

論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻
平成 12 年度博士課程進学
氏 名 樋口 克宏
指導教員名 田中 忠次

論文題目 長大水路におけるゲート管理手法の改善による水利用効率向上に関する研究
－タイ東北部ホワイルワンかんがい地区を事例として

1 序論

1.1 背景

アジアモンスーン地域は、水資源の絶対量は、一見多いが、人口増、産業構造の変動などによる水需要の不均衡による深刻な水不足に悩まされている。水資源の開発も取り組まれてきたが、貯水池の適地も限られており、新規の開発が困難になってきている。水資源の利用効率を高めることに多大な努力が必要とされている。この中で、使用量が特に大きい農業用水の水利用効率の向上が大きな課題となっている。

タイ国内の産業の中で農業部門は、名目 GDP の 10% 程度のシェアを占める。今後も、農業部門を同程度に保つよう政策策定されている。

タイでは、農業協同組合省立灌漑局が灌漑事業を行っており、大規模灌漑において、水利用効率が低く、この効率の向上が望まれている。

1.2 既往の研究

灌漑モデルとしては、タイでは、Water Allocation Scheduling And Monitoring (WASAM) や North-East Water Management And Systems Improvement Project (NEWMASIP) が適用されている。これは、有効雨量、作物種から日灌漑水量を週毎に補正して算出している。

その中では、操作遅れ、用水到達遅れ等の管理要素からの検討がされてはならず、操作の影響が考慮できない。このような問題を扱うためには、用水を定常的な扱いではなく、非定常として扱う必要がある。

1.3 目的

大規模灌漑地域での水利用効率の向上に向けて

1. 降水の時間・空間的変動の特性を把握すること
2. 水分配の現状と課題を分析すること
3. 水分配の管理向上のための現地モデルを作成すること
4. ゲート操作スケジュールを変動させた場合の水利用効率向上の可能性を検討すること

を検討する。

2 タイ東北部 降水特性の検討

2.1 背景

水資源計画上、対象地区の最大のインプットである降水の変動を知る必要がある。特に、灌漑計画において降水量の変動や相関の把握の重要である。

タイにおける降水傾向に関する研究として、Tebakari et al.(2005) は、過去約 20 年間 (1982-2000) の 27 ヶ所での記録を元に経年変動を調べ、13 ヶ所でのパン蒸発量の減少傾向 (信頼度 95%) と降水量の変化傾向がないこと (信頼度 90%) を明らかにした。また、Fukui et al.(2000) は、タイ東北部の降水量データ (1955-1993) の年降水量の変動を解析し、Nakhon Ratchashima と Ubon Ratchathani, Udon Thani の 3 地点のうち、南西部の Nakhon Ratchashima で降水量の減少傾向を示した。

2.2 目的

タイ東北部 16 ヶ所、灌漑プロジェクトを含むタウントンニ県 10 ヶ所・コンケン県 14 ヶ所における年・四半期降水量の経年変化を解析し、降水の特徴を検討する。

2.3 手法

2.3.1 降水指標

タイの水文年は 1 月から 12 月とした。また、第一四半期 (1~3 月) 第二四半期 (4~6 月) 第三四半期 (7~9 月) 第四四半期 (10~12 月) である。

降水指標としては、年降水量の長期トレンド、四半期降水量の長期トレンドを用いた。

2.3.2 手法

経年トレンドの検出には、ノンパラメトリックのトレンド検定法である Mann-Kendall 検定法 (Mann, 1945; Kendall and Gibbons, 1990) を用いた

また、トレンドの傾きについては、ノンパラメトリック手法である Sen 検定 (Sen,1968) を用いて求めた。

時系列データの回帰直線 $f(t)$ を式 (1) と仮定する。

$$f(t) = Q t + B \quad (1)$$

ここで、 Q は回帰係数、 B は定数。

2.4 対象地域

タイ東北部 タイ東北部の 16 地点を対象とした。対象の観測期間は 48~51 年である。北部 6 地点、中央部

5 地点、南部 5 地点

2.5 解析結果

2.5.1 トレンドの解析

タイ東北部で 50 年でのトレンド分析を行った結果を図 1 に示す。

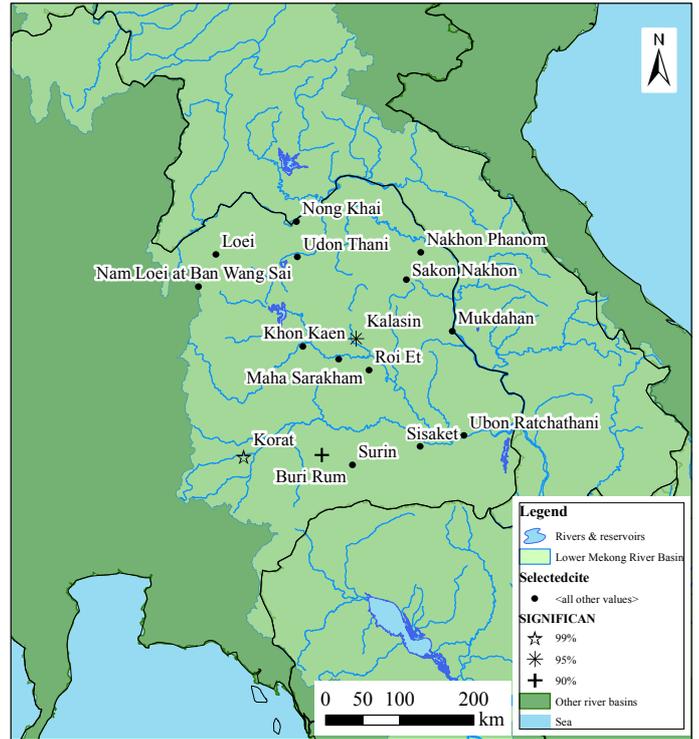


図 1 タイ東北部における年降水量のトレンド

Trend of Annual Precipitation in Northeast Thailand
(1950-2000)

2.6 結論

時間分布のトレンド分析した結果、タイ東北部では、年降水量が、南西部で減少傾向が見られた。空間分布の相関分析した結果、タイ東北部のホワイルワン、ノンワイ灌漑地区では同一灌漑地区における観測値に相関が見られなかった。特に、特に第一四半期と第三四半期の相関が低かった。第三四半期の降水量が 8 割近くを占め、灌漑時期としても雨期灌漑の中心的な時期にもあたる。そのため、第三四半期の降水量の分布に配慮した水分配が必要となる。

3 灌漑水配分の現状と課題

3.1 背景と目的

資金・職員数制約から生じる非効率な水管理の対処法として、世界的に農民参加型水管理手法が進められ (World Bank,1993)、タイ・インド・中国・カンボジア等においても導入が図られている。受益者管理へ移行する場合、水配分が適正に維持されることが前提となり、指標として、公平性、妥当性、安定性等が提案されている。

この章では、タイの中でも水管理技術の高いホワイルワン地区を例として、水配分の現状と問題を整理する。まず、上下流間での水配分と公平性を時系列分析し、つづいて、幹線水路から直接分水する末端水路の水量（以下、直接分水量）を、水収支法により推定、水配分の公平性と直接分水量の取水行動を分析する。そして、今後、農民参加型へ移行していく場合の管理の問題点を整理する。

3.2 使用データ

管理記録には、ホワイルワン地区左岸幹線の 2002/03 年乾期 (2003/1/1~4/20)、2004 年雨期 (2004/6/16~10/25) をもちいた。

3.2.1 手法

ゾーンの境界で測定された幹線流量から、ゾーン内で取水された日用水量を求め、ゾーン毎に用水量 I (mm) を算定した。そして、ゾーン別水配分を月毎に集計した。

各ゾーンでの水需要量の算定には、FAO(1998) の算定式を用いた。作物別要求水量 CWR_C は、次式を用いた。

$$CWR_C = ET_p \times K_C + LP + P - ER \quad (2)$$

ここで、 CWR_C :作物種 C における作物別要求水量 (mm)、 ET_p :可能蒸発散量 (mm)、 K_C :作物係数、 LP :代かき用水 (mm)、 P :浸透量 (mm)。

粗用水量 Q_{demand} は作物要求量と灌漑効率を用いて算出する。

$$Q_{demand} = \sum_C \frac{CWR_C}{E_S} \quad (3)$$

ここで、 E_S :灌漑効率。

また、上下流の公平性の指標 P_E は、次式を用いた

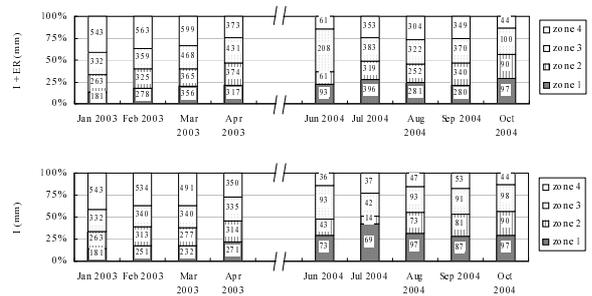


図 2 上下流の水配分 (2003 年乾期, 2004 年雨期)

Water distribution (dry season, 2003 and rainy season, 2004)

グラフの柱内の数字は、水頭 (mm) を示す。

(Molden,1990) .

$$P_E = \frac{1}{T} \sum_T Cov_R \left(\frac{I}{Q_{demand}} \right) \quad (4)$$

ここで、 T :測定期間数 (月)、 Cov_R :地域間の変動係数 (標準偏差を平均で除した値)、 I :実用水量 (mm)、 Q_{demand} :粗用水量 (mm)。

3.2.2 結果と考察

ゾーン毎の用水量と、有効降雨を求めた (図 2)。図 2 において、配分の傾向をみるために、分水量は全体取水量に対する比率で示した。(I+ER) は、灌漑初期 1, 2 月には、ゾーン 3, 4 で高く、全体の 6 割以上を占めている。灌漑後期の 4 月では、各ゾーンへの分水量は、ほぼ均等になった。期間を通しての公平性 P_E は、0.27 であった。

どちらの期間においても、上下流間での水配分は、有効降雨を加味した場合、灌漑開始時には不均等な水配分が、期間中には是正され、期間後半になり均等な配分に近づく傾向がみられた。

3.3 結論

幹線全線での上下流間での水配分は、有効降雨を考慮した場合、灌漑開始時には不均等な水配分が、期間中には是正され、期間後半になり公平な配分に近づく傾向がみられた。しかし、最下流のゾーンは、稲の生長に支障が出るほどの水不足が認められた。

4 水配分モデルによる水利用効率の向上

4.1 はじめに

今後灌漑用地が拡大できる可能性は難しいとされている。そこで、灌漑用水を確保するには、今ある水資源の効率的利用がすすめられている。効率的な水利用のため、施設の改修や農業気象情報の収集、農民との管理協力など様々な取り組みが行われている。特に、農民との協力体制が、農民参加型水管理手法の推進も受け、広く導入されている。しかし、どの程度の効果が期待でき、灌漑事務所側の役割はどう変わるのかについての研究は十分になされていない。用水管理は、日々の操作により、非定常的に変化する部分と、週・旬単位でみた場合の定常的な部分とを同時に考慮する必要がある。そのため、非定常の数値解析手法が必要である。特に、現地の操作の影響として、操作人の人数や行動を含めてモデル化しているモデルはない。

4.2 目的

1. ホワイルワン灌漑地区の幹線を次の点を考慮してモデル化

- 操作人の人数と動線に応じたゲート操作スケジュール
- 目標流量に対するゲート開度が決定可能

2. 操作人数が増加した場合の影響を灌漑期間 2 週間で評価

4.3 非定常モデルの構築

4.3.1 非定常一次元モデルの概要

非定常計算には、中村・白石 (1971) らの一次元モデルを用いた。基礎方程式は、

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S + \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6)$$

ここで、 v は流速 (ms^{-1})、 t は時間 (s)、 g は重力加速度 (ms^{-2})、 h は水深 (m)、 n はマンニングの粗度係数、 R は水力水深 (m)、 A は断面積 (m^2)、 Q は流量 ($m^3 s^{-1}$)、 q は横流入 ($m^3 s^{-1}$) である。

差分には、時間・空間中央差分を用いる。

水理構造物のモデル表現 水理構造物として、幹線内の構造物として、チェックゲート、サイホン、横越流堰、支線への分土工を次のようにモデル表現した。

チェックゲートのモデル表現 オリフィス式ゲート下部からの流出と上流からの越流を考慮する。

$$Q_{under} = C \cdot G_o W_G \sqrt{2g(H_{up} - H_{down})} \quad (7)$$

ここで、 C :ゲート係数 (=0.6)、 G_o ゲート開度 (m)、 W_G :ゲート幅 (m)、 H_{up} :上流側水位 (m)、 H_{down} :下流側水位 (m)

$$Q_{top} = KBH^{\frac{3}{2}} \\ K = 1.785 + \left(\frac{0.00295}{H} + 0.237 \frac{H}{H_d} \right) (1 + \varepsilon) \quad (8)$$

ここで、 C :ゲート係数 (=0.6)、 G_o ゲート開度 (m)、 W_G :ゲート幅 (m)、 H_{up} :上流側水位 H_{down} :下流側水位
サイホンのモデル表現 サイホンの通過流量の算出には、管路の抵抗則に Darcy-Weisbach を用いた式 (9)-(11) を使用した。

$$V = 2g\Delta H / \left\{ f_v + f_o + \frac{8n^2 g}{(D/4)^{1/3}} \frac{l}{D} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$Q = AV \quad (10)$$

$$= \frac{\pi D^2}{4} \frac{G_o}{D} V \quad (11)$$

ここで、 H :上下流水位差 (m)、 f_v :ゲート損失係数、 f_o :出口損失 (=1.0)、 l : 管路長 (m)、 D : 管径 (m)。

4.4 ゲート管理のモデル化

ゲート操作時間を次式で算定した。

$$T_i = T_{ini} + \left(\frac{L}{N_G} \frac{1}{V_{mov}} + T_{ope} \right) (i - 1) + T_{delay} \quad (12)$$

ここで T_i : ゲート i での操作時刻 (min)、 T_{ini} : オフィスの就業時刻 (min)、 L : 操作担当区間 (m)、 N_G : 操作担当ゲート数、 V_{mov} : 移動速度 ($m \min^{-1}$)、 T_{ope} : ゲートあたりの操作時間 (min)、 T_{delay} : 操作担当区間に達するまでの時間 (min)

4.5 水路粗度係数の決定

4.5.1 対象地区

ホワイルワン灌漑地区の左岸幹線水路をモデル対象とした。全長 48.9km、最大流量 $6.3m^3/s$ 、受益面積 8,000ha であり、幹線と支線、副支線計 20 本の水路

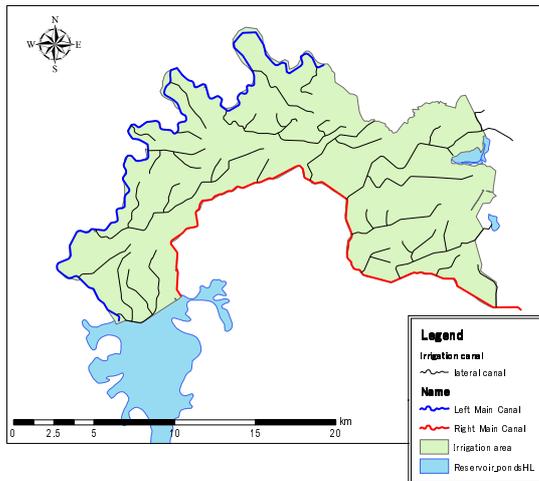


図3 ホワイルワン灌漑地区の用水路図

からなる(図3)。

4.5.2 流量観測

期間は、2006年3月6-14日に行った。測定項目は、水位と、流量、ゲート開度である。水位計には、HOBO水位計12本を水路に設置した。

4.5.3 同定と検証

流量観測の2日間のデータで、マンニングの粗度係数を求めた。粗度係数を $n=0.010, 0.012, 0.014, 0.018, 0.025$ の5段階を与え、水深の誤差量を検討した。その結果、 $n=0.012$ で水深の相対誤差量が最小となった。この粗度係数を用いて、3月6-13日の水深データと比較した場合、十分な適合性が得られた。

4.6 結果と考察

人数の影響を考察するため、期間として1日、2日での検討ならびに2週間でのシミュレーションを行った。

4.6.1 スケジュールの設定

式12のパラメータを、実測をふまえ、次のように定めた。 $L = 10,000$ m, $N_G = 3$, $V_{mov} = 300$ m min^{-1} , $T_{ope} = 10$ min.

表1に各ゲートの操作時刻を示す。この表は、操作人数と開始時間を変えた場合を想定している。

ここで、case1は、操作人数がゲート数と同数程度。case2~4は、操作人数が1人、case5は2人とした。case2~4では、操作開始時刻の遅れが与える影響も考察する。遅れ時間なし ($T_{ini} = 0$ min, $T_{delay} = 0$ min),

1時間遅れ ($T_{ini} = 60$ min, $T_{delay} = 0$ min), 2時間遅れ ($T_{ini} = 120$ min, $T_{delay} = 0$ min) に対応する。

4.6.2 評価の方法

評価には、目標流量に対する相対誤差を用いた。

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_i |Vc_i - Vd_i|}{\sum_i Vd_i}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sum_i (Vc_i - Vd_i)}{\sum_i Vd_i}, \quad (14)$$

ここで Vc_i : ゲート i からの流出量, Vd_i : ゲート i からの計画流量。

ε_a は該当ゾーン内での配分の影響を示す指標であり, ε_b は、該当ゾーンを通過する流量に与える影響を表す指標である。

4.6.3 2週間での影響分析

代掻期間と通常期間に対応した全幹線での異なる流量に対して解析を行った。表2に目標流量を示す。

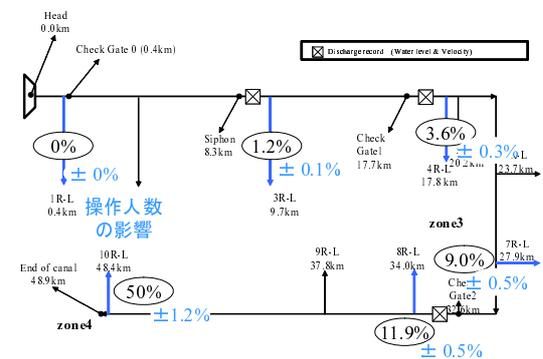


図4 幹線全体への操作人数の影響

4.7 結論

操作開始遅れが2時間以内、かつ、設定開度が事前にと与えられている条件で、一日一回操作する場合を考察した。その結果、操作人の数を増やしたとしても、評価値は1%程度の変化であり、流量への影響はほとんどない。特に、上流・中流部では、設定流量に対して、適切なゲート開度が与えられると、必要流量が分水可能で、10%以内の誤差となる。しかし、下流部では、流量変動が大きい場合、誤差が10%以上であり、事前開放等の別の措置が必要であることが分かった。

表 1 ゲート操作時間

	Person No.		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
	Delay	50%	Many	0	1	1	2
			0	1:00	2:00	0	
Head of main canal	60%	50%	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
Gate 1	10%	50%	9:00	9:00	10:00	11:00	9:00
Gate 2	27%	0%	9:00	9:30	10:30	11:30	9:30
Gate 3	27%	27%	9:00	10:00	11:00	12:00	10:00
Gate 1-1	80%	30%	9:00	9:00	10:00	11:00	11:00
Gate 1-2	0%	20%	9:00	9:30	10:30	11:30	11:30
Gate 1-3	0%	0%	9:00	10:00	11:00	12:00	12:00
Gate 2-1		25%	9:00	9:00	10:00	11:00	10:30
Gate 2-2		20%	9:00	9:30	10:30	11:30	11:00
Gate 2-3		15%	9:00	10:00	11:00	12:00	11:30
Gate 3-1	80%	30%	9:00	9:00	10:00	11:00	10:00
Gate 3-2	0%	20%	9:00	9:30	10:30	11:30	10:30
Gate 3-3	0%	0%	9:00	10:00	11:00	12:00	11:00

表 2 番水時の配分流量

Date	Upstream									sub total	Downstream	Total
	1R-L			2R-L			3R-L					
	1L-1R-L	2L-1R-L	3L-1R-L	1L-2R-L	2L-2R-L	3L-2R-L	1L-3R-L	2L-3R-L	3L-3R-L			
Sep 28				0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	1.00	2.00	1.00	3.00
Sep 29				0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	1.00	2.00	1.00	3.00
Sep 30				0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	1.00	2.00	1.00	3.00
Oct 1	1.00									1.00	2.00	3.00
Oct 2	1.00									1.00	2.00	3.00
Oct 3	0.50	0.50								1.00	2.00	3.00
Oct 4		1.00								1.00	2.00	3.00
Oct 5		0.50	0.50							1.00	2.00	3.00
Oct 6			1.00							1.00	2.00	3.00
Oct 7			1.00							1.00	2.00	3.00
Oct 8				0.33	0.33	0.33	1.00			2.00	1.00	3.00
Oct 9				0.33	0.33	0.33	1.00			2.00	1.00	3.00
Oct 10				0.33	0.33	0.33	0.50	0.50		2.00	1.00	3.00
Oct 11				0.33	0.33	0.33		1.00		2.00	1.00	3.00
Oct 12				0.33	0.33	0.33		0.50	0.50	2.00	1.00	3.00
Oct 13				0.33	0.33	0.33			1.00	2.00	1.00	3.00
Oct 14				0.33	0.33	0.33			1.00	2.00	1.00	3.00

unit: m3 s-1

5 結語

第2章では、時間分布のトレンド分析した結果、タイ東北部では、年降水量が、南西部で減少傾向が見られた。空間分布の相関分析した結果、タイ東北部のホワイルワン、ノンワイ灌漑地区では同一灌漑地区における観測値に相関が見られなかった。特に、特に第一四半期と第三四半期の相関が低かった。

第3章では、幹線全線での上下流間での水分配は、評価値が0.26でほぼ公平であるノに対し、幹線からの直接取水により、ゾーン内での公平性が0.56という悪い結果となった。幹線全体では、灌漑開始時には不均等な水分配が、期間中に是正され、期間後半になり公平な配分に近づく傾向がみられた。しかし、最下流のゾーンは、稲の生長に支障が出るほどの水不足であること。また、ゾーン1内の直接分水量の解析から、農民の取水行動は、必要な雨量と灌漑水量が補給された段階で取水行動が抑制され、取水を行わなくなることが分かった。第4章では、ゲート操作人数の影響と水分配の定量的把握を行うため、分水工と余水吐からなる一次元水路モデルを構築した。人数増加の影響は、2週間の灌漑期間では、必要分水量に対して1%程度であり、提案したモデルで決定した開度を用いることで上流部中流部は、妥当な分水ができることを示した。