

流域の水と物質循環

WATER AND MATERIAL CIRCULATION IN CATCHMENT AREA

井伊博行¹・藤田光一²

Hiroyuki II and Koh-ichi FUJITA

¹正会員 博(理) 和歌山大学システム工学部 教授 環境システム学科
(〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 室長 環境研究部河川環境研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

In this session, mainly environmental isotope, material flow in flood and development toward integrated watershed management are discussed. Environmental isotope focuses on present study examples using stable hydrogen and oxygen isotopes and future application for material flow analysis of catchment. Material flow in flood focuses on a comparison between 1 hour measurement and 1 month measurement of COD and flow rate for analysis of COD loads. 1 hour measurement data includes flood results but 1 month measurement data does not include flood results. The last subject discusses R & D on water and material cycle including impacts of human activities available to integrated watershed management.

Key Words: Catchment area, material flow, isotope, flood, integrated watershed management

1. はじめに

2005年度河川技術に関するシンポジウムでは、「流域の水と物質循環」を特定課題とするオーガナイズド・セッション(OS)が企画された。その主旨は次のようである。

河川の水質は、その流域の土地利用によって大きく影響され、われわれの経済活動と深い関係にある。さらに、河川水質は下流の海の生態系にも大きな影響を及ぼしており、水量とともに水質の役割は大きくなっている。本OSでは、流域での水質に影響を与える水と物質循環に関する研究成果を突き合わせて、関連する問題点や新たな視点を抽出し、今後の流域としての保全、修復に活かす研究の展開・方向性について議論する。

本OSは、水工学委員会環境水理部会と河川部会の合同セッションとして企画され、オーガナイザーはそれぞれの部会から指名されている(第一著者が環境水理部会、第二著者が河川部会)。本総説では、主として前者が流域における水物質循環のプロセス解明の側面から、後

者が技術政策への反映という側面から、共同で研究開発の現状と方向性について整理を行うものである。

本課題は非常に幅広い内容を含むので、本シンポジウムに投稿いただいた論文等を活かすという観点も加え、ここでは特に、起源推定のトレーサとしての「環境同位体」、近年その役割解明の重要性が指摘されている「洪水時の物質輸送」、水物質循環に関する研究成果の「流域管理への展開」の3つに絞って議論を進めていく。

「環境同位体」に関しては、応募論文では、窒素同位体比の適用例が掲載されている。もともと、地球科学の分野で年代測定やトレーサとして古くから利用されており、温泉水や熱水の起源推定から地下水の涵養域の推定や年代測定にも応用されている。しかしながら、日本の河川では、まだまだ、適用例が少なく、その可能性について紹介する。

「洪水時の物質輸送」では、阿武隈川での浮遊成分と栄養塩の輸送、北海道の沙流川での洪水規模と栄養塩の輸送、熊本県有明湾の白川河口域における物質輸送が応募されており、懸濁態と溶解態の物質の割合が洪水によって、どのように変化するのかがポイントとなっている。

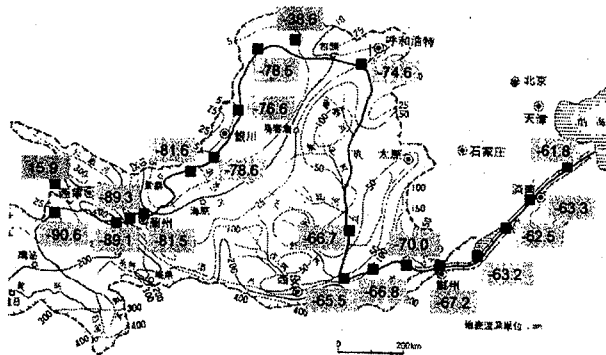


図-1 黄河の水素同位体比の変化(‰)

表-1 大井川用水と菊川流域の酸素・水素同位体比

河川(標高)	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)
大井川(3000m)	-67	-10
菊川流域(5~300m)	-45	-7
菊川下流 (~5m)	-50~-67	-8~-10

最近、国土交通省が全国的に、COD などの水質項目でも 1 時間毎の自動観測を開始している。自動観測によって、洪水時の水質データが飛躍的に増大し、その効果を紀ノ川と大和川の例で紹介する。

「流域管理への展開」については、流域の水物質循環プロセスと人間活動とのかかわりの把握が、流域管理を支え定着させる上で重要な情報を生み出すとの視点から、流域管理につながる研究開発の方向性について考えていく。

2. 環境同位体

同位体は、同じ元素(原子番号)であるが、重さ(原子量)が違う原子を意味し、同位体は同一の元素であるので、化学的な挙動は同一であるが、重さが異なるため、反応速度などの物理的な挙動に差がみられる。その物理的な違いにより、各同位体の比は地球上で異なっている。たとえば、水の酸素・水素同位体比は蒸発・凝集過程で選択的に、軽い同位体が気体になり、重い同位体は液体になる。したがって、海水は、降水に比べて、重い同位体の割合 ($^{18}O/^{16}O, ^2H/H$) が高い¹⁾。その割合 ($\delta^{18}O$, δD) は、一般に次式のように示される²⁾。

$$\delta^{18}O, \delta D = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

ここで、R は ^{18}O と ^{16}O 、D (2H) と 1H の比である。また、放射性同位体比は年代測定に使用され、地下水では、涵養してから時間の推定に利用されている³⁾。ここでは、酸素・水素の安定同位体比の適用例を紹介する。

(1) 水の起源推定

降水の同位体比は、地球規模で変化し、高緯度や内陸

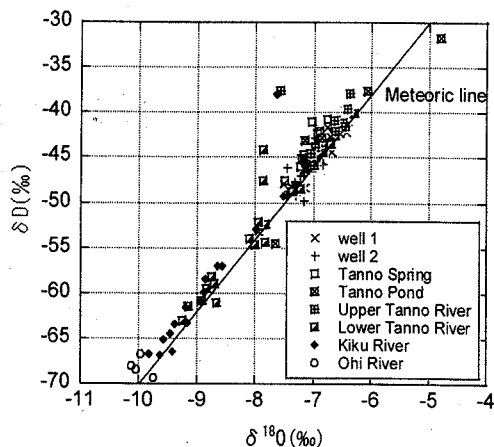


図-2 大井川用水と菊川流域の酸素・水素同位体比

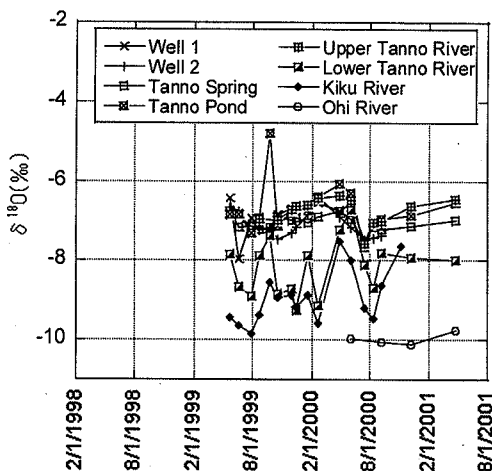


図-3 大井川用水と菊川流域の酸素同位体比の変化

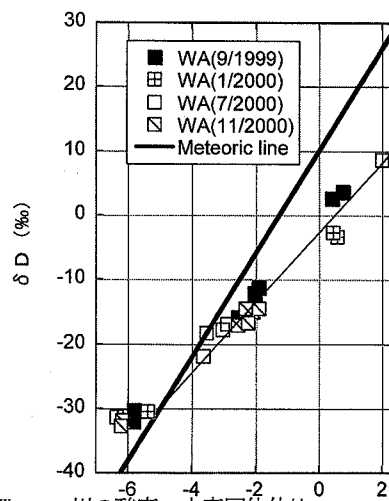


図-4 Wannon 川の酸素・水素同位体比

にむかって、また、標高が高いほど重い同位体比の割合が低くなる。図-1 は、黄河の水の上流から下流までの 3000km の水素同位体比の変化を示したもので、降水の影響で、下流ほど標高が低く、海岸に向かうため、同位体比 (δD) は高くなっていることが分かる。

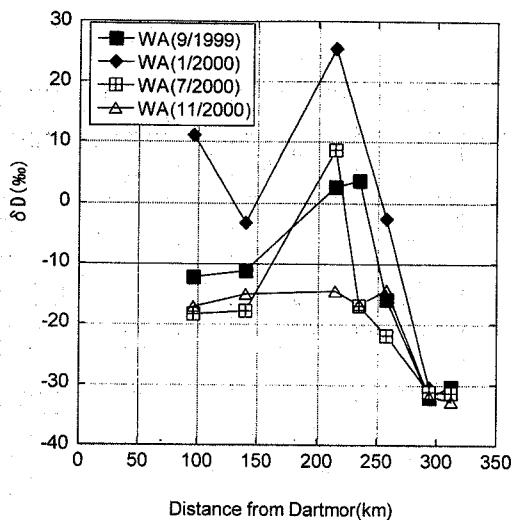


図-5 Wannon 川の水素同位体比の流下過程での変化

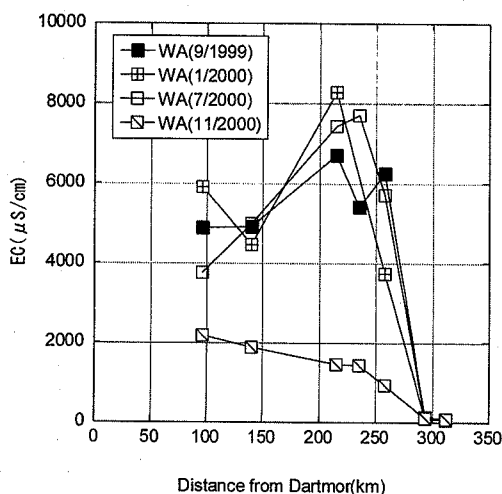


図-6 Wannon 川の電気伝導度の流下過程での変化

降水の同位体比の違いを使って、河川に供給される水の起源を推定した日本の例を紹介する。静岡県菊川流域には、牧の原台地を中心に広範囲に茶畑が分布し、肥料による硝酸性窒素汚染と酸性化現象が深刻な問題となっている。しかしながら、菊川下流域での窒素濃度や酸性化は上流に比べると、かなり軽減化されており、その原因として、大井川用水による希釈効果が考えられ、その供給量を同位体比を使って推定した。大井川用水は、様々な地点で、個人単位で農業用水として使用されており、水門等による流量観測は困難であった。菊川流域の標高は、5 から 200m で、大井川の最大標高 3000m とは大きく異なっているため、2 地域の同位体比は、図-2 や表-1 に示すように、 δD で 20‰、 $\delta^{18}O$ で 3‰の違いがある。その違いを使って、菊川下流域の河川水の大井川用水の混入率を図-3 から推定した結果、菊川の大井川用水の割合は、23 から 96%もあった。したがって、大井川用水による希釈の効果が大きいことが判った⁴⁾。

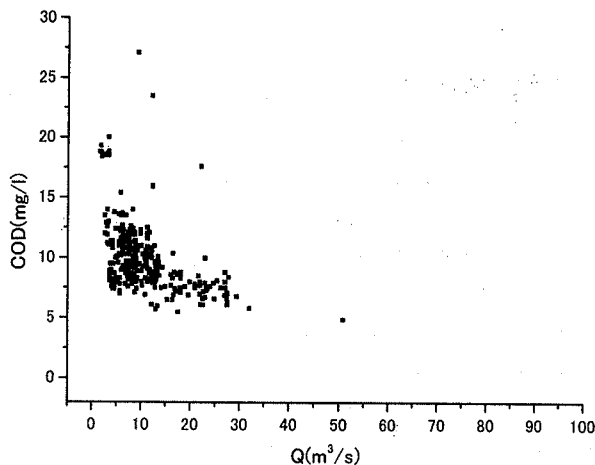


図-7：河内橋における COD と流量 Q の関係
(1983 年 8 月～2003 年 7 月：定期観測)

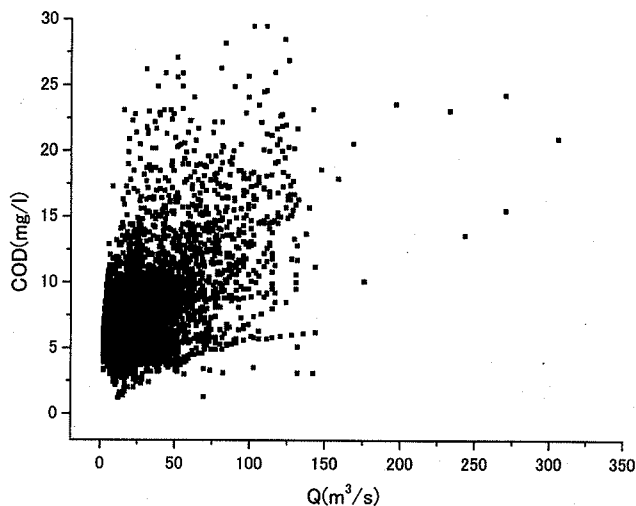


図-8：河内橋における COD と流量 Q の関係
(2002 年 5 月～2003 年 12 月：自動観測)

(2) 河川や湖内での蒸発量の推定

降水は、世界的に図-2 の Meteoric line ($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$) 上にあり、蒸発が起ると、その傾きが 8 から 6 になり、蒸発が進むにつれて、Meteoric line から離れる。図-4 は、オーストラリア南西部の半乾燥地での塩水河川水の酸素・水素同位体比を示したものである。塩水化の原因としては、内陸部に蓄積された塩が雨季に混入するケースと蒸発による塩類集積が考えられる。図-4 では、河川水が蒸発によって、Meteoric line と異なる傾きの直線を形成していることが判る。さらに、図-5、図-6 の水素同位体比、電気伝導度の流下過程での変化では、下流に向かう(図中の右側が上流)につれて、同位体比が高くなり、それにつれて溶存成分(電気伝導度)が大きくなっていることが分かる。したがって、Wannon 川(WA)では、蒸発による塩類集積が塩水化の原因であることが分かった⁵⁾。このように、酸素・水素の両同位体比の変化から水が蒸発したかどうかを推定することができる。今後、日本では湖の蒸発量の推定などに利用されることが考え

られる。

3. 洪水時の輸送

紀ノ川については1999年から、大和川では2003年から年間を通じて、1時間毎の自動水質観測が行われている。項目は、流量、水温、pH、電気伝導度、COD、TBである。特に、栄養成分の指標であるCODが連続観測できるようになったため、従来の1ヶ月毎の定期観測の欠点であった洪水時の栄養塩の輸送現象（人為的なサンプリングのため、洪水時は困難）に関して、1時間毎のデータと1ヶ月毎のデータを比較した結果を紹介する。

図-7、図-8は、大和川中流部の河内橋におけるCODと流量との関係を示したもので、従来の1ヶ月毎の定期観測では、流量が増加すると、CODが減少する傾向がある⁹⁾。また、流量が50m³/sを超えるCODの測定は行われておらず、洪水時の情報が欠如している。一方、同一地点での1時間毎の測定結果では、流量が150 m³/s（最大は300 m³/s）までの結果をカバーし、流量が増加すると、CODも増加している。定期観測からは希釈の効果が予想されたが、表-2の自動観測データによる水質項目の相関係数をみると、CODは電気伝導度(EC)よりもTBと高い相関を持っており、浮遊物の影響が大きいことが判る。このように、1時間毎の自動観測結果によって、現象そのものの捉え方まで大きく変わることが分かった。

自動観測と定期観測データによる輸送量の比較を表-3に示す。自動観測の輸送量は、1時間毎の輸送量（流量×濃度）を積分したもので、定期観測の輸送量は、L-Q式を求め、その式に1時間毎の流量を代入して推定した輸送量の積分値である。その結果は、従来の定期観測データに比べて、自動観測データは、いずれの地点でも大きく、最大2倍にも達する。従来から、原単位法で推定される負荷量は、実測負荷量(定期観測)よりも大きい⁸⁾。その原因としては、ここで取り上げた定期観測から推定されるL-Q式には、洪水時の現象が含まれておらず、推定式と実際の輸送量の違いが原因と考えられる。また、原単位法との輸送量の違いのもう1つの理由として、平水時の河川内での有機物分解が考えられる⁸⁾。

4. 流域管理への展開と水物質循環

流域という地域的広がり単位とし、そこで中心的に展開される自然－人工システムを総合的な視点から適切に管理することを通じて、人と国土との間に良好な関係を構築していくという考えは、三全総のいわゆる流域圏構想にはじまり、その後、「健全な水循環系の再構築」という切り口を交えながら幅広く展開され⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾、最近では総合科学技術会議において「自然共生型流域圏・都市再生技術研究イニシャティブ」が行われている¹⁴⁾¹⁵⁾。

表-2：水質項目どうしの相関係数(船戸：1999年-2002年・河内橋、浅香：2002年-2003年)

地点名	年	6月				12月			
			COD	EC	TB		COD	EC	TB
船戸	1999年	COD	1.00	-0.37	0.77	COD	1.00	0.25	0.66
		EC		1.00	-0.61	EC		1.00	0.16
		TB			1.00	TB			1.00
	2000年	COD	1.00	-0.40	0.86	COD	1.00	-0.39	0.15
		EC		1.00	-0.45	EC		1.00	0.07
		TB			1.00	TB			1.00
	2001年	COD	1.00	-0.07	0.44	COD	1.00	0.08	-0.06
		EC		1.00	-0.55	EC		1.00	-0.23
		TB			1.00	TB			1.00
	2002年	COD	1.00	-0.09	0.72	COD	1.00	0.53	0.40
		EC		1.00	-0.20	EC		1.00	0.03
		TB			1.00	TB			1.00
河内橋	2002年	COD	1.00	-0.39	0.69	COD	1.00	-0.36	0.41
		EC		1.00	-0.42	EC		1.00	-0.68
		TB			1.00	TB			1.00
	2003年	COD	1.00	-0.17	0.82	COD	1.00	-0.09	0.78
		EC		1.00	-0.44	EC		1.00	-0.33
		TB			1.00	TB			1.00
浅香	2002年	COD	1.00	0.19	0.59	COD	1.00	-0.35	0.41
		EC		1.00	-0.46	EC		1.00	-0.64
		TB			1.00	TB			1.00
	2003年	COD	1.00	-0.11	0.86	COD	1.00	0.11	0.59
		EC		1.00	-0.50	EC		1.00	-0.44
		TB			1.00	TB			1.00

表-3 自動観測(1時間)と定期観測(1ヶ月)による物質輸

	船戸 紀ノ川				浅香	河内橋
					大和川	
年	1999	2000	2001	2002	2003	
自動 1 時間	6613	4815	7381	3671	14721	12301
L-Q式 (定期)	5476	3536	5937	2677	9563	6724

(単位：トン/年)

この過程で、各方面の努力により、様々な政策議論（理念や基本的方向性）が積み上げられ、鶴見川や宮川などいくつかの現場での先進的取り組み¹⁶⁾¹⁷⁾も見られるようになった。また、河川法の下で作られる各河川水系で流域委員会では、河川整備を中心にしつつも、流域のあり方について積極的な議論が交わされる場合が少なくない。

一方、総合的な流域管理が政策として制度化され、あるいは実効性のある形で広く定着したかということ、水環境保全施策における総量規制や湖沼水質保全計画など、対応の必要性や緊急性、手段の有効性が比較的わかりやすく提示できた特定のターゲットを除くと、必ずしもそうとは言えない状況にある。総合的な流域管理の理念としての重要性・必要性和、実践されることとのギャップの克服が次の課題と言える。

この課題の一因として、現在の人間活動が、意識も含め、流域というスケールをはるかに超えてしまい、人間の活動スケールを流域単位に押し戻すという考えに実体的意味がもはや無いという状況がある。しかし、自然と人とのかかわりに関係するシステムとそれが展開されるスケールを十分理解し、それを意識しながら再構築のあり方を包括的かつ具体的に考えていくというアプローチは、むしろ重要性を増している。解決すべき問題によ

っては、流域圏が、地域や都市、階層構造を持った流域群など、様々なものになり得ようが、流域という切り口が依然として有用であることには変わりないであろう。そして、このシステムに関して、水物質循環を司るシステムが大きな役割を持つはずである。

また、流域管理が持つ「目標や評価軸を幅広にとらえ、各地域に合ったより良いビジョンを選択する」というスタンスが、目標が明確で誰もが困っている問題への一気呵成の対処に比べて、迫力に欠けるということも、前述の課題の原因になっているかもしれない。しかし、今後我が国において、「一見切迫していないが、各セクターが協調しながら継続的により良い選択を積み重ねることで、何十年か後にすばらしい国土やまちができる」というような“体質改善”型取り組みについても、“一気呵成”型取り組みとは違った意味で重要になっていくと考えるべきであろう。

内外の先進的な流域管理の取り組みは、この課題の克服を考える上で重要な情報となる。吉川¹⁸⁾は、内外の流域再生への実践的取り組みを幅広く取り上げ、それぞれの特徴を分析しながら、流域再生の重要性と方向性を論じている。安倍・石川¹⁹⁾は、米国における Watershed Council の設立背景といくつかの活動事例を分析して、また行政組織を中心にした流域管理への対応との違いを示しながら、その社会装置としての意義を論じている。

著者の一人は、理念と実践とを結びつける方途と必要な研究開発などを議論するための道具として、流域圏再生を実行するための大まかな“手順”を図-9のようにあえて単純に描いている²⁰⁾。この図の中央にあって太矢印により縦につながれた四角枠群が、対象とする地域について再生の実行計画を策定するまでの流れであり、幹の部分に当たる。幹の左にある枠群は、より一般的・普遍的な検討の成果からの支援と位置づけられ、右にある枠群は、研究開発の成果からの支援と位置づけられる(図の下段参照)。

この図でまず重要としているのは、当該地域が感じている問題を幅広くかつ具体的に掘り起こすことであり、このために、地域の取り組み・流域診断技術・再生理念の三点セットが必要と考えられる。このうち、体系的に集められきちんと分析された情報に基づく流域診断技術については、水物質循環に関する研究開発の貢献すべきところが大きい。過去から現在にいたる流域の水物質循環の実態と課題をわかりやすく見せる診断技術が容易に手に入る状況を作ることが必要である。流域診断には流域という広い空間場での多岐にわたる情報を時系列も含め総合的に把握することが基本になり、GISは有力な道具になる^{16) 21) 22)}。また、流域診断には流域住民や行政など様々な主体が流域環境のことを日常的に考える状況を作るという役割が求められ、わかりやすさも重要な要素となる。たとえば、全国一級河川で公表が準備されているフレッシュ度マップ²³⁾や米国連邦環境保護庁が提供し

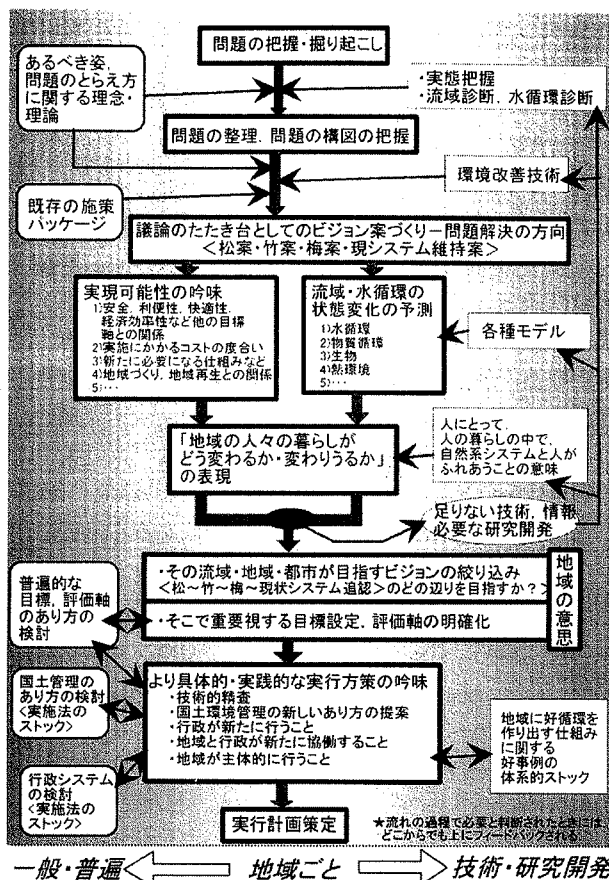


図-9 流域圏再生を実行する際の手順のイメージ²⁰⁾

ている「Surf Your Watershed」は、その例となろう。

また、地域・流域住民の関心が高く、場合によっては、様々な地域活動が始まっていて、しかし科学的・技術的な知見の蓄積が進んでいない現象の解明に専門家が積極的に取り組むことも大事と考えられる。微量化学物質等の地下水を含む水系内での移動・変質とその影響度、栄養塩や土砂の動きを介した森と川と沿岸海域の環境保全上のつながりなどは、その代表例と言える。

次に、図-9では、建設的議論のたたき台として、「松・竹・梅・現状維持」というような様々なビジョンをつくり、各ビジョン実現が地域に何をもたらすかを示すことを重視している。このために、ビジョン実現が地域にもたらす変化を、様々な観点からできる限り定量的・客観的に評価することが必要になり、ここにおいても、水・物質循環の変化予測結果が、生物の生息生育状況や都市の熱環境などと並んで、最も重要な評価対象となる。したがって、水物質循環のプロセス解明とモデリング技術を、このようなビジョン評価につながるものに仕上げていくことが必要となる。藤田・伊藤²⁴⁾は、湖沼の水質改善に関して流域と湖沼における水と物質の動態を計算するモデルを用い、モデルが施策立案にどのように役立つかを課題とともに論じている。大澤・池田²⁵⁾は、農業流域からの微細土砂流出が土地利用形態によりどう変化するかをモデルを用いて検討し、流出抑制対策のあり方を検討している。今後、調査・観測→現象解明→モ

デリング→実際問題への適用，という一方向の流れでなく，問題解決や流域管理の推進につながるモデル開発と適用のあり方から入っていくという流れも合わせた双方向の研究開発も必要と考えられる。このことが，より戦略的なモニタリングにもつながっていくと期待される。

計算などに基づく評価結果は数値などの無味乾燥な情報で出てくることが多いので，それを“翻訳”し，問題がどう解決され，それによって地域や人々の暮らしがどう良くなるかをわかりやすく示すことも，計算と同等に大事となる。たとえば，水質管理検討会（古米弘明東京大学教授ほか）において検討され，国土交通省河川局により試行されている河川水質の新しい指標は²⁶⁾，「人と川の豊かなふれあいの確保」「豊かな生態系の確保」「利用しやすい水質の確保」の各視点から評価を行うものになっている。評価の過程では従来用いられてきた水質を表す様々な数値が使われるが，その最終的な表現が上記のように“翻訳”される点がポイントである。このような翻訳のあり方を見出す際には，人が自然とふれあうことの本質的意味を理解することが重要となる。

以上のような問題の把握・掘り起こしと，様々なビジョンが地域の人々にもたらすことについての検討を梃子に，地域のあり方を様々な考えていくことを通して，その地域に合った目標と評価軸を見出していくという流れを図-9は提示している。このような方式の良否はさておき，水物質循環にかかわる研究開発のあり方を，流域管理の進め方という視点から考え整理していくことは，この課題の持つ内容が非常に幅広いだけに有意義なことであろう。

参考文献 注)本シンポジウム論文集に掲載の論文には文献番号の右肩に*印を付している。

- 1) 井伊博行，平田健正，佐原尚美，伏井邦彦：和歌山県と大阪府における降水中の溶存成分および水素，酸素安定同位体比，水工学論文集，第45巻，pp.289-94，2001。
- 2) 酒井均，松久幸敬：安定同位体地球化学，東京大学出版会，1996。
- 3) 後藤大輔，井伊博行，平田健正，吉国孝成，大塚康範，金川正敏：環境同位体と流量測定によるトンネル湧水の起源推定，環境工学研究論文集41巻，pp.65-674，2004。
- 4) 山野賢一，井伊博行，平田健正，田中豊和，西川雅高，小川裕美：茶畑由来の肥料と大井川用水の導入による菊川流域の硝酸性窒素汚染への影響について，環境工学研究論文集38巻，pp.97-05，2001。
- 5) 井伊博行，John Sherwood，Frank Stagnitti，Nick Turcozy，平田健正，西川雅高：オーストラリア，ビクトリア州南西部の半乾燥地河川水の水素・水素同位体比および溶存成分について，土木学会論文集，No.719/II-61，1-9，2002。
- 6) 高野芳隆，井伊博行，石塚正秀，平田健正，平井秀輝：和歌山県紀ノ川の水質特性から算定したCOD及びCOD負荷量，水工学論文集48巻，pp.1477-1482，2004。

- 7) 高野芳隆・井伊博行・平田健正・石塚正秀・元永秀：大和川での1時間毎の自動観測測定から導き出されたCODの流量依存性について，水工学論文集49巻，pp.1513-1518，2005。
- 8) 谷口正伸・井伊博行・平田健正・石塚正秀：大和川における水温を考慮したBOD負荷量の推定，水工学論文集49巻，pp.1555-1560，2005。
- 9) 特集・20世紀を振り返る「全国総合開発計画にみる水の系譜」，河川，12月号，(社)河川協会，2000。
- 10) 水と人のかかわりに関する研究，NIRA 研究報告書，No.910006，1991。
- 11) 河川審議会総合政策委員会：新たな水循環・国土管理に向けた総合行政のあり方について，1999。
- 12) 丹保憲仁（監修），21世紀の社会システム・国土管理のあり方に関する研究会，(財)河川環境管理財団（編著）：変革と水の21世紀～21世紀の社会システム・国土管理のあり方に関する提言～，山海堂，2004。
- 13) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議：健全な水循環系構築のための計画づくりに向けて，2003。
- 14) 内閣府総合科学技術会議：
<http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/index.htm>
- 15) 福田晴耕：「自然共生型流域圏・都市の再生」について，建設マネジメント技術，8月号，(財)日本建設情報総合センター，2004。
- 16) 鶴見川流域水委員会準備会：鶴見川とその流域の再生—鶴見川流域水マスタープラン策定に向けた提言、リバーフロント整備センター，2001。
- 17) 宮川流域ルネッサンス協議会，三重県：宮川流域ルネッサンス事業—動き出す清流—第二次実施計画（平成15年度～19年度）。
- 18) 吉川勝秀：人・川・大地と環境～自然共生型流域圏・都市に向けて～，技報堂，2004。
- 19) *安陪和雄，石川忠晴：米国の Watershed Council の設立背景と流域管理に果たす役割。
- 20) 藤田光一：自然共生型の流域圏再生—その実行に向けて，河川，8月号，(社)日本河川協会，pp.11-14，2004。
- 21) 日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業 複合領域6：「アジア地域の環境保全」 和田プロジェクト編：流域管理のための総合調査マニュアル，2002。
- 22) 藤田光一：河川環境分野におけるGIS活用の意義と課題，環境アセスメント学会誌，Vol.2，No.1，pp.39-44，2004。
- 23) 宮藤秀之：河川局における健全な水循環系構築のための取り組みについて，8月号，(社)日本河川協会，pp.7-10，2004。
- 24) *藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：水環境問題解決への水物質循環モデル適用の試みとその課題。
- 25) *大澤和敏，池田駿介，山口悟司，高橋恵，干川明：農業流域から河川へ流入する微細土砂の抑制対策試験および解析。
- 26) 国土交通省河川局河川環境課：今後の河川水質管理の指標について（案），2005。

(2005. 4. 7 受付)