

水資源より見た地球温暖化の影響評価

IMPACT ASSESSMENT OF GLOBAL WARMING ON WATER RESOURCES

小尻利治*

Toshiharu KOJIRI

ABSTRACT; Water resources system should be planned under the consideration of global warming because of long-term climate change. Moreover the water demand will be fluctuated due to the increase of population or development of new technology. In this paper I will propose the planning procedure for water resources such as i) estimation of input situation on precipitation and temperature, ii) inference of available water resource amount with basin simulation, iii) prediction of water demand for agriculture, industry and municipal use, and iv) assessment of economical damage caused by additional drought event.

KEYWORDS; global warming, water resources planning, drought assessment

1. 序論

地球温暖化が問題になって久しいが、近年では、地球環境や自然と社会との共存と言った広範な観点に移動しつつあるように思われる。その理由には、二酸化炭素の倍増による温暖化が50年から100年後と長期間であることや、NO_xや酸性雨による生活環境、生態系の変化が身近で起こっていること、等が挙げられよう。また、地震、洪水、渇水、等の自然災害が多発しており、温暖化だけが急務ではなくなったのである。とは言っても、土木構造物は短期で建設できるものではなく、長期的な視野に立った設計・管理計画が必要である。そこで、本研究では、水資源に焦点を絞り、計画の策定と管理手順に関して考察するものである。まず、計画の立案には、(i)入力となる降水・気温分布の把握、(ii)水供給可能量の算定、(iii)水需要量の予測、(iv)安全度を考慮した施設計画、が必要である。二酸化炭素倍増下でのGCMsの結果では、気温が約3℃上昇、降水量が約10%増加となっている。この広域的な情報より、地域単位、流域単位的环境条件を推定しなければならない。従って、計画策定の基本要素は、(i)温暖化シナリオの設定（ここでは、気温3℃上昇、降水量10%増加をベースとする）、(ii)対象流域へスケールダウンした気象・水文情報の推定、(iii)シナリオの下での最適計画の実施と基本システムの抽出、(iv)詳細な流域モデルによる計画の感度分析、(v)最終計画の決定、(vi)実時間での予測を含む管理モデルの作成、が挙げられる（図-1参照）。

2. ファジィ最適化による基本計画の策定

水資源計画における将来の不確実性を以下のように定義しよう。

(i)流入水量は曖昧生を含むが、統計的に予測できる。

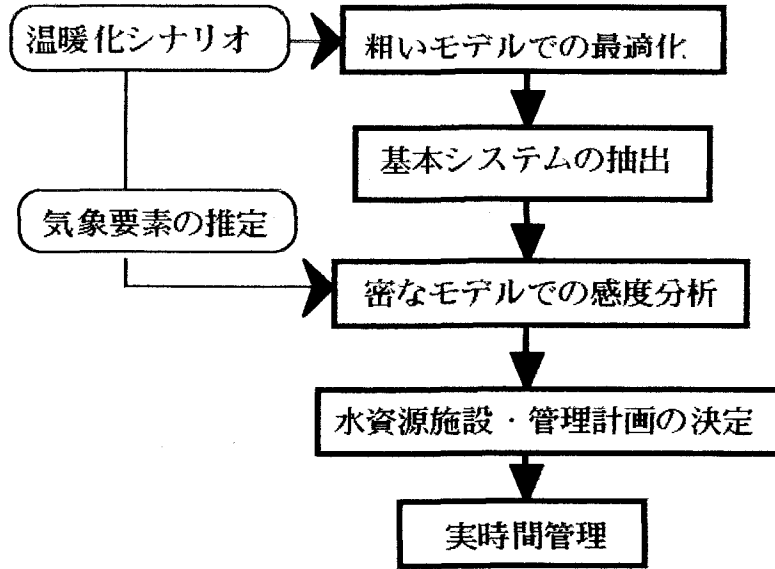
(ii)需要水量も曖昧生を含むが、人口や産業の予測と共に予測可能である。

(iii)水質はシミュレーションモデルで検討し、最初は水量だけを対象とする。

基本的には、水資源システムは必要な制約を満たす中で建設と捜査費用の最小化が図られるべきであり、次のように定式化される。

$$J = \sum_{m=1}^M \{CC_m \cdot V_m + OC_m \sum_{t=1}^{12} O_m(t) + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^K DC_{km} Q_{km}(t)\} \quad (1)$$

* 岐阜大学工学部土木工学科 Dept. Of Civil Eng., Gifu University



図一 1 温暖化を考慮した水資源計画の策定手順

ここに、 CC_m と OC_{km} は導水長さを考慮した建設費用と操作費用の係数、 V_m は貯水池容量、 O_m は施設 m からの放流量、 Q_{km} は施設 m から利用者 k への導水量、および、 K と M は需要者と施設の総量である。ここで、図一 2 に示すような目的関数に好み度（ファジイグレード）を与えるものとする。さらに、水供給量（図一 3 参照）に関しても曖昧生を与えると、結局、曖昧情報下でファジイグレードを最大化することに再定義することが出来る¹⁾。すなわち、

目的：

$$\text{maximize } \lambda \quad (2)$$

費用の制約条件：

$$\begin{aligned} & CC_m \cdot V_m + OC_m^1 \sum_{t=1}^{12} O_m^1(t) + OC_m^2 \sum_{t=1}^{12} O_m^2(t) + OC_m^3 \sum_{t=1}^{12} O_m^3(t) + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^K DC_{km}^1 Q_{km}^1(t) \\ & + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^K DC_{km}^2 Q_{km}^2(t) + \sum_{t=1}^{12} \sum_{m=1}^M DC_{km}^3 Q_{km}^3(t) + (Z_{nU} - Z_{nL})\lambda \leq Z_{nU} \end{aligned} \quad (3)$$

河川流量の制約条件

$$O_m(t) - (O_{dm}(t) - O_{dlm}(t))\lambda \geq O_{dlm}(t) \quad (4)$$

導水による供給量の制約条件

$$\sum_{m=1}^M Q_{km}(t) - (Q_{dk}(t) - Q_{dlk}(t))\lambda \geq Q_{dlk}(t) \quad (5)$$

貯水量の制約条件：

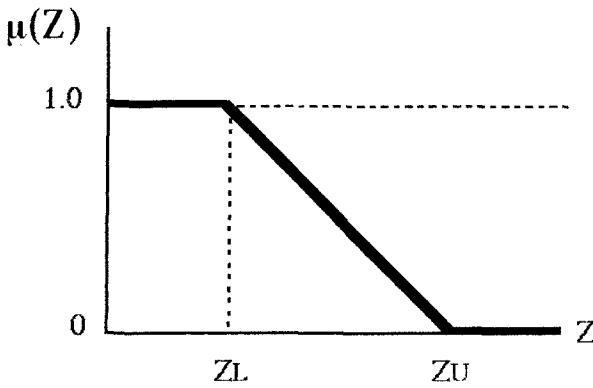
$$S_m(t) + d_m(t)\lambda \leq V_m \text{ and } S_m(t) \geq 0 \quad (6)$$

連続式の制約条件：

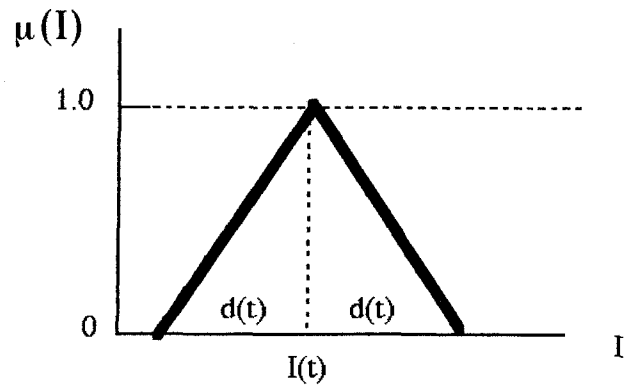
$$\begin{aligned} & S_m(t) - S_m(t-1) + O_m(t) + \sum_{k=1}^K Q_{km}(t) + d_m(t)\lambda \leq I_m(t) + d_m(t) \\ & S_m(t) - S_m(t-1) + O_m(t) + \sum_{k=1}^K Q_{km}(t) - d_m(t)\lambda \leq I_m(t) - d_m(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 Z_{OL} と Z_{OU} は費用の範囲、 Q_d と Q_{dl} は導水量の範囲、 O_d と O_{dl} は放流量の範囲、 $S(t)$ は貯水量、 $I(t)$ は流入量、 $d(t)$ は流入量の曖昧性、である。定式化には、非線形関数の

部分線形化が行われており、それに関する制約条件も追加される。



図一 2 建設費用のメンバーシップ関数



図一 3 流入量のメンバーシップ関数

3. 気象・水文要素の設定

地球温暖化によって降水・気温パターンの変動が起こることは容易に想像されるが、具体的な量や係数が求められているとは言えない。。ここでは、過去の統計資料に基づいて、温暖化時の降水・気温パターンを考えてみよう。気温と降水系列を各々ベクトルパターンとみなし、次の目的関数で分類を行おう²⁾。すなわち、

$$Dis = \frac{|X_i - Z_j|}{Z_j} \quad (8)$$

ここに、 X_i は観測データ系列、 Z_j は分類されたクラスターの代表系列である。すると、パターン間の遷移確率は

$$P_{mj} = \frac{NP_{jm}}{NP_j} \quad (9)$$

となる。ただし、 NP_{jm} は分類されたクラスター j から m へ行く観測系列の総数であり、 NP_j はクラスター j に属する観測系列の総数である。ここで、各クラスター（分類された系列）は月単位で処理されているとすると、以下のようにして、日データがシミュレートされることになる。

- i)まず、初期パターンを任意（現在）の観測データより抽出する。
- ii)続いて、乱数を用いて月単位系列を遷移確率より発生させる。
- iii)さらに、月ごとに同定された確率密度関数を用いて、日単位データを発生する。
- iv)日データを月ごとに統計処理し、対応するクラスターを求める。
- v)必要な数の系列を求めるために、ii)へ戻る。

ここで、温暖化シナリオとして、

- (i) Case 1 - 気温変化無し、かつ、降水量変化無し
- (ii) Case 2 - 気温 3°C 上昇、降水量変化無し
- (iii) Case 3 - 気温 3°C 上昇、かつ、降水量10% 増加
- (iv) Case 4 - 気温 3°C 上昇、降水量10% 現象

を用いる。ただし、気温、降水量は流出過程への影響があるだけで、土地利用や地質の変化は無いものとする。また、シナリオが平均的な変化であるのに対して、分散の変化は

$$\sigma'^2 = \frac{\mu + \Delta T}{\mu} \sigma^2 \quad \mu' = \mu + \Delta T \quad (10)$$

で与えられるとする。ここに、 μ は平均値、 σ は標準偏差を表す。手順ii)での遷移確率は変わらないが、平均値が変化したパターン（クラスター）を用いることになり、iii)では修正された密度関数に従うことになる。さらに、降水量の条件として、a)無降水日数、降水日数、降雨強度が考えられ、予めパターン別、気温別に確率密度関数、あるいは、頻度分布を算定しておく。その結果を下に、シミュレートされた気温別に降水の発生条件を求め直し、日単位の気温降水分布とするものである。

4. 流域シミュレーションによる影響評価

4.1 流域シミュレーションの概要

GISやリモートセンシングの発達を考えると、メッシュ型の流出モデルの有効性は明かで、4層多層メッシュモデル³⁾は次のように定式化される。

$$\text{First layer; } dS_A/dt = f + r + QA H_{in} - QA H_{out} - QAV_{out} - EVA \quad (11)$$

$$\text{Second layer; } dS_B/dt = QB H_{in} + QB V_{in} - QB H_{out} - QB V_{out} \quad (12)$$

$$\text{Third layer; } dS_C/dt = QC H_{in} + QC V_{in} - QC H_{out} - QC V_{out} \quad (13)$$

$$\text{Forth layer; } dS_D/dt = QD H_{in} + QD V_{in} - QD H_{out} - QD V_{out} \quad (14)$$

ここに、 S^* は対象メッシュでの貯留量、 f は表層での浸透量、 r は表層での上流からの流下量、 $Q \cdot H_{in}$ は水平方向の流入量、 $Q \cdot H_{out}$ は水平方向の流出量、 $Q \cdot V_{in}$ は鉛直方向の流入量、 $Q \cdot V_{out}$ は鉛直方向の流出量、 EVA は蒸発散量、である。連続式、運動方程式は以下のとおりである。

$$dS/dt = QI_b - QO_b \quad (15)$$

$$QO_b = 1/\kappa * S \quad (16)$$

ここに、 κ 透水係数、 QI_b 及び QO_b メッシュでの全流入、流出量である。ただし、メッシュ内における時間的、量的連続性を保つために、次の仮定をもうける。すなわち、

i) 水平には3方向からの流入があり、勾配に従って1方向に流出する。

ii) 流量の移動は、 $v = \kappa i$ で与えられる流速に従って換算される。

iii) 各層で最大貯留量を設定し、超える流入量に対しては、次式に応じて逆配分する。

$$\Delta Q_u = \Delta Q A_u v_u / \sum A_u v_u \quad (17)$$

ただし、 ΔQ は総超過流量、 A_u は u 方向の断面積、 v_u 流速、 ΔQ_u は u に戻る流量。

iv) 配分は流速にのみ依存し、水圧には関係しない。

4.2 流域への影響評価

気温が上がれば、蒸発散量などの物理的影響はもちろん、水需要量も増加する。ある対象流域ので農業、工業、都市用水の需要予測量は次ようになる。

$$\text{Agricultural use: } Q_a(t+1) = -0.03 - 0.01r(t-4) + 0.02T(t-4) + 0.83Q_a(t) + 0.14Q_a(t-2) \quad (18)$$

$$\text{Industrial use: } Q_f(t+1) = 0.10 + 0.67Q_f(t) - 0.10Q_f(t-1) + 0.10Q_f(t-2) + 0.14Q_f(t-3) \quad (19)$$

$$\text{Municipal use: } Q_c(t+1) = 0.20 + 0.017T(t-4) + 0.63Q_c(t) + 0.09Q_c(t-1) + 0.09Q_c(t-2) \quad (20)$$

ここに、 $Q^*(t)$ は時点 t での需要量、 T は気温、添字 a, f, c はそれぞれ農業、工業、都市を表す。供給量と需要量が算定されると、評価を行うことが出来る。物理的指標としては、次の利水安全度が考えられる。すなわち、

(i) 渇水の非発生確率を表す信頼度(Reliability):

$$REL = 1 - \frac{\text{the number of drought days}}{\text{total days}} \quad (21)$$

(ii) 渇水時より平常時の戻る可能性を表す回復度(resiliency):

$$RES = \frac{1}{\frac{\text{the drought periods}}{\text{the occurrence number}}} \quad (22)$$

(iii) 渇水の被害や大きさを表す深刻度(Vulnerability):

$$VUL = \frac{\sum(1 - \frac{\text{the discharge}}{\text{the water demand}})}{\text{the number of drought events}} \quad (23)$$

一方、経済的評価として、ミクロ経済学で言う等価的偏差⁴⁾を用いることが出来る。渇水発生確率 p の下での現況の効用レベル $E\{U_p(I)\}$ と発生確率 p' に変化した後の効用レベル $E\{U_{p'}(I)\}$ を比較しようとするものである。すなわち、

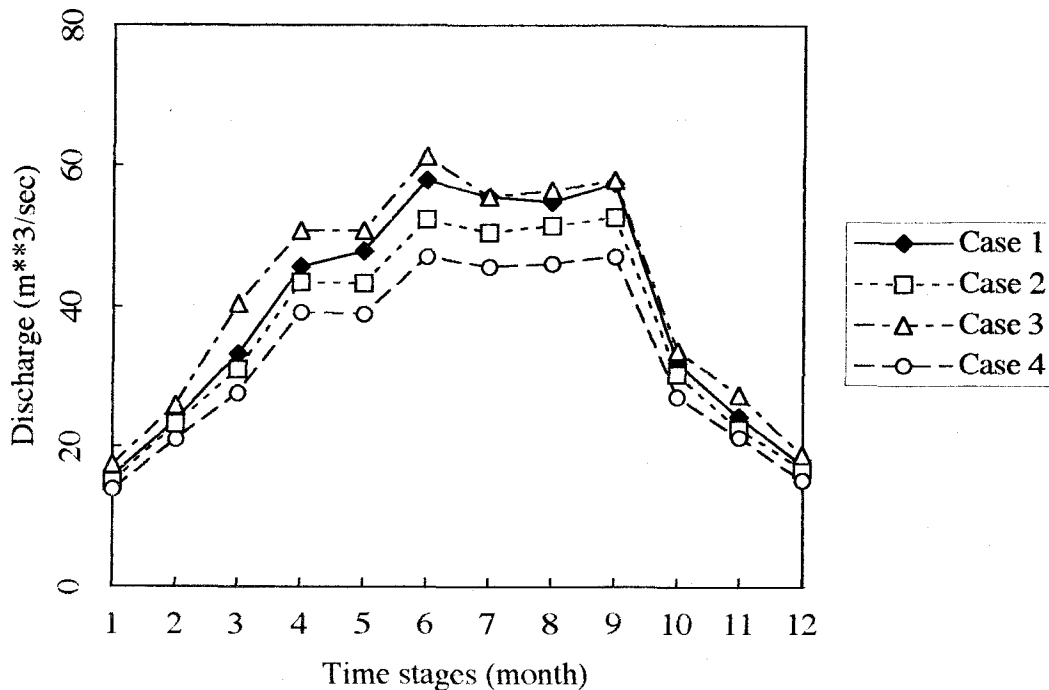
$$E\{U_p(I + EV)\} = E\{U_{p'}(I)\} \quad (24)$$

where,

$$E\{U_p(I)\} = PU(x, 1) + (1 - P)U(x, 0) \quad (25)$$

$$hU(x, \ln l = \ln 0) = -(\rho/h)\{\ln W_1 x_1^{-\rho} + W_2 x_2^{-\rho} + W_3 (a_3 - x_3)^{-\rho} + W_4 (a_4 + x_4)^{-\rho} \\ + W_5 (a_5 - x_5)^{-\rho} + W_6 (a_6 + x_6)^{-\rho} + W_7 (a_7 + nx_7)^{-\rho}\}$$

で表され、EV が被害額となる。ここに、 h は誤差項の分散、 W 各評価項目の重み、 x_1 は所得額、 x_2 は住宅の広さ、 x_3 は通勤時間、 x_4 は日照時間、 x_5 は買い物の便、 x_6 は公共のサービス、 x_7 は渇水の危険性、を示す。



図一 4 各シナリオにおける流出ハイドログラフの比較

図一 4、表一 1、2 は T 流域における流出ハイドログラフの変化と利水評価の結果である。流域内の世帯数は約 1.8×10^5 戸である。降水量が増加すればほとんど影響はでない

か、かえって渇水が少なくなるようである。経済的にも負の被害である。しかし、降水量の現象が起これば、少しづつ影響が現れ、各家庭でも被害を被ることが分かる。降水の発生パターン、発生量に関しては統計資料しか利用していないので、集中豪雨の多発などは組み込まれておらず、今後、気象モデルの一層の精度向上が望まれる。

表一 1 各シナリオにおける渇水指標

	Frequency	Duration	Reliability	Resiliency	Vulnerability
Case 1	24	42	0.934	0.571	0.545
Case 2	25	44	0.932	0.568	0.550
Case 3	21	35	0.942	0.600	0.508
Case 4	27	55	0.929	0.382	0.603

表一 2 各シナリオにおける渇水の経済評価

	Yearly damage per household x1,000 Yen/H/Y	Monthly damage per household x1,000 Yen/H/M
Case 2	2.7	0.23
Case 3	-8.4	-0.7
Case 4	5.5	-0.46

5 結論

本研究は、地球温暖化が水資源システムへ及ぼす影響に関して、評価手順を提案したものである。実時間問題は省略したが、得られた成果をまとめると以下ようになる。

- i)大略的な最適化モデルから、詳細な流域シミュレーションまでを利用した評価手順を提案し、総合的な評価、並びに計画を可能とした。
- ii)曖昧な気象・水文情報の下での最適計画としてファジイ理論を導入し、全体的な計画策定を可能とした。これより、施設の建設、管理計画も算定される。
- iii)気象・水文系列をパターンとして処理し、気温に対応した気候変動シミュレーションモデルを提案した。
- iv)水利用システムを組み込むことが可能な多層メッシュ型流出モデルにより、流域内の水資源分布、渇水分布の把握を可能にした。
- v)利水安全度および等価的偏差による渇水確率の変化を評価し、温暖化による影響を数値的に捉えた。

参考文献

- 1) T. Kojiri (1995) Planning and Management of Water Resources Systems under Future Information using Fuzzy Optimization, Modeling and Management Basin-scale Water Resources Systems, IAHS Publ. No.231, 311-318
- 2) T. Kojiri, T.E. Unny and U.S. Panu (1994) Cluster Based Pattern Recognition and Analysis of Streamflows, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Vol.3, Kluwer Academic Publ., 363-380
- 3) T. Kojiri, (1993) Impact Analysis on Water Resources System due to Global Warming Through Classified Input Patterns and Mesh-typed Run-off Model, Proc. XXV Congress of IAHS. Technical Session A. Volume I: 377-384
- 4) 森杉寿芳・大島伸弘 (1985) 渇水頻度の低下による世帯享受便益の評価法の提案、土木学会論文集、第359号/IV-3、91-98