

タンク・モデル

——積雪・融雪モデルを伴った——

菅原 正巳*・渡辺 一郎**・尾崎 睿子***・勝山 ヨシ子***

国立防災科学技術センター

この報告の第1部と第2部は、第2部の第7章を除き、WMOによる「融雪流出の概念モデルの相互比較」の結果を取りまとめるため、1983年9月にスウェーデンのノールシェピングで開かれた会議に提出するために作られた。しかし、これを書き進めるうちに、この報告に多くの付録をつけ加えて、タンク・モデルの教科書またはハンド・ブックともいべきものを作る気になった。1974年にWMOが行った「水文学における概念モデルの相互比較」においてよい成績を示して以来、タンク・モデルは世界的に知られるようになり、その後海外の河川への適用例も増し、またタンク・モデルの流出・浸透の係数を探し求める自動化プログラム(付録6,7)の開発に成功した。さらには、流出・浸透の係数以外の係数についても、自動的または半自動的手法(付録8~11)が開発された。これらの自動的手法はアメリカのモデルについて行われている自動最適化法(山登り法)と根本的に異なり、はるかに効率的で、手法を構成する操作自体が水文学的意味を持っている。現時点で、これらをまとめて記述した英文報告を作ることに、意義があると信じる。この報告をタンク・モデルの教科書またはハンド・ブックとして利用する際は、付録がむしろ主要部分であるが、第1部は概観を得るために、第2部はある手法を習得するために必要な実例を与えるために有用であろう。

タンク・モデルは形式的には、流域一括モデル(lumped model)、アナログ的モデルと分類され、それは流域分割モデル(distributive model)よりも物理学的、水文学的意味に乏しい、一種のブラック・ボックス・モデルであると多くの人から考えられているようである。行政的、形式的にある種の分類をされるのは致し方ないとしても、流域を細分するほど高級なモデルであると考えるのは誤りであろう。細部描写したものより、細部を省略したデッサンの方が、はるかに力強く真実に迫っている例は珍らしくない。タンク・モデルが世に出てから、すでに1/4世紀をこえているが、いまだかつてこれがブラック・ボックスであると思ったことは無かった。単なるブラック・ボックスが、洪水から低水までを通じて、これほどよい結果を与え得るだろうか。タンク・モデルは単に実測流量によく合う計算値を

*元所長、**第4研究部、***第4研究部計測研究室

与えるものではない、実測値に誤りがあるときは、どうしてもそれに合わせられないのである。合わせる努力が成功しなくて、やがてそれが資料の誤りであることが分るという経験を何度か経て、タンク・モデルは資料の検討に有効であるという特質を示した。これはタンク・モデルが曲線あてはめの手法ではないことを示している。何年かの資料、ときにはわずか2年の資料から定めたタンク・モデルが、係数をそのまま据え置いて、その後何年もの間よい推定値を与える。このようなモデルが単なるブラック・ボックスであるはずがないと、かたく信じては来たが、かかる主観的意見の発表を差し控えて来たのは、タンク・モデルに対する実証的裏づけに欠けていたからである。幸いにして、それが最近になって得られたのである。地殻傾斜計が雨から受ける影響は、タンク・モデルによってよく説明できる（付録 1.3.3）、それは地殻が一種のバネ秤りとして、地下水貯留量を計量しているということで、地下水がタンク・モデルが示すような状態で現実に存在することを示している。またイギリスのケム川の試験流域で、基底流量の季節的変化が、地下水貯留量の季節的変化に対し、位相の進みを示す事実は、基底流量を2段のタンクで記述して来たのが正当であったことを示すものと考えられる（付録 1.3.4）。

長い間、タンク・モデルはブラック・ボックスではない、それは物理学的、水文学的な接近であると信じながらも、それを主張しなかったもう一つの理由は、多くの水文学的観測や実験と、タンク・モデルとがうまく対応しなかったからである。それはなぜであろうか。

地表には河川が流れ、表流水の移動はほとんどすべて河川によって行われる。われわれには眼があって、地表を観察できるから、河川を眺めることによって、地表水の移動の実態を知ることができる。しかし、もしわれわれが地表を観察することができず、地表に何個かの標本点を取り、または小さな標本面積をとって、実験、観察を行うとすれば、河川の表面積が流域全面積に対して占める比率はきわめて小さいから、かなり多くの標本点をとろうとも、それが河川に当たることはきわめてまれであろうし、また取り出した標本面積が河川を含むこともまれであろう。つまりこの方法により表流水移動の真相に迫ることは不可能に近いのである。不幸にして、われわれは地下の様子を眺めることができない。しかし、地中における水の移動は、地表水が河川によって移動するのと似ていて、何かの水路（みずみち）によるものであらうと、われわれは想像する。地中における水の移動は、帯水層、断層、破碎帯等の、一種の不連続構造によって定まるものであらう。それは、標本点や試験流域では捕えにくいものではないだらうか。

そのうえさらに、次の難問がある。いまある水路（みずみち）があるとして、それを多くの点で調査して、各点で水をよく通すと分ったとしても、未調査のどこか一点でそれがつまっていれば、水路（みずみち）は全体として水を通さないのである。また、ある不透水層を多くの点で調査して、どの点でも水を通さないことが確認されたとしても、未調査のどこか一点に孔があいていれば、その層は水を通すのである。かかる現象に対しては、多数標本に

よる調査とか、測定値の平均値とかはあまり役に立たず、全体としての応答が大切なのである。

水文学に現れる諸量は、ほとんどすべて点観測値、または微小面積における観測値である。その中で、河川流量のみが、観測は点で（やかましくいえば河川横断面で）行われるとはいえず、流域全体についての一種の積分量である。この唯一の実測積分量をたよりに、流域全体の応答の様相を、入出力解析によって追求していくのが、タンク・モデルによる流出解析の意義であって、タンク・モデルはそれに用いられる一種の作業モデルである。流出解析の効用として、流量予報があげられることが多いが、これは一種の看板にすぎない。定量的降水量予報の信頼性の低さを思えば、それに頼らざるを得ない流量予報の信頼性の向上は不可能に近い。流出解析の最大の目標は、流域の応答の構造の追求にあると信じる。

さて、地中の水の移動が前述の性格を持つ以上、流域全体としての応答を追求することが大切で、つまり流域一括モデルこそが、きわめて正当な接近方法であろう。事実、タンク・モデルは流域を細分した他のモデル（その中にはタンク・モデルの改良を目的として、流域をメッシュに割ったものもある）よりも、よい結果を示すことが多いようである。これは偶然というよりも、当然の結果というべきである。もちろん、われわれはつねに流域一括モデルを用いる訳ではない。流域がいくつかの気候特性の異なる部分流域から成るときは、流域を分割するし、流域の一部分のみが火山灰に覆れているときは、火山灰地域とその他地域とに分割する。また雪のモデルでは、数個の地帯に分割している。その意味で、われわれのモデルが単なる一括モデルと分類されるのは、やや当を得ないように思われる。

河川流出解析にコレログラム、フーリエ変換が用いられるようになってから久しいし、近時この方法があまり効果をあげないことから、カルマン・フィルタを利用しようという意向も現れている。これらの手法は、振動系に対しては大きな効果をあげるが、河川流量のような減衰系に対しては、あまり効果がないように思われる。 $e^{-\lambda t}$ と $e^{(-\lambda+i\omega)t}$ とは、一見よく似ているけれども、根本的な相異は、減衰系 $e^{-\lambda t}$ には位相がないことである。位相が欠けているから、干渉、共鳴が起こらず、したがってこれを利用して各周波数成分を分離することができない。数学的手法であるフーリエ変換が案出されるよりはるかに前から、光はプリズムによってスペクトルに分解されていた。回析格子、共鳴器、フィルタ回路等は、フーリエ変換に対応する物理的手段である。一方、指数関数的に減衰する諸成分から成る系に対しては、それを各成分に分解する効果的な物理学的手法は見当たらないように思われる。物理的手法と、数学的手法とが平行するはずだという保証はないが、一方が存在すれば、他方をそれから導くことは、多分容易であろう。

さて、われわれが作ったタンク・モデルの自動化プログラムは、2種類の評価式 RQ, RD によるフィードバック方式で、それは流量をそれぞれの固有半減期を持ついくつかの成分に分解する手法である。この方式はタンク・モデルの自動化方式として開発されたものであるが、この考え方が減衰成分から成る系に対する一般的手法として、あるいは有効ではないか

と、ひそかに期待している。

昭和39年に国立防災科学技術センターが発足した当初、「プロセス・モデルの研究」という課題があって、第2研究部（現第4研究部）がそれを担当した。それは実質的には、タンク・モデルと計算機とによる河川流出の研究であった。われわれは現在もこの研究を続け、さらに成果をあげ、手法を客観化、一般化したいと考えているが、当センター発足以来20年を経て、一応このような英文報告をまとめることができたのは、大きな幸せである（菅原正巳記）。

（1984年9月28日 原稿受理）