

タイ国における地域別水使用量の推定方法に関する基礎的検討

手計 太一 ・ 工藤 太一^{*1}

(工学部環境工学科)

水利用のデータは先進国においても入手困難なデータで、越境導水や排水が複雑に混在しており、社会、経済活動による水資源へのインパクトを評価することが極めて難しい。本研究の目的は国勢調査データを基に過去の統計データを利用して将来のタイ国における地域別水使用量の推定法を検討することである。本稿では、Growth/Sigmoid 曲線を利用して過去の水使用量の推定と将来予測を試みた。その結果、生活用水、農業用水ともに極めて精度良く過去の水使用量を再現することができた。また、将来予測においても、本解析による推定値と FAO の統計データを比較すると 1%以下の誤差で推定することができた。本手法によって、将来におけるタイ国の地域別・産業別水使用量の推定が可能となった。

キーワード：生活用水、農業用水、工業用水、水使用、国勢調査、タイ国

1. はじめに

水の惑星と呼ばれる地球には約 14 億 m^3 の水が存在しているが、我々人類が使うことのできる淡水はそのうちわずか 1%にすぎない。古代より人類は水の重要性に気づき、多くの文化・文明は河川の畔で広がっていった。歴史に残る為政者たちの多くは、水を制する者たちであった。現在なお利用されている水道施設を建設した古代ローマ帝国、ナイル川流域を广大で肥沃な穀倉地帯へと開発した古代エジプト文明などが代表として挙げられよう。また、我が国においては、武田信玄が治水事業の一環として考案した霞堤は信玄堤と呼ばれ、現在なお広く利用されている。さらに、湿地帯であった関東平野を一大穀倉地帯へと変えた徳川家康による利根川東遷事業は、約 260 年に亘る徳川幕府を支え、現在の東京の発展の基礎的事業であったと言っても過言ではない。

「水を制する者は国を制する」という言葉の通り、これまでに水を求めて幾多の戦争・紛争が繰り広げられてきた。現代においても、例えば 1967 年の 6 日間戦争は、まさにヨルダン川の利用を求めてイスラエルとパレスチナの争いであった。その結果は現在でもイスラエルによるヨルダン川の水源の支配や地下帯水層の管理にまで至る。

その他にも代表例を挙げると、コロラド川（アメリカとメキシコ）、シルダリヤ川とアムダリヤ川（キルギス、タジキスタン、ウズベキスタン、カザフスタン）、ユーフラテス川（トルコとイラク）、ガンジス川とブラマプトラ川（バングラデシュとインド）、メコン川（タイ、カンボジア、ベトナム、ラオス、ミャンマー、中国）など多くの国際河川において利害のコンフリクトが起きている。

水は、生命にとって必要不可欠なものであり、社会・経

済活動を通して人類が発展するためには水資源開発が最も重要である。上述のような戦争や紛争が絶えないのは、常に淡水資源が不足していることにある。

地球温暖化に伴う気候変動、開発途上国における人口増大、経済成長、都市化による水需要の増大といった社会変化が水資源に大きな影響を与えている。また、将来的な気候変動による水資源の時空間分布の隔たりといった問題が懸念されている。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第 4 次評価報告書においても気候変動が水資源に様々な影響を与えることを検討しており、対応策（水資源計画）としては水資源の確保の観点から極めて重要であると議論されている⁽¹⁾。

現在、気候変動が水資源に与える影響について推測されている問題は、洪水と渇水の頻発、積雪水資源の減少、海面上昇の影響、水質の影響などが挙げられている⁽²⁾。この複雑化した水資源問題における対応策として、気候の予測、社会・経済変化の予測が重要であり、これらに適応できる精度の良い予測モデルの構築が急務であるといえる。

従来の研究では、例えば、沖ら（2002）は気候変動を取り上げ、全世界における将来の水資源需給を評価している。将来の水需給に関しては、人口増加の影響が最も支配的であるものの、温暖化時の水循環予測結果は、地球温暖化によって全体として水循環が活発となり、水需給が緩和されると論じている。また、人口増加や都市への集中による水不足が主に途上国で懸念されると指摘している⁽³⁾。

さらに、花崎ら（2006）は全球統合モデルを開発し、世界の水需給変化の推定、水資源評価を検討し、三項目について課題を挙げている。このモデルは陸面過程、河川、農業、貯留池操作の四つのサブモデルからなる。水需要バランスは地域差が大きいので、対象となる流域や国を絞って

*1 福岡大学大学院工学研究科建設工学専攻

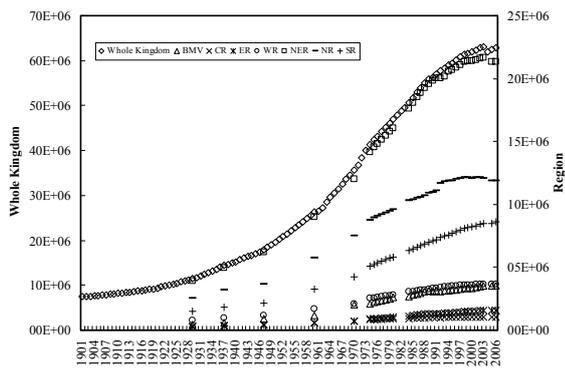


図 1 全国，地域別における 1901 年から 2006 年までの人口の経年変化

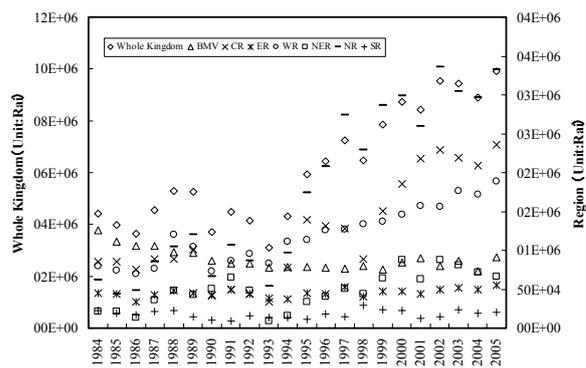


図 4 全国，地域別における 1984 年から 2005 年までの米作で利用された灌漑面積の経年変化 (単位: Rai)

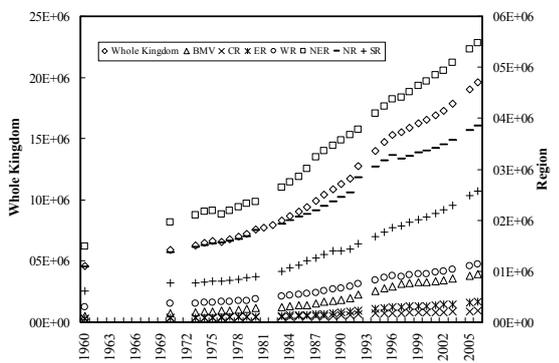


図 2 全国，地域別における 1960 年から 2006 年までの世帯数の経年変化

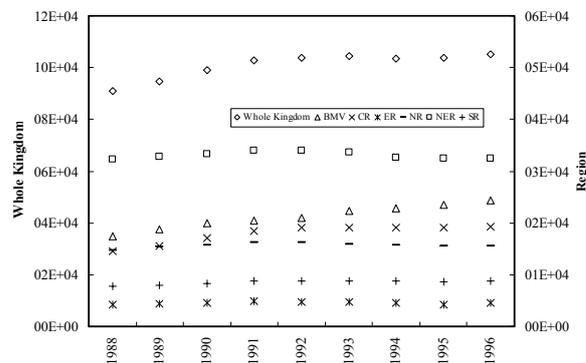


図 5 全国，地域別における 1988 年から 1996 年までの工場数 (稼働中) の経年変化

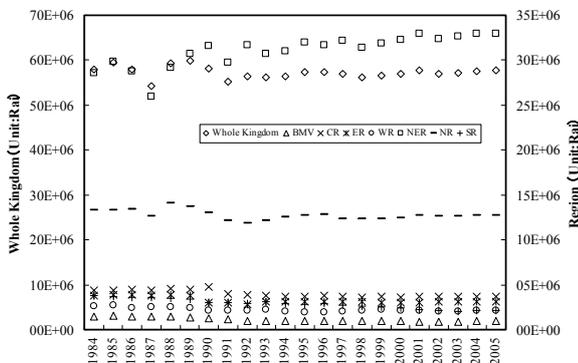


図 3 全国，地域別における 1984 年から 2005 年までの米作で利用された天水田面積の経年変化 (単位: Rai)

2. データ

本研究では、「容易に入手可能なデータ」を利用して水使用量の推定を行うため、国勢調査データから得られるデータに着目した。研究対象としたタイ国では、「Statistical Yearbook Thailand」, 「Agricultural Statistics of Thailand」がほぼ毎年刊行されている。本研究では上記の「Statistical Yearbook Thailand」(1916 年から 2006 年までの 91 年分) から得られたデータを使用している。その中から、生活用水データ (人口, 世帯数), 農業用水データ (水田面積, 灌漑面積), 工業用水データ (工場数) を抽出した。

図 1 から図 5 は人口, 世帯数, 天水田・灌漑面積, 工場数の経年変化を示す。人口は全国で見ると, 1901 年から単調に増加しているものの, 1990 年代に入りやや増加傾向は小さくなっている。地域別に見ると, 各地域の増加傾向に違いはあるが, 単調に増加している。世帯数は人口と同様の傾向にある。天水田・灌漑面積 (※1Rai=1600m²) は全国, 地域ともに 1980 年代後半まで増加傾向にあるが, 1990 年代に入ると, 横ばいもしくは減少傾向にある。工場数においては, 「Statistical Yearbook Thailand」に記載されていなかったため, Web Site of Department of Industrial Works, Ministry of Industry のデータを引用した。工場数のデータは非常に少なかったため, 経年的な変化傾向は認められないが,

詳細な解析を進めることが第一の課題, 気候モデルの持つバイアスが原因と考えられ, どう対処していくかが第二の課題, 土地利用変化を含めた水資源の評価が第三の課題であると見解を述べている^{(4),(5)}。

水は地域的・時間的に偏在する資源である。地域別に, 水資源と社会変化・経済発展を定量的に評価し, 将来の水資源予測の推定が必要である。本研究の目的は開発途上国資源予測モデルを構築することである。本稿では, 国勢調査データを利用した簡便な水利用予測モデルの構築を試み, その信頼性について検討を行った。

全国、地域ともに横ばいにある。

3. 解析手法

3.1 原単位

本研究では地域別・用途別の水使用量を定量的に明らかにするため、原単位法を利用した。原単位法とは水使用量を基本フレームと原単位の積で表すもので、将来の基本フレームと原単位を推定することにより水使用量を予測した⁽⁶⁾。

以下に導出方法を示す。

$$\text{生活用水} = \text{人口数} \times \text{原単位} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{農業用水} = \text{作付面積} \times \text{原単位} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{工業用水} = \text{工場数} \times \text{原単位} \dots \dots \dots (3)$$

生活用水の原単位は、Lada et al.(2005)が推計した世帯数あたりの生活用水量（都心部：404L/日、地方部：279L/日）を利用し⁽⁷⁾、この値を世帯数構成人数で除すことにより、一人あたりの生活用水量、（都心部：115.4L/日、地方部：79.7L/日）を算出した。ここで、同国中心部であるバンコク首都圏以外は「地方部」の値を利用した。

農業用水の原単位は、国連食糧農業機関（FAO）によるAQUASTAT DATABASEのデータを利用した⁽⁸⁾。2000年の農業用水量（ $82.8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ ）を同じく2000年の作付面積で除し、単位面積あたりの農業用水量（ $0.79 \text{ m}^3/\text{yr}$ ）を算出した。

工業用水の原単位は、農業用水と同様に、AQUASTAT DATABASEのデータを利用した。1990年の工業用水量（ $1.44 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ ）を、同じく2000年の工場数で除し、単位工場数あたりの工業用水量（ $14546.2 \text{ m}^3/\text{yr}$ ）を算出した。

3.2 水使用量の推定式

水使用量の推定式として、Growth 曲線と Sigmoid 曲線を利用した。様々な関数の中から以下の2つの関数を利用し、

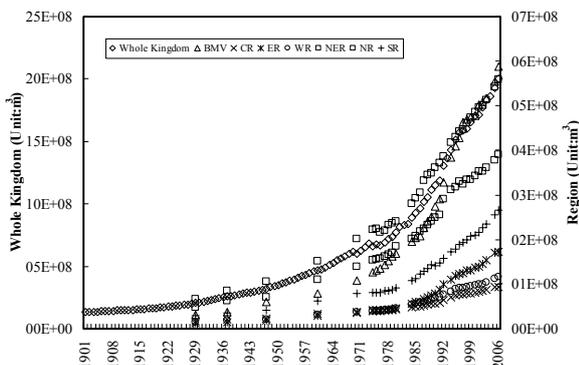


図6 全国、地域別における1901年から2006年までの生活用水量の経年変化(単位:m³)

水使用量の推定を行った。(4)式はロジスティック関数、(5)式は Hill 関数である。

$$y = \frac{b \cdot e^{-ax}}{c + d \cdot e^{-ax}} \dots \dots \dots (4)$$

$$y = A + (B - A) \frac{x^n}{k^n + x^n} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、各式のパラメータ (a~d,A,B,k,n) の推定には、非線形最小自乗法の一つである Levenberg-Marquardt 法を利用した。Levenberg-Marquardt 法は多くの多次元非線形関数でパラメータを発散させずに効率よく収束させる（探索する）方法として知られている。

前章で述べた統計データを利用して、原単位法により水使用量を算出した結果を推定式に適用させて、2100年までの水使用量予測の再現、将来予測期間において比較、評価を行った。

4. 解析結果

4.1 生活用水

タイ国の用途別生活用水（タイ国における生活用水の内訳）は中心部バンコク首都圏で、風呂：78L/日、洗濯：52L/日、トイレ：31L/日、その他：28L/日、Loss：24L/日、炊事：4L/日が主に使用されている⁽⁹⁾。

図6は1901年から2006年までの生活用水量の経年変化である。全国では、1901年から単調に増加しているものの、1990年代に入り、特に増加傾向は大きくなっている。地域別では、バンコク首都圏と東北部が1970年代に入り、急激に増加している。その他の地域は、増減傾向に違いはあるが、単調に増加している。

4.2 農業用水

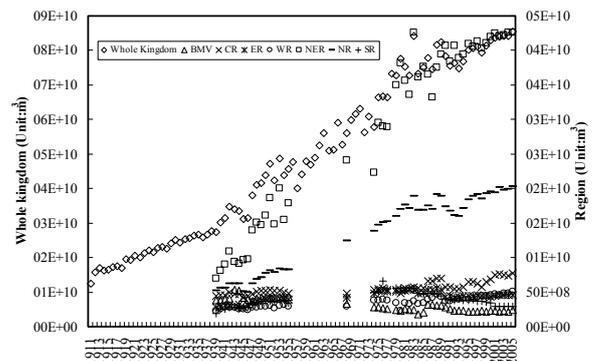


図7 全国、地域別における1911年から2005年までの農業用水量の経年変化(単位:m³)

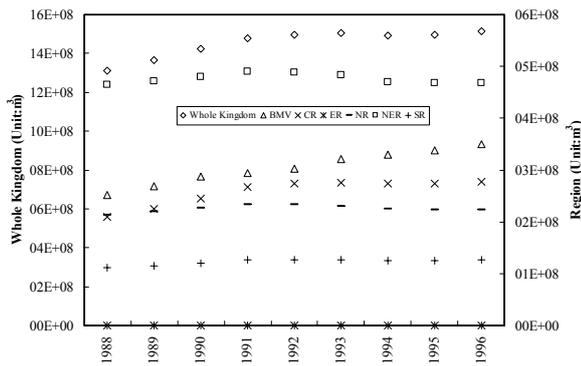


図 8 全国、地域別における 1988 年から 1996 年までの工業用水量の経年変化(単位:m³)

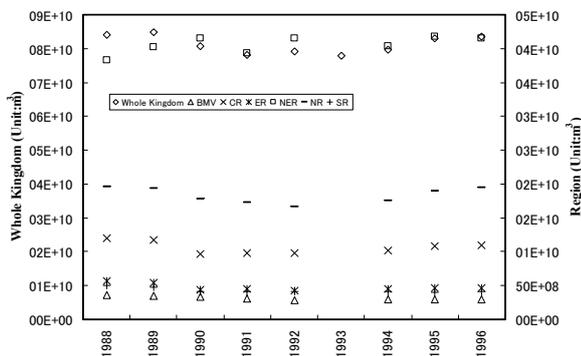


図 9 全国、地域別における 1988 年から 1996 年までの総水使用量の経年変化(単位:m³)

タイ国は、国土面積約 51 万 3145km²のうち約 40%が耕地であり、その半分を稲作地が占める。農業用水は、水稻の生育に必要な水田灌漑用水、野菜・果樹等の生育等に必要な畑地灌漑用水、家畜飼育等に必要な畜産用水に大別される。

図 7 は 1911 年から 2005 年までの農業用水量の経年変化である。全国では、降水量の影響があり、年変動が大きいですが、経年的には増加傾向にある。地域別に見ると、東北部が 1970 年代に入り、急激に増加しており、他の地域は 1990 年代に入り、横ばいもしくは減少傾向にある。

4. 3 工業用水

図 8 は 1988 年から 1996 年までの工業用水量の経年変化である。工場数のデータが少ないため、経年的な変化傾向を評価することはできなかった。

4. 4 地域別水使用量

図 9 は 1988 年から 1996 年までの総水使用量の経年変化である。本解析では、データ不足により総水使用量は 1988 年から 1996 年までの結果が得られた。

1996 年のデータに着目すると、全国で 836 億 3441 万

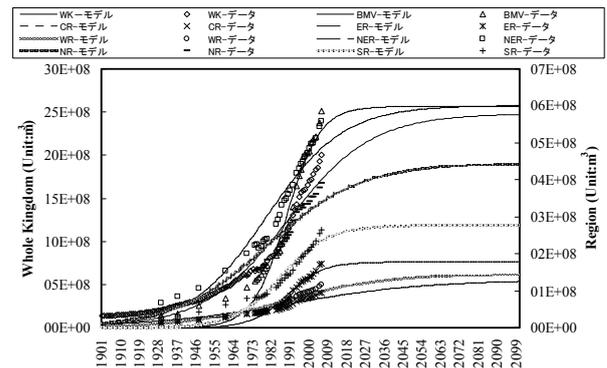


図 10 2100 年までの生活用水の統計データと推定結果の比較

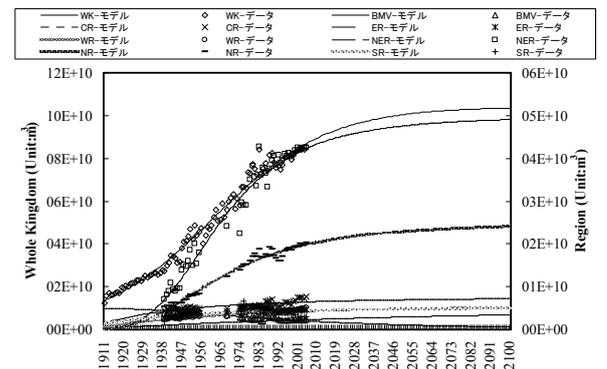


図 11 2100 年までの農業用水の統計データと推定結果の比較

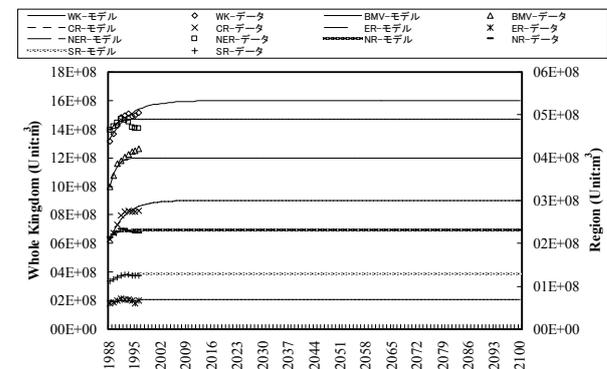


図 12 2100 年までの工業用水の統計データと推定結果の比較

118m³/yr の水使用量が算出された。96.3%にあたる 805 億 5178 万 6256m³/yr が農業用水、1.9%にあたる 15 億 6972 万 5998m³/yr が生活用水、1.8%にあたる 15 億 1289 万 7864m³/yr が工業用水として使用されている。地域別に見ると、バンコク首都圏では、73.6%が農業用水、14.5%が生活用水、11.9%が工業用水、中央部では、95.9%が農業用水、1.5%が生活用水、2.5%が工業用水、東部では、95.9%が農業用水、1.4%が生活用水、2.6%が工業用水、東北部では、97.8%が農業用水、1.1%が生活用水、1.1%が工業用水、北部では、97.2%が農業用水、1.7%が生活用水、1.2%が工業用水、南部では、92.5%が農業用水、4.5%が生活用水、3.0%が工業用水として使用されている(表 1 参照)。バンコク首都圏では全国の中でも農業用水の使用率が低く、東北部と北部では農業用水の使用率が高いことが分かる。

表 1 各地域の 1988 年と 1996 年の水使用量の内訳

地域	年	割合(%)		
		生活用水	農業用水	工業用水
バンコク	1988	6.7%	86.3%	7.0%
	1996	14.5%	73.6%	11.9%
中央部	1988	1.0%	97.3%	1.8%
	1996	1.5%	95.9%	2.5%
東部	1988	1.2%	97.7%	1.1%
	1996	2.6%	95.9%	1.4%
東北部	1988	0.9%	97.9%	1.2%
	1996	1.1%	97.8%	1.1%
北部	1988	1.2%	97.7%	1.1%
	1996	1.7%	97.2%	1.2%
南部	1988	2.7%	95.1%	2.2%
	1996	4.5%	92.5%	3.0%
合計	1988	1.3%	97.2%	1.6%
	1996	1.9%	96.3%	1.8%

表 2 各地域の平均降水量と国土面積

地域	年平均降水量		国土面積
	(mm)	(m^3)	(km^3)
バンコク	1,477	11,500,274,736	7,788.2
中央部	1,192	19,785,481,091	16,593.4
東部	1,823	66,552,894,268	36,502.5
西部	1,025	44,108,494,220	43,047.1
東北部	1,402	237,896,879,686	169,644.3
北部	1,234	208,420,033,516	168,854.3
南部	2,173	153,691,705,878	70,715.2
合計	1,475	741,955,763,395	513,145

表 3 各地域の 1988 年と 1996 年の降水量に負荷する水使用量の割合

地域	年	割合(%)		
		生活用水	農業用水	工業用水
バンコク	1988	8.4%	107.8%	8.8%
	1996	17.1%	86.7%	14.0%
中央部	1988	0.8%	82.9%	1.5%
	1996	1.1%	70.8%	1.9%
東部	1988	0.4%	33.8%	0.4%
	1996	0.9%	34.2%	0.5%
東北部	1988	0.7%	80.5%	1.0%
	1996	0.9%	80.4%	0.9%
北部	1988	0.6%	45.8%	0.5%
	1996	0.7%	42.1%	0.5%
南部	1988	0.4%	12.9%	0.3%
	1996	0.6%	11.3%	0.4%
合計	1988	0.6%	47.2%	0.8%
	1996	1.0%	49.2%	0.9%

1996 年までの解析結果を基に 2100 年までの水使用量予測を行い、統計データとの比較を行った。図 10 は生活用水量の統計データと推定結果の比較、図 11 は農業用水量の統計データと推定結果の比較、図 12 は工業用水量の統計データと推定結果の比較である。1996 年から 2100 年までに約 17% (約 143 億 3864 万 2180 m^3) の水使用量の増加が推定された。生活用水は約 40%、農業用水は約 18%、工業用水は約 4%、それぞれ増加するという結果が得られた。生活用水量・農業用水量は統計データが整備されていたため、非常に精度良く再現できた。しかし、工業用水量は、社会変化要素として工場数を基に推定を行ったが、データ不足のため、精度良く再現できなかった。今後の課題として、工場数という社会変化要素を GRP や工業生産高などに換えて、将来予測を試みる必要がある。

タイ国の年平均降水量は 7419 億 5576 万 3395 m^3 である (表 2 参照)。そのほとんどが蒸発散や漏出、湿地における遊水などによって失われる。そのため、約 2 割のみが河川に流れることになる⁽¹⁰⁾。

表 3 は 1988 年と 1996 年における降水量に負荷する水使用量の割合である。1996 年に着目すると、全国で、降水量のうち約 51%の水使用量が利用されている。地域別に見ると、バンコク首都圏では降水量のうち約 118%、中央部では約 74%、東部では約 36%、東北部では約 82%、北部では約 43%、南部では約 12%の水使用量が利用されている。バンコク首都圏に着目すると、降水量のうち 100%以上の水使用量が利用されていることが分かる。これは、ダム貯水池等による貯水量が豊富であることを示している。

今後もこの傾向は続くと予想され、早急な対応 (水資源計画) が必要である。本稿では年平均降水量に負荷する割合を評価したが、乾期、雨期のように、季節ごとに見ると、水不足に陥る時期が出てくる可能性があるため、季節ごと

に分けて、評価する必要がある。

5. 結論

本研究では、国勢調査データを利用した簡便な水利用推定モデルを提案した。本手法によって、将来における地域別・産業別水使用量の推定が可能となった。

1996 年までの統計データを基に、モデルパラメータをチューニングし 2000 年の水使用量を推定した。その結果、2000 年の水使用量は 871 億 6170 万 4557 m^3/yr と推定された。AQUASTAT DATABASE の 2000 年のデータによると、871 億 1000 万 m^3/yr の水使用量が算出されている。両者を比較すると、1%以下の誤差で水使用量を推定することができた。

今後さらに発展させようとする地域や国にとって、将来の水使用量予測は社会・経済的に極めて重要な要素であり、水資源の問題は避けては通れない。特に開発途上国では、人口増加、灌漑面積の増加、工場数の増加といった社会・経済は変化し、水使用量はダイナミックに変化すると予測

される。水資源計画を怠れば、国・地域の発展に大きな影響を及ぼすであろう。水循環は社会・経済変化とは切り離せない問題であることを念頭に政策立案する必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、花崎直太博士(独立行政法人 国立環境研究所 研究員)に貴重な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report, <http://www.ipcc.ch/>.
- (2) 風間聡, 沖大幹 (2006): 温暖化による水資源への影響, 地球環境, Vol.11, No.1, pp.59-65.
- (3) 沖大幹, 安形康, 鼎信次郎, 虫明功臣, 猿渡崇央 (2002): 気候変動を考慮したグローバルな水資源需給の将来, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, pp.549-554.
- (4) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 (2006): Bucket型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発, 水工学論文集, 第50巻, pp.529-534.
- (5) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 (2006): 統合水資源モデルによる地球温暖化に伴う世界の水需給変化の推定, 水文・水資源学会 2006年総会・研究発表会, pp.42-43.
- (6) 池淵周一 (2001): 水資源工学, 森北出版, pp.41-44.
- (7) Mathurasa, L. et al. (2005): Analysis and Forecast of Domestic Water end-uses in Khon Kaen Province, Thailand, *Proceedings of Aqua Asia Forum 2005*, pp.1-14.
- (8) FAO: AQUASTAT, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/databases/index.stm>.
- (9) Otaki, Y. et al. (2008): Micro-components survey of residential indoor water consumption in Chiang Mai, *Drink. Water Eng. Sci.*, Vol. 1, pp.17-25.
- (10) 手計太一 (2008): タイ王国の水資源開発-歴代為政者たちの水資源政策-, 現代図書, 224pp.

A Study on Estimation Method for Regional Water Use in Thailand

Taichi TEBAKARI · Taichi KUDO^{*1}

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering

Water use data is one of unavailability water-related data even in developed countries. Cross-border raw water conveyance and water discharge has been intricately intermingled in WU data; therefore, it is too difficult to estimate the impact of socioeconomic activity on water resources. The purpose of this study is to develop an estimation method for regional water use in Thailand using the census data. This paper was estimated regional water use of the past and predicted the future water use in Thailand using the Growth/Sigmoid curve model. As a result of this study, our model could reproduce the domestic and agricultural water use of the past with high dimensional accuracy. Moreover, in the future prospects, our model could estimate the FAO's statistic data with an accuracy of about 1%. Our estimation method could estimate regional and/or industrial water use in the future in Thailand.

Key words: Domestic water, Agricultural water, Industrial water, Usage of water, Census data, Thailand

*1 Graduate School of Architecture and Civil Engineering, Fukuoka University