水利用の問題点と多目的システム計画の手法

西川禕一

1. はじめに

水ほどわれわれの生活に，いや生命そのものに直結した物質は稀である．われわれは毎日，ほとんど無意識のうちに，大量の水を使い去っている．気候的にみて，世界の多雨湿潤地域に位置する日本では古来水資源に恵まれ，年になん回か発生する洪水に悩まされることはあっても，乾燥や水不足に悩まされることは少なく，人々の水に対する関心は薄く，おおむねはおおらかであった．ところが，近年，ことにこの10年ほどのあいだに，工業化，都市化が進み，生活水準が向上するにつれて，事情が大分かわってきた．水需要が増すほどには供給量の増加が確保されず，新しい水資源の開発コストはいちじるしく高くなってきたのである．われわれはこれを簡単に，水不足と称している．また量の問題だけでなく，質の問題，すなわち水質の汚濁・悪化もいちじるしくなってきた．水不足，水質悪化がめだってくるとわれわれも水への関心を高めざるをえない．新しい水資源の開発の見とおしはどうなるのか，水利用の実態はどうなっており，それをより合理化するにはどうしたらよいのか，水質の悪化の原因と対策はどのように考えたらよいのか，節水やいわゆる水の再利用は可能なのか，等々が気になるわけである．水はいわば社会的物質，社会的資源であって，これらの問題は単なる技術的問題ではなく，広く経済的，社会的要因の入り組んだ問題複合体(social problematigue)である．問題複合体にアプローチするシステム的方法論は，今日けっして完備されていないが，現実の諸問題に動機づけられて，いくつかの方法が提案され試みられつつある．この小論では，水資源，水利用の諸側面を概観しながら，方法論の発展にふれてみたい．

筆者はけっして水の専門家ではなく，むしろまったくの素人である．この原稿を書くことになったのはなにかのまちがいではないかと思っているのであるが，水はなんびとにも直接かかわりと影響のある問題だと思いなおして，システム工学の観点から1つの考察を試みた．おおかたのご批判とご教示を乞う次第である．

2. 日本の水資源と水利用の特徴

水は考えてみればまことに不思議な物質である．摂氏 0°～100° のひろい温度領域で液体として存在し，熱容量および融解と気化の潜熱はきわめて大きく，表面張力も大きい．また化学的には安定でかつすぐれた溶剤である．このようなきわだった特質ゆえに，あらゆる動植物のもっとも重要な構成要素となり，また，他の物質の摂取，循環，排泄の媒体となって生物体を維持している．

このような水の現在および将来にわたる確保は人間の生存にとって，基本的な要請であり，学問分野としては水資源の開発と水利用の管理を目的

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

とする水文学が発達してきた．国際的にも，たとえば国連に水に直接，間接関係する機構として，UNESCO(教育科学文化)，WMO(気象)，FAO(食糧農業)，WHO(保健)などの機関が設けられており，とくに近年における世界的な気象変動や人間活動による水循環機構の変化とその影響を広汎に解明するために，UNESCOが主宰する国際水文10年計画（IHD）および国際水文プログラム(IHP)がすすめられている．

水は世界的規模の問題であると同時に，降水量，その季節変動，地形・地質などの自然条件や，人間の生活活動，産業活動，その密度，規模，土地利用の形態などの社会条件によって性格を異にする，地域性の強い問題である．したがって外国の成功例(たとえばＴＶＡ)を直輸入して日本にあてはめる，というような形では失敗する．この点に留意して，現実の地域条件の実態調査と，それにもとづく独自の方法論の整備を心がけねばならない．

日本をマクロにみた自然条件の特徴はつぎのように考えられる．

(1) 年平均降水量は 1,750～1,800 mm であり，世界の年平均 750～850 mm とくらべても，とくに温帯に位置する国としては多い．国土全体として，約 6,700億トン／年の降水量があることになる

(2) しかし，人口１人あたりの降水量は約 6,600 m^3／年であって，世界平均の 32,000 m^3／年にくらべるとかなり少ない

(3) 年間の降水量に大きな変動があり，梅雨から秋の台風期と冬の豪雪期(日本海側のみ)に集中する

(4) 降水量の地域的な偏りも大きく，北陸（降雪），西南部では多いのに，瀬戸内，北海道東部などは少ない

(5) 降水による不連続的な水資源供給は，河川により平滑化される．しかし日本の河川は規模が小さく，また地形が急峻なために，この平滑化能力が小さい．たとえば，河川の年流出率は70～90%(欧米，中国などでは５～30%)であり，河況係数（一定期間内の最大流量と最小流量の比)は数百～1,000(外国では数十のものが多い)にもおよぶ

(6) (5)とも関連して，洪水時における土砂の流出が多い．そのため土砂流，山崩れ，滞砂，などが多い

なべていえば，日本の水資源はきわめて変動が大きいのが特徴である．その変動の多い水資源の年間収支はまた特徴のあるものとなる．年間 6,700億トンの降水量のうち，蒸発散は約 2,100億トン(31%)，洪水時およびそれ以外の流出がほぼ同程度で計3,700億トン(55%)，残り約900億トン（14%）が利用されるが，そのうち農業に55%，工業に35%，生活に10%の割合といわれている．蒸発散が少なく，洪水流出が多く，また農業用水の多いのがめだつのである．

3. 現在および将来の問題点

以上のことをふまえて，現時点における水利用のいくつかの問題点を考察してみよう．

（ｉ） 水資源の開発

水資源の開発，すなわち資源として利用しうる水をつくり出す手段には，河川開発，湖沼開発，下水処理，海水の淡水化，既存水利権の再配分などがある．このうち河川・湖沼の開発はダムなどによって河川流水の時間的な平滑化をはかる方法であり，もっとも普通の手段である．日本のダムはとくに洪水の制御と発電を主目的にしたものが多いが，上水，農業水利を加えたものも少なくない．多目的ダム(貯水池)は目的によって設計・運用が矛盾する要素を含んでいるが，たとえば逆調整池を設けて発電需要の時間変動を緩和する，などの方策が講じられる．

わが国では，経済的社会的に有利なダムサイトはほとんど使い尽されてしまったともいわれている．毎秒 1 m^3 の水を新しくえるためのダム建設

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

費は，15億円以上にもなるという．また水没補償，自然・環境保全との調和も，ますます困難になりつつある．しかし，まだしばらくは，実現可能で他よりも有利な手段として，開発が行なわれると思われる．ただし水源地においても，単なる補償という経済的割りきり方だけでなく，水源地域の振興という見方が必要になろう．

下水を2次あるいは3次処理して，かんがい用水あるいは工業用水として供給することは，わが国でもはじめられている．水質が悪く，また変動しやすいこと，水温が比較的高いことなど，技術的問題も多いが，水源地と消費地が同一であること，原水の供給が安定していること，水利権の問題がないことなど，利点も多く，河川開発のコスト上昇にともなって相対的有利性がますます高まるであろう．とくに工業では利用淡水の60～70%が回収水になっている地域もあり，汚染や地盤沈下の防止など，いろいろの点からリサイクリングの技術の進歩が要望される．

(ii) 農業用水利体系との関連

さきにみたように，わが国では農業用水が大きな比重を占めている．そのうちで大きな割合を占めるのはいうまでもなく，水田かんがい用水である．農業水利は古い歴史をもち，そこでは水は独立した経済的な財というよりは，水田という資本財の付属物的な性格をもってあつかわれてきた．水利費は量水制ではなく，いわゆる面積割りで賦課される．これは一方の工業用水，都市用水が基本的には市場経済原理に立脚してとりあつかわれているのと，根本的には相違する点である．ここに水利の二重構造が存在する[1]．この二重構造は，最近2つの要因によって，徐々に変化をはじめつつある．1つは，農業の近代化と農村秩序の変容によって，農業経済内部における水のもつ役割がかわってき，また旧来の水利管理体制が維持できなくなったことである．いっぽう新しい都市水利の開発コストの上昇にともなって，既存の農業水利とのあいだに大きな差額原水コストが形成され，都市化・工業化の進展による都市用水の需要が増すのと相まって，農業用水の転用を求める圧力が強まってきている．ことは都市問題と農業問題の根幹に触れるので，土地の転用と同様に，無限定に市場経済のメカニズムのみにゆだねることはできないが，水資源の社会的再配分の観点から，新しい原理が模索されるべきであろう．

(iii) 水の代替技術の開発

東京および大阪の1人1日あたりの平均給水量はそれぞれ500ℓおよび600ℓ以上である（家庭用水はその約半分）．これは世界的にみて，かなり高い水準の値である．そのうち家庭用水では冷房，洗濯，風呂，自動車洗浄などの占める割合が高く，飲料や炊事用は10ℓにも満たない．

また工業用水では，業種による差異はあるがなべて冷却用60%，製品処理および洗浄用26%などとなっている．これらの数値から直観されることは，現在水は安価だから，さまざまな用途に濫用されているのではないか，ということである．現に工業冷却用に海水の占める割合は40～50%に高まっており (i)にのべた処理水の再利用についても，再利用の形態（直接再利用と河川を通じての間接再利用），用途（おもに工業用水および生活雑用水）などいろいろ検討されている．将来は農業においても，循環利用が考えられるであろう．要するに水の不足，コスト高を心配するだけでなく，用途別に，水の再利用以外の代替技術の可能性をも含めて思考すべきである．

(iv) 水汚染と排水処理

BOD，COD，重金属，有機塩素系化合物，チッ素やリン等々，水の汚濁負荷量が増し，その汚染源が工業，農業，家庭などと広範囲にわたるので，対策はなかなか容易でない．個々の汚濁防止，除去，蓄積汚濁物質の回収の技術を高めるとともに，根本的には水利思想，水利体系の見なおしが必要である．従来から，そしていままでも根強いのは，いわゆる「水に流す」思想である．廃棄物を水中に排出し，水流の浄化作用に期待す

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

る，という考え方である．これがまちがいであることをより明瞭に認識したうえで，産業，家庭とも，水利の単位と流れをはっきりさせ，各単位ごとに流出水質は流入水質と同等である，という原則をふまえる必要がある．しごくあたり前であると同時に，またきわめて素人じみたいい方であるが，水利システムの最終目標はこの原則に立脚しなければならない．

4. 水資源開発と管理への数理的アプローチ
——多目的システム計画法の試み——

水資源の開発と水利用システムの管理には，さまざまな観点からの数理的アプローチが試みられ，多くの具体例に適用されてきた．そのうち，ここでは多目的システム計画および運用の立場にかぎって，その方法論の概要を中心にのべてみたい．

4.1. 多目的最適化問題と非劣解

多目的最適化問題はたとえばつぎのようなベクトル評価規範の最小化問題として定式化される．

$$\min_{x} f(x) \quad \text{sub. to } x \in X \qquad (1)$$
$$X \triangleq \{x \mid g(x) \leqq 0\}$$

ここに，$x \in R^n$，$f(x): R^n \to R^m$，$g(x): R^n \to R^r$ である．(1)の m 次元の評価規範空間における許容集合 $F \triangleq \{f(x) \mid x \in X\}$ の各点間の優劣は半順序関係をなすので，通常つぎのように非劣解および最適解の概念が定義されている．すなわち $x_0 \in X$ は

$$\{x \mid f(x) \leqq f(x_0),\ x \in X\} = X \qquad (2)$$

のとき，非劣解（または Pareto 最適解）であるという．また

$$\{x \mid f(x) \geqq f(x_0),\ x \in X\} = X \qquad (3)$$

のとき，(完全)最適解であるという．

各評価規範 f_i の最小値

$$f_i^* = \min_{x} f_i(x) \quad \text{sub. to } x \in X \qquad (4)$$

からなるベクトル f^* が，$f^* \in F$ ならば最適解は存在するが，これはむしろまれである．$f^* \notin F$ のとき，f^* を理想点とよぶ．

非劣解は，各 f_i 間のトレードオフ(限界代替率)を考慮して，そのなかから適当な解，すなわち選好解(または満足解)を選ぶべき集合を与える．つまり非劣解以外は，考慮の対象からはずすことができる．しかし，評価規範のあいだの利害対立が大きいほど，この解集合は広くなる．非劣解に対する必要十分条件[2,3]やそれを求めるアルゴリズムも[4-8]，いくつか提案されている．

4.2. 選好解の決定法

非劣解のなかから選好解を選び出すには，新たに別の評価規範を導入しなければならない．意思決定者の価値基準をもっともよく反映するような評価規範をいかに導入するかが解法のキーポイントになる．それには大別して2つの方法がある．第1は決定者の価値基準を反映する効用関数を直接構成する方法，第2は非劣解になんらかのスカラ評価規範を加えるものである．効用関数の存在性や決定法に関してもよく研究されているが[9,10]，実際にそれを構成することは一般に困難である．後者は本来未知な価値基準を模索的に求める方法になるので，より実際的であろう．それをさらにわけると

(1) 評価規範の間になんらかの優先順位を設定する方法（辞書式配列法[11]，ε 制限法[4-6,12]，パラメータ法[7,8]など）

(2) 価値基準をあらわすスカラ評価規範を設定する方法（パラメータ法，目標計画法[13]など）

(3) 対話型繰返しアルゴリズムによる方法

などになる．

(3)のうち，Geoffrion らのアルゴリズムでは[14]，意思決定者は無差別面上における特定の評価規範に対する残りの評価規範のトレードオフ比を評価し，この値にもとづいて効用最大の方向をみいだす．つぎにこの方向に沿って単位量変化させた各評価規範のグラフを参照して，最適な歩み幅を答える．各繰返し段階でこの2つの判断をくだしながら，選好解に到達する．

また Haimes らは，surrogate worth trade-

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

off method を提案した[15]．これは非劣解上での各評価規範のトレードオフ比を，評価規範値の水準に応じて求め，この比を用いて各評価規範の相対的な価値を意思決定者に尋ねる．彼はそれを代用価値関数Wの値（たとえば−10と10の間の値）で答える．この値はトレードオフ面と無差別面の傾きの差をあらわしていると考えられるので，$W=0$ となる点，すなわち両面の接点を繰返し過程で探索するものである．いいかえれば，このような操作で決定者は評価基準を引き出されることになる．

4.3. 水資源問題への応用

水資源の開発，管理に関する問題は，(1)多数の利害対立者，意思決定者が関係する，(2)多くの，同一基準では測れない目的，評価規範が存在する，(3)過去および未来の情報に多くの不確実性が混在する，などの理由のために，複雑かつ不確定な多目的システムの問題である．物理的（水文的）な水そのものだけでなく，経済や行政管理のシステムとも密接に連係しているため，システムの同定やモデリングにおいても，多くの不確定で困難な要因が存在するのである[15]．

水の問題は，河川流域における水資源量の計画問題と，水質の問題とに大別できる．両問題は相互に関連はするが，一応別に考えることができよう．以下では前者を単に水資源問題，後者を水質問題とよんでおく．

水資源計画の主な目的は，洪水の制御，かんがい，工業用および都市(生活)用水の供給，発電，水運，レクリエーションなどであり，その他漁業，水質，環境保全に関係する．水資源問題を，はじめて多目的の立場から提言したのはMarglin (1967年)であったといわれているが，その後アメリカを中心にして方法論，応用（まだそれほど多くはないが）両面の研究が進展した．たとえばMIT の Marks, Cohon らによるアルゼンチンの Rio Colorado における研究[5]，Reid と Vemuri の問題[8]とそれに対する SWT 法の適用[15]をあげることができる．Cohon らは隣接流域間の水の適正配分と国の経済的便益を指標として，LP モデル (screening model) により非劣解を求めた．その結果，流域内上下流地域間の水配分，開発，経済効率，発電のトレードオフを明らかにするようないくつかの代替案を提示している．Reid らの問題では，事業投資額，水の蒸発散量，貯水容量を指標とし，労働投入量と貯水池半径を決定変数としている．環境，生態系景観なども考慮したモデルとしては，Major[16]，MillerとByers[4]の例がある．その他の典型的な問題や手法については，文献15および17を参照されるとよい．

水資源問題は独立した問題ではなく，ひろく地域の土地利用，経済開発とも結びついている．そのような観点から，地域のトータル・モデルをつくる試みも行なわれている．例として Haimes の階層モデル[18]，Battelle 研究所（Columbus）の Hamilton らの Susquehanna 河流域のシステム・ダイナミックス・モデル[19]をあげておく．

多目的水質計画の試みは，いまのところ多くは理論的段階に留まり，実際例をあまりみないようである[15]．五大湖の水質に関して，多種多様の有機，無機物質，微生物，臭気，放射能，水温変化などの目標値を規定した条文がアメリカとカナダのあいだでとり交わされた例があるが，水質基準をあまりきびしく規定した場合，将来とも実現不可能だということになるおそれがある．そのようなとき，経済活動の水準ともにらみ合わせて，どの程度までどの基準を緩和できるか，といったトレードオフも，一種の多目的計画の問題である．

わが国における研究ではたとえば文献20の特定研究報告書には，水質に関してもいくつかのシステム的研究の成果が示されている．

む す び

わが国における水資源，水利用の特徴と問題点，アメリカを中心に具体化されつつある多目的計画の方法と適用例などについて概観してみた．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

多目的最適化は，水資源問題にも大きく触発されて，最近ようやく数理的方法論が形をなしてきた段階である．この種の問題は，単目的の最適化や最適制御と異なって，単なる数学的理論やアルゴリズムの研究だけでは解決しえない．それは人間の価値観や行動の問題と深くかかわっているからである．難問ではあるが，システム問題の解明にあたっては避けてとおることのできない基本点を含んでいる．今後，わが国における水資源利用の実態に即しつつ，独自の数理的方法の開発，応用を進めることが切望される．

参考文献

1) 玉城哲：「日本経済と水資源問題」農業土木学会誌，43：713，1975.
2) S. Karlin : Mathematical methods and theory in games, programming and economics, Addison Wesley (Reading) 1959.
3) N. O. Da Cunha and E. Polak : Constrained minimization under vector-valued criteria in finite dimensional spaces, J. Math. Anal. Appl., 19 : 103, 1967.
4) W. L. Miller and D. M. Byers : Development and display of multiple-objective project impact, Water Resources Research, 9 : 11, 1973.
5) J. L. Cohon and D. H. Marks : Multiobjective screening models and water resources investment, Water Resources Research, 9 : 826, 1973.
6) Y. Y. Haimes, L. S. Lasdon, and D. A. Wismer : On a bicriteria formulation of the problems of integrated system identification and system optimization, IEEE SMC-1 : 296, 1971.
7) A. M. Geoffrion : Strictly concave parametric programming, Basic theory, Management Sci., 13 : 244, 1966.
8) R. W. Reid and V. Vemuri: On the noninferior index approach to large-scale multi-criteria systems, J. Franklin Inst., 291 : 241, 1971.
9) P. C. Fishburn : Utility theory for decision making, John Wiley (New York) 1970.
10) R. C. Keeney and H. Raiffa : Decision analysis with multiple conflicting objectives, John Wiley (New York), to appear.
11) D. H. Chyung : Optimal systems with multiple cost functionals, SIAM J. Control., 5 : 345, 1967.
12) W. L. Nelson : On the use of optimization theory for practical control system design, IEEE AC-9 : 469, 1964.
13) P. L. Yu and G. Leitmann : Compromise solutions, domination structures, and Salukvadze's solution, JOTA, 13 : 362, 1974.
14) A. M. Geoffrion, et al.: An interactive approach for multi-criterion optimization, Management Sci., 19 : 357, 1972.
15) Y. Y. Haimes, et al. : Multiobjective optimization in water resources systems, SWT method, Elsevier (New York) 1975.
16) D. C. Major : Multiobjective redesign of the Big Walnut Project, Systems planning and design, Prentice-Hall (Englewood Cliff) 322, 1974.
17) J. L. Cohon and D. H. Marks : A review and evaluation of multiobjective programming techniques, Water Resources Research, 11 : 208, 1975.
18) Y. Y. Haimes : Hierarchical modeling of regional total water resources systems, Automatica, 11 : 25, 1975.
19) H. R. Hamilton, et al.: Systems simulation for regional analysis, MIT Press (Cambridge) 1969.
20) 文部省科研費特定研究報告書(代表者：椹木義一)：「環境汚染制御」1975. 「環境汚染の検知と制御」1976.

にしかわ・よしかず　1933年生　京都大学工学部教授　電気工学教室

専攻：システム計測制御工学，とくに大規模システム，非線形システムのモデリング，最適化など

略歴：1955年京都大学工学部卒．京都大学，UCLA などに在職し，現在に至る．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．