水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 13, No. 3 (2000) pp. 186-197

水資源質に関する研究の現状と将来

—特にモデル、地下水、有害化学物質、地球温暖化影響、量と質の統合管理に注目して—

A critical Review of Research on Water Resource Quality, With Special Reference to Model, Groundwater Quality, Risk Management of Toxic Chemicals, Influence of Global Warming, and Integrated Management of Water Quantity and Quality

福島武彦*

(広島大学工学部)

Takehiko FUKUSHIMA

Faculty of Engineering, Hiroshima University

東海明宏**

(北海道大学工学研究科)

Akihiro TOKAI

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

小尻利治・池淵周一***

(京都大学防災研究所)

Toshiharu KOJIRI, Syuichi IKEBUCHI

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The recent research trends on water resources are investigated by classifying and comparing the themes of papers on water resource quality published in Japanese and international journals. The following research topics are considerably limited in Japan; 1) analyses on the runoff of toxic chemicals and groundwater quality, 2) models of package-type, models supported by GIS, and models for simulating the runoff of toxic chemicals, and 3) countermeasures and/or techniques for reducing the influence of non-point sources. The future research directions in this field are discussed and proposed with special reference to model, groundwater quality, risk management of toxic chemicals, influence of global warming, and integrated management of water quantity and quality.

Key Words : Water resource quality, Model, Groundwater quality, Toxic chemicals, Risk management, Global warming, Integrated management of water quantity and quality

水資源質に関する日本と世界における論文テーマを分類し、論文数をまとめることから、最近の研究動向を調べ、比較している。その結果、日本の研究に欠けているものとして、1) 有害化学物質の流出現象や地下水質の解析、2) パッケージ型、GIS支援型、有害化学物質流出に関するモデル、3) ノンポイント汚染源に対する対策・技術の開発、があげられる。これらを参考に、今後日本で進めるべき水資源質の研究テーマとして、モデル、地下水質、有害化学物質を対象としたリスク管理、地球温暖化の影響、水資源における量と質の統合管理、を取り上げ、それぞれについて研究の問題点と研究方向を議論し、提案している。

キーワード：水資源質、モデル、地下水質、有害化学物質、リスク管理、地球温暖化、量と質の統合管理

I. はじめに

21世紀には水が原因で戦争が起こるのではないかと警告が発せられている(高橋, 1997)。有害化学

物質の混入、自然環境の喪失による浄化作用の低下、などにより劣化する「質」、ならびに人口増加、開発圧力による水需要の増加、地球温暖化に伴う気象変化により減少あるいは不安定化する「量」、といっ

*広島大学工学部 〒739-8527 東広島市鏡山

Faculty of Engineering, Hiroshima University, Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8527, Japan

**北海道大学工学研究科 〒060-8628 札幌市北区

Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

***京都大学防災研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasyo, Uji 611-0011, Japan

たことが原因で、多くの地域で水資源の逼迫が懸念されている。

水がその利用者、固有の生態系にとって、有効に利用されるためには、良好な質を維持しなければならない。ここではそれを「水資源質」としてとらえ(市川, 1998), 水資源質に関する国内外の研究の動向をまとめるとともに、今後の研究方向を議論する。次に、水資源質の研究の中で今後進めるべき課題として、モデル、地下水、地球温暖化の影響、化学物質のリスク評価、質と量との関係といったものを取り上げ、それぞれに関して、研究の問題点を議論し、研究方向を提案する。

II. 国内外での研究の動向

1. 論文整理の方法

世界の研究動向は、「Water Environment Research」の1997年と1998年の論文レビュー特集号(literature review; 1996年と1997年に発表された英語論文が対象)のUrban wet weather flow (都市降雨時流出), Nonpoint sources (ノンポイント汚染源; ここでは都市域以外の農地、林地などが対象), Groundwater Quality (地下水質)に紹介されている約2500件の論文に加え(相互に若干の重複あり), 数編の研究展望論文を加え解析した。なお、レビュー対象論文の内、日本人が第1著者と考えられる論文が都市降雨時流出で6件、ノンポイント汚染源が1件、地下水質で14件程度あるが、その数は後述の日本語論文と比べ少ない。すなわち、この解析で得られた結果は主に英語圏の諸国での研究動向を示すものと考えている。

日本の研究動向は、「水文・水資源学会誌」, 「土木学会論文集(第7部門)」, 「環境工学研究論文集」, 「環境システム研究」, 「水工学論文集」, 「水環境学会誌」, 「環境科学会誌」, 「水道協会誌」, 「下水道協会誌」, 「陸水学会誌」, 「日本土壤肥科学雑誌」, 「地下水学会誌」の12の雑誌に、1993～1997年の5年間に発表された論文(審査付き)を対象として、その内容を吟味して、分類を行った。特に、「下水道協会誌」では「下水道論文集」, 「日本土壤肥科学雑誌」では「Soil Science and Plant Nutrition」という関連する論文集に発表された論文も対象とした。I. にも述べたように、水資源質を扱う論文を主な対象としたが、水資源量が主題のものもわずかであるが含まれている。また、対象雑誌は水資源学、土木工学、環境科学・工学、陸水学、農学などの分野から選んだものであり、環境化学、林学等の分野のもの

が抜け落ちているが、今後の課題としたい。

論文の分類は、「Water Environment Research」にならない、まず都市降雨時流出、ノンポイント汚染源の2大分類とした。次に、それぞれの研究を現象解析、管理、対策のどれに重点を置くかで中分類した。さらに、現象解析では汚染タイプにより、管理では手法タイプ(モニタリング、モデリング、リアルタイムコントロール(RTC)、流域管理)により、対策・技術では手法により、小分類した。2つ以上の小分類テーマを有するものもあるが、ここでは最も適合する小分類のみに属させた。なお、Groundwater Qualityに紹介された論文の議論はIV. で別に行う。

2. 水資源質研究の現状

1) 世界における研究の動向

表-1, (1)と(2)には、世界における水資源質研究を都市降雨時流出、ノンポイント汚染源に分けて論文数をまとめる。両者それぞれ2年間に400～500件、つまり両分野をあわせて年間400～500件の論文が発表されている。

都市降雨時流出に関する研究では、管理と対策がそれぞれ40%弱、現象解析(発生源、影響解析も含む)が20%強となっている。現象解析の中では、発生源解析が42件、下流水域の影響解析が19件で、残り30件が現象記述型の研究である。管理では、モデルに関わるものが54件と33%を、流域管理が48件で29%を占めている。対策研究では、政策・教育タイプが74件で45%、滞留(貯留)に関するものが52件で32%と多い。

ノンポイント汚染源に関する研究では、現象解析と管理がそれぞれ40%、対策が20%程度の比率となっている。現象解析の中では、その2/3を表流水が、1/3を地下水が占めている。また、農業を中心とした有害化学物質に関するものが96件と現象解析の50%以上を占めている。管理の中ではモデルを主題としたものが115件と3/4以上を占めている。対策では、耕作方法(tillage) 33件、緩衝域(buffer zone; vegetation filter strip) 28件、滞留池(detention pond) 10件、湿地(wetland) 10件が多い。

2) 日本での研究の動向

表-2から、5年間で、都市降雨時流出関連の論文が46件、ノンポイント汚染源関連の論文が90件と、後者が多いこと、合計で年間27件程度と世界の論文数の6%程度であること、両分野とも最近の方が論文数が増える傾向にあることがわかる。また、都市

表一 1(1) 都市降雨流出に関する世界の論文の分類と件数(1996年と1997年の2年間, 全420件)

Table 1(1) Classification of the papers on urban runoff published in international journals (1996-1997; total number: 420)

a. 現象解析 (91件)			
	汚染現象 (30件)	発生源 (42件)	影響 (19件)
アンモニア、DO消費、BOD、COD	5	1	
栄養塩	4	9	1
トリハロメタン		1	
バクテリア、ウィルス	3	4	6
重金属	5	11	8
疎水性有機物*1	5	16	4
農薬	5		
ごみ	3		
*1; PAHs, PCB, PCDD/F etc.			
b. 管理 (165件)			
モニタリング	36		
モデル	38		
GIS結合モデル	16		
実時間制御	27		
流域管理	48		
c. 対策・技術 (164件)			
政策・教育	74		
技術一般	12		
排水	21		
滞留	52		
湿地	5		

表一 1(2) ノンポイント汚染源に関する世界の論文の分類と件数(1996年と1997年の2年間, 全462件)

Table 1(2) Classification of the papers on non-point sources published in international journals (1996-1997; total number: 462)

a. 現象 (184件)		
表流水	土壌	28
	栄養塩・有機物	36
	農薬・有害化学物質	54
	硝酸	25
地下水	薬・有害化学物質	41
b. 管理 (184件)		
モニタリング	44	
表流水モデル	70	
地下水モデル	45	
GIS結合モデル	25	
c. 対策・技術 (94件)		
耕作方法	33	
家畜	7	
水位管理	6	
緩衝領域	28	
滞留池	10	
湿地	10	

降雨時流出関連では「水工学論文集」, 「下水道協会誌」, 「環境工学研究論文集」に, ノンポイント汚染源関連では「水工学論文集」, 「水環境学会誌」, 「水文水資源学会誌」, 「日本土壌肥科学雑誌」に論文が

多い。以下にその内容を分類する(表一 3, (1), (2))。

都市降雨時流出に関する研究では, 管理が48%, 現象解析28%, 対策24%, と世界と比べ対策研究が少ないのが目立つ。管理の中ではモデルに関するものが半数以上を占めている。現象解析では有害化学物質の現象記述が5件, 栄養塩の発生源を扱ったものが3件ある。対策では滞留池が6件と多い。

ノンポイント汚染源に関する研究では, 現象解析が64件と71%を占め, 管理は22件で24%, 対策は4件で4%と少ない。現象解析の中では表流水が46件とその70%以上を占め, 地下水関連は18件と少ない。表流水の中では栄養塩, 有害化学物質, 地下水では硝酸が多い。管理ではモデル研究が大きな割合を占めている。

3) 世界と日本の研究動向の違い

両分野あわせて, 日本の研究に欠けているのは以下の点である。

- (i) 現象解析では, 特に都市域からの有害化学物質, 微生物の流出現象である。表一 4 には都市域からの雨天時流出現象解析の対象となった有害化学物質を整理するが(世界), 多環芳香族炭化水素(PAHs), PCB, 農薬, MTBE, ダイオキシンなどが多い。
- (ii) 管理においては世界, 日本とも, モデルを用いた研究の割合が高いが, 世界では1) パッケージ

表一 2 日本の雑誌に掲載された水資源質に関する論文数
Table 2 Numbers of the papers on water resource quality published in Japan.

	1993	1994	1995	1996	1997	合計
都市						
土木学会論文集	0	1	1	1	3	6
環境工学研究論文集	2	4	0	1	0	7
環境システム研究	1	1	1	0	1	4
水工学論文集	1	1	1	0	2	5
水環境学会誌	1	0	1	3	4	9
環境科学会誌	1	0	0	0	0	1
水道協会誌	0	1	0	0	0	1
下水道協会誌	2	1	0	2	3	8
水文水資源学会誌	0	0	1	0	0	1
陸水学雑誌	0	0	0	0	0	0
日本土壌肥科学雑誌	0	0	0	0	0	0
地下水学会誌	0	0	3	0	1	4
計	8	9	8	7	14	46
都市以外						
土木学会論文集	0	2	1	1	1	5
環境工学研究論文集	0	0	2	0	1	3
環境システム研究	0	0	0	1	0	1
水工学論文集	2	5	2	2	7	18
水環境学会誌	2	0	2	7	2	13
環境科学会誌	0	0	1	1	1	3
水道協会誌	1	1	1	0	1	4
下水道協会誌	0	0	0	0	0	0
水文水資源学会誌	2	2	3	1	5	13
陸水学雑誌	2	0	0	0	0	2
日本土壌肥科学雑誌	2	6	5	2	4	19
地下水学会誌	2	4	0	2	1	9
計	13	20	17	17	23	90

表一 3(1) 日本の雑誌に掲載の都市降雨流出に関する論文の分類と件数(1993~1997年の5年間, 全46件)

Table 3(1) Classification of the papers on urban runoff published in Japan(1993-1997; total number: 46)

a. 現象解析と影響 (13件)

	現象	発生源	影響
NH ₄ , DO消費, BOD, COD	1		
nutrients	1	3	
THM			
bacteria, virus			
heavy metals	1	1	
hydrophobic compounds	5		
pesticides	1		
litter			

b. 管理(22件)

モニタリング	5
モデル	13
GIS支援のモデル	
リアルタイムコントロール	
流域管理	4

c. 対策・技術 (11件)

政策・教育	1
技術一般	2
排水路	2
滞留	6
湿地	

表一 3(2) 日本の雑誌に掲載のノンポイント汚染源に関する論文の分類と件数(1993~1997年の5年間, 全90件)

Table 3(2) Classification of the papers on non-point sources published in Japan(1993-1997; total number: 90)

a. 現象 (64件)

表流水	土壌粒子	8
	栄養塩	24
	農薬等の有害化学物質	14
地下水	硝酸	13
	農薬等の有害化学物質	5

b. モデルと管理 (22件)

モニタリング	5
表流水のモデル	13
地下水のモデル	3
GIS支援のモデル	1

c. 対策技術 (4件)

農地	2
畜産	
地下水位管理	1
バッファ領域	
植生フィルター	1
滞留池	
湿地	

表一 4 都市降雨時流出で対象とされた物質(世界)

Table 4 Substances targeted by the papers on urban runoff(international journals)

PAHs (多環芳香族炭化水素 ; Polycyclic aromatic hydrocarbons)	13
PCBs (ポリ塩化ビフェニール Polychlorinated biphenyls)	4
農薬	4
MTBE (メチルトブチルエステル ; Methyl tert-butyl ether)	3
PCDD/PCDF (ダイオキシン等 ; Polychlorinated dibenzo-p dioxin or dibenzo furan)	3
petroleum hydrocarbons (石油系炭化水素)	2
phthalate (フタル酸)	1
VOCs (揮発性有機化合物 ; Volatile organic compounds)	1

表一 5 水資源質研究で利用されているモデル(世界)

Table 5 Generalized models for the research on water resource quality

a. 都市降雨流出

SWMM (Stormwater Management Model)	7
Hydro Works	5
MOUSE	4
STORM (Storage Treatment Overflow Runoff Model)	2
WASP	1
MIKE 11	1
HYDRA	1

b. ノンポイント発生源

GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems model)	9
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	9
AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)	6
HSPF (Hydrologic Simulation Program FORTRAN)	3
USLE (Universal Soil Loss Equation)	3
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	3
ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)	1
CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model)	1

型モデル, 2) GIS支援のモデル, 3) 有害化学物質の流出モデル, が多いのが特徴である。表一5には都市降雨時とノンポイント汚染源に分け, 多用されているモデルを示すが, 前者ではSWMM, Hydro Works, 後者ではGLEAMS, WEPP, AGNPS等のパッケージモデルがいろいろな研究に利用されている。日本では研究者それぞれが自らのデータをもとにモデルを作ることが多いが, 世界的にみれば市販あるいは無料提供されるパッケージモデルに自らのデータを当てはめたり, 新たなモジュールを追加するようなやり方で, モデルの共用化が進んでいる。

- (iii) 対策においては, 特にノンポイント汚染源に対する対策技術の検討が日本では少ない。また, 日本では水田が多いが, 用水の利用の仕方での汚染型

となる場合も, 浄化型になる場合もある。その辺りの系統的な調査・研究が少ない。

- (iv) 日本では地下水の水質に関わる論文が年間10件以下と少ない。雑誌の選び方も関係しているが, 世界での論文数, その多彩さ(後述Ⅳ参照)と比べるとかなり見劣りする。

以上から, Ⅲではモデル, Ⅳでは地下水, Ⅴでは有害化学物質を対象としたリスク管理, を題材としてももう少し詳細な議論を行う。また, 世界でも研究例があまり多くないが, 地球温暖化の水資源質への影響をⅣで, 量と質の統合管理をⅥで論じる。

Ⅲ. モデル研究の現状と今後の方向

Wurbs (1998)は, ここ30年間アメリカでは水資源システム予測モデルの開発に多くの労力, 時間と

資金が投入され、これらは現在では世界中で多くの専門的な問題解決に利用されていることを報告している。そして、代表的な汎用モデルとして表一6のようなものを挙げ、それらの特徴をまとめるとともに、開発者とのコンタクト方法を示した。

Corwin *et al.* (1997)は土壌層(Vadose zone)におけるノンポイント汚染物質の移動に扱うGIS支援モデルを議論し、1) データベース、2) 地理情報システム、3) モデル、が三位一体として開発されなければならないとした。すなわち、土壌層の様々な特性を表現するパラメータの全国規模での蓄積、汎用型の地理情報システム(ARC/INFO, ERDAS, GRASS等)やモデル(GLEAMS, LEACHM等)の開発や修正が、様々な機関の共同作業として進む必要があるとした。

Thomann(1998)は水質、生態系モデルの開発を、1) 第1期(1925~1980年)；対象水域での対象水質

表一6 汎用モデル一覧(Wurbs (1998) を一部修正)
Table 6 Generalized water resource simulation models

a. 流出

HMS (Hydrologic Engineering Center)
SSARR (USACE North Pacific Division)
TR-20 (Natural Resource Conservation Service)
SWMM, HSPF (EPA)
SWAT (Agricultural Research Service)
PRMS (U.S. Geological Survey)

b. 河川水理

RAS, UNET, HEC-6 (Hydrologic Engineering Center)
FLDWAV, DAMBRK (National Weather Service)
FESWMS (U.S. Geological Survey他)

c. 河川・貯水池の水質

QUAL2E, WASP (EPA)
CE-QUAL (Waterways Experiment Station)
WQRRS, HEC-5Q (Hydrologic Engineering Center)

d. 貯水池・河川管理システム

HEC-5, HEC-PRIM (Hydrologic Engineering Center)
IRIS (Cornell University)
WRAP (Texas A&M University)
PRSYM (Bureau of Reclamation and others)
ARSP (Acres International Cooperation)

e. 地下水

MODFLOW, MOC, SUTRA (U.S. Geological Survey)
PLASM, RANDOM WALK (Illinois State Water Survey)
WHPA (EPA)
SWIFT II (Sandia National Laboratories)

f. 水分配システム

KYPIPE (University of Kentucky)
WADISO (Waterways Experiment Station)

g. 水需要予測

IWR-MAIN (USACE Institute for Water Resources)

変化を記述するモデル、2) 第2期(1980~1990年)；底泥、流域からの入力、水理現象などが組み込まれた水質モデル、3) 第3期(1990年~)；大気から入力、生態系が再現されたモデル、に分けている。このようなモデルのモデルの大型化はコンピュータのパワー増大によって支えられているが、将来の“golden age of models”は単に大きいということではなく、水質管理におけるdecision-making過程での合意形成に寄与することが期待されている。このためには、科学者、技術者の組織によるモデルの評価が必要である、と述べている。

また、Ogden(1998)はGISモジュールと流域分布定数型モデルに関するASCEの委員会報告をまとめて、そうしたモデルが行政機関に利用されるには、1) 流域、雨の降り方などの空間特性の表現、あるいは2) 水、底泥、汚染物質の流出フラックスをより正確に再現する、といった改良が必要であるとしている。また、こうしたモデルの応用性の向上を図ることから、水文技術者間の相互理解と技術向上が期待されるとしている。

Field *et al.* (1998)は都市降雨時流出の適切な管理のためのここ数年間の研究方向として、1) 問題の特徴付けと評価、2) 流域管理、3) 有害化学物質の影響評価と管理、4) 管理技術、5) インフラ整備をあげ、特に流域管理としては、政策決定支援システム、つまり目標達成のための計画案の作成とそのコストの算定などを行うことができる道具の開発を急務としている。

以上を含め、今後のモデル研究の方向としては、

- 1) 研究者、技術者の間で共用できるデータベース、パッケージモデルの開発、公開を行う。
- 2) 政策決定の際の議論、相互理解、合意形成に役立つモデル、システム作りを行う。また、こうしたシステム作りへの科学者、技術者集団の積極的関与を促す。

IV. 地下水質の研究

表一7には「Water Environment Research」のGroundwater Quality (地下水質)に紹介された論文1636件(1996, 1997の2年間)を分類した結果を示す。これによれば、世界で一年間に800件以上もの地下水質を扱う論文が発表されていること、その内では現象解析とモデルが58%、対策・技術が25%と多いことがわかる。特に、現地での動態解析として、有機化学物質を扱うものが55件、硝酸を対象とするも

のが50件と多い。対策研究は都市におけるポイント発生源を対象としたものが多く、現象解析とモデルではノンポイント発生源を扱う比率も高い、という傾向が見られる。

日本では、「地下水学会誌」、「日本土壌肥科学雑誌」を中心に、農地地下水の硝酸汚染、有機塩素化合物による地下水汚染とその改善技術、等に関する論文が発表されているが、そのトータル数は少ないと言わざるをえない。この原因としては、1) 地下水利用量が少ない(一人当たりの年間取水量は、日

表一 7 世界での地下水質研究の分類と件数(1996年と1997年の2年間、全1,636件)

Table 7 Classification of the papers on groundwater quality published in international journals(1996-1997; total number: 1,636)

a. 現象解析とモデル (951件)		
飽和層での諸過程	取り込み・脱離	211
	化学反応	106
	生物分解	161
	塩水	33
	コロイドによる輸送	38
	微生物輸送	27
非飽和層での諸過程	取り込み・脱離	53
	化学反応	26
	生物分解	35
	ガス、蒸気輸送	64
	廃棄物埋立	9
現地での動態解析	農薬	55
	硝酸	50
	金属	22
	放射性物質	13
	埋立処分地浸出物質	10
	微生物	17
	その他	21
b. 管理 (282件)		
モニタリング	水	166
	土壌	14
	ガス	18
	リモートセンシング等	30
管理システム	リスクアセスメント	24
	水質	30
c. 対策・技術 (403件)		
	総合対策	26
	物理化学的方法	97
	フラッシング法	82
	生物学的方法	95
	ガス吸引法	54
	電気化学的方法	27
	光処理	18
	熱処理	4

本104m³、に対してアメリカ433m³と多い(世界資源研究所・国連環境計画・国連開発計画・世界銀行, 1999)。ヨーロッパの中でもブルガリア566m³、アイスランド394m³、ポルトガル311m³、デンマーク215m³などは多い)、2) 地下水の汚染状況に関する調査が少ない、といったことがあげられる。なお、「地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会」などには年間100件に近い研究発表があり、近い将来には多数の論文が期待される分野であることは間違いない。今後の研究方向としては、

- 1) 地下水質に関するデータが少なく、またその整理が十分にされていないのが問題である。長期、広域的なモニタリングとそのデータベース化が急務である。
- 2) 流域の3次元的水循環構造を把握するため、表面流と地下水流との相互関係に関する現象解析を行う。
- 3) 同様に、地表面の汚染と地下水汚染との関係に関する研究が必要である。例えば、都市でのノンポイント汚染源、道路、屋根からの排水の地下水への流入と汚染に関する現象解析とモデル化が十分に行われていない。また、雨水の地下浸透を行う場合、その地下水質に及ぼす長期的な影響を懸念する報告もあるので(Wagner, 1998)、そうした観点での調査研究も必要である。

V. 有害化学物質を対象としたリスク管理

環境ホルモン様物質(内分泌かく乱化学物質)の生態系への影響、ダイオキシンの発ガン性などが、最近マスコミでも大きく取り上げられている。化学物質汚染問題の現状の把握には、環境への負荷量、生産量、被曝に関係する環境媒体の化学物質濃度、環境媒体での残留性といった要素を考慮する必要がある。化学物質安全性総点検調査においては、そういった要因を考慮した上で、既存化学物質、新規化学物質にわけ、日本全国の代表モニタリング地点において年1回程度の頻度の調査が継続されている。

化学物質を生産、消費、廃棄の軸で類型化したとき、例えば工業原材料系、家庭消費系、製品添加剤系、農業消費系と分類すると、これらのカテゴリーごとに環境への進入過程は異なり、リスクへの対応はそれに沿ったものとなる。なかでも開放系の用途の化学物質は直接環境への負荷となるため農薬、洗剤等は過去において検討対象とされ、製品の改善・使用に当たっての注意事項が表示されるといった制

度を生み出してきた。一方閉鎖系の用途については、直接的な負荷に直には結びつかないものの、それを含む製品の寿命にしたがって徐々に環境へ接触しうろ形態へと変化するため、廃棄物あるいは浸出水としてでてきたものの適正処理の問題として取り組まれている。こうした微量化学物質の水資源質に及ぼす影響は、従来の有機汚濁による溶存酸素の欠乏、急性毒性物質の突発的流出事故等とは、管理、対策の面でも大きく異なる対応が要求されている。すなわち、リスクとして影響を定量化する際の解析の枠組みへのインプットは多種多様であり、リスクを評価する際のエンドポイントも評価視点の数だけ存在するため、それらをまず考慮し、整理しなければならない。

こうした物質のリスク管理にあたっては、1) 物性、動態が不明なものが多く、媒体間の分配、汚染の空間・時間スケールを予想することが難しい、2) 毒性実験結果、特に慢性影響、生態系への影響が不明な物質が多い、3) 生産量が経年的に大きく変化する、あるいは非意図的生産物のように、環境への侵入量の推測が難しいものが多い、4) 環境中濃度は微量であるためにモニタリングデータを得ることが難しく、また多種類であるためモニタリングデータを収集することにも困難があるといった問題を抱えている。

このため、様々な化学物質のすべてに対して、詳細な動態モデルを当てはめ、環境中の濃度を予測し、リスクを評価することは極めて難しい。実際的には、まず環境中でリスクが高いと予想される物質をスクリーニングし(東海ら, 1996)、次にリスクが高いものに関してはその水域での濃度分布を予測する(小尻ら, 1999)、といった流れでリスク管理を行わざるを得ない。

今後、有害化学物質の適切なリスク管理に向けて、以下のような研究や事業が必要と考えられる。まず、研究基盤をしっかりとしたものとするために、

- 1) 有害化学物質の生産、消費、物性、毒性、環境中濃度等に関するデータベースを構築し、公開する。
 - 2) 特に、環境へ漏洩するプロセスの明確化と化学物質の消費特性に応じた類型化が重要である。
- 第2に、リスク評価のための方法論の開発として、
- 3) リスク発現に関連する一連のプロセス、すなわちDSP (Driving force), S(State), R(Response)にかかわるリスク指標を開発する。

- 4) 多数の物質のリスクを統合評価するための方法論・モデルを開発する。

- 5) 特に、水資源質の管理という視点からは、流域の水量・水質からみた健全性や耐リスク性を現す指標を開発し、それを評価する。

第3に、事例研究として、

- 6) PRTR (Pollutant Release and Transfer; 様々な排出源から排出又は移動される潜在的に有害な汚染物質の目録若しくは登録簿)などのデータを活用して、ある地域における物質濃度予測、リスク評価モデルを作成する。例えば、どのような水域で、どのような物質が問題となりそうかを、大まかに予測するモデルを開発する。

- 7) 発生源を点源、面源あるいは非意図的生成物等に分け、それぞれのリスク削減に向けての管理、対策・技術を合理的に選択するための手法を提案する。

さらに、以上を踏まえて、advancedな研究課題としては、

- 8) どういったリスク因子をどういった優先順位で対応するかといったリスク管理原則の確立。
 - 9) リスク評価のシステム化。既往のリスクモデルを情報技術を援用して統合し、広くユーザーへ普及することを意図する。
 - 10) 地域における耐リスク的な都市代謝技術システムの構築や既存の安全対策との連携。
- といった研究が必要となる。

VI. 地球温暖化の水資源質に与える影響

地球温暖化影響に関する研究方法としては、1) 長期観測データを用いて温暖化の影響が現れているかを確認するもの、2) 気象、長期観測データを用いて高温、低温など気象条件の違いによりどのような影響が現れるかを統計的に調べるもの、3) 現象を再現するモデルを構築し温暖化後の条件を入力して影響を調べるもの、4) 実験により温暖化後の状態を再現して影響を調べるもの、5) 多くの気象条件の異なるフィールドでの観測結果の解析から影響を予測するもの、などがある。水環境に関わる分野としては、水温、氷厚など直接的な影響の解析には1)、2)が、水文・水資源の解析には3)が、水質、植物プランクトンの解析には2)、3)、5)が、高次生態系の解析には4)や5)が、用いられることが多い。

こうした手法はそれぞれ長所、短所を有するが、

特に短所としては、1)ではまだ影響の現れているものが少ないことが挙げられる。次に、2)では過去の気象変動の周期が短く、今後の温暖化現象とは現象的に異なるものではないか、との疑問点がある。3)のモデルには、基礎過程の再現を目指すようなタイプと入力・出力の間をブラックボックスで結ぶタイプ(ニューラルネットワークモデルなど)があるものの、各種パラメータのキャリブレーションのためには、当然のことながら長期観測データが必要である。また、温暖化影響を表現するパスが正しく基礎過程として盛り込まれているか、入力情報が十分であるか、等の問題点を有している。4)は実験室での実験に留まり、同じ現象がフィールドでも生じるのかに疑問が生じる。最後に5)では地域性の評価が問題となる。また、全部の手法に共通するが、原因と結果の関係をa)時間遅れの無い、b)線形な、c)可逆的な系、と仮定している場合も少なくないが、そうでない場合にはカタストロフィックな結果がもたらされないと限らない。

北アメリカにおける気候変動と淡水生態系影響評価のシンポジウム報告(McKnight, D. *et al.* ed., 1996)では、1)が氷の消失時期、底泥鉛直分布、水温、イオン濃度などに関する7編、2)が躍層深、各種イオン流出、湖内濃度、動物プランクトンの現存量などに関する4編、3)が氷厚、水流出、有機物濃度変化、各種イオン流出、塩湖や沿岸域での鉛直塩分分布、サケの重量、魚の生存域などに関する13編、4)が動物プランクトンの生存に関する1編、5)が栄養塩、魚の分布などに関する2編、が報告されている。特にモデルを利用した3)による研究が多いのが特徴であるが、モデルの精度、問題点の話はあまり議論されていない。

また、ヨーロッパ、北アメリカの陸水学者は、以下のような4つのワーキンググループを作り、地球温暖化の湖沼、貯水池への影響を整理し、管理方法を議論している(George, D.G., 1998)。グループ1; 気象の日々変動の湖沼への影響のモデル化、グループ2; 気候変動の湖沼への影響の検出と予測、グループ3; 気象、気候が変化する場での水質管理、グループ4; データベースの構築などを目的とした国際的ネットワークの形成。

ところで日本では、水資源量に及ぼす地球温暖化の影響は様々に議論、予測されているが、水資源質への影響予測は定性的なものに止まっている(Hanaki, *et al.*, 1998)。すなわち、地球温暖化により淡水

生態系では、1)らん藻類の繁茂、2)表水層の発達、3)貧酸素層の発達、4)生物、特に動物プランクトンのサイズの低下、5)流域での農業使用の増加による化学物質濃度の上昇、といったことが生じるのではないかと考えられているが、その程度は不明である。なお、ここ数十年の気象と河川、湖沼水質データをもとに、気象変動の水質に及ぼす影響を定量的に求め、その結果をもとに地球温暖化の影響評価を行った研究は存在する(尾崎ら, 1999; Fukushima *et al.*, 2000)。

現在までの温暖化影響研究の問題点をまとめると、a)水流出を除くと気温のみの影響が評価されていて、降水量が変化した場合の影響が予測されていない、b)人間活動、流域の陸上生態系といった水環境の境界条件の変化が予想出ていないので、水環境の変化を予測することが出来ない、c)モデルを作成するのに十分なデータベースが構築されていない、などが挙げられるであろう。

以上から、今後、行うべき研究とその流れとしては、

- 1) 気候変化が森林、水田、畑地といった各生態系とそこからの水、物質流出に及ぼす影響を、過去の資料、モデルから明らかにする。
- 2) 同じく気候変化による人間活動の変化に伴い、都市域からの水、物質流出の変化を推測する。
- 3) 水文資料と同じく、水質、生物量に関してもデータベースを構築する。
- 4) 3)をもとにして、水流出モデルに対応する物質流出モデルを作成する。
- 5) 生物に及ぼす水温、溶存酸素量などの影響に関するデータベースを作成し、4)のモデルと組み合わせることから、生物量変化予測を行う。
- 6) 水量、水質、生物量の変化予測結果をもとにリスク評価を行い、対策、適応方法を提案する。

なお、同じく地球環境問題として水資源質への影響が懸念される酸性雨に関しては、Gorham (1992)、佐竹(1999)といった、レビュー、研究展望があるので、ここでは省略する。

VII. 水資源における量と質の統合管理

1. 将来の水資源管理

従来の水資源管理は水利用の立場のみで、点での水量、水質を知ることから、需要を満足する量と基準を満足する質を対策技術により得るという形での管理が進められてきた。その時、対策技術の選定は

主にコストによりなされてきた。

しかし近年、水に関係する省庁、環境庁、国土庁、厚生省、農林水産省、通商産業省、建設省では連絡会議を設置し、「流域の健全な水循環」という概念による水管理を目指した動きを始めた。その定義は確定したものではないが、そうした概念をもとに水管理を行うためには、1) 従来の点、線での評価から面(鉛直構造も考慮)、さらには時間的な観点での評価、2) 質の評価、が必要となる。

まず、1) の面的な管理を行う手法として、流域管理がある。Naiman (1992)は流域管理を“Balancing long-term sustainability with cumulative environmental change”と定義している。水管理の立場では、流域変化の予測、流域計画・水資源計画の整合と実施、リスクへの対応案の準備、流域の環境保全、等を行うことであろう。すなわち、持続可能な水資源計画の作成、地球規模での大気・水循環解析からスケールダウンしたものを境界条件としてGIS利用の流域モデルの作成、といった内容で構成され

ものと考えられる。

次に、2) は水量、水質、生態系(例えば環境庁は健全性を評価するものとして水量、水質、水生生物、水辺地、地盤をあげている)の多目的問題となる。すなわち、質の予測が必須となるし、各指標の総合化の方法が十分に議論される必要がある。

2. 今後の研究方向

近年の水資源計画は、1) 年単位の水収支、2) 部分流域をベースとした流域単位での集計、3) 高水、低水と若干の水質(BOD、全窒素、全リン等)をそれぞれ独立に解析、といった枠組みで作成されている。その結果、1) 特定基準点での水量、水質は把握できるが、流域内での時空間分布特性は求まらない、2) 評価項目間の物理的相関が考慮できない、等の問題が残されている。水資源政策では、日単位での降水・流量の変化や気温・季節に応じた水需要変動を考慮する必要があるのは明らかで、それらを十分に解析できないものであった。

図一 水資源質に関する研究の将来

Fig. 1 Future directions of the research on water resource quality

このため、近年整備されてきた地理数値情報、気象・水文情報、流出解析法等を活用した流出モデルの作成を目指す必要がある。これらに、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵで紹介したような質に関するモデルを結合し、流域管理の基礎情報を得るシステムの開発を行わなくてはならない。

最後に、自然系では持続性、自然からの乖離の少なさなどが、流域の健全性の指標となるであろうが、人工系(水道、下水道、一部廃棄物を含む)でのそれは明らかでない。楠田(1999)はその候補として費用、リスク・便益、エネルギー消費率、快適性、生態系への影響度、システムの制御性、公平性などをあげているが、今後、そうした指標が必要、十分であるのか、個々の指標の計測方法などを決めて行かねばならないだろう。

Ⅶ. 最後に

世界と日本での論文テーマの比較、それらを参考にして今後の水資源質の研究方向を議論した。図-1には、それらを整理した結果を示す。今回、ここで取り上げた「モデル」、「地下水質」、「有害化学物質を対象としたリスク管理」、「地球温暖化の影響」、「量と質の統合管理」、といったキーワードに関する個々の研究が重要であることは間違いないが、相互の関連を考えつつ、全体システムの構築を目指して戦略的に研究を進めて行くことがさらに重要と考える。そのためには水資源質研究の核となるような機関の創設が必要な時期となったといえよう。

謝辞：資料の提供、有益な議論など、市川新(京都大学)、寺川陽(土木研究所；現建設省中部地方建設局)両先生には様々な点でご指導頂いた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- Corwin, D.L., Vaughan, P.J. & Loague, K. (1997) : Modeling nonpoint source pollutants in the vadose zone with GIS. *Environ. Sci. Tech.*, 31, pp. 2157-2175.
- Field, R. *et al.* (1998) : Urban wet-weather flow management: research directions. *J. Water Resources Planning Manage.*, 124, pp. 168-180.
- Fukushima, T., Ozaki, N., Kaminishi, H., Harasawa, H. and Matsushige, K. (2000) : Forecasting the changes in lake water quality in response to climate changes, using past relationships between meteorological conditions and water quality. *Hydrological Processes*, 14, 593-604.
- George, D.J., Jones, J.G., Puncochar, P., Reynolds, C. S. and Sutcliffe, D.W. (1998) : *Management of Lakes and Reservoirs during Global Climate Change*, 323pp., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht
- Gorham, E. (1992) : Atmospheric deposition to lakes and its ecological effects: A retrospective and prospective view of research. *Jpn. J. Limnol.*, 53, pp. 231-248.
- Hanaki, K., Takara, K., Hanazato, T., Hirakuchi, H. and Kayanne, H. (1998) : *Impacts on hydrology /water resources and water environment*, Hishiooka, S. and Harasawa, H. ed. *Global Warming*, pp. 131-161, Springer, Tokyo.
- 市川 新(1997) : 水資源質の基本概念, 水文・水資源ハンドブック, pp. 401-402, 朝倉書店.
- 小尻利治・東海明宏・木内陽一(1998) : シュミレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, 41, B-2, pp. 119-134.
- 楠田哲也(1999) : 第1章流域水マネジメントの拡がりと研究課題, 土木学会環境工学委員会流域水マネジメント研究小委員会 報告書, pp. 1-1~1-9.
- McKnight, D., Brakke, D.F. and Mulholland, P.J. (1996) : *Freshwater Ecosystems and Climate Change in North America*. *Limnology Oceanography*, 41, pp. 815-1149.
- Naiman, R.J. ed. (1992) : *Watershed Management*. 542pp., Springer-Verlag, New York.
- Ogden, F.L. (1998) : GIS-Hydrologic model integration. *Water Resources Engineering Conference 98 (ASCE)*, pp. 780-785.
- 尾崎則篤・小野美由紀・福島武彦・原沢英夫(1999) : 気象変動の河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究. 土木学会論文集, 629, pp. 97-109.
- 佐竹研一(1999) : 酸性雨研究の現状と展望, 環境科学会誌, 12, pp. 217-225.
- 世界資源研究所・国連環境計画・国連開発計画・世界銀行(1999) : 世界の資源と環境, pp. 302-310, 中央法規.
- 高橋 裕(1997) : 世界水会議(World Water Council)の動向と課題, 水資源センター研究報告, 17, pp.

9-10.

Thomann, R.V. (1998) : The future "Golden Age" of predictive models for surface water quality and ecosystem management. *J. Environ. Eng.*, 124, pp. 94-103.

東海明宏・長屋圭治・湯浅 晶(1996) : 数量化分析を用いた環境中化学物質濃度区間の推定, *環境化学*, 6, pp. 503-510.

Wagner, W. (1998) : Natural waters—a minnor of regional development. *EAWAG News*, 44E, pp. 3-5.

Wurbs, R.A. (1998) : Dissemination of generalized water resources models in the United States. *Water Internat.*, 23, pp. 190-198.

(受付: 1999年12月22日, 受理: 2000年3月10日)