

新しい流況曲線の提案に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON PROPOSAL OF A NEW FLOW DURATION CURVE

真名子武¹・手計太一²・平野文昭³
Takeshi MANAGO, Taichi TEBAKARI and Fumiaki HIRANO

¹学生会員 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

²正会員 博(工) 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

³正会員 工博 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

To understand the long term change in river flow is basic information in order to estimate water resources in region and/or watershed. One of ways to obtained above mentioned information from river flow data is the flow-duration curve. It is too difficult to grasp the condition of the watershed using the flow-duration curve because the flow-duration curve depends on rainfall.

In this paper, we propose a new flow-duration curve which does not depend on rainfall. This new flow-duration curve was estimated by runoff ratio using moving average runoff and rainfall.

As a result of new flow-duration curve, the difference among three case study watershed's flow regime can be observed clearly. A new flow-duration curve, which we proposed, could clarify the watershed conditions like land use and/or soil characteristics using only historical river flow and rainfall data.

Key Words : *flow duration curve, runoff, rainfall, runoff ratio, Uratukuba Experimental basin, Chao Phraya River basin, Mae Chaem watershed*

1. はじめに

流域や地域における水資源を評価する上で、河川の流量変動を知ることは基本的な情報である。しかしながら、河川流量データには、水が通過した大気陸面の情報(降水量や土地利用や土壌等)を含んでいる。基礎的かつ単純な河川流量データから、このような情報を得るための簡便な手法の一つとして流況曲線が挙げられる。

流況曲線は非常に簡便に作成することができ、かつ概略的にはその理解は容易である。特にダム貯水池建設などの水資源開発計画のためには極めて重要な情報源となっている¹⁾。また、河川の低水流量の頻度解析²⁾や河川流域の水文学的特徴を明らかにするために利用される³⁾など古くから研究されている。

さらに、特に我が国においては、森林流域における流出特性を把握するために流況曲線が利用されている。例えば、渇水緩和機能について山林と造成農地を比較したり⁴⁾、近年になって強く問題提起されている「緑のダム」の問題の解決のために利用されたりしている⁵⁾。

しかしながら、上述したように、河川流量データには様々なデータが内在しているため、一般的な流況曲線を使用した場合には、その取り扱いには慎重にならなけれ

ばならない。特に、降雨量の河川流量への影響は最も大きいいため、その影響を除いて流域の土地利用や土壌特性などの議論することが必須である⁶⁾。また、流域に応じた水文年の年界に着目することで適切に表現された流況曲線を得ることに成功している⁷⁾。

一方で、流況曲線の特性を明瞭に判別できるように、一般的な流況曲線を修正した昇降順対数流況曲線が提案されている⁸⁾。これは、一般的な流況曲線と同様に簡便に作成することが可能であり、かつ高水や低水部分の判別が容易にできる。

しかしながら、これまでに提案されている流況曲線はいずれも降雨量の影響を完全に除うことができず、本当に知りたい流域の状況を知るためには十分ではない。

以上を鑑み、本研究では、降雨量の影響を残さずに河川流量の変動傾向を明らかにしようと、移動平均流出率流況曲線を提案するものである。本稿では、既存の流況曲線との相違を明らかにするとともに、三つの流域を利用して移動平均流出率流況曲線の特徴を論じる。

2. 既往の流況曲線の整理

表-1 研究対象とした三流域の特徴の比較。

項目	裏筑波流出試験地	Chao Phraya川上流域	Mae Chaem流域
流域面積 (sq. km)	3.21	110569	3853
流路延長 (km)	14.8	310	158
主流路平均勾配	1/13	1/12000	1/200
土地利用	約97%が森林	約40%が耕作地, 約60%が森林. 経年的に土地利用は大きく変化している	約93%が森林
地形・地質	主に風化花崗岩	主にれき岩, 砂岩, 頁岩	主にれき岩, 砂岩, 頁岩
平均年降水量(mm)	1497	1195	985
平均年流出高(mm)	858	199	273

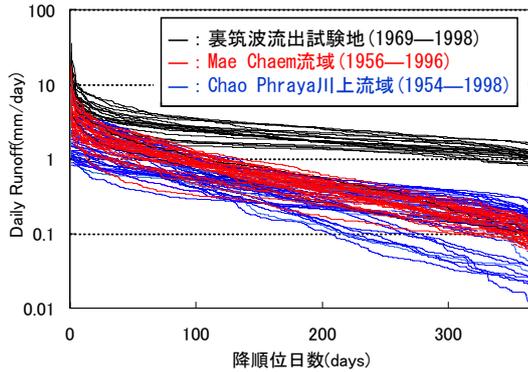


図-2 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした片対数流況曲線。

流況曲線とは流域からの流出状況や河川の流況特性を知るために、一年間にわたる毎日の日流出量（24時間の流出量）を縦軸にとり、最高値のものから順に、横軸に設けられた発生日に対してプロットして得られる曲線のことである⁵⁾。特にダム貯水池開発計画に際し利用され、近年では「緑のダム」論争にも頻出している。

通常の流況曲線では特に低水部の特徴を判別することが難しいため、上述に説明した図の縦軸を対数にすることでその判別を容易にしたものが片対数流況曲線である。これは、各年の流況曲線の相違を可視的に判別するためであり、定量的な評価ではない。

そして、前章で紹介した昇降順対数流況曲線⁸⁾は、日流量を降順に183日まで、同様に昇順に183日まで並べ、両者をつなぎ合わせて作成するものである。横軸の日数、縦軸の日流量ともに対数軸をとる。この手法は、前述の流況曲線、対数流況曲線と同様に、必要とするデータは日流量データのみであり、作成は非常に簡便である。

しかしながら、いずれも降雨量の影響が取り除かれていることはなく、これらの流況曲線からでは、詳細な流域の状況を得ることは難しいのが実情である。

3. 研究対象流域

本研究では、流域の特徴が顕著に異なると考えられる

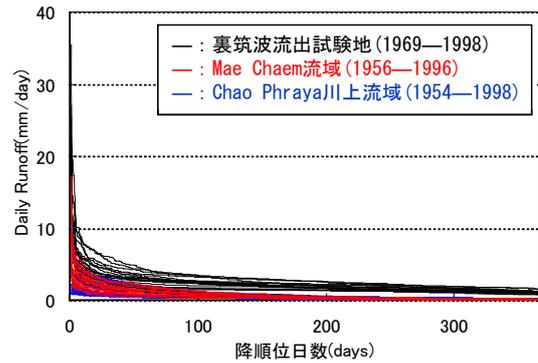


図-1 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした一般的な流況曲線。

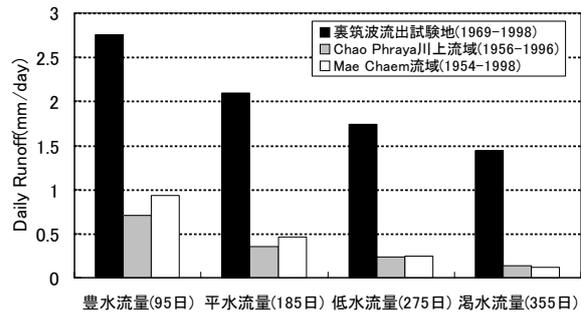


図-3 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした豊水流量, 平水流量, 低水流量, 渇水流量の平均値の比較。

下記に挙げる日本国内外に位置する三つの河川流域を対象とした(表-1参照)。

(1) 裏筑波流出試験地

裏筑波流出試験地は、(独) 土木研究所が1969年から継続的に水文観測を行っている試験流域である⁹⁾。本流出試験地は利根川水系桜川左支川山口川の最上流部、筑波山麓北側斜面に位置する。流域面積は3.12km²、流域平均勾配は等高線延長法によって25°である。流域内は国有林等による森林によって覆われた典型的な山地森林流域である。本研究では、流域の出口に位置する山口流量観測所の流量データ、祖父ヶ峰雨量観測所の雨量データを利用した。

(2) Chao Phraya川上流域

Chao Phraya川上流域はタイ国の中央部から北部に位置しており、同国面積の約30%を占める、同国最大の流域である。本研究では北部山岳地域から流れる4つの支川 (Ping川, Wang川, Yom川, Nan川) が合流するNakhon Sawan市までの流域を対象とした。流域面積は110569km²、平均年降水量は約1195mm、平均年流出高は約199mmである。また、本対象流域の大きな特徴は、上流部に1964年と1974年にそれぞれ100億m³級の大規模ダム貯水池が建設されたことである。このダム開発によって下流部の流況は大きく変化しており¹⁰⁾、本研究には理想的な流域で

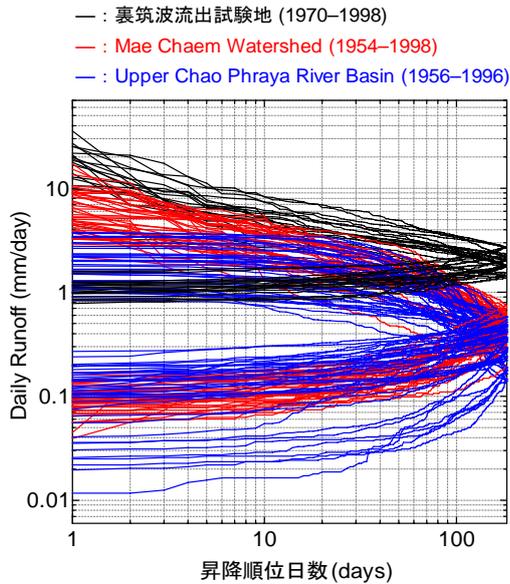


図-4 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした昇降順対数流況曲線。

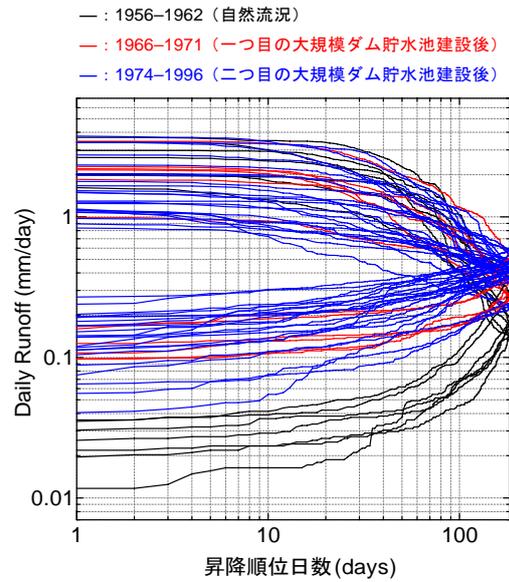


図-5 Chao Phraya川上流域を対象とした大規模ダム貯水池の建設前後期間における昇降順対数流況曲線。

あると言える。

本研究で利用する河川流量データはタイ国中央部に位置するC.2水文観測所 (Nakhon Sawan市) の日流量である。また、降水量データは流域内外に位置する143箇所の雨量観測所の日雨量データを利用してティーセン雨量を算出した。

(3) Mae Chaem流域

Mae Chaem川はタイ国の北西部に位置しており、大別すると上記に挙げたChao Phraya川流域の支川である。流域面積は3853km²、平均年降水量は約985mm、平均年流出高は約272mmである。土地利用の約93%が森林で覆われており、1980年から1990年までの10年間ではほとんどその変化がないことがわかっている。詳細な流域の情報については既出されている¹¹⁾ので割愛する。

本研究で利用する河川流量データは、対象流域の最下流に位置するP.14水文観測所の日流量である。また、降水量データは流域内外に位置する13箇所の雨量観測所の日雨量データを利用してティーセン雨量を算出した。

4. 解析結果

(1) 一般的な流況曲線

図-1は裏筑波流出試験地(1969年から1998年)、Chao Phraya川上流域(1956年から1996年)、そしてMae Chaem流域(1954年から1998年)を対象とした一般的な流況曲線図である。この図は縦軸、横軸が普通軸のため、研究対象とした三流域における各年代の差異を認めることは困難である。また、各流況曲線が重なり合っているため、各流域の年代の差異が明瞭でない。特に降順位日数が10

日以下の部分や150日以上部分ではその傾向が顕著である。しかし、裏筑波流出試験地とChao Phraya川上流域、Mae Chaem流域における流域間の差異の把握は可能である。

図-2は研究対象とした三流域(解析期間は上述と同様)の片対数流況曲線図である。この図は縦軸が対数軸になっているので、前述した図-1と比較すると、裏筑波流出試験地、Chao Phraya川上流域、そしてMae Chaem流域の流域間の全体的な流況曲線の挙動を判別することが容易となっている。それでもなお、降順位日数が10日以下の部分や150日以上部分での流況曲線の差異の判別が困難である。

図-3は研究対象とした三流域(解析期間は上述と同様)の豊水流量(95日)、平水流量(185日)、低水流量(275日)、渇水流量(355日)の平均値を比較したものである。この図から、裏筑波流出試験地とChao Phraya川上流域、Mae Chaem流域の流域間の差異は明瞭である。一方で、降雨の影響を考慮していないため、一概に流域間の特徴が得られるわけではない。特に、裏筑波流出試験地が突出している理由は研究対象とした三流域の平均年降水量が約1500mm、1200mm、900mmであり裏筑波流出試験地の平均年降水量が他の二流域のそれより大きいからである。よって、この差異は降雨に帰着すると考えられる。またMae Chaem流域はChao Phraya川上流域の支川であるため、全体的に挙動がほぼ等しい。しかし、この図-3からだけでは流域間の特徴の相異(例えば、土壌の状態や土地利用等)を認識することが困難である。

(2) 昇降順対数流況曲線

図-4は研究対象とした三流域(解析期間は上述と同様)の昇降順対数流況曲線図である。昇降順対数流況曲

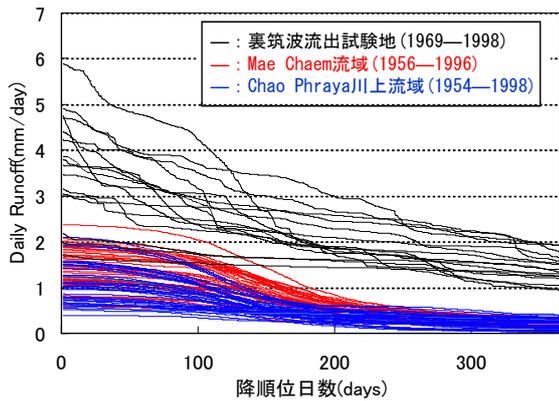


図-6 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした移動平均流況曲線。

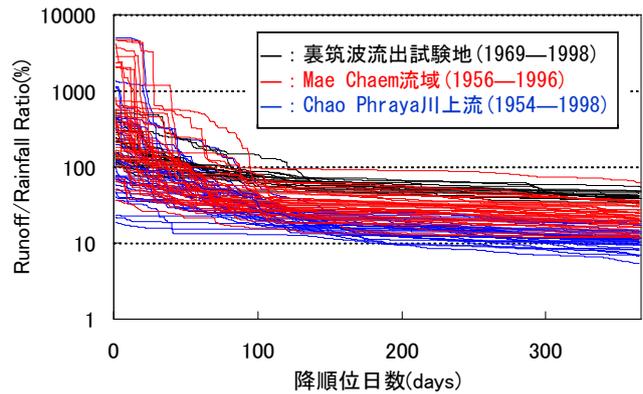


図-7 裏筑波流出試験地, Mae Chaem流域, Chao Phraya川上流域を対象とした移動平均流出率流況曲線。

線については先述の通りである。前述した図-2と比較すると各流況曲線がグラフ全体に拡大されており、特に、各流域での降順位日数が10日以下の部分や昇順位日数が10日以下の部分で流域間の差異が把握できるようになってきている。図-4より、各年の流況曲線の高水および低水部分の特性の差異が共にはっきりと見分けられるようになること、河川流況の特質を簡潔に表わすいくつかの代表流量(渇水流量など)を容易に目算することが可能である⁸⁾。表-1から分かるように、裏筑波流出試験地の平均年降水量が約1500mm、平均年流出高が約860mmであり、Chao Phraya川上流域やMae Chaem流域より大きいため全体的にグラフの上方に位置している。昇順位の10日以下の部分に着目すると、Mae Chaem流域は裏筑波流出試験地と同じような挙動を示しており、降雨への依存性が高いことが分かる。

次に示す図-5はChao Phraya川上流域での自然流況、一つ目の大規模ダム貯水池建設後(1964年に建設)そして、二つ目の大規模ダム貯水池建設後(1972年に建設)の昇降順対数流況曲線図である。前述した図-4では自然流況におけるChao Phraya川上流域での各年代の流況曲線の違いを認めることは困難である。一方で、この図を用いることで降順位日数が10日以下の部分で自然流況から大規模ダム貯水池が建設されるに伴って、低水流量が増加していることを容易に判断できる。なおかつ、河川流量だけから大規模ダム貯水池建設を推察することが可能である。

5. 移動平均流出率曲線の提案

(1) 移動平均流出率流況曲線の作成方法

これまでに提案されている流況曲線では、降雨の影響を除くことができているため、流況曲線の挙動が土地利用や土壌の影響に因るものなのか、それとも降水の影響に因るものなのかの判別が出来ない。

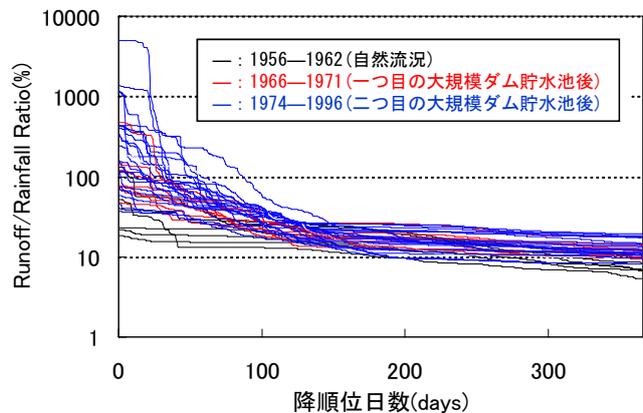


図-8 Chao Phraya川上流域を対象とした大規模ダム貯水池の建設前後期間における移動平均流出率流況曲線。

本研究では、降水量の影響を除去するために、流出率に着目した。流出量を降雨量で正規化することによって、降雨の影響を取り除くことができる。また、単純に流出率を求めるだけでは、無降雨0mmによる0割りの問題や、一降雨イベント毎の流出率しか算出できない。そこで、降雨量と流出量ともに移動平均することによって、連続的に流出率を算出し、一年間を降順位に並べて曲線を作るという、移動平均流出率流況曲線を提案する。以下に、本研究で提案する移動平均流出率流況曲線の作成方法手順を示す。

①流域における最大無降雨連続日数を検索する。本研究で対象とする裏筑波流出試験地, Chao Phraya川上流域, そしてMae Chaem流域における最大無降雨連続日数はそれぞれ70日, 144日, 115日であった。

②このままでは、0割は回避できないので、上述で求めた最大無降雨連続日数に一日を加算する。①で求めた日数に一日を加算すると、裏筑波流出試験地, Chao Phraya川上流域, そしてMae Chaem流域はそれぞれ71日, 145日, 116日となる。これが、各流域における移動平均を行う際の日数となる。

③ここまでで求めた移動平均の日数を利用して、各流域の移動平均流出高, 移動平均降水量が算出できる。こ

の値を利用して、毎年について降順位に並べ替えることで、各流域の移動平均流況曲線、移動平均雨況曲線が作成でき、さらに縦軸に対数をとることで移動平均流出率流況曲線が作成できる。

(2) 移動平均流出率流況曲線を用いた流況の把握

図-6は研究対象とした三流域（解析期間は上述と同様）の移動平均流況曲線図である。裏筑波流出試験地では、この図において各年代の流況曲線の差異が明瞭である。また、裏筑波流出試験地とChao Phraya川上流域、Mae Chaem流域における各流域の差異を判別することができる。先述した**図-1**と比較すると裏筑波流出試験地、Chao Phraya川上流域、そしてMae Chaem流域の流域間の全体的な流況曲線の挙動を判別することが容易となっている。特に、裏筑波流出試験地において、各年代での流況曲線の挙動の把握が容易である。しかし、Chao Phraya川上流域やMae Chaem流域の各流域の差異や各年代の流況曲線の差異の把握が困難である。

図-7は研究対象とした三流域（解析期間は上述と同様）の移動平均流出率流況曲線図である。この図において流出率の概念を使用しているため、移動平均流出率が100%を超える領域、100%を下回る領域をそれぞれ低水部分、高水部分と述べるができる。前述した**図-6**と比較すると、降順位日数が50日以下の部分では、裏筑波流出試験地、Chao Phraya川上流域、そしてMae Chaem流域の各年代の流況曲線の差異が低水部分で容易に把握することが可能である。また、降順位日数が150日以降の部分ではすべて高水部分となり、前述した**図-6**と比較すると各流況曲線の間隔が広がり各流域の差異を把握することが容易になっている。

Chao Phraya川上流域における自然流況、一つ目の大規模ダム貯水池建設後(1964年に建設)そして、二つ目の大規模ダム貯水池建設後(1972年に建設)の各期間における移動平均流出率流況曲線図を**図-8**に示す。この図は、Chao Phraya川上流域の自然流況、一つ目の大規模ダム貯水池建設後、そして二つ目の大規模ダム貯水池建設後の期間の流況曲線の差異を把握することを目標として作成した。昇降順対数流況曲線では一つ目の大規模ダム貯水池建設後と二つ目の大規模ダム貯水池建設後の降順位日数が10日以下の部分での各年代での流況曲線の差異は明瞭ではない。しかし、この図によって降順位日数が50日以下の部分では各年代での流況曲線の差異は明瞭でかつ、低水流量の増加が顕著であるため自然流況から大規模ダム貯水池が建設される経過を流況曲線のみで把握することが可能である。

図-9は研究対象とした三流域（解析期間は上述と同様）の移動平均流出率が100%を超える日数の比較したものである。Chao Phraya川上流域に着目すると自然流況と一つ目の大規模ダム貯水池建設後では低水流量の増加は微量だが、二つ目の大規模ダム貯水池建設後では大

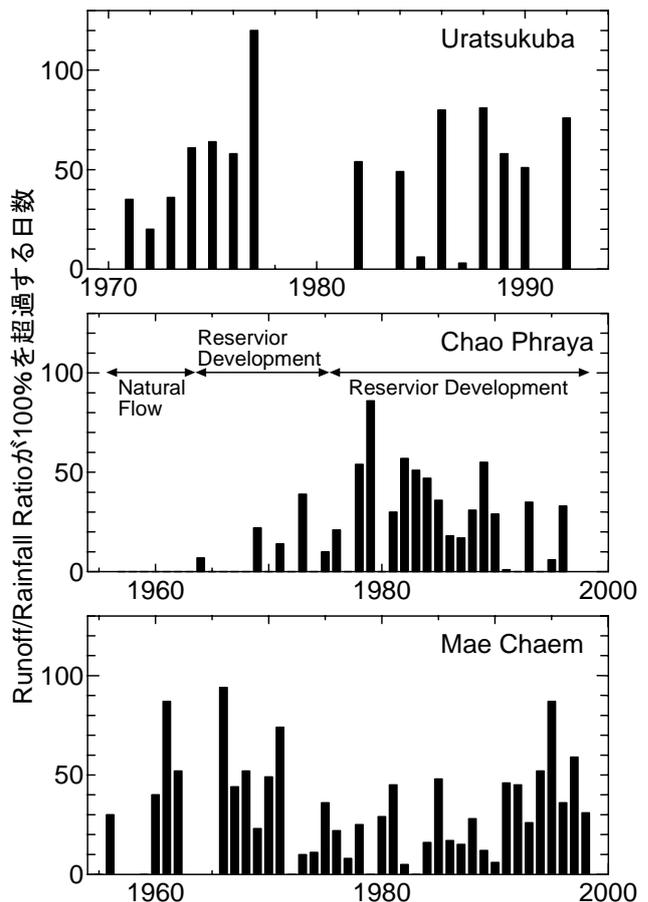


図-9 裏筑波流出試験地、Mae Chaem流域、Chao Phraya川上流域を対象とした移動平均流出率流況曲線において流出率が100%を超過する日数の経年変化。

幅に低水流量が増加していることが分かる。しかし、裏筑波流出試験地やMae Chaem流域では各年代による低水流量の差異は生じているが、それが何に起因しているかは本研究では明らかにできていない。

図-10において裏筑波流出試験地、Mae Chaem流域、Chao Phraya川上流域（解析期間は上述と同様）を対象とした移動平均流出率と移動平均流出高の関係を示している。Mae Chaem流域はChao Phraya川上流域と同じような挙動を示している。そのためMae Chaem流域はChao Phraya川上流域の支川であると判断することができる。また、裏筑波流出試験地の挙動は図の中央部で広範囲に分布していることが分かる。裏筑波流出試験地はMae Chaem流域、Chao Phraya川上流域と比較すると移動平均流出率の幅が狭いが、移動平均流出高で幅が広がっており、その差は歴然としている。この図は、降雨に依存していないために各流域の土壌の状態や土地利用等による差異だと考えられる。また、Chao Phraya川上流域に着目すると、自然流況から大規模ダム貯水池が建設されるに伴って、移動平均日流出高が徐々に大きくなっていることを把握することが可能である。さらに、二つの大規模ダム貯水池開発後には流出率が数十箇所、突出している所があり、これは二つの大規模ダム貯水池からの放

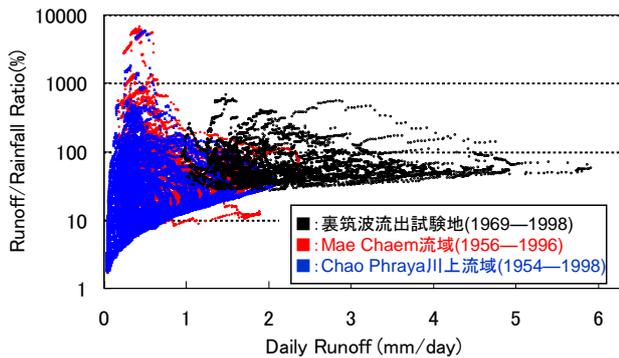


図-10 裏筑波流出試験地，Mae Chaem流域，Chao Phraya川上流域を対象とした移動平均流出率と移動平均流出高の関係。

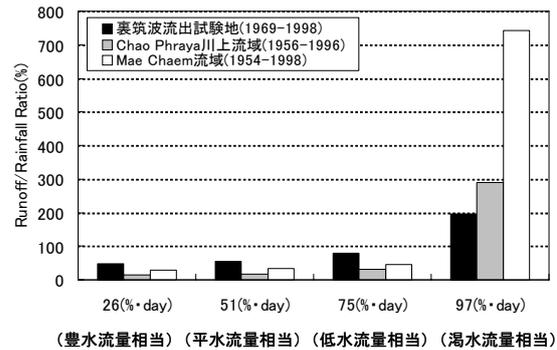


図-11 裏筑波流出試験地，Mae Chaem流域，Chao Phraya川上流域を対象としている移動平均流出率を利用して求めた26%-day，51%-day，75%-day，97%-dayの平均値と移動平均流出率の比較。

流によるものだと考えられる。

図-11は研究対象とした三流域（解析期間は上述と同様）の移動平均流出率を利用して求めた26%-day（豊水流量相当），51%-day（平水流量相当），75%-day（低水流量相当），97%-day（渇水流量相当）と移動平均流出率を比較したものである。26%-day，51%-day，75%-dayの部分で裏筑波流出試験地が他の二つの流域と比較してすべて大きいことが把握できる。さらに，この図より渇水流量部分に相当する97%-dayの各流域の差異が明瞭であり，Mae Chaem流域，Chao Phraya川上流域，裏筑波流出試験地の順で移動平均流出率が大きい。特に，Mae Chaem流域が他の二つの流域より突出しており，流量が増加していることが明瞭である。以上のことから，移動平均流出率流況曲線を用いることによって，土地利用や土壌等の流域の状態を推察することができる可能性がある。

6. まとめ

本研究の目的は，降雨量の影響を残さずに河川流量の変動傾向を明らかにするための新しい流況曲線を提案することである。降水量の影響を除去するため流出率に着目し，移動平均流況曲線，移動平均雨況曲線，移動平均流出率流況曲線を作成した。本研究で対象とした三流域は，茨城県筑波山に位置する裏筑波流出試験地，タイ国のChao Phraya川上流域，そしてこの支川であるMae Chaem流域である。

特に，Chao Phraya川上流域において河川流量，降水量データのみを用いて移動平均流出率流況曲線を描くことで，自然流況から大規模ダム貯水池が建設される経過を容易に把握することが可能であることを示した。

さらに，本研究で提案した移動平均流出率流況曲線に着目すると，移動平均流出率が100%を超える領域は低水

部分であり，降順位日数が50日以下の部分では各流域，各年代の差異が一般的な流況曲線と比べて容易に判別できるようになった。

謝辞：本研究の遂行に際し，（独）土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センターより裏筑波流出試験地の水文データの提供をしていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Dingman, L.: Synthesis of flow-duration curve for unregulated streams in New Hampshire, Water Resour. Bull., Vol.14, No.6, pp.1481-1502, 1978.
- 2) Wandle, S.W. Jr.: Low-flow frequency and flow-duration analysis of natural-flow streams in Massachusetts, J. Boston Soc. Civ. Eng. Am. Soc. Civ. Eng., Vol.69, No.1, pp.86-110, 1983.
- 3) Mimikou, M. and Kaemaki, S.: Regionalization of flow duration characteristics, J. Hydrol., Vol.82, No.1/2, pp.77-91, 1985.
- 4) 瀧本裕士・堀野治彦・渡辺紹裕・丸山利輔・田中正：山林は渇水緩和に役立つか 奈良県五条吉野地区を事例として，農業土木学会論文集，No.107, pp.75-81, 1994.
- 5) 太田猛彦・服部重昭：地球環境時代の水と森，日本林業調査会，222pp，藤原印刷，2002.
- 6) 鈴木雅一・芝野博文・太田猛彦・Liu R.：山地流域の流況曲線に与える降雨の年々変動の影響，日本林学会誌，Vol.80, No.3, pp.184-188.
- 7) 稲葉誠博・沼本晋也・近藤観慈・林拙郎：森林流域における渇水期流量に着目した流況解析，中部森林研究，No.52, pp.251-254, 2004.
- 8) 河村明・久野祐輔・神野健二：昇降順対数流況曲線の提案，土木学会論文集，No.761, II-67, pp.91-94, 2004.
- 9) 益倉克成・吉野文雄・吉谷純一・深見和彦・堀内輝亮・山邊満：裏筑波流出試験地調査成果報告書，土木研究所資料，第2959号，161pp，1991.
- 10) 手計太一・吉谷純一：大ダム建設が流況に与えた影響—タイ王国・Chao Phraya川流域を対象として—，水文・水資源学会誌，Vol.18, No.33, pp.281-292, 2004.
- 11) Yoshitani, J. and Tebakari, T.: PUB research databook— Mae Chaem River basin, Thailand—, Technical Memorandum of Public Works Research Institute, ISSN 0386-5878, No.4003, 2005.