

(19) 水需給構造並びにその変化過程の分析

(株)日本水道コンサルタント 萩原 良巳

// ○小泉 明

// 辻本 善博

1. はじめに

現在、わが国における利水問題として、水源水量の不足、水質の悪化などがあげられる。前者の問題は増加する水需要に対して水源開発がさまざまな制約により遅れていることが原因であろう。また、後者の問題は、工場排水、都市排水に対する規制の遅れ、および排水処理施設の建設の遅れなどに起因するものであろう。これらの問題の本質は、水需要に比べ水供給が豊富であった前時代から、水不足の深刻化してきた今日に至る過程の中で、水利用形態についての適切な対策がなされなかったことにあるといえる。したがって、今後の利水問題を考える場合、水源水質の悪化も考慮した水需要と水供給のバランスの問題を総合的に考察する必要がある。

このため、本研究においては、水源水量の不足、水質の悪化を利水行政にフィードバックさせ、かつ水需給を社会経済活動との関連のうちにダイナミックに把握したシステムシミュレーションモデルを作成することとする。そしてこのシステムモデルを用いることにより、将来の水需給変化過程を観察することが可能となり、将来の利水計画策定に際して必要となるいくつかの情報や指針を得ることができる。以下、2.では水需給システムモデルの構造とその範囲を示し、3.ではシステムダイナミクスによる水需給システムシミュレーションモデルを提示する。そして、4.では代表的なケースについて将来状況を想定したシミュレーションを行ない、結果の一例を示す。なお、本研究の空間的、時間的スケールとしては全国規模、年単位を用いることとする。

2. 水需給システムモデルの構造とその範囲

水需給システムモデルとして記述する内容およびその境界は、把握したい情報の内容と精度によって決まるものであるが、本研究の目的は水需給の変化過程の分析により利水計画フレーム策定のための情報を得ることであるため、全国を均質的に一本化してとらえることとする。そこで、本研究では水需給システムモデルを以下の7つのセクターに分けて考えるものとする。

①水資源セクター

淡水の供給源であるところの、ダムため池、地下水および表流水に分割し、それぞれの供給量の推移を、事業費、汚染および規制等の関数としてとらえる。ただし、海水の淡水化は実用化されるまでにはかなりの年数が必要であると考えシステム外とすることとする。

②水供給セクター

淡水の供給施設別に、上水道、工業用水道および農水供給施設、中水道に分割し、それぞれの供給量の推移を事業費、汚染、水需給ギャップ等の関数としてとらえる。

③水利用セクター

利用目的別に、家庭用水、業務用水、工場用水および農業用水の各用途に分割し、それぞれの利用水量（すなわち供給量）をとらえる。

④排水処理セクター

利用された水の内、排水処理施設を通過するものについては施設別に、公共下水道、特定下水道に分割し、それぞれの処理水量を事業費と汚染の関数としてとらえる。なお、特定下水道とは、コンビナート等の工場群が共同で設置する施設をさすものとする。

⑤環境インパクトセンター

排水処理施設を通過する、しないにかかわらず、利用された水は公共水域へ流入するが、特に水域の汚染を考慮し、流入負荷量と流入水量とに分割してとらえることとする。

⑥水需要セクター

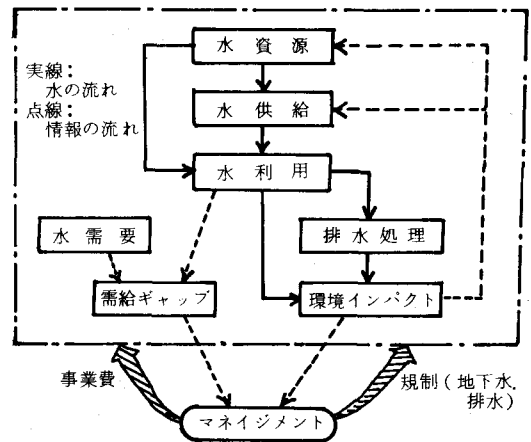
水供給サイドとは独立に、水需要サイドから家庭、業務、工場および農業に分割し、それぞれの需要量を社会、経済ファクターとの関連のうちにとらえることとする。

⑦水需給ギャップセクター

水需要量と水供給量の差を水需給ギャップとし、家庭、業務、工場および農業のそれぞれの利用目的別に分割してとらえる。

以上、水需給システムモデルの内容およびシステム境界を7つのセクターに分割してとらえたが、これらの各セクターは、相互に関連を持ちながら、各々の目的に応じた機能を有する。各セクター間の相互関連構造を図.1に示す。図.1において、実線は水のフローを示し、点線は情報のフローを示す。マネジメントは水需給のバランスと環境保全を目的とした意志決定機関の行動を指すものとする。すなわち、意志決定機関の役割は、水需給ギャップと環境汚染を情報源として、各種水関連事業費を投入し、各種水利用規制を発することであるとしている。また、環境インパクトセクターから、水資源、水供給の各セクターに向っている点線は、水供給源が汚染により影響を受けていることを示している。この様に水需給システムには多種多様の側面があり、かつそれぞれが相互に複雑に作用しながらダイナミックな変動をしている。この様な複雑な内部構造をもつシステムの将来の動向を推測するためには、シミュレーションによる方法が好ましい。本研究ではシステムダイナミックス手法を採用し、前述のシステム内各セクター関連構造に沿って、水需給システムシミュレーションモデルを作成することとする。

図.1 各セクター間の相互関連



3. 水需給システムシミュレーションモデル

ここでは、2.で述べた水需給システムの構造とその範囲に基づき、各セクターを構成している各サブセクターごとにシステムダイナミックス手法によるフローダイアグラムを作成する。以下、各セクターごとに各種サブセクターの考え方を例記し、この考え方に従って作成した水需給システムモデル全体のフローダイアグラムを図.2に提示することとする。

①水資源セクター（①ダムため池、②地下水、③表流水サブセクター）

①のダムため池貯水容量の変動レイトは、ダム関連事業費と現時点の貯水容量（レベル）により決まるものとし、その増加分を上水道、工業道および農水施設に配分することとする。②では地下水取水量を施設別（上水、工業、農水）、用途別（家庭、業務、工業、農業）に取水形態ごとにとらえ、それぞれの取水量の変動レイトは需給ギャップと地下規制により決まるものとする。また③でも地下水と同様に表流水取水量を施設別、用途別に取水形態ごとにとらえ、それぞれの取水量の変動レイトは需給ギャップ、取水規制および公共水域汚染により決まるものとしている。

②水供給セクター（④上水道、⑤工業用水道、⑥農水供給施設、⑦中水道サブセクター）

ここでは、各種水供給施設ごとに注目し、水の流れをとらえる。各供給量変動レイトは上水道事業費、工業用水道事業費、かんがい排水事業費等によりそれぞれ説明されるものとしている。なお、中水道については開発コスト、水需給ギャップさらに中水道開発率等により変動レイトを説明している。

③水利用セクター（㊦家庭用水、㊧業務用水、㊨工業用水、㊩農業用水の各利用サブセクター）

ここでは、各種水利用形態ごとに水利用量を水供給セクターにおける各種有効供給量の総和としてとらえる。なお、上水道家庭供給量変動レイトは上水道新規供給量を家庭用配分比率により分配されるものとし、上水道業務用水および上水道工業供給量変動レイトについても同様に各用途配分比率により分配している。さらに、業務、工業用水についてはそれぞれ回収水量も組み入れている。

④排水処理セクター（㊪公共下水道施設、㊫特定下水道施設サブセクター）

ここでは各下水道施設による処理水量、放流負荷量および汚泥量に注目し、下水処理水量変動レイトは下水道事業費により決まるものとし、特定下水道整備水準は公共水域の汚染が進めば増加させるように設定するものとする。

⑤環境インパクトセクター（㊬排水処理インパクト、㊭汚濁負荷インパクト、㊮汚泥の各サブセクター）

ここでは、公共用水域への流入水量、流入負荷量を自然流出と処理場流出とに分けて考え、用途別流出率、流達率を定数として設定することにより、自然流入水量および自然流入負荷量をとらえる。さらに、水供給施設、排水処理施設において生ずる汚泥量についてもその流れをとらえている。

⑥水需要セクター（㊰家庭用水、㊱業務用水、㊲工場用水、㊳農業用水需要サブセクター）

ここでは各用途別水需要を社会、経済要因（外生変数）との関連のうちに原単位方式で記述し、〔家庭用水原単位〕×〔総人口〕、〔業務用水原単位〕×〔第3次産業人口〕、〔工業用水原単位〕×〔工業出荷額〕によりとらえる。さらに農業用水については、水田、畑、家畜に分類し、需要の大半を占めると思われる水田需要量については、〔稲かんがい面積〕×〔減水深〕で表わすこととする。

⑦水需給ギャップセクター

ここでは、家庭用水、業務用水、工業用水および農業用水の各々の需給ギャップを算定するものとする。また、各々の需給ギャップ比率を〔需給ギャップ〕／〔需要量〕で表わす。なお、業務、工業用水については回収水を除く場合の需給ギャップⅡおよび需給ギャップ比率Ⅱを算定する。

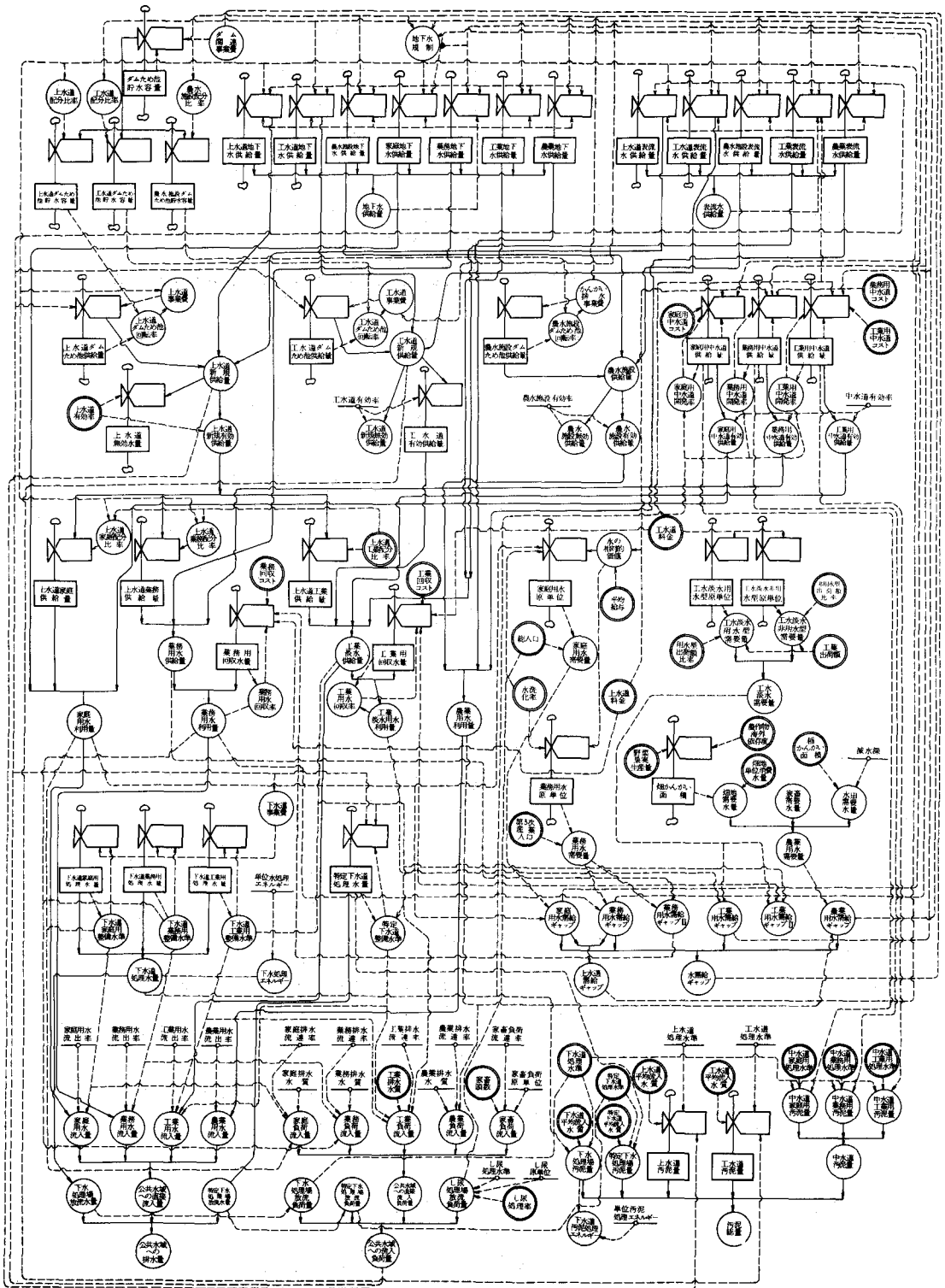
以上の水需給システムモデルにおける各種レイト、レベル、補助変数等を数式化することにより、水需給変化過程を分析することが可能となる。表・1にモデル式の一部を示すこととする。

表・1 モデル式

モデル式	記号説明
$DR = k \cdot D, k = k_0 \cdot \exp(1 - Q/Q_0)$	DR; ダムため池貯水容量変動レイト、k; ダム事業費投資効率、D; ダム関連事業費; Q; ダムため池貯水容量
$P_1 = w_1 A' / (w_1 A' + w_2 B' + w_3 C')$ if $A' + B' + C' = 0$, 現在貯水容量比	P_1 ; 上水配分比率 $A' = \max(A, 0)$; A; 上水需給ギャップ、 $B' = \max(B, 0)$; B; 工業需給ギャップ $C' = \max(C, 0)$; C; 農水需給ギャップ、 w_1 ; 上水道料金、 w_2 ; 工業水道料金、 w_3 ; 農水料金
$WR = L \cdot a \exp(1 - q/q_0)$ if $a < 0$, $WR = L \cdot a$	WR; 上水直接取水量変動レイト、L; 上水道直接取水量、a; 上水需給ギャップ比率、q; 河川流出負荷量
$IR = \beta \cdot K$	IR; 工業水道ダムため池供給量変動レイト、K; 工業水道事業費、 β ; 工業水道事業費投資効率
$GR = GR_0 \cdot b / b_0 \cdot C_0 / C \cdot M / M_0 \cdot (1 - P)$ if $C/M > L$, $GR = 0$	GR; 業務用水回収水量変動レイト、C; 業務用水回収コスト、b; 業務用水需給ギャップ比率Ⅱ、M; 上水道料金、P; 回収率、L; 相対コスト限度
$SR = 0.0129H + 524.4$, 重相関係数=0.765	SR; 公共下水道処理水量変動レイト、H; 下水道事業費
$BA = 3.7 \times 10^{-7} \cdot S + 0.101 + Ga \cdot \delta$, 重相関係数=0.855	BA; 業務用水原単位、S; 平均給与、Ga; 水洗原単位、 δ ; 水洗化率の伸び率
$D = Df + Dv, Dv = Dv_0 (g/g_0)$	D; ダム関連事業費、g; 需給ギャップ、Df; ダム維持管理費 Dv; ダム建設費

（注）ここで添字「0」は基準年度の値を示す。

図. 2 水需給システムフローダイアグラム



4. 水需給変化過程の分析結果

3.で提示した水需給SDモデルにより、レベルの初期値、定数および外生変数を設定した上でシミュレーションを行なった結果、昭和40～48年度の実績値とシミュレーション値については、ほとんど全ての要因について推移の傾向および値の双方共大きな差異は生じなかった。このことは作成したSDモデルの有効性を示していると考えられる。また、シミュレーション値としては種々の要因についての将来値が算出されたが、ここでは以下の3点に注目した結果についてのみ報告する。

i) 水需給ギャップの変化(図.3)

水需給ギャップの変化をダム事業費との関連でみると、昭和40年度から55年度までのダム事業費の効果により、昭和60年頃には現在の水不足は解消されるが、その後、水需要量の伸びにより再び水需給ギャップが増加し、そのためダム事業費も伸びる結果となっている。しかし、昭和72年頃にはダム事業費の効果により水不足が解消されてゆくことがわかる。また、水需給ギャップの推移を見ると振動しながら次第に0になることが予想され、このことは作成したシステムモデルを水需給ギャップ解消のための制御システムとしてとらえた場合、このシステムが安定であることを示しているものと考えられる。

ii) 水需要、水供給量の変化(図.4)

水需給の経年変化について用途別に考察することとする。まず、家庭用水と業務用水の水需要量は、昭和75年度にはそれぞれ現在の約1.7倍、約2倍の値に増加している。これは人口の都市集中による第3次産業の増大、水多消費型生活への移行の進展等を顕著に表わしていると考えられる。一方これら需要に対する供給についてみると、家庭用水の供給量は今後ますます上水道へ依存してゆくことがわかる。また、業務用水の供給量については、上水道からの供給量はもちろんのこと、今後特に回収水量が増加してゆくことがわかる。つぎに、工業用水需要量についてみると、単位出荷額当りの必要水量は漸減するものの、工業出荷額の伸びにより昭和75年度には現在の約1.8倍に達する。一方これに対する供給については、工業用水道供給量はもちろんのこと、回収水量が大幅に増加してゆくことがわかる。また、農業用水需要量については、稲かんがい面積が現在までの減少傾向を将来もたどるものとすれば、農業用水需要

図.3 (その1) 水需給ギャップの変動

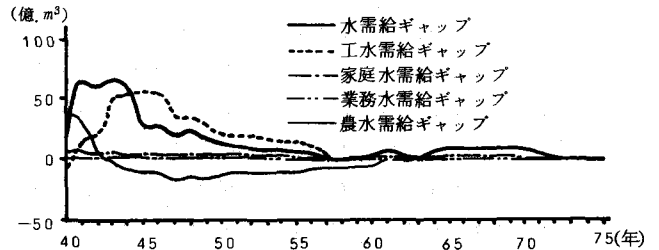


図.3 (その2) 事業費の変動

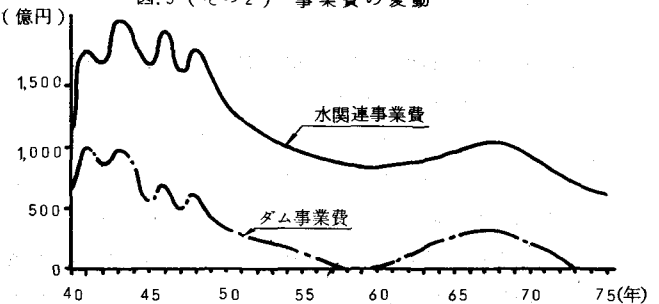


図.4 (その1) 家庭・業務用水需給変動

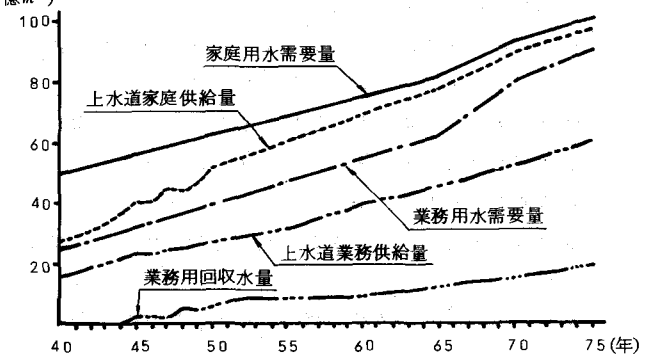
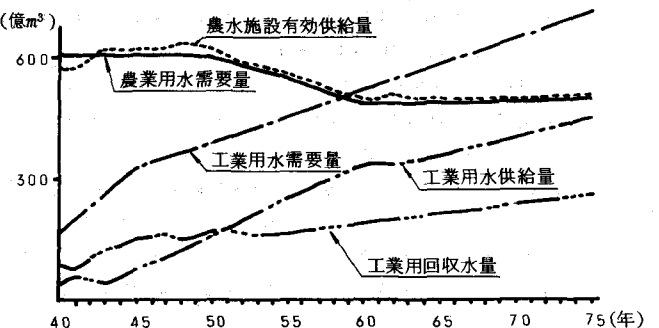


図.4 (その2) 工業・農業用水需給変動



量は同様の減少傾向を示し、昭和75年度には現在の約0.9倍になることがわかる。一方供給量についてみると地下水、表流水およびダム取水量はともに減少するが、需要量の減少も大きく供給過剰傾向を示し、需給ギャップは解消されていることがわかる。

iii)政策実験による回収率の変化

ここでは政策実験の一例として、業務用水回収コストおよび工業用水回収コストをいくつか設定した場合の回収率の変化について考察する。まず、業務用水について回収コストを標準型(昭和75年で60円/㎥)と低減型(昭和75年度で40円/㎥)とした2ケースのシミュレーション結果を見ると、業務用水利用水量は2ケースともほぼ同じ値を示したが、昭和75年度において、標準型では回収率が21%であったものが、低減型では30%に達することがわかる。また、工業用水についても標準型(回収率が1.0で回収コスト95円/㎥)と低減型(回収率が1.0で回収コスト35円/㎥)の2ケースとも工業用水利用水量はほぼ同じ値を示したが、昭和75年度において、標準型では回収率が69%であったものが、低減型では71%となっている。以上のことから、回収コストの低下に伴って、業務用水に関しては回収水への依存が高まり、工業用水に関しては変化があまり見られなかった。

5. おわりに

本研究では、利水問題を水源水質の悪化等も考慮した水需要と水供給のバランスの問題として総合的に考察するために、水需給構造の把握ならびにその変化過程の分析を行なった。すなわち、2.では水需給システムを一つの全体システムとしてとらえた上、これを7つのセクターに分割し、各セクターごとの内容を示した。つづいて3.ではシステムダイナミックスによる水需給システムモデルのフローダイアグラムを提示し、説明を加えた。そして、4.では、この水需給SDモデルによるシミュレーションを行ない政策実験を伴う水需給変化過程の分析を行なった。つぎに本研究の問題点ならびに今後の課題を述べる。

i)本研究で作成したシステムモデルはあくまで水の流れに注目したものであり、土地、人口、産業および経済等のフレーム要因を外生変数として多く採用した。目的に応じて、これらの外生変数の内部化並びにモデルの簡略化等が必要となろう。

ii)本研究の水需給システムモデルでは、全国を均質的に一本化してとらえているため、水源水量の地域的偏在、さらに、人口、産業等の都市集中による水需要の偏在等を考慮できない。このため、今後、各地域の持つ特性を考慮し、地域間の影響をも組み入れた水需給システムモデルの作成が必要である。

iii)本研究では、水需給システムモデルの作成と、そのシミュレーションによる水需給変化過程の定性的分析を目的としたため、実績データやシミュレーション結果の細かな値にとらわれず、各種要因の大まかな傾向を把握することに主眼を置いた。今後、データや情報の入手、収集に努めシステムモデルの精度を向上させて行く必要がある。

最後に、建設省土木研究所、山中敦、中村昭の両氏の助言に謝意を表する。

<参考文献>

- 1)吉川和広・岡田憲夫: System Dynamics Approach to The Water Resource Management Related to The Regional Development, 1975
- 2)小玉陽一他: システム・ダイナミックス、共立出版、1973
- 3)J.W.Forrester: ワールド・ダイナミックス、日本経営出版会
" アーバン・ダイナミックス、 "
- 4)高碑・池淵・園: 水の需給構造と其の変化過程に関する研究、土木学会年次学術講演会、1974
- 5)ローマクラブ報告書: 転機に立つ人間社会、ダイヤモンド社、1976
- 6)小笠原暁: 長期総合計画策定支援システムー兵庫ダイナミックスー
- 7)長尾義三: 土木計画序論ー公共土木計画論ー、共立出版、1972
- 8)米谷栄二編: 土木計画便覧、丸善、1976