

東北タイにおける河川の流出特性と伝統的灌漑の技術様式

星 川 圭 介*

Runoff Characteristics and Traditional Irrigation in Northeast Thailand

HOSHIKAWA Keisuke*

Abstract

Earthen weirs called *thamnop* have been widely used for rice irrigation in northeastern Thailand (Northeast Thailand) and northwestern Cambodia. The most distinctive feature of *thamnop* irrigation is that it diverts the entire river runoff into riverbanks. Complete blockage of river channels causes even floodwater to be flushed into riverbanks without any human control. This study discusses why *thamnop* can function without frequent collapse and severe damage to human life and property and why such an irrigation method is preferable, from a hydrological perspective. Results of a spectral analysis of fluctuation in daily runoff show that even in the period immediately after rain, runoff of rivers in northeastern Thailand tends to fluctuate in a much more gradual manner than that in northern Thailand and Japan. *Thamnop* have been constructed on rivers that have no destructive flush runoff or storm flow. Analysis results with Filter Separation AR Method show that runoff of rivers in northeastern Thailand consists mostly of surface runoff. In other words, they do not have stable base-runoff that is usually used for weir irrigation. Because of instability and unpredictability of runoff, the locals use *thamnop* for maximizing the water intake. Such gradual but unreliable river runoff is caused by the mountain-less terrain of northeastern Thailand. Therefore the use of *thamnop* for irrigation is the optimum adaptation to the hydrology of northeastern Thailand.

Keywords: Northeast Thailand, traditional irrigation, *thamnop*, runoff characteristic, spectrum analysis, Filter Separation AR Method, penneplain

キーワード：東北タイ、伝統的灌漑、タムノップ、流出特性、スペクトル分析、フィルタ分離自己回帰法、準平原

* 京都大学地域研究統合情報センター：Center for Integrated Area Studies, Kyoto University, 46 Shimoadachi-cho, Yoshida Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
e-mail: hoshi@cias.kyoto-u.ac.jp

I はじめに

1. 東北タイにおける伝統灌漑

タイ東北部（東北タイ）やカンボジア西北部の河川沿い低地の一部で行われてきた水田灌漑は、同じ河川水を用いた水田灌漑でありながら、日本や北タイなどで行われてきた井堰灌漑とは大きく異なる。その灌漑の最大の特徴は、河岸の地盤より高い土堰堤によって河道を完全に閉塞し、河川の流れのほぼ全量を河岸へと流し込む点にある。土堰堤は木の骨組みに土を盛ったもので、上部にはしばしば補強用に樹木や竹が植栽される。また、土堰堤は川をせき止めるのみならず河岸上にまで延長され、河岸へ流れ込んだ水を広く拡散させる役割を果たすことも多い〔福井・星川 2009: 35-43〕。写真1にその一例を示す。日本や北タイの井堰灌漑では、堰によって河川水の一部のみを取り込み、残りは堰の上を越流させる、あるいは水門を開くことにより下流へと通過させる。取り込んだ水は水路を用いて受益地にまで送水し、分配する。一方東北タイの土堰堤を用いた灌漑では、上述のように全量を取り込むうえ、取り込んだ水を人為的なコントロールの下で配分する水路のようなシステムを持たないことが多い。岸に流れ込んだ水はさながら洪水のように水田を冠水させる。

こうした土堰堤は現地の言葉で「ファーイ (*fai*)」あるいは「タムノップ (*thamnop*)」などと呼ばれる。ラオ語を母語とする人々が多い東北タイ北部では前者、クメール語などを母語とする人々が多い南部では後者の呼び名が一般的に用いられる。本論文では便宜上、土堰堤を用



写真1 東北タイ西南部ナコンラーチャシーマー県にある Thamnop Khon Muang

注：上流側上空からの撮影。川を横切る土堰堤によって流れが完全にせき止められている。(撮影：福井捷朗)

いた水田灌漑がとくに盛んな東北タイ南部地域での呼称を採用し、以下、水田灌漑用の土堰堤を指して「タムノップ」と呼ぶことにする。¹⁾

2. タムノップが用いられる理由

冒頭にタムノップを伝統的なものであるとしたが、東北タイのタムノップはいつごろから用いられてきたものだろうか。タイ国立公文書館の文書に東北タイのタムノップに関する記述が現れるのは1910年代以降である。Chumphon Naewchampaはそうした公文書館収蔵資料等の記録に基づき、1900年に開通したバンコクと東北タイの玄関口コーラートとを結ぶ鉄道が東北タイでの商品米栽培を拡大させ、その過程でタムノップの建設も広がったとした[Chumphon 1996]。ただしタムノップの使用は公文書の記述以前、中央政府が東北タイへの関与を深める以前の19世紀中にも行われていたと考えられる。1922年のナコンラーチャシーマー州農務官文書[KS.1/3760]には「築数十年の古いタムノップ」に関する記述、1916年の同じくナコンラーチャシーマー州農務官文書[KS.11/1139]には「10年以上前に村人が協力し合って築造したタムノップ」についての記述がみられるなど、タムノップについての知識が当時すでに地域住民の中に広く共有されていたと考えられるのである[福井・星川 2009: 78-90]。現地での聞き取りでも、過去数十年以内に築造され、資金の出所や建設年代を住民がはっきり記憶しているタムノップがある一方で、数世代を経て地域の伝承の中にさえ建設年代が残っていないという例もしばしばである。

東北タイにおいてタムノップが河川灌漑に用いられてきた理由として、福井らはまず、日本や北タイで堰の建設に用いられてきた岩石などの材料が、浸食の進んだ準平原である東北タイでは入手しにくい点を指摘した[Fukui *et al.* 2000]。土質材料による堰はひとたびその堤頂を越える流れが生じれば浸食によって簡単に決壊してしまうため、そうした越流が発生しないように河岸より高い堤で完全に河川をせき止めざるを得ないということになる。実際、まだ東北タイにおいてセメントなどの材料が手に入りにくかった1910年代から1920年代にかけて、政府は土堰堤の上を木板で覆って浸食を軽減した越流可能型タムノップの建設をいくつか試みている[福井・星川 2009: 103-107]。こうした材料の制約に加え、星川らは、東北タイの大部分が侵食の進んだ準平原地域にあり、全体的な地形勾配が緩やかな上、基岩の凹凸に起因する不規則な起伏が妨げとなって水路を用いた配水が難しく、地域全体を冠水させるような洪水型の灌漑を行う方が効率的であるためではないかと推測した[Hoshikawa and Kobayashi 2004; 2009]。

1) 「仏暦 2485 (西暦 1942) 年国営灌漑法」(พระราชบัญญัติการชลประทานหลวง พ.ศ. 2485) において「“タムノップ” とは水が越流しないようせき止めるために、水路内に設置するもの」と定義されており、東北タイなどで用いられている土堰堤を「タムノップ」と呼ぶことはこの定義にも沿うものである。

ただしこれだけでは、「東北タイではなぜタムノップが用いられるか」という問いに半分しか答えていない。

まず、なぜタムノップが河川を完全に閉塞しうのかという点を明らかにする必要がある。日本や北タイで用いられてきた取水堰は、タムノップのように河川を完全に閉塞するものではなく、安定的な取水のために河川の流れをせき上げるのみであるが、それでも豪雨等による河川流量増加時には水位を過剰に上昇させ、氾濫を引き起こす危険性を持つ。また氾濫に至らないまでも堰自体が流量増加のたびに押し流される恐れがある。河川流量が少ない時には流れの妨げとなって水位を上昇させることが求められるが、流量増加時には流れの妨げとならないことが求められるのである。この二律背反を解決するため、水位上昇時に堰自体を一瞬で解体できる仕組みを施した木組みの堰「板羽目堰」のような工夫がなされてきたし〔佐藤他 1991〕、近代的土木・機械技術が発達・普及して以降はそれらを駆使し、水位上昇時には水門を開放して流下抵抗を極力減ずることができる可動堰の導入により、その解決が図られている。1990年代から2000年代初めにかけて世論を賑わせ、その後事実上廃止となった徳島県吉野川第十堰の可動堰化計画も、その是非はともかく、同じ問題意識に基づいている。河川の流れを妨げるととどまらず、タムノップは河川を完全に閉塞してしまう。河川氾濫を人為的に生じさせて水田に水を流入させるにしても、タムノップ自体の破壊を免れ、人命や周囲の家屋に危険を及ぼさずにどうしてそのようなことが可能なのかという疑問が生じるのである。

また広範囲に水を供給するために河川氾濫を人為的に生じさせるにしても、完全に河道を閉塞することが必要なのかという点も検討されねばならない。日本や北タイの井堰灌漑では、降雨中から降雨直後にかけての平常時と比べて極端に水位が上昇する時には堰の水門を開く、あるいは固定堰の場合なら堰の上を越流させる。いずれにせよ水位上昇時に現れる増加分の流量は下流に流し（利用対象とせず）、無降雨時にゆっくりと流出してくるいわゆる基底流出を取水の対象とするのである。一方タムノップは河川を完全に閉塞するという構造上、いかなる流れであってもすべて受け止め、河岸へと流し込む。河岸へ流れ込む水の量や時期はまさに河川流量次第であり、人間による制御の及ぶところではない。もし、起伏が大きく地形勾配が緩やかという地形的要因により水路を用いた配水が難しく、人為的な河川氾濫を引き起こして周囲一帯を冠水させたほうが効率的であるということのみが理由ならば、極端な水位上昇を下流へ逃がしうる構造の堰を用いて河川氾濫を生じさせればよい。そうすればあらかじめ設定された領域を一定の深さに冠水させることも可能で、強い水流や過剰な冠水深による稲への被害を避けることができ、安定的に稲作を行えるはずである。上述した政府による板張りタムノップは水流によって板が洗い流されて失敗に終わっているが〔福井・星川 2009: 105〕、もし安定的な基底流量のみを取水したほうが有利であれば、政府がタムノップ開発に関与し始める以前から地域住民自身が板張りタムノップ以外の越流を可能にする何らかの工夫を発達させてきた可能

性もある。タムノップによる全量取水は、堰を建設する材料がない、あるいは地形的要因によって水路による配水が難しいから人為的な洪水を引き起こして地表面全体を水没させるしかないといったような消極的な理由による結果ではなく、地域の水資源を最大限に有効利用するにはタムノップによる全量取水が最適であるところから編み出された積極的な適応であるとは考えられないだろうか。

これらの疑問点は、タムノップが地形条件のみならず、河川の流出特性に依拠している可能性を示唆する。まず極端な流量増加がなく、タムノップにより河道を閉塞したところで人命や家屋に危険を及ぼす氾濫が生じないという可能性、そしてその一方で安定的な利用を期待できるような基底流出が少ないという可能性である。本論文では、タムノップが広く用いられ、かつ流量観測データが多地点・長期間にわたって入手可能な東北タイの河川流出特性を、北タイ、そして日本の河川の流出特性と比較することにより、なぜタムノップが東北タイで盛んに利用されてきたのか、さらになぜ利用可能なのかを明らかにする。

II 流出特性の分析方法

東北タイの河川流出は間欠的であるとしばしばいわれる。東北タイのいくつかの河川水位・流量観測所のデータを見ると、確かに雨季の間にいくつかの大きな流出のピークがあり、ピークとピークの間にはほとんど流出が見られない。ただし北タイで井堰灌漑が行われている河川についても、細かいピークが連続し、流量が安定する期間がみられないケースもある。逆にタムノップが建設されている東北タイの河川においてピークの間比較的安定した流出が生じることもある。タムノップ灌漑と井堰灌漑が行われている河川の特徴を比較する際には、それぞれの河川の流出機構を解明して定量的に両者の違いを示す必要がある。

河川水の供給源は降水（熱帯地域の場合はほぼ降雨）である。地表面にもたらされた降雨は、一部が蒸発し、一部は地表面を伝って河川へと流出（早い流出）し、一部は地下に浸透する。地下浸透分はさらに比較的浅い部分にある亀裂等の間隙を縫って比較的早く流出する成分（中間流出）と、いったん地下水となった後ゆっくりと湧出する成分（遅い流出もしくは地下水流）とに分けられる。大まかに言えばこれら早い流出・中間流出・遅い流出の3要素の比率とおおのの流出速度が各河川の流出特性を形成するのであり、これらを同定することにより、それぞれの河川における流出機構を推定することができる。その手法として代表的なのが流出過程のモデル化である。降雨が河川に流出するまでの浸透・貯留・流出過程をシミュレートするモデルを構築し、入力された観測降雨データに対して観測流量に近い流量を算出するようモデルの構造や諸パラメータを調整することを通じて、流出機構を推定するのである。

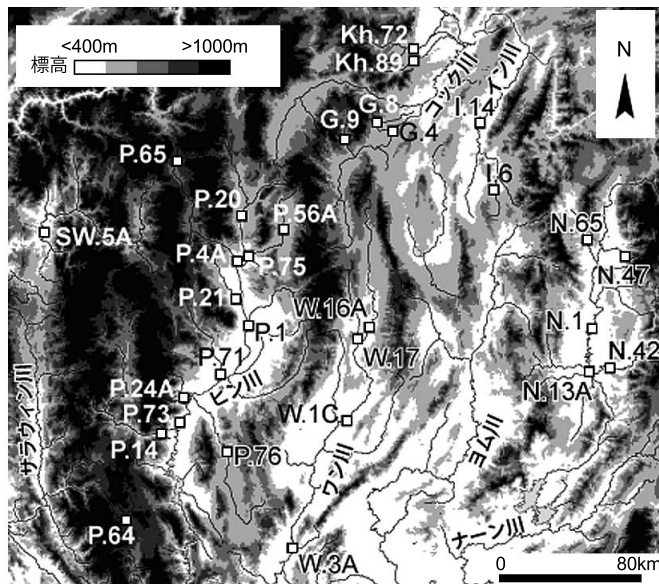
しかし本研究では東北タイ、北タイ、日本のなるべく多くの河川の流出について分析・比較

を行うため、多くの手間とデータを要するシミュレーションモデルの構築による対応は現実的ではない。流量データのみを解析対象として、流出過程を推定する手法を用いることとする。流量データのみから流出過程を分析する代表的な手法としては、フィルタ分離自己回帰 (AR) 法 [日野・長谷部 1985] や流量変動のスペクトル解析を行う手法 [沖 2004] がある。これらはいずれも河川流量の時系列変化の波形が複数の波長の波の重ね合わせとして構成されていることを前提とするもので、数学的手法により重なり合った波を分離する、あるいは波長ごとの波の強さ (振幅の自乗) の形に変換することにより流出機構を分析するものである。具体例を挙げれば、地表面流出 (早い流出) は一般に数時間から数日の間に鋭いピークをもって増減する波長の短い (周波数の高い) 波形を構成し、地下水流出は数週間以上の波長の長い波形を構成する。降雨中から降雨直後にかけての流量の増減は、その降雨に起因する地表面流出と、それ以前の複数降雨による中間流出、地下水流出がそれぞれ構成する流量増減波の合成として解釈されるのであり、これらを分離する、あるいはそれぞれの周波数の強度分布に着目することで各流域の流出特性を分析するのである。フィルタ分離自己回帰法およびスペクトル解析法は日本の河川のほかタイのクウェーヤイ川 [日野・長谷部 1985] やチャオプラヤー川 [沖 2004] の流出解析にも用いられて有効性が示されていることから、本研究でもこれら 2 手法を用いることとする。これらの手法については本論文末の付録により詳しく述べる。

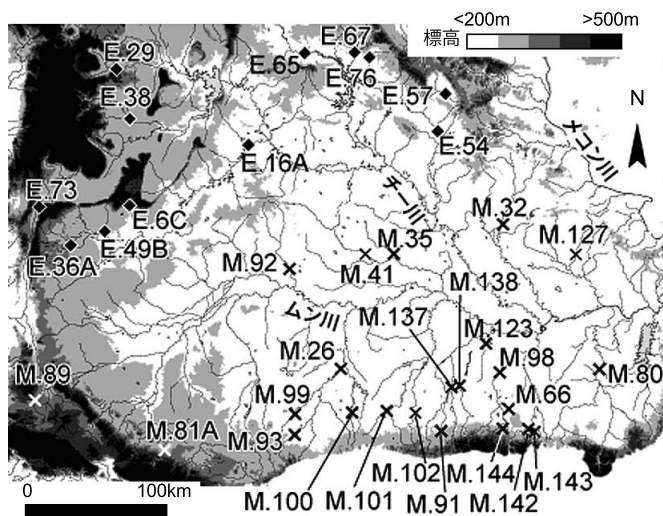
使用データ

東北タイのほか、比較対象として北タイ、日本の河川流量データを用いる。タムノップが最も多く建設されている流域面積 $1,000\text{km}^2$ 以下の河川を中心に、最大約 $13,000\text{km}^2$ までの流域面積を持つ流量観測点のデータまでを対象に含める。タイの流量データは灌漑局、日本の流量データは国土交通省にそれぞれよった。図 1 に東北タイと北タイの流量観測点の所在地を、表 1 に東北タイの観測点について流域面積と灌漑の状況をそれぞれ記す。日本の河川からは標津川 (合流点)、釧路川 (標茶)、最上川 (下瀬、稲下)、姫川 (山本)、常願寺川 (瓶岩)、揖保川 (曲里)、土器川 (丸亀、常包橋)、球磨川 (横石、一武、多良木) を選んだ。標津川や釧路川は流域に占める山地の割合が低い。とくに標津川は上流の一部に山地があるのみで、緩やかな丘陵の間を流れている。一方、常願寺川や土器川は河床勾配の強い急流河川として知られている。

スペクトル分析については、各地点、欠測の少ない 6 カ年の連続データから連続 2,048 日分のデータを切り出して周波数と波の強さの関係に変換し、分析に供した。変換には高速フーリエ変換を用いた。またフィルタ分離自己回帰法については、日本の場合は梅雨以降、タイの場合は雨期中盤以降のいずれも河川増水期の単年データを使用した。対象とした年代は、東北タイは 1980 年代から 1990 年代半ば、北タイは 2000 年前後、日本は 1980 年代から 2000 年代であ



(a) 北タイの河川と流量観測点



(b) 東北タイの河川と流量観測点

図1 対象観測点の所在（東北タイおよび北タイ）

注：北タイと東北タイの間で標高区分の色分けが異なることに注意。

表 1 分析対象（東北タイのみ）

観測点	流域面積 (km ²)	観測点近傍の状況
E.6C	300	上流側は細い稜線に縁どられた顕著な凹地。1960 年代後半まで森林
E.16A	13,171	チー川本流
E.29	945	ブークラドゥン山麓
E.36A	290	川筋沿いは森林。周囲に顕著な丘陵が点在
E.38	1,446	用水路付の近代的灌漑堰有
E.49B	331	用水路付タムノップ有
E.54	1,511	プーバン山からの水を集める。
E.57	98	プーバン山中すり鉢状地形の底。上流側支流は放射状
E.65	1,949	
E.67	420	
E.73	243	急峻な崖に囲まれた広い谷
E.76	163	すり鉢状地形の底
M.26	2,927	
M.32	1,654	
M.35	672	タムノップ有
M.41	1,310	
M.66	586	
M.81A	433	1960 年代まで森林
M.89	655	近傍は畑か住宅
M.91	128	用水路付タムノップ有
M.92	1,094	小規模な丘陵が多い。
M.93	329	タムノップ有
M.98	1,092	タムノップ有
M.99	88	タムノップ有
M.100	131	タムノップ有
M.101	390	タムノップ有
M.102	207	タムノップ有
M.123	142	タムノップ有
M.127	414	すり鉢状地形の底。上流側支流は放射状
M.137	397	タムノップ有
M.138	1,038	タムノップ有
M.142	241	ドンラック山脈山麓
M.143	46	ドンラック山脈山麓
M.144	124	用水路付の近代的灌漑堰有。ドンラック山脈山麓

注：観測点の記号はタイ国の灌漑局によるもの。E はチー川，M はムン川流域内にあることをそれぞれ示す。

る。データ取得期間が一致しないのは、タイでは特に小規模河川における観測地点の改廃が頻繁で長期にわたるデータが少ないこと、東北タイでは 1990 年代半ば以降多くの小規模河川の上流にダムが建設され、タムノップが盛んに用いられていた時代とは流出の状況が変化している可能性があることなどによる。フィルタ分離自己回帰法もスペクトル解析法も流量から河川

固有の流出特性を解明するものであるから、観測年代の違いは比較にあたっての障害とはならないと考えられる。

III スペクトル解析の結果

1. パワースペクトル密度の分布

図2に対象河川の一部についてのパワースペクトルを示す。横軸の値として周期（流量増減あたりの時間）をとっている。全地点に共通して右上がりの傾向が見て取れるのは、パワースペクトル密度が等波数間隔（周期の逆数）で算出されるため、周期が短い領域ほど細かい周期刻みに値が算出されていることが原因であり、短い周期で変化する流量成分（たとえば降雨後の増水）が長期的な流出と比べて少ないことを必ずしも意味するものではない。さらにこの右上がり傾向を細かく観察すると、いくつかの類型があることが分かる。たとえば図2において標津川（合流点）、常願寺川（瓶岩）、球磨川（横石）、Nam Mae Kon（G.4）、Nam Mae Kham（Kh.72）などは100日以下の周期の領域において全体として直線的で緩やかな右上がり傾向を示す。一方Lam Sieo Noi（M.35）やHuai Thap Than（M.101）では周期10日の辺りに顕著な変曲点が認められ、長周期から短周期の方向に見た場合、周期10日以下のところで急激に落ち込む。つまり標津川などと比べ、Huai Thap Thanなどでは10日以下の周期をもつ流出変化の割合が少ないことを示しているのである。一般的に河川水を利用する際には安定的な利用が期待できる部分、つまり長周期の流出成分（基底流出）が対象となる。いつどれだけ降るか予測できない降雨による短期的な増水（短周期の流出）まで利用対象とするのはインフラのコストに見合わないばかりか洪水・水不足の危険性が高い。

河川流出の周期成分割合を規定する要因の一つは流域面積である。立川他〔1995〕が琵琶湖・淀川流域の河川を対象に行った研究によれば、流域面積が大きくなるほど流量の時間変動が緩慢となり、おおむね流域面積 300km^2 以上を境として周期1時間未満の超短期流出成分は流出予測モデルを構築する上で無視しうるレベルに低下するという。こうした流域面積と短周期流出割合の間の負の相関関係は、流域面積が大きくなるにしたがってさまざまな水源からの流出が集まり、特に短周期成分について相殺現象が生じるためと推測される。図3はこの負の相関関係を想定し、縦軸に中期流出スペクトルに対する短期流出スペクトルの比、横軸に流域面積（いずれも対数目盛）をとったものである。ここでは、10日以上186日（約半年）以下の周期をもつ流出を安定した利用が期待できる「中期流出」、10日未満の周期をもつ流出を安定利用が難しい「短期流出」として定義しており、それぞれの区間内のスペクトル密度積分値の比（短期流出スペクトル／中期流出スペクトル）を算出した。以下、これを略して「短期流出比」と呼ぶ。この図には全体的に負の相関関係が表れているが、その一方で、北タイについて

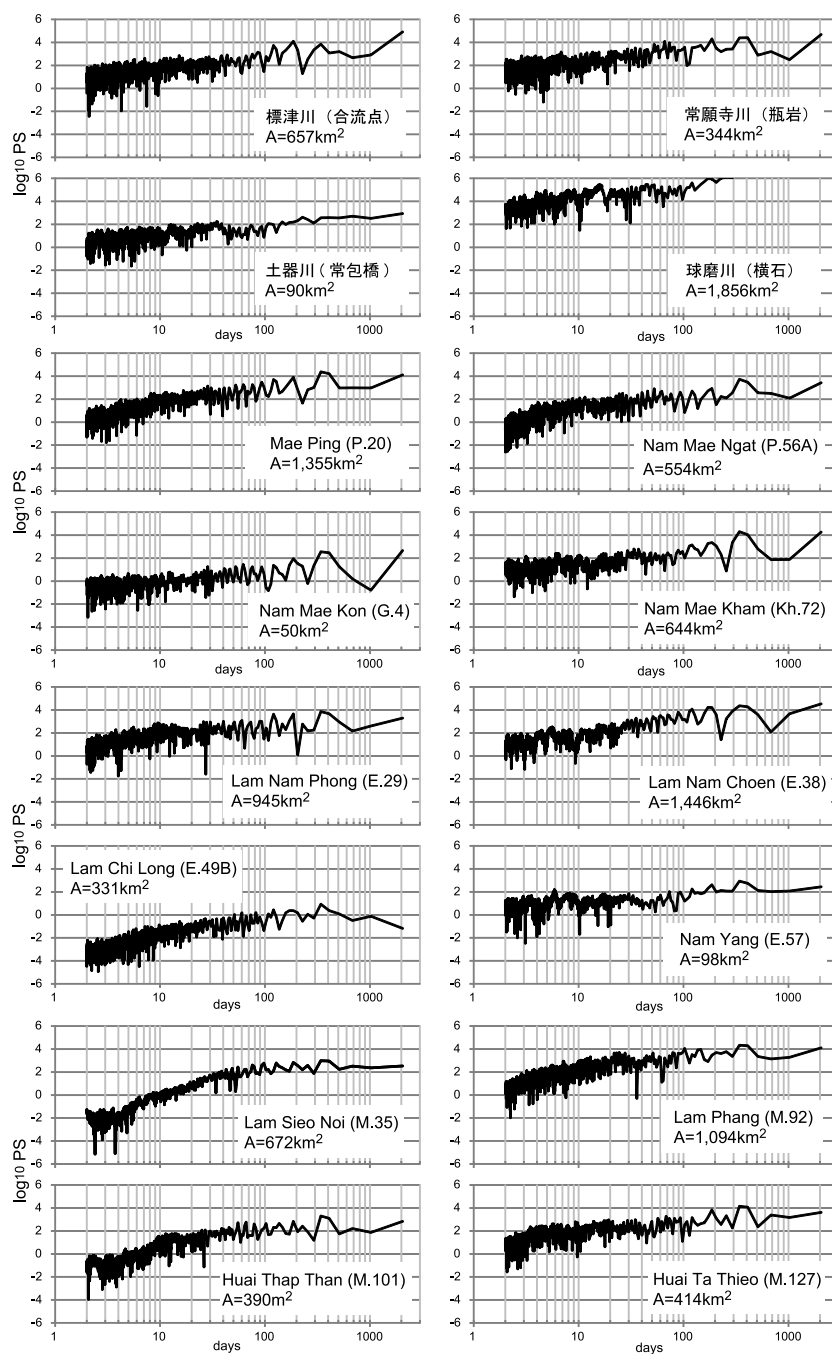


図2 河川日流出量フーリエ変換結果

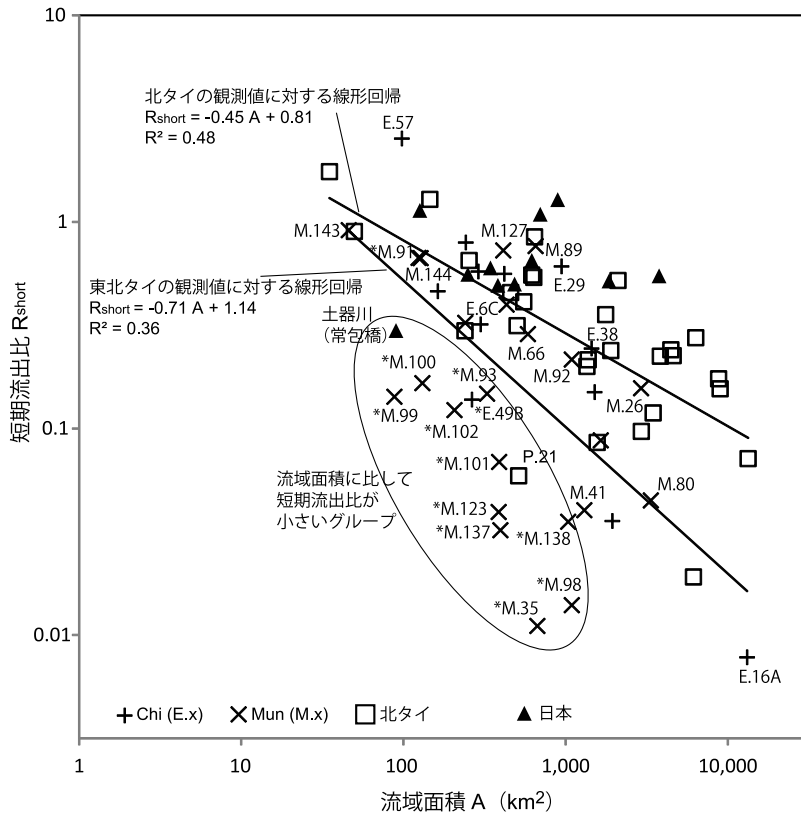


図3 流域面積（横軸）と短期流出比（縦軸）の関係

注：東北タイのムン川とチー川の観測点については一部地点コードを記した。
また近傍にタムノップの所在が確認されている観測点についてはコードの前に「*」を付している。

は相関が強く、東北タイの河川については相関が弱い傾向が示されている。北タイのみについての決定係数 (R^2) および回帰直線の傾きはそれぞれ0.48と-0.45であったのに対し、東北タイについてはそれぞれ0.36と-0.71であった。²⁾ 東北タイの一部、流域面積数百 km^2 程度の小規模河川の中には、日本や北タイにおける流域面積数千 km^2 程度の大河川に相当する流量安定性を示すものがあることも見て取れる。東北タイの中で特に河川規模に対する短期流出比が小さいのは、Huai Thap Than³⁾ (M.101) や Lam Chi (M.93, M.99), Huai Haet (M.123) など、図3

2) 一方、日本の河川については弱い相関しか認められなかった。サンプルの少なさも一因であろうが、日本の場合ほとんどの河川にダムが設置され、流出がコントロールされていること、融雪水の影響の大きさが地域によって異なることなどが影響しているとみられる。

3) Huai ははじめ後出の Lam, Mae Nam, Mae はいずれも「河川」を意味するタイ語であり、河川名の冒頭に冠せられる。本論文では「ムン」や「チー」などの大流域河川を除いて河川名の訳出はせず、ローマ字にて現地名を表記する。

の中で楕円に囲まれた領域内の地点である。このうち特にM.101やM.123では近傍上下流に多くのダムノップの存在が認められる。一方流域面積に比して短期流出比が高い河川では、M.91(流域面積128km²)下流10km程度の範囲にいくつかのダムノップが認められるのを例外として、ダムノップは建設されていない。短期流出比が低いことは、降雨直後の短い時間に立ち上がるピーク流出成分が相対的に少ない、あるいはピーク流出が長期間にわたるなどかなものであることを示す。冒頭に述べたようにダムノップは河川を完全にせき止めるため、越流や水門の開放によって余剰水を逃すことができる堰と異なり、大きなピーク流出があればダムノップ自体が破壊されたり致命的な洪水被害が発生したりする可能性が高い。流域面積が小さい割に短期流出比が低い(短時間のピーク流出が相対的に少ない)河川(図3の楕円の範囲内)にダムノップが集中しているという事実は、水門や越流によってそうしたピーク流出を分離・除去する必要がない河川がダムノップにとって有利であり、そうした河川を選んで建設されている、あるいは建設直後の破堤を免れて存続している可能性を示唆する。流域面積が大きい河川も短期流出成分は少ないが、絶対的な流量が多いためダムノップでせき止めることは困難である。

2. 東北タイの河川に短期流出が少ない理由

それではなぜ東北タイにはそうしたダムノップにとって好都合ともいべき流出特性を有する河川が多いのか。まず考慮せねばならないのは、ダムノップに好都合な流出特性があるからダムノップが建設されているのではなく、ダムノップが多く建設されているから短期流出成分が除かれているという可能性である。ダムノップはすべての流れをせき止めて河岸に溢れさせる。周辺の土地に拡散した河川水の一部は再び河川に戻るが、それまでには流入の際のピーク(短期流出)は平準化されてしまう。上流側に多くのダムノップを持つ観測点の流出は短期流出成分の割合がとりわけ低いことからダムノップの持つピークカット作用は少なくないと考えられる。ただしM.93(Huai Seo)のように上流側にダムノップが認められない観測点の流出についても、日本や北タイ、東北タイのダムノップのない河川と比べて流域面積に対する短期流出比が十分に小さいことから、ダムノップのみが短期流出比を下げているわけではない。やはりある自然的要因によってもともと短期流出成分の少ない河川が存在し、そこにダムノップが存立しようとみるべきであろう。

自然的要因の一つとして考えられるのが地形である。東北タイは浸食がすすんだ準平原地形であり、北タイと比べて山地の割合が少ない。日本のサンプル河川の中で比較的平野の占める割合が高い標津川や釧路川も、最上流部には一定面積の山地を有している。また東北タイの中でも流域面積の割に短期流出が少ない河川の大部分をムン川の支流が占めている。チー川が流れる東北タイ北部ではプーパン山脈をはじめとして浸食後に残った基岩が形作る急峻な地形が

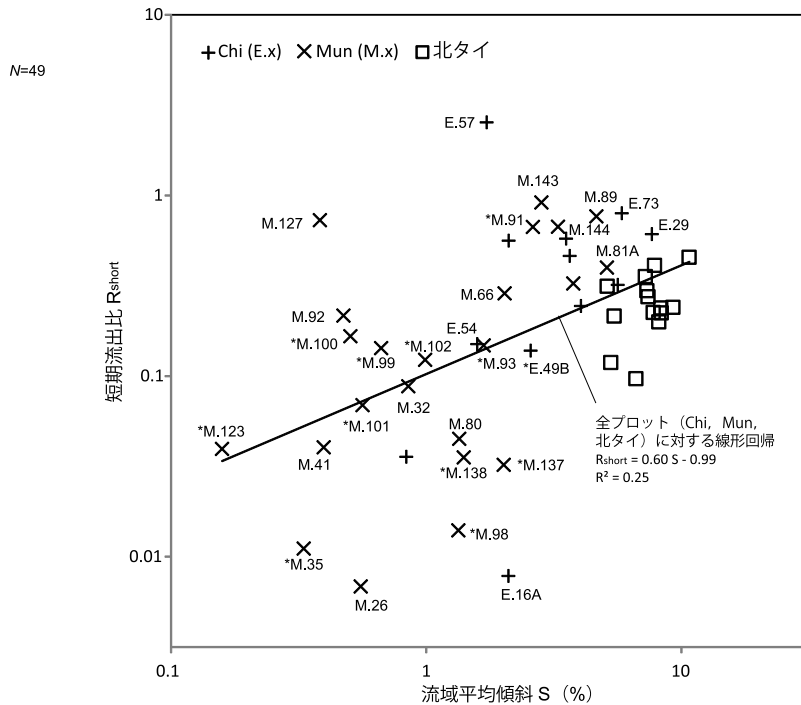


図4 流域内平均傾斜と短期流出スペクトル比の関係

注：回帰式・直線は全流域の観測点データに共通のもの。
 東北タイのムン川とチー川の観測点については一部地点コードを記した。
 また近傍にタムノップの所在が確認されている観測点についてはコードの前に「*」を付している。

比較的多いが、ムン川が流れる東北タイ南部にはカンボジアとの国境をなす幅10km程度のドンラック山脈を除けば山地といえるほどの起伏はほとんどない。傾斜が緩いと必然的に流出速度は遅くなり、さまざまな場所に降った雨が短期間に河川へと集中することも少なくなるため、降雨後の流量増減は緩やかになるはずである。図4に東北タイと北タイの対象観測点について流域内の平均傾斜と短期流出比の関係を示す。流域の平均傾斜はSRTM-30を1,000mグリッドにリサンプルした上で各グリッドの傾斜を求め、流域（観測地点の集水域）で平均したものである。おおむね両者の間に正の比例関係があることが見て取れる。⁴⁾

4) 北タイの観測点が上部中央に集中し、東北タイのグループからはやや外れているのは、対象観測点について、北タイの観測点のほうが全般に東北タイのものよりも流域面積が大きいことがその主な理由である（図3参照）。図4にプロットした北タイ、東北タイのデータについて、短期流出比の常用対数を従属変数、平均傾斜と流域面積の常用対数を独立変数として回帰式を求めたところ、両独立変数、回帰式ともに0.1%以下の水準で有意であり、短期流出比は流域面積と流域平均傾斜に強く規定されていることが示された。

ただし流域平均傾斜だけでは代表しえない地形的要素の影響も大きい。図 4 中、東北タイの 2 つの観測点 (E.57, M.127) が上方に外れている (傾斜に比して短期流出比が高い)。これらの観測点はすり鉢状地形の底部に位置しており、流出が短時間に集中するものであろう (図 1 (b) 参照)。M.92 もまた平均傾斜に比して短期流出比がやや高い。この M.92 はすり鉢状地形の底部に位置しているわけではなく、河川網の形態も M.101 など他の短期流出比が低い東北タイの河川と同様である。両者の間で大きく異なるのは流域に占める丘陵の割合である。流域平均傾斜は M.101 では 0.56%, M.92 では 0.47% と近い値を示しているが、流域傾斜の標準偏差については M.101 で 0.52, M.92 では 0.22 と大きく異なる。M.101 では源流部に傾斜 1% から 3% 程度の山地があるのを除いて大部分が傾斜 0.5% 以下の平坦地である。おおむね本流・支流の流向になだらかに傾斜し、目立った丘陵はほとんどない。この平坦地と山地のコントラストが傾斜の標準偏差を高めている。一方、M.92 流域は顕著な山地がない代わりに、傾斜 0.5% から 1%、比高 20m 程度、面積数 km^2 の丘陵が数多く点在し、総面積にして流域の半分近くを占めているのである。平均傾斜は M.101 流域より低い、実際には平坦な地域が少ない。河川沿いに存在するこうした丘陵から降雨後比較的速やかに流出が起きているものと推測される。

地形要因のほか、一般には土地被覆も河川への降雨の流出の速さや流出成分の割合を規定する重要因子として想定される。上記のとおり山地が少ないという地形条件により東北タイでは 20 世紀前半から水田が急拡大し、1990 年代の時点で地域面積の約 30% (作付面積ベース) を水田が占めるに至っている [Thailand, Division of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives 1996]。また 1960 年代からのケナフをはじめとする商品作物栽培の導入が丘陵部に残された森林を農地に変えた。1990 年代後半、東北タイの森林面積は地域面積の 12% にまで減少した [Thailand, National Statistical Office 2008]。一方で北タイや日本の河川については、特にその上流域は山林に占められている。こうした土地被覆の違いが、東北タイと北タイ・日本の河川流出特性の違いに大きく寄与しているとしても不思議はない。しかし結論から言えば、東北タイとその他の地域との間でみられる桁違いの短期流出比の差への土地被覆の違いの寄与は限定的である。図 5 に観測期間内に上流の土地被覆が森林から農地へと大きく変化した 2 地点の短期流出比の変化を示している。E.6C, M.80 とともに東北タイの中では例外的に 1960 年代後半頃まで上流に森林が残されていたが、ダム建設移転者の入植 (M.80) や道路整備などにより急速に農地開発が進んだ。水田のほか商品作物栽培の畑地の比率も高い。2 地点いずれも短期流出比変化が一方への変化とはならず増減を繰り返しているのは、土地被覆変化のほか、森林伐採後、順次進められた畝立て等の農地整備が理由として想定される。⁵⁾ さらに

5) 森林伐採により一時的に地表面流出が増加 (あるいは地表面流出が以前より早く流出) するとしても、耕起されれば地下浸透が増加し、畝や畔が形成されれば地表面流出が妨げられると考えられる。

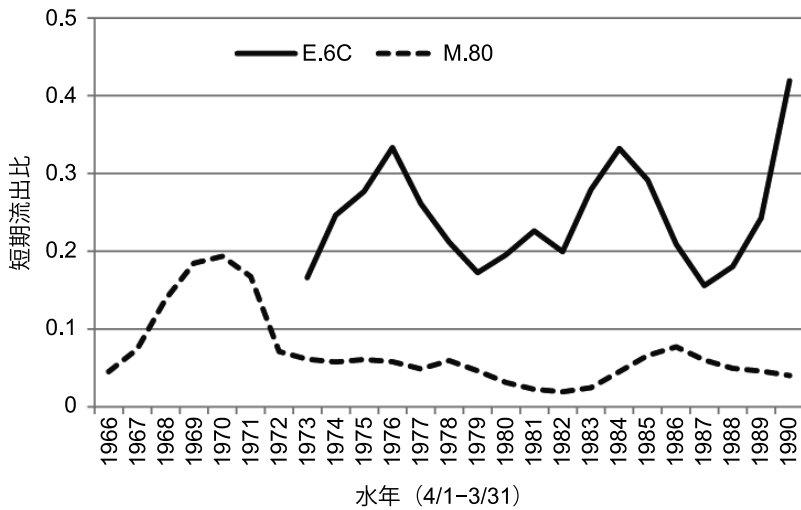


図5 短期流出比の経年変化

注：各水年4月1日から2,048日間をとって高速フーリエ変換を行っている。

に、観測手法・技術の変化による観測精度の変化等も反映されてしまっている可能性もある。⁶⁾ しかしいずれにせよ大きな土地被覆変化があったにもかかわらず短期流出比変化率は10%から50%程度の幅に収まっていることから、土地被覆の違いによる流出特性の違いはタムノップの存立に影響を与えるほどではないとみてよい。Wilk *et al.* [2001] もまた、森林割合が80%から30%に減少した東北タイ西部のNam Phon 上流域を対象に流出モデル解析を行った結果として、一定の傾向を持った流出変化は認められなかったと結論付けている。

次章ではフィルタ分離自己回帰法を用いてタムノップが存在する河川の流出特性をより詳しく分析する。

IV フィルタ分離自己回帰法による分析

1. 流出分離の手順と方針

前章でパワースペクトル密度分布解析の対象とした河川流量データのうち、ダムや融雪による影響が少なく、降雨と流出の関係が見やすい地点のデータを選んで、フィルタ分離自己回帰

6) 本研究で用いたタイの河川流量データは、水位と流量の関係を示した「水位流量曲線式」に観測水位を代入することにより導出されたものである。この水位流量曲線式は河床の形状の変化等に伴って数年おきに更新される。こうした曲線式更新の前後で導出結果としての「観測」流量の傾向に変化が生じることも想定されうる。

法により流出特性を詳しく分析する。分析対象としたのは日本の球磨川（横石）、土器川（常包橋）、北タイの Mae Ping (P.20, P.56A)、東北タイの Mae Nam Chi 支流 (E.29, E.38, E.49B)、Mae Nam Mun 支流 (M.35, M.91, M.92, M.101, M.127) のデータである。東北タイの河川については灌漑状況についてすべてのパターンを含むよう地点を選択した。すなわち、タムノップ灌漑を有する河川 (E.49B, M.35, M.91, M.101)、用水路付の近代的堰灌漑が行われている河川 (E.38)、およびタムノップや堰による灌漑が行われていない河川 (E.29, M.92, M.127) の 3 通りである。

フィルタ分離自己回帰法とは、流量の時系列データを数値フィルタにかけ、低周波成分（長期流量変動）から順次取り除くことにより流出を分離し、分離された各流出成分の自己回帰式を求める手法である。自己回帰モデルは過去の時系列値から次のステップの値を求める手法で、日流量に関して言えば、過去数日間の流量から翌日の流量を求める回帰予測モデルとなる。流量変動を流出成分ごとに分離すれば、個々の流出成分について線形の自己回帰モデルが成り立つことを前提としており、逆に言えば自己回帰モデルの当てはまりが悪いモデルの変数が不自然である場合、数値フィルタによる分離の際のパラメータ設定が不正であることが示唆される [日野・長谷部 1985]。流出分離にあたって重要なパラメータである分離周期 (T_s) については流出逓減曲線の変曲点間の日数に基づき設定し、自己回帰式から求めた降雨流出応答曲線が（たとえば複数の極大値を取るなど）不自然な形状を取らないことを確認した。

河川の流出が、遅い流出（地下水流出）、中間流出、早い流出（地表面流出）、という大きく分けて 3 つの成分の組み合わせからなることは上述のとおりである。フィルタ分離自己回帰法の実施にあたって流出をいくつに分離するかについて、フィルタ分離自己回帰法を開発した日野らは、まず全流出を地下水流出と中間・表面流出との 2 つに分離した後、降雨強度が高く、中間・表面流出を再分離する必要がある場合に限り、さらに中間流出と地表面流出を 2 つに分離する操作を行っている [同上書]。強度の高い降雨がない限り地表面流出の割合が無視できる程度に少ないことを前提としたものであろう。ここではいずれの対象地点についても 2 つに分離した時点で自然な降雨流出応答曲線が得られ、また 3 成分への分離を試みた場合、3 つに分離したうちの 1 成分の割合がほぼ皆無となったため、2 成分への分離が妥当と判断した。また特に東北タイの流出については分離された成分がそれぞれどういった流出に基づくものか同定されていないため、以下、2 つに分離された流出のうち長期の流出を長期流出、流出全体から長期流出を除いた部分を短期流出と仮に呼ぶことにする。

2. 流出分離の結果

図 6 に流出分離の結果を示す。それぞれ地点によって高水期の 20 日間から 110 日間のデータを対象として流出分離操作を行い、そのうち比較のため 60 日間を切り出して表示している。

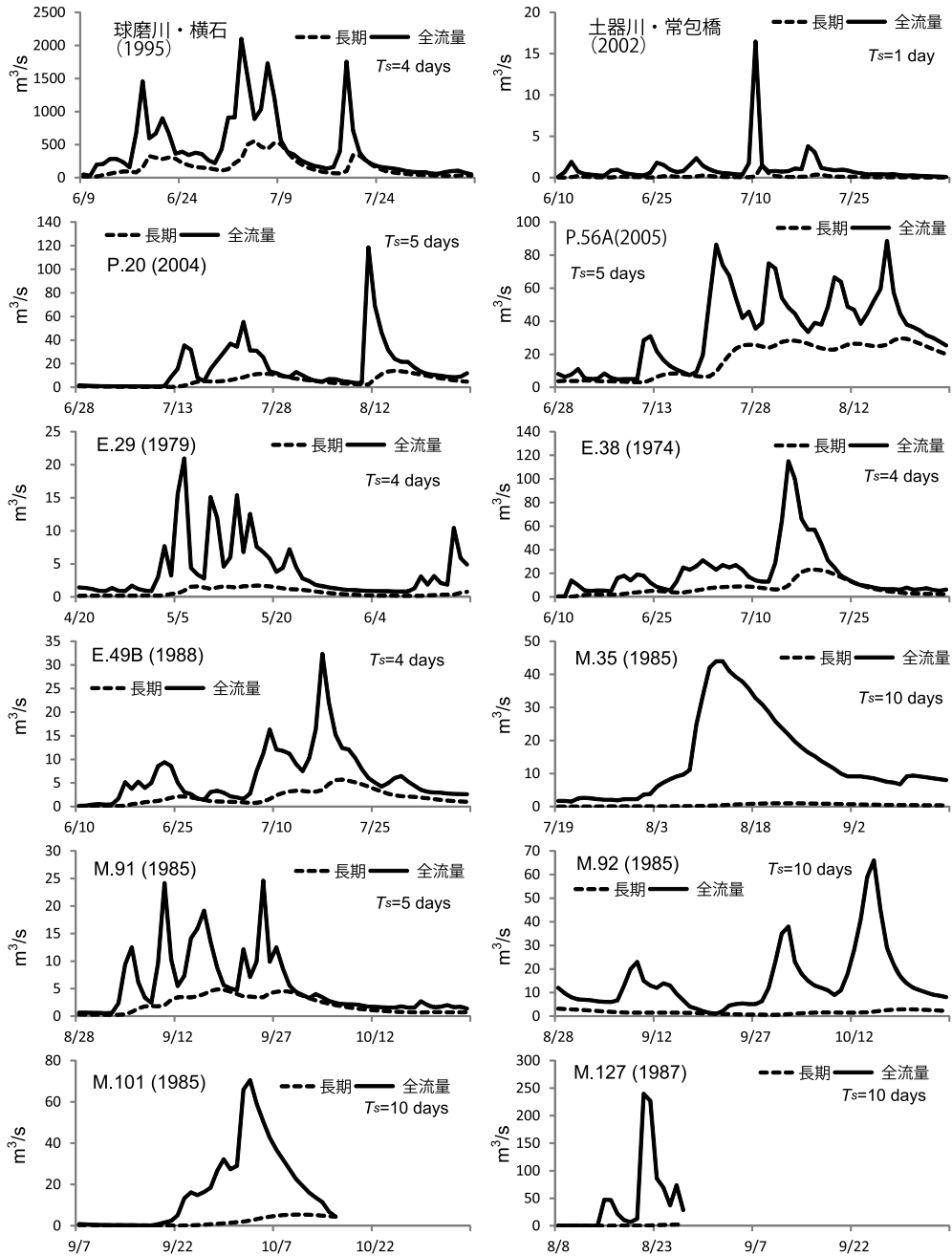


図6 フィルタ分離自己回帰法による流出分離の結果

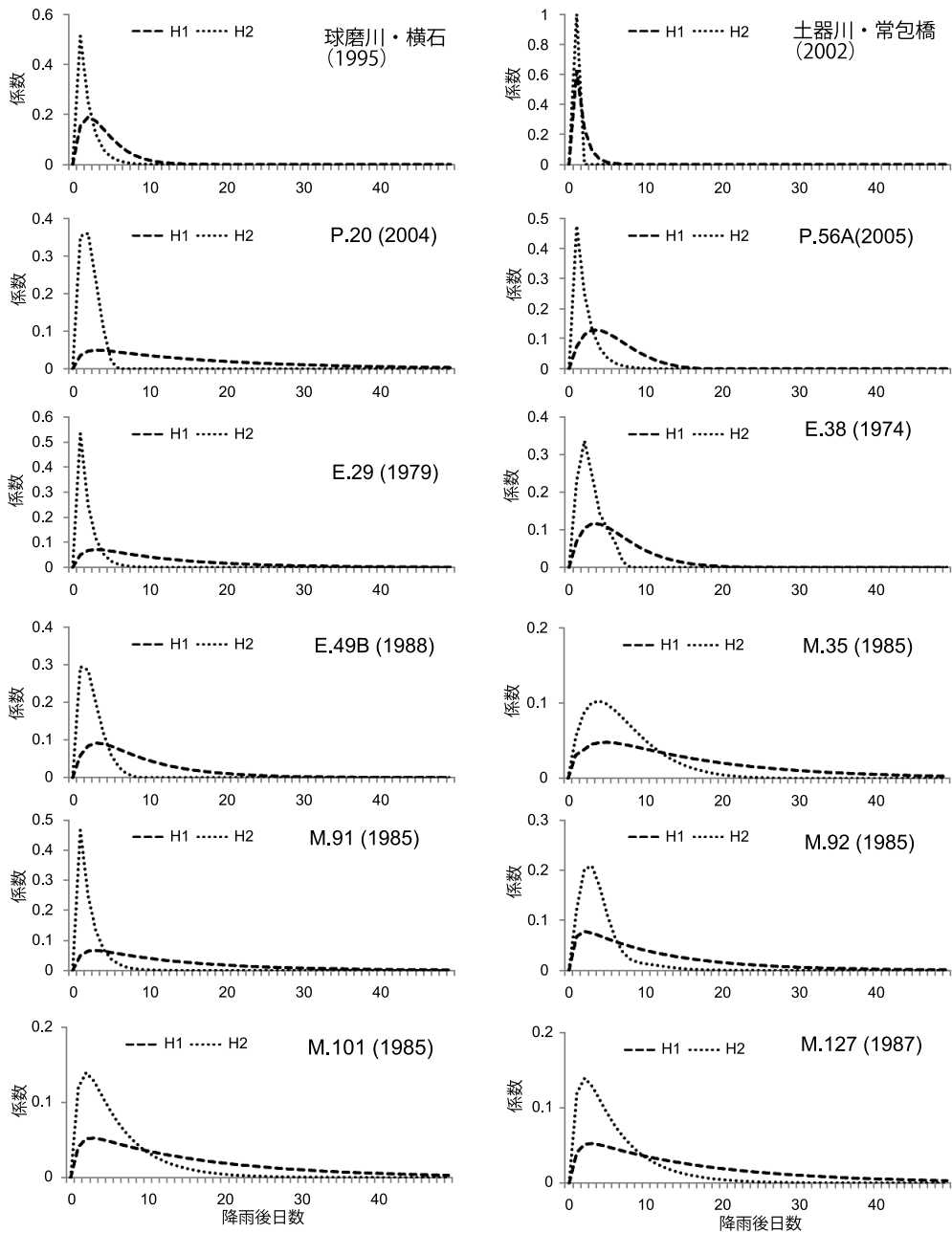


図7 フィルタ分離自己回帰法によって求められた各観測地点・流出成分の降雨－流出応答曲線
 注：H1は長期流出の応答，H2は全流出から長期流出を除いた短期流出の応答。

また図7には、流出分離と自己回帰モデルの導出によって得られた流出成分ごとの降雨・流出応答曲線（単位図）を示している。図7の横軸は降雨後の日数、縦軸は降雨に対する係数である。ある日にもたらされた降雨が何日目にとどれだけ流出するかという割合を示した案分曲線であり、ピークが鋭いほど降雨が短期間に流出し（流出に占める直近の降雨の割合が高い）、緩やかなほど長期に渡って流出する（過去長い期間にわたる降雨が流出に反映され、直近の降雨の占める割合が相対的に低い）ことを示す。

図6を見ると、球磨川、ピン川2地点（P20, P56A）、およびチー川支流3地点（E.29, E.38, E.49B）、ムン川支流1地点（M.91）では地下水流出あるいは遅い中間流とみられる長期と早い中間流などとみられる短期流出が一定割合ずつ存在するのに対し、土器川および東北タイのムン川支流4河川（M.35, M.92, M.101, M.127）の流出はほぼ単一の流出成分から構成されていることが示されている。

土器川は上流に急峻な山地を持ち降雨直後に急激な流出増加がみられるが、降雨のない期間には頻繁に枯れ川（瀬切れ）状態となる。ただしこれは川の流れが伏流しているだけであり、伏流水は貴重な灌漑用水源となっている〔国土交通省四国整備局 香川河川国道事務所〕。つまり観測されていないだけで、本来は長期成分がないわけではない。一方M.35, M.92, M.101, M.127については長期流出の伏流はないとみてよい。伏流を生じるためには河床が透水性のきわめて高い砂礫などによって構成されている必要があり、砂や粘土の上を流れる東北タイの河川はこの条件に合致しないためである。それでは設定した分離周期が不適切なために長期流出成分が分離できていないという可能性はないだろうか。確かにほかの地域の河川同様5日程度の周期で分離すれば、一定の「長期流出」成分が得られる。しかしこの場合、2つの応答曲線がほぼ重なってしまい、もはや異なる流出成分とはみなしえず、合理的な流出分離とは言えない。分離周期を5日から15日まで変えながら試行したところ、分離周期変化に対する応答曲線の変化が単方向かつ極めて連続的であり、流出成分の分離点を示すような明確な閾値は現れなかった。ここからはこれら4観測点の河川流出が広い周期の幅を持つ単一の流出成分によって構成されていることが示唆される。また10日という長い分離周期をとってもなお、2つの応答曲線の形状の違いが他の河川ほど明瞭には表れていない（図7）ことは、10日の分離周期で分離された「長期流出」も、実際は「短期流出」と同一成分であること示している。

3. 東北タイ河川の流出過程の検討

上述の通り流出のフィルタ分離の結果からは東北タイのムン川支流のM.35, M.92, M.101およびM.127における河川流出成分がほぼ単一であることが示された。この成分はどこからもたらされるものだろうか。東北タイは透水性に富む砂質土壌が比較的多いとされるが、これらの観測点が存在する流域の地形はきわめてなだらかであることから、降雨直後に地下水流出が大

量に河川に流れ込み、さらに比較的短時間のうちに流出を終えると考えすることは難しい。試薬を用いてコンケン郊外の畑地斜面（チー川流域）を対象に浅層地下水の流動を計測した結果として、水平方向の流動速度は1日0.1m程度かそれ以下であることが示されており〔谷山・三浦 1991〕、また東北タイの丘陵斜面における地下水位は雨期の間ほぼ一定の増加傾向を示して短期の大きな変動がみられないことも〔Williamson *et al.* 1989; Goto *et al.* 2008〕、東北タイにおける地下水の水平方向への流動性の低さを示している。地下水流出の河川流量への寄与はあるとしても、上記流出分離によって得られた応答曲線のように速やかに立ち上がった上で裾を引かずに終了するということは考えられない。また土壌の不飽和領域を水平方向に流出する中間流出も寄与率は低いと考えられる。透水性の高い砂質土壌が多く、かつ地表面傾斜が緩やか、という条件により下方浸透が卓越するためである。

地下水流出でも中間流出でもないとするれば、考えられるのは地表面流出のみである。実際に東北タイでは雨期中盤以降、降雨後に地表面を流れ下る水の流れがしばしば観察される。時には水田の畔を超える深さになり、低地全体が大きな川のようになることもある。そうした大規模な地表流が降雨直後のみならず数日にわたって続くこともある。M.35やM.101にみられるような緩やかでかつ裾を引かない流出は、緩傾斜の地表面をゆっくりと流れ下って河川に入る地表流によって形成されていると考えられる。

地表面流出が生じるメカニズムについては、地表面流出が流域内の土壌水分の飽和状況と降水量との関係に規定され、十分飽和状態にある領域にもたらされた降雨のみが地表流出に寄与するという考えが、1960年代以降Bestonら多くの研究者により提示されている〔Beston 1964〕。その発展の中でHewlettが提唱した変動流出寄与域（variable source area）の考えによれば、地表面流出源は流域内の土壌水分分布に応じて変化し、その流出源の位置や広がりによって流出のパターンが変化する〔Hewlett and Hibbert 1967〕。図6において、ムン川支流のうち2地点（M.101, M.127）について40日間、20日間と60日未満の短い区間についてのみ流出分離結果が示されているのは、これらの地点ではこれ以上の長期を対象として分離を実施すれば、分離周期をどのように設定しても降雨流出応答曲線に複数の極大値が現れ、分離が行えなかったためである。これは流出特性がピーク流出ごとに変化していることの表れであり、変動流出寄与域の考え方によくあてはまる。東北タイの降雨は局所性がきわめて強く、数キロメートルしか離れていない2つの観測点の間で降雨量が大きく異なることも珍しくないため、変動流出寄与域の効果は他の地域に比べて大きく表れるであろう。

同じ東北タイでもE.29, E.38, E.49B, M.91については流出が2つの成分に分離された。短期流出は地表面流出、長期流出は地下水流出と推測される。これらの観測点の流域では山地の占める割合が高く、そうした山地から地下水が供給されているものであろう。地表面が数メートルの土層・砂層に覆われている平原や丘陵とは異なり、山地ではしばしば基岩が地表面に露出

する。また地形勾配が丘陵に比べて大きいことから地下水の水平方向の流動（流下）速度も大きい。これらの条件により、山地では一度地下に浸透した降雨が再び地表面に現れやすく、湧水が河川の流出に寄与する割合が高くなるものと考えられる。

4. 河川流出特性と伝統的灌漑

表2に本章で扱った東北タイ・北タイの流量観測点について流域地形・流域特性、そして灌漑の種類ごとにまとめた。

流域に山地の占める割合が小さいとき、河川の流出は地表面流出のみによりほぼ構成される（M.35やM.92, M.101, M.127）。さらにM.35やM.101のように平原部の傾斜が緩やかで丘陵が少なく、かつ、すり鉢状に支流が集中する形態でないとき、地表面流出の河川流入は長時間にわたり、河川流量の増減も非常に緩やかで長い時間的周期を有するものとなる。典型的なタムノップ灌漑が行われているのはこうした流出特性をもつ河川沿いである。流れは緩やかである反面、タムノップが機能するような大きな流出がいつ発生するか予測することは難しく、安定した取水量も期待できない。上述した変動流出域の考え方によれば流出のパターンが流出ごとに変動している可能性もあり、流量増加が発生した時に、その後の推移を予測することも難しい。しかしこうした取水可能量の不安定性と予測困難性は、福井らが指摘するとおり、タムノップによって河川から溢れた水を水田に貯め込む（深水湛水させる）ことにより克服することが可能である。日本では河川から安定した取水を行うためにダムが建設されてきた。ダムは流量増加時に水を貯め、渇水時に水を放流することにより河川流量を安定させる。タムノップの場合、河川流量を安定させるのではなく、受益地である水田をいわば貯水池とすることにより、流量の不安定さを克服するのである〔福井・星川 2009: 134〕。事実、タムノップからの流入を受ける水田が1m以上の深さに湛水する様子もしばしば観察される。⁷⁾ 全量せき止めて取水するということは、河川流出を最大限有効利用するということでもある。地形勾配がきわめて

表2 地形と流出および灌漑形態

流域地形	観測点	流出構成要素	灌漑形態
平原のみ	M.35, M.101	緩やかな地表面流出	タムノップ
平野・平原+山地	P.20, P.56A, E.38, E.49B, M.91	比較的緩やかな地表面流出+地下水流出	水路付タムノップ もしくは井堰灌漑
平原+山地	E.29	急な地表面流出+地下水流出	—
平原+多数の丘陵	M.92	急な地表面流出	—
すり鉢状斜面	M.127	急な地表面流出	—

7) 非常に大まかな議論であるが、蒸発や流出によって日量20mmの水が水田から失われる場合、一度1m (1,000mm) の深さに水田を湛水させれば、その後50日間は補給灌漑が不要ということになる。

緩やかで水路による配水が行いにくいという地形条件も考え合わせれば、地表面流出を利用したタムノップ灌漑は東北タイの大部分を占める平原地域にとって最適な灌漑手法であるといってもよいだろう。

E.38 や E.49B, M.91, 北タイの河川 (P.20, P.56A) など、一定比率の山地を有する流域では地下水流出による安定した流量が期待できる。あらかじめ定められた受益地へと効率的に水を分配するための施設としての導水路の存在は、人間のコントロールの下で安定した取水が行われていることの証左となる。ムン川支流 Huai Thap Than 流域最上流部、ドンラック山麓の Huai Sen にも用水路を有するタムノップがある。ここでは毎年5月、タムノップから用水路を通じて水田に導水して田植えが行われており、タムノップ受益水田の生産安定性は極めて高い [Hoshikawa and Kobayashi 2004]。これらのタムノップにとって地表面流出の多くは利用価値のない余剰水となる。日本や北タイに比べると地表面流出に占める短期流出成分の割合が少なく、ピーク流出がタムノップを破壊したり家屋や人員に被害を及ぼしたりする危険性は少ないが、余剰水を下流に捨てる設備があればより効率的である。事実、上記 Huai Sen のタムノップでは1990年代に余水吐としてのコンクリート堰がタムノップの堤に設置され、補修の回数が大幅に減ったという。E.49B 近傍の用水路付タムノップも、その直上流で河道（あるいは人為掘削による水路）が水路により隣の河道と結び付けられており、これが余剰水を逃すための工夫である可能性もある。M.91 近傍のタムノップについても、タムノップに開口部があり河川流の一部を下流に逃せるようになっているか、あるいはせき止めるというよりも流路変更を行って分水路に全量を流し込む構造が採用されている。M.91 観測点が設置された Huai Samran の東隣 10km ほどのところを並行し、河川形態が類似する Huai Tik Chu の Thamnop Kradon の例も参考になるだろう。Thamnop Kradon は1930年代、僧侶の指導の下で地域住民によって建設されたタムノップであるが、1年目の雨期に決壊し、1940年代の政府による再建後も頻繁な補修を必要とした。補修の労を軽減したい住民らの請願により女王プロジェクトの下で1989年に堤の補強とコンクリート堰（余水吐）の設置が行われて現在に至っている [福井・星川 2009: 156–158]。このように山地の割合が高い流域では安定した流出が期待できる反面、降雨直後に大きなピークが生じやすく、タムノップによる取水には困難が伴う。E.38 ではタムノップではなくコンクリート製の近代的灌漑堰が建設されている。E.38 におけるピーク流出時の絶対流量が多く、タムノップの建設が行えなかったものとみられる。東北タイの中で地下水流出成分が多いこれらの河川は、日本や北タイの井堰灌漑が行われている河川と、流出特性の点において本質的な差はないとみてよい。流出特性の類似にもかかわらず、北タイでは木や石を用いた堰、東北タイでは土質材料を主とするタムノップがそれぞれ用いられた理由は、それぞれの地域での材料の入手容易性が第一に挙げられる。また、タムノップによりその場で水位を高く堰上げた方が合理的ということもあろう。取水地点を受益地の upstream に設けることで河川水面

と田面との比高差を解消するという井堰灌漑の手法を採るには、東北タイの地形勾配は緩やかすぎるのである。

東北タイの中では例外的な高峰の一つであるブークラドン（海拔1,316m）の麓に位置するE.29では、地下水流出はあるものの地表流出量の変動が激しく、タムノップの建設は困難と考えられる。コンクリート堰ならば建設可能であろうが、周囲が畑作地域で河川灌漑に対する需要が低いいため、灌漑堰は見当たらない。

最も水利用が難しいのがM.92やM.127のような流出特性をもつ河川である。安定した地下水流出成分が少ないばかりか、地表面流出も変動が非常に激しい。前章で言及したように半すり鉢状の流域であって短期間に地表面流出が集中しやすいこと（M.127）、小規模な丘陵が流域に数多く点在し、降雨の短期間流出が起きやすいこと（M.92）が流量変動の理由と考えられる。M.92の丘陵の傾斜は、地表面の早い流出には寄与しても、利用に供せるほど多くの地下水流出をもたらすほどではない。また、M.127のすり鉢の境界をなす分水嶺は幅2km程度。山地とは呼びえないほど微かなもので、頂部も含めすべて開墾されている。

V 結 論

河川を完全にせき止め、その全量を岸に流入させるタムノップのような構造物による灌漑は、緩斜面の平原が流域の大部分を占め、流出の大部分が緩やかな地表面流出により構成されている河川において可能であり、かつ非常に合理的であることが示された。こうした河川は東北タイの中では南部ムン川の南側（右岸）の平原に多く見られる。一方で同じ東北タイのタムノップでも、山際の地下水流出成分が多い河川では、地下水を利用対象としていることも明らかになった。第I章2節での問いに答えるとすれば、東北タイの支流河川の多くは流量変化が緩やかであり、タムノップで閉塞しても危険な洪水を引き起こさず、タムノップ自身も破壊されにくいということ、全量取水に関しては、平原地域のタムノップについては積極的適応であり、地下水流出を利用するタムノップについては、材料の制約上、余剰水を下流に逃す設備の建設がかつて困難だったことによる消極的対応であったということになる。

「平原型タムノップ」ともいえるべき地表面流出を利用したタムノップが多くみられる東北タイ南部と類似の地形は、カンボジアの西北部の非氾濫域にも見られ、やはり多くのタムノップが建設されている。また地形的に連続する東部タイのサケーオ県などにもタムノップらしきものがあることが航空写真などから確認できる。東南アジアの伝統的灌漑といえば北タイの「ムアンファイー」に代表される井堰灌漑が有名であるが、タムノップによる灌漑もまた、このムアンファイーと同様、東南アジア大陸部の広い範囲に分布している可能性がある。

謝 辞

本論文の執筆に当たっては福井捷朗京都大学名誉教授から多大なるご助言・ご教示を賜りました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

日本語文献

- 福井捷朗；星川圭介. 2009. 『タムノップ——タイ・カンボジアの消えつつある堰灌漑』 東京：めこん.
 日野幹雄；長谷部正彦. 1985. 『水文流出解析』 東京：森北出版.
 国土交通省四国整備局 香川河川国道事務所. <http://www.skr.mlit.go.jp/kagawa/river/seibikeikaku/abouttrisui.html> (2012 年 7 月 18 日確認).
 沖 大幹. 2004. 「降雨のスペクトル特性」『スペクトル解析ハンドブック』 日野幹雄（総編集），261–266 ページ所収. 東京：朝倉書店.
 佐藤俊郎；中村好男；森友利行. 1991. 「西広板羽目堰の構築技術と機能の保存」『農業土木学会誌』 59(12): 1365–1370.
 立川康人；藤田 暁；椎葉充晴；高棹琢馬. 1995. 「河川流量系列の単位時間間隔と流域面積の関係に関する分析」『水工学論文集』 39: 115–120.
 谷山一郎；三浦憲蔵. 1991. 「東北タイ砂質土壌における浅層地下水の挙動とキャッサバ湿害の関係」『土壌の物理性』 63: 3–12.

外国語文献

- Beston, Roger P. 1964. What Is Watershed Runoff? *Journal of Geography Research* 69(8): 1541–1552.
 Chumphon Naewchampa. 1996. Socio-economic Changes in the Mun River Basin 1900–1970. Paper presented at The Core University Seminar between CSEAS, Kyoto University and Thammasat University, Kyoto, October 1996.
 Dickinson, W. T.; and Whitely, H. 1970. Watershed Areas Contributing to Runoff. In *Results of Research on Representative and Experimental Basins: Proceedings of the Wellington Symposium*, December 1970, vol. 1 no. 96, pp. 12–26. IAHS Publ.
 Fukui, Hayao; Chumphon Naewchampa; and Hoshikawa, Keisuke. 2000. Evolution of Rain-fed Rice Cultivation in Northeast Thailand: Increased Production with Decreased Stability. *Global Environmental Research* 3(2): 145–154.
 Goto, Shinkichi; Kuwagata, Tsuneo; Pisarn Konghakote; Anan Polthanee; Ishigooka, Yasushi; Toritani, Hitoshi; and Hasegawa, Toshihiro. 2008. Characteristics of Water Balance in a Rainfed Paddy Field in Northeast Thailand. *Paddy and Water Environment* 6(1): 153–157.
 Hewlett, J. D.; and Hibbert, A. R. 1967. Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Regions. In *Forest Hydrology*, edited by W. E. Sopper and H. W. Lull, pp. 275–290. Oxford: Pergamon Press.
 Hoshikawa, Keisuke; and Kobayashi, Shintaro. 2004. Study on Structure and Function of an Earthen Bund Irrigation System in Northeast Thailand. *Paddy and Water Environment* 1(4): 165–171.
 ———. 2009. Effects of Topography on the Construction and Efficiency of Earthen Weirs for Rice Irrigation in Northeast Thailand. *Paddy and Water Management* 7(1): 17–25.
 Moroizumi, Toshitsugu; Hamada, Hiromasa; Somsak Sukchan; and Ikemoto, Masahiro. 2009. Soil Water Content and Water Balance in Rainfed Fields in Northeast Thailand. *Agricultural Water Management* 96(1): 160–166.
 Thailand, Division of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 1996. *Agricultural Statistics of Thailand 1995/96*. Bangkok.
 Thailand, National Statistical Office. 2008. *The 2008 Core Environment Indicators*. Bangkok. <http://web.nso.go.th/indicator/environ/forest.pdf> (2012 年 7 月 23 日確認).
 Wilk, J.; Andersson, L.; and Plermkamom, V. 2001. Hydrological Impacts of Forest Conversion to Agriculture in a Large River Basin in Northeast Thailand. *Hydrological Processes* 15: 2729–2748.

Williamson, D. R.; Peck, A. J.; Turner, J. V.; and Arunin, S. 1989. Groundwater Hydrology and Salinity in a Valley in Northeast Thailand. In *Groundwater Contamination: Proceedings of the Baltimore Symposium*, May 1989, no. 185, pp. 147–154. IAHS Publ.

タイ政府公文書館文書

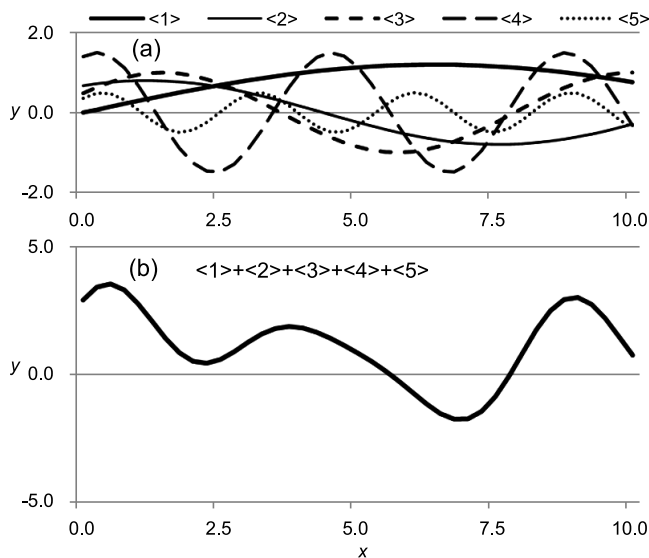
กส.1/3760 (KS.1/3760). 1922. มณฑลนครราชสีมาส่งรายงานตรวจการของนายจ้าง หัสถีธรรม พนักงานเกษตร (นาคอนラーチャーシーมەر州, 農務官報告).

กส.11/1139 (KS.11/1139). 1916. มณฑลนครราชสีมาส่งรายงานขุนธรรพพิทักษ์ได้นำนายคาเลนเฟลดตรวจการปิดท่านบที่ลำตะโคง จังหวัดบุรีรัมย์ และท่านบที่ลำเหมืองกลาง จังหวัดนครราชสีมา (นาคอนラーチャーシーมەر州บุรีรัมย์県ラムタコーン川およびナコンラーチャーシーเมอร์県ラムムアン克蘭ン川のダムノップ築造視察にカーレンフェル氏を案内したタラートンピタク公の報告).

【付録：使用した分析手法】

1. スペクトル解析を用いた流量変動分析

光は波としての性質を有している。通常目にする光はさまざまな周波数（色）・振幅（明るさは振幅の自乗に比例）・位相の正弦波が合成されたものであるが、プリズムに通せば周波数ごとのスペクトルに分解されて、このうち可視光にあたる赤から紫までの「虹色」を目にすることができる。プリズムを通す前の光が赤味を帯びていれば赤い部分がとりわけ明るくなる。このように光の波はプリズムを用いることにより周波数と明るさ（または強度；波の振幅の自乗に比例）の関係に変換することができる。この周波数と光の強度の関係を描いたグラフは周波数スペクトルと呼ばれ、その形状は光源のほか光が反射・透過してきた物質によって異なるため、光源の性質の分析や物質の同定に利用されている。



附図1 (a) 正弦関数<1>から<5> ($y=A \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot x/L + \alpha)$) の波形, (b) およびその合成波

注：ここでは $L=256$ であり、各関数の変数 A, n, α については附表1の通り。区間 $0 \leq x \leq 10$ について示している。

附表 1 附図 1 式 <1> から <5> の変数

	<1>	<2>	<3>	<4>	<5>
A	1.2	0.8	1.0	1.5	0.5
n	10	20	30	60	90
α	0.0	1.0	0.5	1.2	0.8

注： A は正弦波の振幅， n は区間 L における波数， α は位相のずれをそれぞれ示す。

光以外の波についてもさまざまな周波数・振幅・位相を持つ単純な正弦波の重ね合わせとして理解することができる。附図 1 に正弦波の足し合わせの単純な一例を示す。附表 1 には附図 1 にプロットした関数の各パラメータが記されている。波数 n の刻みと数を増やすことで、雑音の音波のように複雑な波からパルス波のように直線的な波まで表現することが可能である。正弦波の足し合わせとしての波動は、数学的な手法を用いて正弦波の周波数・強度・位相の関係に変換することができる。不規則に見える波も、周波数と強度の関係に変換することにより規則性が見出されることがあり、現在、自然系から人文・社会系まで広範な分野における波動現象が周波数と強度の関係から解析されており、その手法は光のスペクトルになぞらえてスペクトル解析と呼ばれる。本研究が対象とする河川流量の分析については、沖が、チャオプラヤー川を対象としてスペクトル解析を行い、流量変動にダム操作に伴う 3.5 日および 7 日の周期変動があることを見出している〔沖 2004〕ほか、国内外に適用事例がある。

周波数・振幅への変換手法として代表的なものにフーリエ変換があり、次式にて表される。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt$$

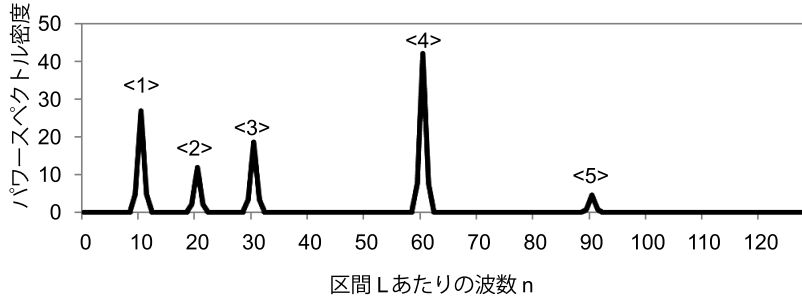
ここで $x(t)$ は変換前の波動を表す関数であり、流量などの時系列変化であれば t は時間。波が前後に無限に続くものとして積分される。変換後の値 $X(f)$ は周波数 f の波の振幅の大きさと位相のずれを示す複素関数であり、この絶対値 $|X(f)|$ を取ることにより実数の振幅を得る。観測データのように一定の間隔をもって採取された有限個の離散的なデータに対しては次式の有限離散的フーリエ変換が用意されている。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}$$

ここで N は観測数であるとともに変換後の周波数区間の数となる。 T は観測期間であり、 k は 0 から $N-1$ までの整数。さらに観測値の数 N を 2 の乗数（たとえば 512 や 1,024）にすることにより計算の高速化を図ることができ、この計算手法（アルゴリズム）は高速フーリエ変換（FFT）と呼ばれる。離散変換の場合は変換後の値 $X(k)$ を自乗して観測期間の長さ $T (= \Delta t \cdot N)$ で除することにより光の強度のスペクトルに相当する値の周波数に対する分布を得る。これを「パワースペクトル密度分布」という。附図 2 に FFT により得られた附図 1 の合成関数のパワースペクトル密度分布を示す。もとの正弦波の波数にあたる部分に、振幅に相当する大きさのピークが表れていることが見て取れる。

2. フィルタ分離自己回帰法による流出解析

過去の時系列値を説明変数、現時点の値を目的変数にとった回帰式が成り立つと仮定するモデルを自己回帰モデルと呼ぶ。日野・長谷部〔1985〕が提唱したフィルタ分離自己回帰法は、河川の流量を地下水流



附図2 附図1 (b) の合成関数のパワースペクトル密度

注：サンプリング数 $N=512$ ，サンプリング間隔 $\Delta t=1$ でFFTを実施した。

FFTでは $-N/2 \leq n \leq N/2$ の区間について結果が与えられるが，正と負の領域は折り返しで同じ値をとるため，正の領域のみを示している。

出・中間流出の2つ，あるいは地下水流出・中間流出・地表面流出の3つに分離すれば，各成分の流量についてそれぞれ次の自己回帰モデルが成り立つことを前提としている。

$$y_t^{(l)} = a_1^{(l)} \cdot y_{t-1}^{(l)} + a_2^{(l)} \cdot y_{t-2}^{(l)} + a_3^{(l)} \cdot y_{t-3}^{(l)} \dots a_n^{(l)} \cdot y_{t-n}^{(l)} + \varepsilon_{t-1}^{(l)} \quad (1)$$

ここで y ：各時点の流量， a ：自己相関係数， t ：タイムステップ（時間，または日）， l ：流出成分（地下水流出： $l=1$ ，中間流出： $l=2$ ，地表面流出： $l=3$ ）， ε ：残差である。回帰式（1）の求め方には幾通りかの手法があるが，本研究では自己相関係数 a はYule-Walker法を利用して算出し，モデルの次数はAIC情報量基準によって決定するという一般的な手法を採用した。

日単位の流量を扱うとき式（1）の残差 ε は前日の降雨による成分と見なすことができ，このとき

$$\varepsilon_{t-1}^{(l)} = b^{(l)} \cdot \lambda \cdot x_{t-1}^{(l)} \quad (2)$$

ここで x ：各流出成分に寄与する降水量， b ：前ステップ（ $t-1$ ）の降雨のうち当該ステップ（ t ）に流出する割合， λ ：降水量から流量への単位変換係数（たとえば流域面積（A）が km^2 ，降水量が mm/d ，流量が m^3/s で与えられる場合は $A/86.4$ ）。タイムステップ $t-1$ における降水量のうち流出成分 l となって流出した量は流量時系列から式（1）の変形である式（3）により逆推定できる。

$$\hat{x}_{t-1}^{(l)} = (y_t^{(l)} - a_1^{(l)} \cdot y_{t-1}^{(l)} - a_2^{(l)} \cdot y_{t-2}^{(l)} \dots - a_n^{(l)} \cdot y_{t-n}^{(l)}) / \lambda \cdot b \quad (3)$$

このほか下記，降雨に対する流量の応答関数も自己相関係数 a より算出できる。

$$y_t^{(l)} = h_0^{(l)} \cdot x_t^{(l)} + h_1^{(l)} \cdot x_{t-1}^{(l)} + \dots h_n^{(l)} \cdot x_{t-n}^{(l)} \quad (4)$$

ここで h は降雨が時間的にどのような按分で流出するかを表す応答係数である。過去の降雨時系列に経過時間に相当する応答係数を乗じて積算することにより次の時点の流量が得られる。通常は時間の経過に伴い流量に対する影響力は低下するので， h_1 を最大として n が増加するにしたがって減衰する。応答係数 h は下記によって算出される。

$$\left. \begin{aligned} h_0^{(t)} &= 0 \\ h_1^{(t)} &= 1 - a_1^{(t)} - a_2^{(t)} - \dots - a_n^{(t)} \\ h_2^{(t)} &= a_1^{(t)} \cdot h_1^{(t)} \\ h_t^{(t)} &= \sum_{j=1}^t h_{t-j}^{(t)} \cdot a_j^{(t)} \quad (t > 2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

この手法の要である流出成分の分離は、地下水流出・中間流出・早い流出の順に流出変動の周期が短くなることを利用して、短周期成分を除去する数値フィルタ（ローパスフィルタ）を用い、より長周期の成分から順次分離していくことにより実施する。この作業にあたって重要なパラメータとなる除去閾値周期は、流量逓減時の流量曲線変曲点などから得ることができる。詳細については日野・長谷部〔1985〕を参照のこと。