

昭和55年度秋季大会シンポジウム「豪雨について」の報告（続）*

4. 洪水流出の予知に関する一考察

高 棹 琢 馬**

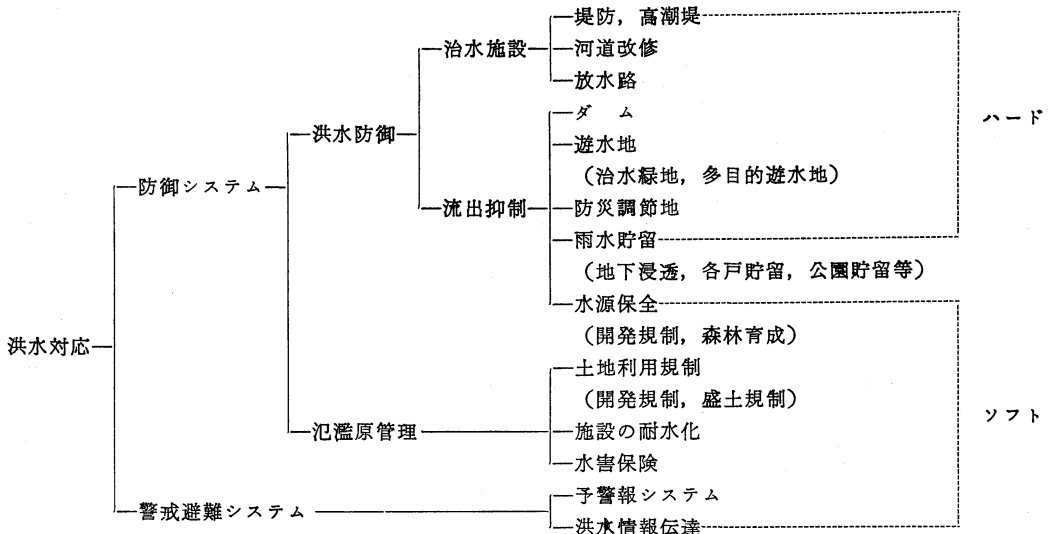
1. 豪雨災害と予知

近年の経済・社会的変貌は都市部に著しい人口・資産の集中をもたらした点に最大の特徴があり、かつそれに伴う流域の自然的変質は、保水・遊水機能を劣化させ、都市河川を中心とした中小規模河川の整備の遅れと相伴って、こうした流域での被災能を激増させてきた。すなわち、河川の洪水流出の先鋭化とそれに伴う低平地での中小河川の氾濫、内水の湛水による被害、さらには高位部での斜面崩壊・土石流などによる土砂災害といった都市型複合的水害の激増は、いずれも上述の社会的・自然的条件の変貌に起因するものである。こうした傾向は、大都市周辺のスプロールの都市化にもとづくものであるが、さらにはいわゆる定住圏構想による中小都市の整備にあたって地域・都市計画の中心的課題として十分考慮しておく必要がある。

これらの水災害の主入力は豪雨であるが、その対応策としては、単に河川の治水機能の増強だけでは限界があり、流域全体の広汎な内容をもった面的治水機能の強化に力点をおいて治水安全度を高めるべく、総合治水対策が治水政策の最重点課題となっている。その内容についての詳細な説明をする余裕はないが、第1表をみれば大要は理解できよう。

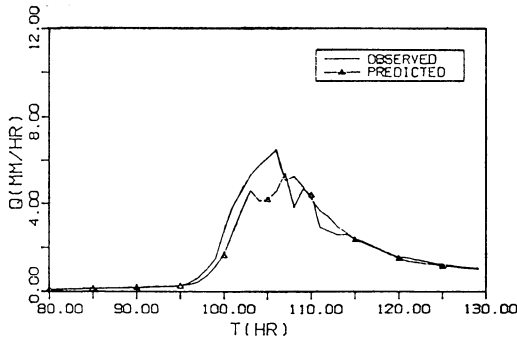
豪雨災害の予知には防災対策と関連して2つの型が考えられる。1つは計画予知であって、これは防災施設群の機能、配置、規模決定、優先順位といったハードな対策の基本となるものであって、超過確率あるいはリターンピリオドを基礎概念とする計画降雨の設定とそれに対応する各種水文量（洪水流出、氾濫水の分布、斜面崩壊・土石流など）の推定がその内容である。この問題については従来から多くの研究がなされているが、豪雨の

第1表 総合的治水対策システム。

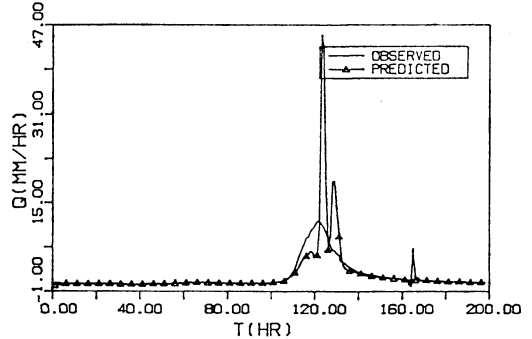


* 3月号よりの続編。

** Takuma Takasao, 京都大学工学部。



第1図 GMDH による1時間先流出予測例(神流川流域).



第2図 GMDH による1時間先流出予測例(神流川流域).

空間的、時間的分布パターンについての定量的分析がなお不十分である。

いまひとつの型は逐次予知であって、これは時刻 t までの気象・水文情報から $t+\alpha$ ($\alpha>0$) の各種水流量の予測を内容とするものであって、防災施設の操作あるいは避難、水防活動といったソフトな防災対策に不可欠の課題であるが、今日までほとんどみるべき成果はない。一方、気象衛星、AMeDAS、雨量・水位計のテレメータ化、雨量レーダで代表される観測システムの整備の進展には著しいものがあり、各種水流量の実況把握の On-line 即時化は今後より一層強化されるであろう。こうした背景を考え、ダム貯水池群への流入流量の予測、氾濫外水位と氾濫ゾーンの推定、堤外地各種水工施設たとえば排水機場の稼働準備、斜面崩壊・土石流発生 の予測、危険時の通信・避難・水防体制整備などの防災・減災対策において、実況把握にもとづいた逐次予測手法の開発を計ることは実際的かつ緊急の課題であり、以下では洪水流出を対象としてその研究動向を概括してみよう。

2. 洪水流出の予知

洪水流出の予知といってもその内容は様々であるが、すでに述べたように大略2つに分けられる。1つは計画予知につながるものであって、集中豪雨などの豪雨現象が急迫しているわけではなく、将来の可能性を考えて、想定された豪雨入力(たとえば計画降雨)に対する洪水流出量を求めるという内容のものであって、流域場条件の変化による洪水流出形態の変化予測もこの中に含まれる。この場合、洪水流出の予知作業は洪水流出現象の時々刻々の進行とは無関係になされるので Off-line の予知といってよい。これに対して、もう1つの予知は、豪雨とそれによる洪水流出現象が現に進行しているときに

なされるもので、豪雨・洪水流出現象の時々刻々の観測情報を生かしながら、短時間先の予知・予測をしていく On-line の予知である。

いずれの場合も、各現象の特有の性質を持ったモデル、すなわち Causal なモデルが必要であり、特に、On-line 予知は確率的なものにならざるを得ないが、その確度あるいは精度が予知時間と関連して量的に定められることが必要である。

2.1. 洪水流出の Off-line 予知

予知しようとする現象が何であれ、まずその現象を理解し、その動的推移の法則性を理解することが必要である。現象の法則性を数式化したものがモデルであるが、洪水流出現象は極めて複雑であって、多様なモデルが提案されているが、未だ十分とはいえず、洪水流出現象に関する研究は現在も盛んに行われている。したがって、本節では、特定の流出モデルをとりあげてそれによる Off-line 予知を議論するのではなく、Off-line 予知の原則について述べることにする。

洪水流出モデルは、一般に次の形をしている。

$$\{Q\} = f(\{R\}, H_0, A)$$

ここに、 $\{R\}$ は豪雨入力、 H_0 は豪雨開始時の流域の保湿度状態すなわち初期条件、 A は流域場の条件、 $\{Q\}$ は問題とする地点の洪水流出である。 $f(\cdot)$ は洪水流出モデルを表現している汎関数である。洪水の Off-line 予知とは、 $\{R\}$ (と H_0) についてある想定をして $\{Q\}$ を算定することであるといつてよい。 $\{R\}$ (と H_0) をどのようにとるかは、それらの確率・統計的特性と予知主体のリスクに対する考え方にもよるが、一般には既往の豪雨資料の統計的解析を基にして、ある超過確率あるいはリターンピリオドによって設定される。概して、これは対象とした流域ではあまり経験されたことのない規模の

ものであって、このことは、洪水の Off-line 予知の『外挿性』を示すものである。

現実の洪水流出の予知の際には、流出モデルを選択しなければならない。前述したように、洪水流出モデルについては未だ研究途上にあり、様々のモデルのうちどれを選択するかは難しい。ただ、洪水の Off-line 予知の外挿性を考慮すると、Black box モデルより洪水流出現象の物理的理解、すなわち雨水流の挙動に関する水理式を基礎にした流出モデル（雨水流モデル、たとえば Kinematic wave モデル）を用いるのが適切であろう。

洪水の Off-line 予知の『外挿性』に対する配慮の必要性を例示しよう。第1図、第2図は神流川流域での GMDH による1時間先流量の予測計算例である。ここでは、過去の降雨・流量系列は既知としているので、Off-line 予知より精度はよいはずである。なお、GMDH モデルは過去の入出力系列のみからその変換規則を求めるもので Black box モデルの1つである。ここで用いた GMDH モデルのパラメータは、ピーク時の流出高が 6 mm/hr 前後の2出水の資料を用いて同定した。第1図に示す出水では予測が比較的良好であるのに対し、第2図に示す出水では、予測は使いものにならない。これは、GMDH モデルが把えた入出力関係がこの場合 6 mm/hr 程度の出水のそれであって、それを上回る大きな出水に対しては適用できない。すなわち外挿できないことを示している。GMDH モデルの場合、このような外挿の失敗からは何らの法則性も生みださないが、雨水流モデルの場合は、それは流出構造の転移として理論的、実験的に検討され、流出モデルの中に組み込んでいくことが可能である。

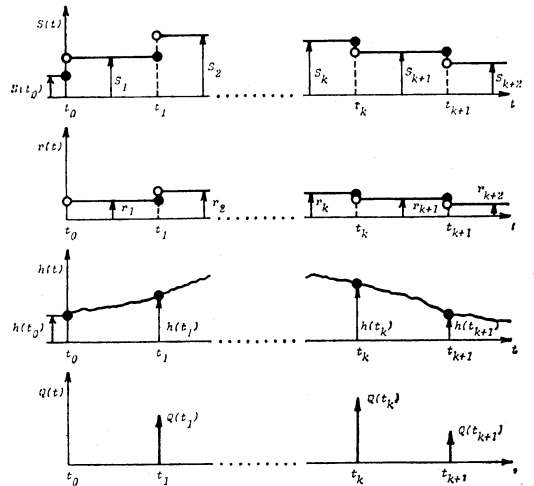
洪水流出の Off-line 予知において、雨水流の挙動に関する水理式を基礎にした流出モデルを用いるのが適当

であることは、流域場の変化を考慮する場合、さらに明確となる。流域の都市化などがその典型であって、都市化による場の条件Aの変化が問題になるが、入出力関係だけから場の条件——この場合、パラメータA——を定めるような Black box モデルでは流出形態の変化を量的にはまったく予測しえないのである。

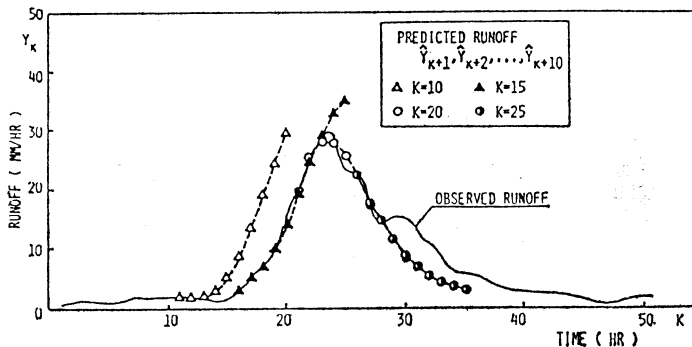
以上のことは、洪水流出現象が本質的に時間可変で非線形形であることを意味しており、その特性をモデルに明確に組み込むためには、Physically based アプローチ以外にないことを示している。この点についてはなお述べる必要があるが割愛する。

2.2. 洪水流出の On-line 予知

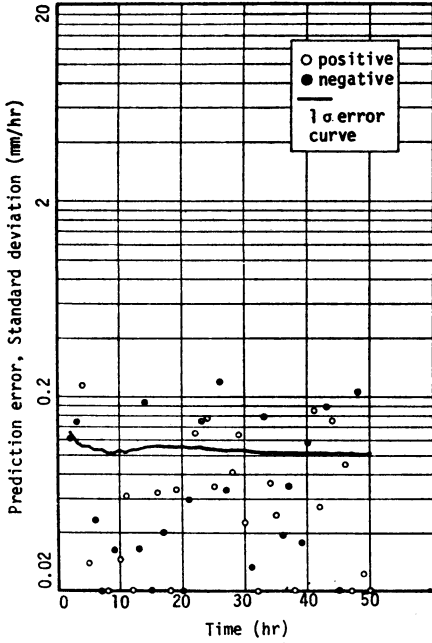
洪水流出の逐次予知または On-line 予知は、洪水流



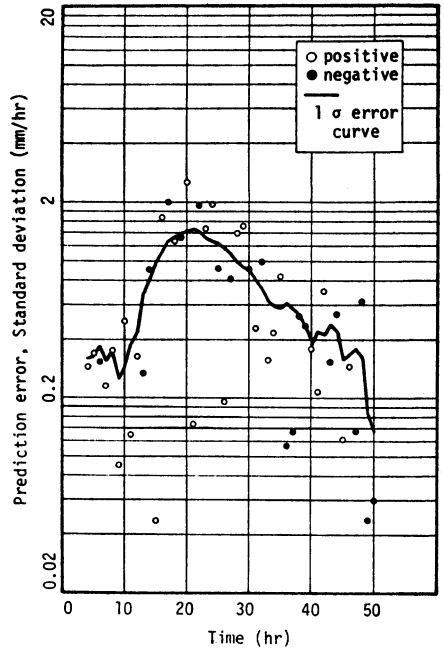
第3図 気象・流出システムの状態ベクトルの推移と観測。



第4図 観測流量と10時間先までの予測流量。



第5図 1時間先の予測誤差とその標準偏差。



第6図 3時間先の予測誤差とその標準偏差。

出現象が現に進行している場合に行なわれるもので、現象に関する観測情報が現象の進行につれて入手されていく点が Off-line 予知と根本的に相違するところである。ただ、降雨情報しか入手し得ない場合には、Off-line 予知と本質的に異なるものではない。重要なのは、流量情報が入手される場合である。洪水流出の予知は、降雨予知と洪水流出モデルによって行なわれるが、一般には予知流量と観測流量とは異なる。この差は、現象が stochastic であること、すなわちモデルの不完全さと、降雨・流量観測の誤差に起因する。

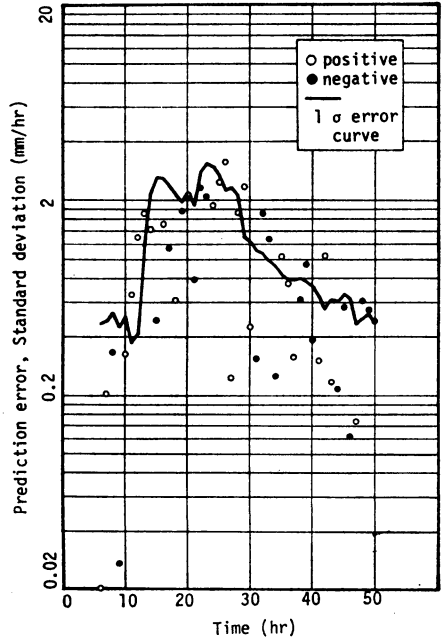
以下では、状態量・出力の予測値だけでなく、その予測誤差の共分散行列をも逐次的に求めていく方法、すなわち、気象システムと流出システムのモデルと予測手法を結合して状態空間法による Kalman のフィルタリング・予測理論の適用に関する筆者らの検討の概要を報告しよう。このような研究は、緒に就いたばかりであって、こうした方向について御批判をおおぎたい。

まず、流出システムについて、次のようなモデルをおくことができる。

$$\text{状態方程式: } dh(t)/dt = f(t, h(t), r(t)) + v(t), t \geq 0$$

$$\text{観測方程式: } Q(t_{k+1}) = g(t_{k+1}, h(t_{k+1})) + w_{k+1},$$

$$k = 0, 1, \dots, t_0 < t_1 < \dots$$



第7図 5時間先の予測誤差とその標準偏差。

ただし、 $h(t)$ は時刻 t での流出システムの有限次状態ベクトル、 $r(t)$ は時刻 t の降雨強度、 $Q(t_{k+1})$ は時刻

t_{k+1} での流出流量, $\{v(t), t \geq t_0\}$ は $h(t_0)$ とは独立で

$$E[v(t)] = 0, \text{Var}[v(t)dt] = V(t)dt$$

である白色正規確率過程, $\{w_{k+1}, k \geq 0\}$ は, $h(t_0)$, $\{v(t), t \geq 0\}$ とは独立で

$$E[w_{k+1}] = 0, \text{Var}[w_{k+1}] = W_{k+1}$$

であるスカラーの白色正規確率過程, f はベクトル値の, g はスカラー値の関数であって, それぞれ流出モデルの決定論的な部分を意味する. なお, v, w はそれぞれモデル構造と観測誤差にもとづく不確定部分であって攪乱項といわれる.

次に, 気象システムの状態空間型モデルについて考えよう. 気象システムの出力である降雨は, ある時間間隔内の強度の積分値の形で観測されることが多い. そこで, 気象システムについては離散時間で考えて,

$$\text{状態方程式: } S_{k+1} = \phi(t_k, S_k) + \alpha_k, k=0, 1, \dots$$

$$\text{観測方程式: } r(t) = r_{k+1} = \psi(t_k, S_{k+1}) + \beta_k, k=0, 1, \dots$$

と記述されるようなモデルを考えるのが実際的である. ただし, S_k は期間 $t_{k-1} < t \leq t_k$ での気象システムの有限次状態ベクトル, ϕ はベクトル値の, ψ はスカラー値の関数, $\{\alpha_k, k=0, 1, \dots\}$ は S_0 とは独立で, $\alpha_k \sim N(0, A_k)$ の白色正規確率過程, $\{\beta_k, k=0, 1, \dots\}$ は $\{\alpha_k, k=0, 1, \dots\}$ とは独立で, $\beta_k \sim N(0, B_k)$ の白色正規確率過程とする. 以後の記述を容易にするため, 時刻 t の気象システムの状態ベクトルを $S(t)$ と表わすことにする. ところで, 気象システムの状態ベクトルは, 大規模場におかれた豪雨発生の潜在的条件, たとえば, 対流活動の集中, 鉛直不安定存在, あるいは水蒸気量などの潜在的条件下で表わされるはずであり, また観測方程式は $S(t)$ 内での凝結過程によって定まるものであろう. 筆者には, こうした点の知識はほとんどないが, 豪雨というマイクロ現象を簡単な形でモデル化し, その特性を大規模場の変数で表現する方式 (パラメタリゼーション) の開発や, マクロ場とマイクロ場間の分析, 雲物理の進展によって, いずれは上記の表現が可能になることを期待したい.

さて, 以上のようなモデル構成では, 気象・流出システムの状態ベクトルの推移と観測の様子は第3図のよう

になる. トータルシステムをこのように考えると, 全体の状態ベクトル $X(t)$ は,

$$X(t) = [h(t)^T, S(t)^T]^T$$

と表わされる. そうすると, $X(t)$ の動的推移の仕方は, $t_i < t < t_{i+1}$ の間で連続的に推移する場合

$$\frac{dX(t)}{dt} = \begin{bmatrix} f(t, h(t), r(t)) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

と表わされ, t_i から t_{i+1} へ不連続に飛ぶところでは

$$X(t_{i+1}) = \begin{bmatrix} h(t_i) \\ \phi(t_i, S(t_i)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_i \end{bmatrix}$$

と表わされる, これらの式が非線形であると Kalman の理論を直接適用することはできないが, 準線形化の手法を用いれば, Kalman の離散時間線形システムに関するフィルタリング・予測理論が適用される形となる.

第4図は, 気象システムモデル (非線形) を仮想し, 流出システムモデルとして貯留関数法を用いた場合の予測計算例である. 図中, 観測流量として示しているのは, 実流域のそれではなく, 設定したシステムモデルによって発生させたものであり, これを観測流量とみなして, それぞれ10時間先までの予測計算の結果を示している. 第5図, 第6図, 第7図はそれぞれ, 1時間先, 3時間先, 5時間先の流出予測誤差と, 前もって算出されたその予測誤差の標準偏差との対応を示すもので, 前もって算出される予測の精度が実際のそれに比較的よく一致している. もちろん, この計算例では, システムの構造, パラメーターをすべて既知としている. 実流域での予測にあたっては, システム構造 (モデル構造) の推定, モデルパラメーターの推定, 攪乱項の有色性や統計的パラメーターの推定が必要であることはいうまでもない. これらの点については, あまりに多くの問題が残されているが, 今後, 気象学方面の研究者との交流をはかり, かつまた御指導をいただきたいと切に御願する次第である.

なお, 拙稿中, 気象に関する部分は, 九州大学の坂上教授, 京都大学の中島教授, 後町助教授の直接間接の御指導等によるところが多いが, 内容の間違いや誤解はすべて筆者の責任であることを明記しておく.

討 論

二宮：防災は個々の降雨に対して行なうものか、あるいはいつ雨が降っても良いように平常から備えをしておくのが防災か。

高棹：防災には計画予知とオペレーショナルフォカストの両方がある。前者では、多くの水文データを時系列的にあるいは周期分析をして、その結果から施設の規模や配置計画を考える。また後者の場合には、それぞれの土工構造物を有機的かつそれぞれ単独にも操作する必要があり、そのためにはできるだけ多くの入力情報（気象予報）が欲しい。

二宮：雨の予報が適確にできて問題が残るのではないか。たとえばダム操作で水資源の経済性と洪水に対する安全性の選択の問題などの競合性が問題にならないか。

高棹：ダム調節では、多目的ダムであるから当然経済性を考えないわけにはいかないが、入力情報が多くなるほど適切な操作が出来ることも事実である。現在ほとんどのダムでは入力情報が不十分なためそれぞれのダムによってきめられた一定量放流方式をとっているが、入力情報が増えると非正常放流を有効にすることが出来、特に複数のダム操作にはその効果が大きい。また避難や水防体制のように人命にかかわる重要な指示を出す場合には、集中豪雨のようなライフタイムの短い現象が少しでも早く予報されると、その効果がきわめて大きい。

平木（電計室）：河川関係の希望している入力情報というのは、どの程度のタイムスケールのものをもっとも望んでいるか、気象予報を出す側にとってはタイムスケールによって方法が異なるのでそこを聞きたい。

高棹：現在の中小河川の計画基準値は 50 mm/hr、確率年でいえば 5～10 年程度を考えて土工施設を計画している。気象予報の難かしいことはわかっているが、入力情報が多いほどありがたい。たとえばレクリエーション広場や市民広場を多目的遊水池として計画する場合に、豪雨予報がその施設の安全性の決め手となる。

平木：計画段階でなく実際に災害が予想される場合に、高棹先生はどのようなタイムスケールのものとして集中豪雨の予報を希望されるか。

高棹：集中豪雨がマスコミのつくった言葉であることや、それが数時間程度以内のライフタイムを持つものであることは知っているが、現在気象台の出す暴風雨警報

や洪水警報は京都南部というような広範囲に出されるので、もう少し地域的にもきめの細かいものを出して頂けると幸いである。

中島：司会者の方から高棹先生の代弁をすると、たとえば現在の注意報、警報では平地で何 mm、山地で何 mm といった莫然とした表現でなされているけれども、淀川などの統合管理システムへの入力としては、たとえ誤差何%確率いくらという形容詞がついても、もう少しきめの細かい数字が予報されることが望ましい。

二宮：その要望は良くわかるけれども、台風や低気圧の予想進路が変わったり、集中豪雨をもたらす不安定域の位置がずれたりすることを考えると、現在の気象学の知識ではとてもそんな細かいメッシュで予報は出来ない。

それからもう 1 つ心配になることは、予知の精度が将来向上したとすると、それに対応して計画段階でもそれに対応してより高度のオペレーションが考えられる。この場合予報精度が 100% になればよいが、より細かい情報が提供されるものとして計画が立てられるので、予報がはずれた場合の災害は、より大きくまた新しい型のものになる可能性がある。

古橋：将来、より細かいメッシュの観測が利用者から要望される場合には、気象庁として追尾する限界があるのではなからうか。したがって高度の気象資料の利用を要望するところでは、気象庁の観測網以下にそれぞれの目的にあった観測網を利用者側も協力してつくる必要がなからうか。

高橋浩一郎：雨量予報と洪水対策についてのいままでの討論を伺って、これについてのコメントを述べる。豪雨予報と洪水対策についての気象側と水利対策側との橋渡しは重要だと思う。高棹先生の要望を伺っていると、やや抽象的で気象学者にはわかりにくい面があると思う。雨量予報を洪水予報に利用する場合の 1 つの問題点は、予報期間の問題である。ごく短期間の予報であれば予報というよりは実況で良いはずであり、それならば流域に密な観測網をはってそれを迅速に集めればよい。数時間の予報ならば、たとえばレーダーエコーの補外でかなりのところまでいけると思う。どういうことを要望されるのか、具体的に聞いた上で検討する必要があるのではなからうか。

次に別の問題であるが、ふつう雨量予報というと、1

地点の雨量の予報を意味しているように思う。しかし、これでは不十分であり、その空間スケールも重要ではなからうか。これは気象予報の場合だけでなく工学における計画の場合にも重要だと思う。こういった面の気候統計は従来ほとんど行なわれていなかったが、今後必要になるのではなからうか。たとえば鉄道の水害を考える場合、線路に沿って豪雨の降る範囲を知ることが必要だが、そのような場合に空間スケールに関する認識が1つの中心になると思う。

高棹：予知・予測には精度と同時に余裕時間のことも考えねばならない。それぞれの土工施設はそれぞれの機能と規模を持っているから、いちがいにとどの程度の時間ということはいえないが、たとえば土工施設、ダム貯水池でいうと、通常のハイダムで貯水容量をみたすには大洪水時で3時間ぐらいで満杯になる。したがって、洪水調節の操作の場合には少なくとも3時間程度という1つの希望を持っている。水防とか避難体制の場合には、待機時間を考えて5～8時間ぐらいと考えられる。しかし、それぞれの目的によって多少異なってくるので、こういうことは私共も大いに考えていきたい。

二宮：今、予報という言葉が使われているが、予報というのは必ずしも人間が加工して出すデータだけをいうのではなく、社会に有効なデータを流すということが予報だと私は思う。しかし、気象関係の人というのは何か時間的な予報をしなければ予報でないと思込んでいるところがあるように思う。たとえば、細かな観測のネットワークの雨量をすみやかに社会に流す、インフォメーションを流すこと自身が、私は広い意味の予報に入っていると思う。気象屋さんはこういうことを忘れがちなのでなからうか。

中島：それではこれで今日のシンポジウムを閉じたいと思うが、特に京都大学土木教室の高棹先生をお招きして、気象学会の今までのシンポジウムとくらべてやや異色のシンポジウムとなった。今日はかなり討論が白熱して、立場の異なる人たちの互いの理解が未だ充分でないことを知ると共に、今後このような相互理解のためのシンポジウムが必要であることもわかった。どうもありがとうございました。

(文責：中島暢太郎)