1997), ニュージーランド(Bowden *et al.*, 2001), 日本(小野寺ら, 2001など)など環太平洋地域の斜面においてはその重要性が指摘されている箇所が多く, 雨水-流出モデルを構築する上で無視することのできないコンポーネントであると考えられる.

2. 土層中の側方流の「表面地形依存性」

TOPMODEL(Beven and Kirkby, 1979), 窪田らのモデル(窪田ら, 1988), TAPES-C model(Moore *et al.*, 1988), 市川らのモデル(市川ら, 2001)など, 山地の雨水-流出モデルにおいては, 地中の水流の向き, 大きさが表面地形の勾配に従うとする仮定が幅広く用いられてきた. 斜面部では, 位置ポテンシャルの差が動水勾配のほとんどを占めることから, 表面地形により地中の水の流れが表現できるとした仮定は理論的には妥当であると考えられてきた. さらに, 近年, 洪水流出波形, 溪流水質, 表層崩壊位置の予測計算, 土砂流出量計算においても, この仮定が用いられてきた(例えば, Montgomery and Dietrich, 1994; Scanlon *et al.*, 2000; 佐山・竇, 2003など).

これに対して, オーストラリアのTarrawarraで行なわれた研究結果では, 土壤水分の分布は, 特に乾季において, 表面地形に依存しないことが明らかにされてきた(Grayson *et al.*, 1997). 同様の結果は, Tarrawarra以外において世界各地で報告されてきている(例えば, Western *et al.*, 1998).

また, 1980年代前半において, 滋賀県桐生試験地

でおこなわれた観測から, 降雨時に斜面土層内において発生する側方流の大部分は土壤-岩盤境界面上において発生することが報告された(太田ら, 1983). さらに, 多摩丘陵波丘地試験地などにおいては, 土壤-岩盤境界面に沿うようにパイプが発達する結果, 土壤-岩盤境界面においては多量の側方流が発生することが示された(田中ら, 1984; Tanaka *et al.*, 1988). この現象はさらにその後, ニュージーランドのMaima(McDonnell, 1990), アメリカのPanola(McDonnell *et al.*, 1996), 日本の森林総研竜の口試験地(Tani, 1997), 鳥取大学蒜山演習林(小山・奥村, 2002), カナダのPlastic Lake(Peters *et al.*, 1995)やブリティッシュ・コロンビア大学演習林(Hutchinson and Moore, 2000)など世界各地で行われた詳細な水文観測においても確認されてきた. これらの結果は, Freer *et al.*, (2002)が, 地表面と岩盤表面の地形を詳細に調べた上で結論づけたように, 降雨時の斜面土層内の側方流は表面地形ではなく, 土壤-岩盤境界面の地形に依存することを示している.

3. 地下水位変動の「同時性」

TOPMODELをはじめとする変動流出域概念に基づく流出モデルの多くは, 地下水位の上下の変動は場所によって変動幅は異なるものの, 地下水位の上昇または下降の傾向は斜面部位の影響を受けず, 斜面で共通であると仮定している(Beven and Kirkby, 1979). つまり, 斜面内の地下水は同時に上昇, 下降を開始すると仮定している.

この仮定に関する検証例は少なく, Moore and Thompson(1996)がカナダのブリティッシュ・コロンビア大学演習林で検証した例, Seibert *et al.*(2003)がスウェーデン北部に位置するSvartberget流域で検証した例が見られる程度である. Moore and Thompson(1996)は地下水位変動の「同時性」の仮定は妥当であるとの結論を得ているが, Moore and Thompson(1996)の観測井戸が斜面の下部約1/3に限られていることなどにおいて問題があった. そこで, Seibert *et al.*(2003)は斜面のほぼ全域をカバーした観測井戸のデータを用い, ライパリアンゾーンの地下水位の上下は, 斜面上部の上下と一致しないことを示した. 同様の結果は, 日本の森林総研常陸太田試験地(Sidle *et al.*, 1995)や不動寺, 京都大学芦生演習林トヒノ谷(Uchida *et al.*, 2004)においても確認されている.

また、地下水水質、水の安定同位体比、水温などの調査の結果、斜面部の地下水とライパリアンゾーンの地下水は水質、安定同位体比、水温が大きく異なることが報告された(Katsuyama and Ohte, 2002; Uchida *et al.*, 2003ab; Burns *et al.*, 2003)。このことは、斜面部とライパリアンゾーンの地下水は互いに混ざり合っており、異なる涵養機構を持つことを示していると考えられる。Asano *et al.* (2002; 2003)は斜面下部の溪流に近いゾーンで発生する地下水の大部分は岩盤内の経路からもたらされるのに対し、斜面部に発生する地下水の大部分は土壌層内の鉛直浸透によってもたらされることを示した。ほぼ同様の水の流出経路の空間分布は、東京農工大学波丘地(小野寺, 1990)やアメリカのCoos Bay (Anderson *et al.*, 1997)やSleepers River (McGlynn *et al.*, 1999)、ニュージーランドのGlendhu (Bowden *et al.*, 2001)の各流域でも報告されている。

さらに、地下水位の斜面部位による応答時間の違いは、ハイドログラフの形状にも影響を及ぼすことが明らかにされてきた。ニュージーランドのMaimai試験地における調査からは、ライパリアン部からの水の流出と斜面部から流出しライパリアンを通過する水の2成分で斜面からの流出水のハイドログラフが形成されているが、両者の応答に差があることが示された。すなわち降雨初期においては、ライパリアン部からの水の流出が卓越するのに対し、流出低減時においては、斜面部から流出し、ライパリアンを通過する水の成分が多いことが明らかにされた(McGlynn and McDonnell, 2003)。

・新しい観測結果のモデルへの反映例

「IHD以降の観測研究の代表的な成果」でも述べたように、IHD以降の観測研究の成果は、トレーサーを用いた観測、地下水位、土壌水分量の空間分布の観測によってもたらされた。しかしながら、トレーサー、地下水位の空間分布の観測の多くは、各サイトの雨水流出過程に関する複雑で定性的な概念モデルを提示することを主目的としたものであった(例えば、McDonnell, 1990; Peters *et al.*, 1995; Uchida *et al.*, 2002)。一方、近年、流出水量のデータだけでは、モデルの精度や妥当性を十分に検証することはできないことが示されてきたものの(Kirchner *et al.*, 1996)、雨水流出過程に関する数値モデル研究の多くは、トレーサーを用いた観測、地下水位、土壌水分量の空間分布の観測結果をモデ

ルの構造決定、変数決定、モデルのパリテーションに利用することはほとんどなかった。例えば、Fukushima(1988)によって提案されたHYCYMODELは、現在までに提案されたモデルのうち、最もプロセスに則したモデルの1つであると考えられるが、HYCYMODELの定数の決定には、現時点においては流出水量のデータのみが用いられ、地下水位や土壌水分量観測、地下水、流出水の化学組成、同位体比などのデータは用いられてこなかった(例えば、Tanaka *et al.*, 1998)。ここでは、近年行われてきた観測から得られた知見を数値モデルに反映する試みを紹介する。

1. トレーサー及び地下水位の空間分布に基づく流域分割

前章で示したように、地下水位の応答は山地流域内においても斜面の部位によって異なることが明らかとなった。そこで、近年、流域を連続的につながった複数のタンク(ボックス)とするモデルが提案されてきた(例えば、Seibert and McDonnell, 2002; Uhlenbrook *et al.*, 2004)。過去の工学的な流域研究におけるボックスモデルの発展と利用は、プロセス/メカニズムの理解のためにというよりはむしろ、計算の簡便性を求めてのものだったが、近年行われてきたモデル化は、地下水動態や土壌溶液の化学組成、同位体比の情報に基づき、支配する水文過程の違いにより流域を分割しようとする試みである。

流域を複数のタンクで表現する利点は、モデルの中で水とトレーサーの正確な収支が出てくることから、より複雑なダルシー則に基づくモデルと同程度に物理則にのっとったモデルになること、ハイドログラフの遞減特性や流出水・地下水の平均滞留時間によりタンク(ボックス)の大きさを客観的に規定できること、Richardsの式に基づき流域をメッシュ状に分割したモデルに比べてパラメータの数が極めて少なく、パラメータの不確かさが極めて小さいことなどが挙げられる(Uhlenbrook *et al.*, 2004など)。

例えば、Seibert and McDonnell(2002)は、最も集中的な水文観測が実施された流域の1つであるニュージーランドのMaimai流域を対象にモデル化を行った。同流域では、観測からライパリアン部と斜面部の地下水位の応答は定性的に異なっていること、平行斜面と凹地、ライパリアンゾーンの土壌水

の化学組成や水の同位体比が有意に異なることから、流域を平行斜面、凹地、ライパリアンの3ボックスに分割し、平行斜面部のボックスからの流出水は側方流として凹地ボックスを涵養し、さらに凹地ボックスからの水はライパリアンボックス、続いて渓流へと流れる階段状に連続した構造を提案し、同モデルを用いて、流出水のハイドログラフのみならず、地下水位が良好に再現できることを示した。

2. トレーサー及び地下水位の空間分布測定結果のパラメータの最適化への活用

Kirchner *et al.* (1996) はハイドログラフだけを使った検証では、モデルの妥当性を十分に検証することはできないことを示した。これに対して、前節で述べたような単一又は複数タンク(ボックス)からなる雨水-流出モデルを用いて、流量のみならず、野外観測から得られるそのほかの情報、例えば河道近傍の飽和帯の面積、渓流の水質、滞留時間などのトレーサー情報などを再現する試みがなされてきた(Uhlenbrook *et al.*, 1999; Seibert *et al.*, 2000; Seibert and McDonnell, 2002)。

Seibert and McDonnell (2002) は、連続的な流出水量データを「ハードデータ」と呼ぶとき、それと対照的なものとして河道近傍の飽和帯の面積、渓流の水質、滞留時間などを「ソフトデータ」と呼ぶよう提案している。彼らは、流出水量(ハードデータ)だけでパラメータを最適化したとき、流出水量に関しては計算値と実測値の相関係数は高いが、通常その他の基準(例えば、予測されたピーク流量に占める直接流出水量(event water)の割合、斜面部、ライパリアン部の地下水位変動など)の再現性は低いことを示した。このことから、ソフトデータをモデル構造及びパラメータの決定に利用することによって、流出水量に関しては計算値と実測値の相関係数は若干低下するが、流域の水文現象をより忠実に表現しているモデルを構築することができると結論付けた。前章でも述べたように、世界中の試験流域には「ソフトデータ」が数多く存在することを併せて考えると、「ソフトデータ」を用いることが、新しいモデル研究の方向性となる可能性が考えられよう。

・まとめと今後の課題

50年前に、水文学者が森林流域でホートン型地表流(降雨強度が地表面の浸透能を上回って発生する地表流)が発生しないことを観測したことから、そ

れに代わる新しい流出生起概念(変動流出域概念)を提起した。しかし、ここで示してきたように変動流出域概念では十分に山地の雨水-流出過程を説明しきれず、新しい概念が必要であることが指摘されつつある。しかしながら、今のところ、変動流出域概念に代わる雨水-流出過程の概念やモデル構造の構築をどのように進めていけばよいのかという方向性は明らかではないし、コンセンサスが得られているとはいいがたい。また、いまだに斜面スケールでの雨水-流出過程の支配要因(過程)を定量的に評価するには、多くの観測(降水量、土壌水分量、流出水量、地下水位)や原位置実験、同位体や水質等を用いたトレーサー手法を組み合わせる必要があり、簡易に斜面スケールの雨水-流出過程を評価する手法が確立されていない。そのため、Jones and Swanson (2001) や Kirchner (2003), Sivapalan (2003) が指摘しているように、1つの小流域において行なわれた詳細な研究から、普遍的な水文法則を導き出すのは困難であった。更に言えば、ある1つの斜面の特徴を記述するのに必要な最低限の観測手法が明示されていないため、世界各地で「独自」の観測が続けられているように思われる。その結果、過去20年間に何度も重要性を指摘されてきたにもかかわらず(例えば Dunne, 1983), 観測から得られた知見とモデルの構造及び素過程のモデル化が十分にリンクしていない(「観測」と「モデル」の融合がなされていない)。

今後、変動流出域概念に代わる雨水-流出過程の概念の構築にあたっては、これまでに観測が行なわれてきた流域の水の量や質を支配する最も重要な要因を、相互に比較し、また分類することが重要であると考えられる。過去数10年間に明らかにされてきた複雑なプロセスを整理し、変動流出域概念の次の理論を生み出す際には、2.で述べたような「非線形」がキーワードかもしれない。氷河による堆積物で覆われた斜面で見られるトランスミッシビティー・フィードバックや土壌-岩盤境界面で発生するパイプ流、岩盤の割れ目中的水流など、それぞれ全く違うプロセスに思える現象も全て、ある状態間の切り替わりによる非線形の閾値を持ったプロセスとすれば、ひとつの現象としてとらえられる。また、山地の自然現象を定式化、一般化する上で、他に注意すべき点としてスケールの問題がある(Phillip, 2003)。すなわち、スケールを拡大した場合、小さいスケールで流出現象をコントロールして

いた流出経路・帯水層とは異なる応答, 混合過程, 滞留時間を持った流出経路・帯水層が流出現象に寄与することがある(宮田ら, 2003; Burns *et al.*, 2003 など)。一方で, それぞれの流出経路・帯水層の特性を明らかにするためのトレーサー手法は十分に確立されており, さまざまなスケールや環境条件下において, 最も重要な支配要因を定量化することが必要であろう。

近年, Weiler and McDonnell (2004) は「現場の理解・情報を集結させたモデルによる数値実験」を通して, 現場斜面の複雑さを整理し, 次なる野外実験のための作業仮説を立て, 斜面の雨水 - 流出過程の支配要因を明らかにする試みを紹介した。今後, 変動流出域概念に代わる雨水 - 流出過程の概念の構築にあたっては, このような「観測」と「モデル」の融合, 「実験主義者」と「モデラー」の対話を進めていく必要があると考えられる。

引用文献

- Abdul, A. S. and Gillham, R. W. (1984): Laboratory studies of the effects of the capillary fringe on stream flow generation, *Water Resour. Res.*, **20**, pp. 691-698.
- Ambrose, B. (2004): Variable 'active' versus 'contributing' areas or periods: a necessary distinction, *Hydrol. Process.*, **18**, pp. 1149-1155.
- Anderson, S. P., Dietrich, W. E., Montgomery, D.R., Torres, R., Conrad, M. E. and Loague, K. (1997): Subsurface flow paths in a steep, unchanneled catchment, *Water Resour. Res.*, **33**, pp. 2637-2653.
- Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N. (2002): Residence times and flow paths of water in steep unchanneled catchments, Tanakami, Japan, *J. Hydrol.*, **261**, pp. 173-192.
- Asano, Y., Uchida, T. and Ohte, N. (2003): Hydrologic and geochemical influences on the dissolved silica concentration in natural water in a steep headwater catchment, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, pp. 1973-1989.
- Betson, (1964): What is watershed runoff?, *J. Geophys. Res.*, **69**, pp. 1541-1552.
- Beven, K. J. (2000): Rainfall-runoff modelling: the Primer, 360pp., Wiley, Chichester.
- Beven, K. J. (2001a): How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **5**, pp. 1-12.
- Beven, K. J. (2001b): On modelling as collective intelligence. *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 2205-2207.
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979): A physically-based variable-contributing-area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, **24**, pp. 27-53.
- Bishop, K. H. (1991): Episodic increases in stream acidity, catchment flow pathways and hydrograph separation, 246 pp., Ph. D. thesis, Univ. of Cambridge.
- Bowden, W. B., Fahey, B. D., Ekanayake, J. and Murray, D. L. (2001): Hillslope and wetland hydrodynamics in a Tussock grassland, south island, New Zealand, *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 1707-1730.
- Burns, D. A., Plummer, L. N., McDonnell, J. J., Busenberg, E., Casile, G.C., Kendall, C., Hooper, R. P., Freer, J. E., Peters, N. E., Beven, K. J. and Schlosser, P. (2003): The geochemical evolution of riparian ground water in a forested Piedmont Catchment, *Groundwater*, **41**, pp. 913-925.
- Buttle, J. M. (1994): Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins, *Prog. Physic. Geog.*, **18**, pp. 16-41.
- Cappus, P. (1960): Basin expérimental d'Alrance - Étude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits, *La Houille Blanche A*, pp. 493-520.
- Dunne, T. (1978): Field studies of hillslope flow processes, in M. J. Kirkby, editor. Hillslope hydrology, pp. 227-293, Wiley, Chichester.
- Dunne, T. (1983): Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff, *J. Hydrol.*, **65**, pp. 25-48.
- Dunne, T. and Black, R. D. (1970): Partial-area contributions to storm runoff in a small New England watershed, *Water Resour. Res.*, **6**, pp. 1296-1311.
- Freer, J., McDonnell, J. J., Beven, K.J., Peters, N. E., Burns, D. A., Hooper, R. P., Aulenbach, B. and Kendall C. (2002): The role of bedrock topography on subsurface storm flow, *Water Resour. Res.*, **38**, doi: 10.1029/2001WR000872.
- Fukushima, Y. (1988): A model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment, *Hydrol. Process.*, **2**, pp.167-185.
- Grayson R. B., Western, A. W., Chiew, F. H. S. and Blöschl G. (1997): Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls,

- Water Resour. Res.*, **33**, pp. 2897-2908.
- 福嶋義宏・武居有恒(1981): 山地小流域の短期流出に関するモデル, 第25回水理講演会論文集, pp. 229-236.
- Harr, R. D. (1977): Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope, *J. Hydrol.*, **33**, pp. 37-58.
- Hewlett, J. D. and Hibbert, A. R. (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, Proceedings of 1st International Symposium on Forest Hydrology, pp. 275-290, Pergamon, New York.
- Hutchinson, D. G. and Moore R. D. (2000): Throughflow variability on a forested hillslope underlain by compacted glacial till, *Hydrol. Process.*, **14**, pp. 1751-1766.
- Horton R. E., (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle, *EOS Trans. AGU*, **14**, pp. 446-460.
- Hooper R. P., Christophersen, N. and Peters N. E. (1990): Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members - an application to the Panola mountain catchment, Georgia, U. S. A., *J. Hydrol.*, **116**, pp. 321-343.
- 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴(2001): 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, **691**, pp. 43-52.
- 一柳錦平・加藤喜久雄(1998): ^{18}O をトレーサーとした流出成分の分離, 水文学会誌, **11**, pp. 260-265.
- Jones, J. A. and Swanson, F. J. (2001): Hydrologic inferences from comparisons among small basin experiments, *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 2363-2366.
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗(2004): 風化花崗岩山地源流域の渓流水 NO_3^- 濃度形成に対する水文過程のコントロール, 日林誌, **86**, pp. 27-36.
- Katsuyama, M., and Ohte, N. (2002): Determining the sources of stormflow from the fluorescence properties of dissolved organic carbon in forested headwater catchment, *J. Hydrol.*, **268**, pp. 192-202.
- Kirchner, J. (2003): A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. *Hydrol. Process.*, **17**, pp. 871-874.
- Kirchner, J. W., Hooper, R. P., Kendall, C., Neal, C. and Leavesley, G. (1996): Testing and validating environmental models, *Sci. Total. Environ.*, **183**, pp. 33-47.
- Kirkby, M.J. (1978): Hillslope Hydrology, 389 pp. Wiley, Chichester.
- 北原 暉(1996): パイプ流と大孔隙に関する研究史, 水利科学, **227**, pp. 80-114.
- 小葉竹重機(1979): 河川流域における洪水の形成過程に関する研究, 京都大学学位論文, 131pp.
- 小山 敢・奥村武信(2002): 1降雨に対して2回の流量増加があるパイプ流の流出機構, 地形, **23**, pp. 561-584.
- 窪田順平・福嶋義宏・鈴木雅一(1988): 山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(水収支及び地下水発生域の検討), 日林誌, **70**, pp. 381-389.
- McDonnell, J. J. (2003): Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response, *Hydrol. Process.*, **17**, pp. 1869-1875.
- McDonnell, J. J. (1990): A rationale for old water discharge through macropores in a steep humid catchment, *Water Resour. Res.*, **26**, pp. 2821-2832.
- McDonnell, J.J., Freer, J., Hooper, R., Kendall, C., Burns D. Beven, K. and Peters, J. (1996): New method developed for studying flow on hillslopes. *EOS, Trans. AGU.*, **77**, pp. 465-472.
- McGlynn, B. and McDonnell, J. J. (2003): Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water Resour. Res.*, **39**, doi:10.1029/2002WR001525.
- McGlynn, B. L., McDonnell, J. J., Shanley, J. B. and Kendall, C. (1999): Riparian zone flowpath dynamics during snowmelt in a small headwater catchment, *J. Hydrol.*, **222**, pp. 75-92.
- 宮田秀介・内田太郎・浅野友子・安藤宏幸・水山高久(2003): 花崗岩山地一次谷流域の流出現象に及ぼす岩盤地下水の影響, 砂防学会誌, **56**, pp. 13-19.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994): A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resour. Res.*, **30**, pp. 1153-1171.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T. and Loague, K. (1997): Hydrologic Response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, *Water Resour. Res.*, **33**, pp. 91-109.
- Moore, I. D., O' Loughlin E. M., Burch G. J. (1988):

- A contour based topographic model and its hydrological and ecological applications, *Earth Surf. Processes Landforms*, **13**, pp. 305-320.
- Moore, R. D. and Thompson, J. C. (1996): Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept?, *Water Resour. Res.*, **32**, pp. 663-669.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle R. C. and Hosoda, I., (1999): Morphological characteristics of macropores and distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**, pp. 1413-1423.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R. C. and Hosoda, I. (2001): Subsurface runoff characteristics from a forest hillslope soil profile including macropores, Hitachi Ohta, Japan. *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 2131-2149.
- 西口幸希・内田太郎・水山高久・小杉賢一郎 (2005): 山地源頭部における土壌間隙水圧の空間分布の観測, 砂防学会誌, **57**, pp. 53-58.
- 岡本芳美(1972): 山腹における降雨の滲透と流下について, 水理講演会論文集, **16**, pp. 121-126.
- 岡本芳美(1973): 山腹における降雨の滲透と流下について(続報), 水理講演会論文集, **17**, pp. 73-78.
- 小川 滋(1977): 山地小流域における出水解析の基礎的研究, 九大演報, **50**, pp. 1-68.
- Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M. and Fujihara, I. (2001): The role of subsurface runoff through bedrock on storm flow generation, *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 1693-1706.
- 小野寺真一(1990): 丘陵地斜面における地中水の流出プロセスとその水文地形特性について, 地形, **11**, pp. 369-385.
- 小野寺真一・長濱則夫・藤崎知恵子(2001): 瀬戸内海花崗岩山地流域における降雨流出過程 - 電気探査及びトレーサー法による検討 -, 日本水文学会誌, **31**, pp. 73-82.
- 太田岳史(1983): 一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討(初期水分条件と直接流出特性), 日林誌, **65**, pp. 448-457.
- Pearce, A. J. (1990): Streamflow generation processes: An austral view, *Water Resour. Res.*, **26**, pp. 3037-3047.
- Peters, D. L., Buttle J.M., Taylor, C. H. and LaZerte, B.D. (1995): Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin, *Water Resour. Res.*, **31**, pp. 1291-1304.
- Phillips, J. D. (2003): Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems, *Progress in Physical Geography*. **27**: pp.1-23.
- 佐山敬洋・寶 馨(2003): 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**, pp. 1-9.
- Scanlon, T.M., Raffensperger, J.P., Hornberger, G.M. and Clapp, R.B. (2000): Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modeling using a modified TOPMODEL, *Water Resour. Res.*, **36**, pp. 2575-2685.
- Seibert, J., Bishop, K. Rodhe, A. and McDonnell, J. J. (2003): Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady-state hypothesis, *Water Resour. Res.*, **39**, 1014, doi: 10.1029/2002WR001404.
- Seibert, J. and McDonnell, J. J. (2002): On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multi-criteria model calibration, *Water Resour. Res.*, **38**, 1241, doi: 10.1029/2001WR000978.
- Seibert, J., Uhlenbrook, S., Leibundgut, Ch. and Halldin, S. (2000): Multiscale calibration and validation of a conceptual rainfall-runoff model, *Physics and Chemistry of the Earth* **25**, pp. 59-64.
- Sidle R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Simizu, T. (1995): Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, *J. Hydrol.*, **168**, pp. 227-250.
- Sivapalan, S. (2003): Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: Is there a connection?, *Hydrol. Process.*, **17**, pp. 1037-1042.
- Sklash, M. G. and Farvolden, R. N. (1979): The role of groundwater in storm runoff, *J. Hydrol.*, **43**, pp. 45-65.
- 高棹琢馬(1963): 出水現象の生起場とその変化過程, 京都大学防災研究所年報, **6**, pp. 166-180.
- Tanaka, H., Fukushima, Y., Li, C. H., Kubota, J., Ohta, T., Suzuki, M. and Kosugi, K. (1998): Water Discharge Property of Evergreen Broad-leaved Forest River Basin - Jiulianshan, Jianxi Province, China, 水文学会誌, **11**, pp. 121-133.
- 田中 正・安原正也・丸井敦尚(1984): 多摩丘陵源流域における流出機構, 地理評, **57**, pp. 1-19.
- Tanaka, T., Yasuhara, M., Sakai, H. and Marui, A. (1988): The Hachioji experimental basin study -

- storm runoff processes and the mechanism of its generation, *J. Hydrol.*, **102**, pp. 139-164.
- Tani, M. (1997): Runoff generation processes estimated from hydrological observation on a steep forested hillslope with a thin soil layer, *J. Hydrol.*, **200**, pp. 84-109.
- 寺嶋智己・諸戸清一(1994): 花崗岩山地小流域における水流発生機構, 地形, **11**, pp. 75-96.
- Tromp van Meerveld, I. and McDonnell, J.J. (2005): Measured non-linearities in subsurface flow: A 147 storm analysis of the Panola hillslope trench, *Water Resour. Res.*, in review.
- 塚本良則(1961): 中間流についての一実験, 日林誌, **43**, pp. 62-67.
- Tsukamoto Y. (1963): Storm Discharge from an Experimental Watershed, 日林誌, **45**, pp. 186-190.
- 辻村真貴・田中 正(1996): 環境同位体を用いた降雨流出の研究, 『水文地形学』(恩田裕一ら編), pp. 79-88, 古今書院.
- 内田太郎(2004): 近年における山地の土砂移動現象に関わる斜面水文プロセス研究の進歩, 砂防学会誌, **57**, pp. 58-64.
- Uchida T., Asano, Y., Mizuyama, T. and McDonnell, J. J. (2004): The role of upslope soil pore water pressure on lateral subsurface stormflow dynamics, *Water Resour. Res.*, **40**, W12401, doi: 10.1029/2003 WR002139.
- Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N. and Mizuyama, T. (2003a) Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resour. Res.*, **39**, 1018, doi: 10.1029/2002 WR001298.
- Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N. and Mizuyama, T. (2003b): Analysis of flowpath dynamics in a steep unchanneled hollow in the Tanakami Mountains of Japan. *Hydrol. Process.*, **17**, pp. 417-430.
- Uchida, T., Kosugi, K. and Mizuyama, T. (1999): Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed, *J. Hydrol.*, **222**, pp. 18-36.
- Uchida, T., Kosugi, K. and Mizumaya, T. (2001): Effects of pipeflow on hydrological processes and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catchments, *Hydrol. Process.*, **15**, pp. 2151-2174.
- Uchida, T., Kosugi, K. and Mizuyama, T. (2002): Effect of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, central Japan, *Water Resour. Res.*, **38**, 10.1029/2001WR000261.
- Uhlenbrook S., Roser S. and Tilch N. (2004): Hydrological process representation at the meso-scale: the potential of a distributed, conceptual catchment model, *J. Hydrol.*, **291**, pp. 278-296.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C. and Rodhe, A. (1999): Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems to identify model parameters and structure, *Hydrol. Sci. J.*, **44**, pp. 779-798.
- Weiler, M. and McDonnell, J.J. (2004): Virtual experiments: A new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology, *J. Hydrol.*, **285**, pp. 3-18.
- Western, A. W., Blöschl, G. and Grayson, R. B. (1998): Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra Catchment. *J. Hydrol.*, **205**, pp. 20-37.
- Weyman, D. R. (1973): Measurements of the downslope flow of water in a soil, *J. Hydrol.*, **20**, pp. 267-288.
- Whipkey, R. Z. (1965): Subsurface stormflow from forested slopes, *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* **10**, pp. 74-85.
- Wigmosta, M. S., Vail, L. W. and Lettenmaier, D.P. (1994): A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain, *Water Resour. Res.*, **30**, pp. 1665-1680.
- Wilson C. J. and Dietrich W. E. (1987): The contribution of bedrock groundwater flow to storm runoff and high pore pressure development in hollows, IAHS Publication **165**, pp. 49-59.

(受付 : 2004年10月28日 , 受理 : 2005年 2月22日)