

H-4

アジア地域における人間活動による広域環境変化と 経済発展の相互影響に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 原沢英夫

環境庁国立環境研究所

地球環境研究グループ	温暖化影響・対策	森田恒幸
社会環境システム部	環境管理研究室	原沢英夫・高橋 潔
(委託先)	麗沢大学	小野宏哉
	長崎大学	早瀬隆司
	熊本大学	有古範敏
(共同研究者)	京都大学	松岡 譲

中国自然資源総合考察委員会 Sun Jiulin, Lie Zehui, Lu Xianhu
インドインデラガンジー研究所 V.K. Sharma

〔要旨〕

アジア地域における発展途上国では、急激な人口増加や経済活動の拡大に伴う人間活動の変化が、基盤となる環境資源の破壊や劣化を招き、貧困の助長など経済・社会状況の悪化させるなど悪循環に陥っている。本研究は、一次産業などの人間活動に伴う広域的な環境変化、その地域の人間居住や社会・経済へ及ぼす影響を把握すること、これらの知見をもとに人間活動－環境変化と社会・経済の相互影響を評価するモデルを構築し、アジア地域に適用することにより、発展途上国が持続可能な発展を実現するためにとるべき環境保全施策を検討することを目的としている。

初年度においては、1) 発展途上国における一次産業を中心とした人間活動の変化と環境変化の相互作用に関わる要因についての解析を行うとともに、2) 人間活動－環境変化－社会・経済影響モデルに関する研究事例をレビューし、モデルの基本構造について検討を行った。

2年度めにおいては、初年度の成果をもとに、1) 人間活動－環境変化－社会・経済影響モデルのフレームワークを構築するとともに、それを構成する農業、水資源、健康、及びそれらを結ぶ経済モデルのプロトタイプの開発を行った。2) モデルの開発に併せて、中国、インドの共同研究者と協力して、モデル検証及び適用に際して必要となる環境、社会・経済データを収集し、データベース化を行った。

最終年度においては、経済モデルを適用することによって、アジアの農業及び食料生産の今後の動向を予測するとともに、農業とも関連の深い水資源問題を検討しうる水資源モデルを開発してアジア地域に適用した。モデルの精度についてはさらに関連要因を取り入れ精度を向上させる必要があるが、一応水需給分析の基礎となるモデルを開発できた。水需要に関しては、中国、インドの研究者と協力して農業、産業、家庭における水消費量などのデータ収集、解析を行ったが、

水供給に比べると、途上国での水需要データは極端に不足しており、今後の課題となっている。

〔キーワード〕 アジア地域、人間活動、環境変化、社会・経済システム、発展途上国

1. 研究の背景と目的[要旨]

アジア地域の発展途上国では、急激な人口増加や経済活動の拡大に伴う人間活動の変化、経済発展に伴う生活レベルの向上に伴い、基幹産業である農業などの一次産業活動や生活の基盤となる環境資源の持続不可能な利用や森林やバイオマスなどの再生可能資源の不適切な管理が原因となり、さらに貧困を助長するといった悪循環に陥っている。この悪循環を断ち切り、環境に配慮した開発（持続的発展）を行うためには、まず、人間活動に伴って生じている広域的な環境変化を把握し、さらにそれらが地域の人間居住や地域の社会・経済へ影響を及ぼす因果関係を明確にすること、これを踏まえ発展途上国が環境に配慮した持続可能な発展が可能となる方策を検討することが最優先課題となっている。

アジア地域の発展途上国では、急激な人口増加や経済活動の拡大に伴う人間活動の変化が、一次産業活動や生活の基盤となる環境資源の持続不可能な利用や森林やバイオマスなどの再生可能資源の不適切な管理の要因となっており、さらに貧困を助長するといった悪循環に陥っている。この悪循環を断ち切り、環境に配慮した開発（持続的発展）を行うためには、まず、人間活動に伴って生じている広域的な環境変化を把握し、さらにそれらが地域の人間居住や地域の社会・経済へ影響を及ぼすなど因果関係を明確にすることが先ず必要である。

そして地域レベルで特定された相互関連性と、森林伐採による地球の温暖化を促進しているなど地球規模かつ長期的な点も視野に入れた『人間活動－環境変化・温暖化－社会・経済影響』を評価するシミュレーションモデルを構築することにより、一次産業を中心とした人間活動、環境・社会・経済変化との相互影響を定量的に把握できる。このモデルをアジア地域に適用することにより、発展途上国が温暖化を防止するとともに、貧困の解消など持続的な発展を実現するためにとるべき環境保全施策についての提言を行うことを最終的な目的としている。

本研究は、1) 発展途上国における一次産業を中心とした人間活動の変化と環境変化・温暖化の相互作用の解明、2) 人間活動と環境変化を評価・予測するための人間活動－環境変化・温暖化－社会・経済影響モデルの開発と適用、3) 一次産業経済モデルによる持続可能な一次産業生産の方策に関する検討、の3つの観点から実施する。

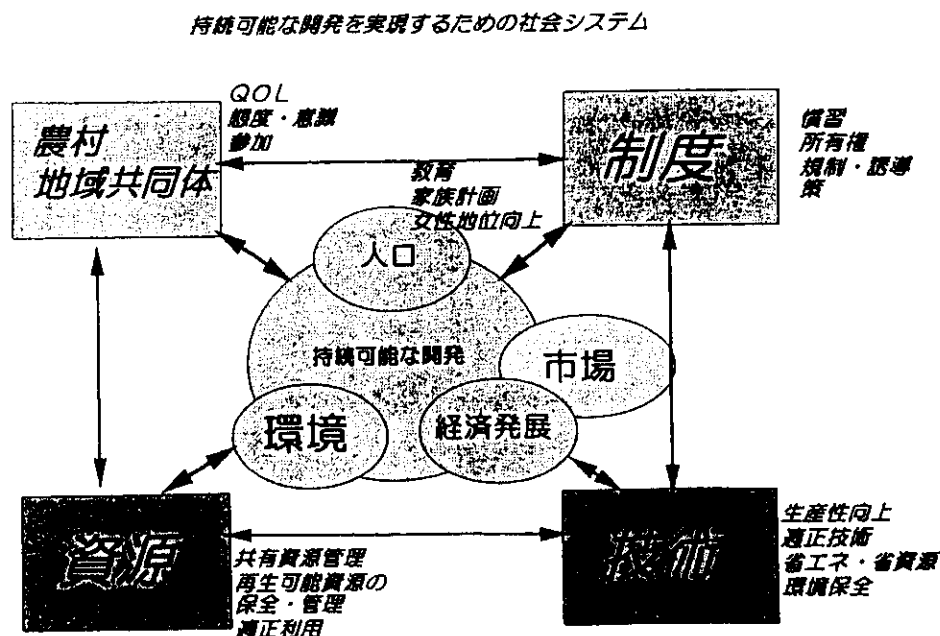
2. 本研究によって得られた成果

2.1 モデルの構築

(1) 発展途上国における人間活動・環境変化・社会・経済システム

発展途上国における人間活動と環境変化及びその社会・経済影響に関する研究レビュー等を通じて人間活動と環境変化の相互関連要因の分析（活動パターンと環境変化）を行った。図－1は、発展途上国を対象とした人口－環境－経済に影響を及ぼしていると考えられる主要な4つの要因を示している。従来、環境破壊は人口増加、開発圧力による環境資源の枯渇や再生不可能な利用

を中心として捉えられてきたが、さらに農村地域に見られる地域共同体による資源管理や土地所有などの制度の問題、また持続的な発展のために不可欠な農業生産性の向上を可能とする技術が挙げられる。



図－１ 持続可能な開発を実現するための社会システムの関連要因

また環境変化も地域によって異なっている。アジア地域についてみれば、例えば、東南アジアでは、生産性の高い土地の利用を制限されている農村地域の住民が森林地へ入りこむことにより、森林破壊を招いたり、肥沃な土壌の消失や生物多様性の減少をもたらしている。そして農業生産力の低下、潜在的な森林生産の消失などを招き、地域共同体としての生活が成り立たなくなり、結果的に貧困を助長し、都市への人口流入を促進するといった悪循環がある。一方、世界の最貧困国であるネパールを含むヒマラヤの山岳地帯では、流域の植生被覆の破壊や土壌浸食が発生して、生産力の低下や日々のエネルギー源である薪不足、下流での洪水と土砂沈積などの環境変化が発生している。いずれも農業、林業などの一次生産活動など不適切な環境資源の利用から生じている。

(2) 人間活動－環境変化－社会・経済影響の評価モデルの構築

・既存のモデルのレビュー

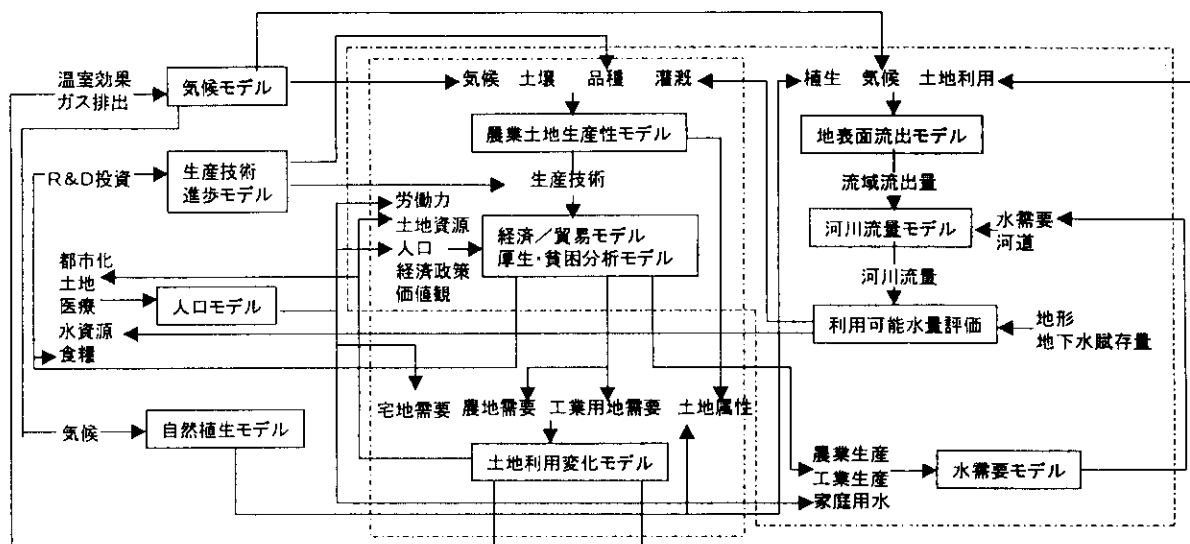
既存の資源利用－環境変化に関する代表的なモデルを取上げ、その特徴を一覧としてののが表 1 である。モデルのタイプもシステムダイナミクス（SD）を利用したものから、一般均衡を利用したモデルまで多様である。

・モデルの基本的構造

人間活動－環境－社会・経済の相互影響に関する知見や既存の資源利用－環境変化に関するモ

デル等を評価するとともに、アジア地域における現象のモデル化に必要な知見を整理し、あわせてモデル構築・検証に必要なアジア地域の地理情報データ、社会・経済データを一部収集、整備した。図－2は、本研究の中心となる人間活動－環境変化－経済・社会システムを表すモデルの枠組みを示したものである。

農林業を中心とした社会システムと水資源、土壌資源、土地資源などの環境資源からなる自然システムとの相互作用を主として扱うモデルである。人口増加、都市化、ライフスタイルの変化技術革新や気候変動などの影響は外生的に与えるモデルである。農林業では穀物生産量の変動を物量で計ることが一義的に重要であるが、さらに穀物については、国内の市場価格の変動や国際取引（貿易）などによる国際的市場の動向についても考慮する必要があることから、一般均衡型の経済モデルを基本とすることとした。

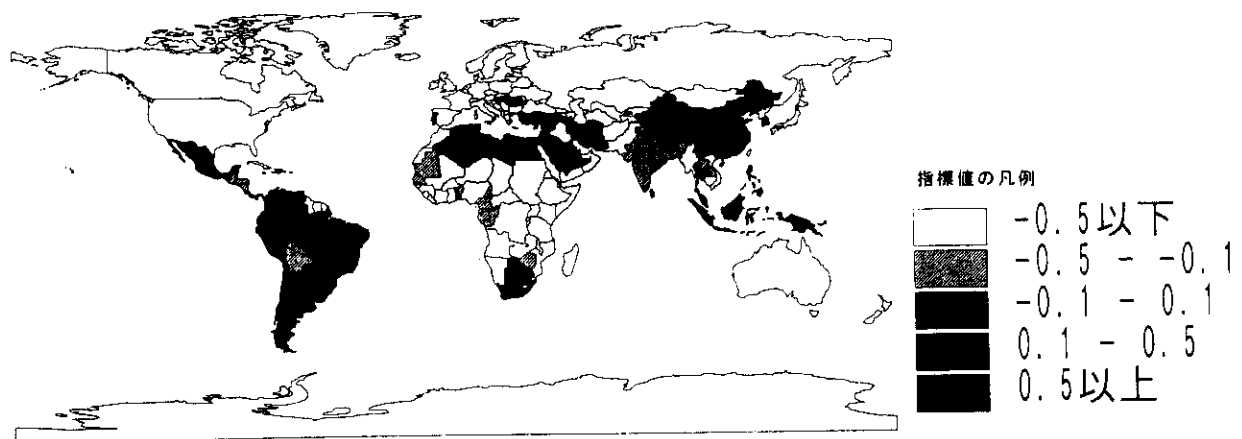


図－2 人間活動－環境変化－経済社会モデルの枠組み

2.2 アジア地域における食糧安全保障

アジア地域の各国の食料事情を比較検討するために、4つの要因を考慮した指標を作成した。4つの要因としては、一人あたりのGNP(家庭レベルの食糧購買力)、5才以下の幼児死亡率(個人レベルの食糧不足)、カロリー摂取量(国レベルの食糧不足)、そして人口増加率(将来食糧需要の伸び)を取り上げた(年度は90年度である)。発展途上国を対象に各要因毎に算定した平均値、標準偏差により基準化し、それらの平均をとることにより、点数化した(点数が低いほど食料事情が悪く問題となっていることを示す)。図－3は、世界の途上国の指標値の分布を示したものである。中国では、指標値が高く、インドでは対照的に低いことが顕著である。中国については、急速な人口増加、ライフスタイル(とくに肉食指向)の変化、一部地域の農地の劣化や

他の土地利用への転換などのために、穀物輸出国から輸入国に転換しているなど、将来の食糧事情の悪化が懸念されているが、アジア地域においては、食糧安全保障の面では途上国の中では良いほうである。最も懸念されるのが、インドをはじめとしたインド亜大陸の各国である。インドでは、人口増加が著しく 2050 年には、中国（15.6 億人、世界銀行による世界人口長期推計による）を抜く人口（16.2 億人）を擁すると予測される。地球温暖化はこの地域の穀物収量が大幅に減少すると予想されることから、アジア地域においてインドなどの食糧安全保障を担保するための仕組みづくりが必要になることは明らかである。



図－3 発展途上国の食糧安全保障指標（指標値が大きい程、安全性が高い）

・貿易を通じた食糧安全保障の可能性について

将来アジア各国で穀物収量が変化した場合の影響を経済モデルにより試算した。貿易データベースをもとに、一般均衡モデルを用い、その影響について検討した。貿易データベースは、世界貿易分析プロジェクトが開発提供しているものを用いた（GTAP1994 年版）。世界を 30 地域に分割し、産業セクターを農業を中心に 8 セクターに分割している。

温暖化の影響を受けた場合の農業生産性の変化を外生的変数として与え、現在の貿易条件を仮定した場合の影響を見た。温暖化の影響と同様な気候変化があり、人口は現状といった仮定で計算しているが、貿易を通じて穀物価格が変化することにより、各国への経済的に影響が異なることが示されている。表－1 は外生的に与えた生産性の変化(%) と経済的影響について 6 カ国／地域についてまとめたものである。インドで生産性が悪化すると農産物価格が高騰し、社会的な厚生（この場合は消費者余剰ではかっている）が 5%程減少することが示されている。人口の急増による食糧需要の増大と、温暖化など環境変化による生産性減少による供給量の減少から生じる需給のアンバランスは、国際的な貿易を通じても解消しない可能性が高く、農産物価格の高騰は人々の食糧確保を困難にする可能性が高い。穀物需給を国際的な市場メカニズムに任せるだけでは食

糧安全保障を保つことは困難であり、余剰食糧の融通などの機構を考慮する必要があるだろう。

(1) 食糧需給については、中国とともに、インドが問題であること、食糧生産は、人間活動の活発化によって圧力を受けつつあるが、さらに温暖化は、地域的な食糧生産に影響を与える。経済モデルによる試算からは、貿易によりこうした地域的な食糧生産の差異を相殺する方向に働くが、経済発展の差は輸出・入を考慮した食糧の確保面での格差をもたらすと考えられる。

表－1 農業生産性が変化した際の経済影響の例

	IS92a(二酸化炭素施肥効果あり)						IS92a*(二酸化炭素施肥効果なし)					
	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E U	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E U
生産者価格変化(%)												
米	-18.24	-19.71	-6.64	-51.76	-17.07	-19.16	-0.01	-1.58	17.96	-40.16	-0.06	-4.93
小麦	-28.61	-27.47	38.64	-41.18	-28.27	-22.82	4.91	8.47	125.11	-13.10	4.76	8.92
その他穀物	-26.26	-29.14	-29.80	-59.35	-27.83	-27.51	1.81	0.79	1.80	-43.59	-1.46	-3.36
非穀物農産物	-1.68	-1.43	-1.75	-0.35	-1.57	-0.62	-0.01	-0.28	1.90	2.76	-0.10	-0.05
畜産物	-3.16	-5.81	-2.49	-6.21	-8.80	-1.48	-0.19	-0.09	2.84	-1.22	-0.59	-0.04
加工農産物	-3.30	-5.21	-1.22	-2.24	-2.16	-1.14	-0.15	-0.01	0.30	-0.35	-0.07	0.04
鉱業・製造業	0.10	0.12	-0.92	0.14	-0.11	-0.17	0.03	-0.12	-1.10	0.61	0.03	-0.02
サービス	0.14	0.38	-1.09	0.17	-0.10	-0.17	0.03	-0.16	-0.93	0.69	0.02	-0.02
生産量変化(%)												
米	1.88	2.48	-0.26	113.40	-0.51	0.82	0.11	-0.25	-1.76	105.99	0.23	2.03
小麦	-0.53	0.53	-6.22	105.10	-0.64	-7.20	-6.60	-3.97	-7.64	115.07	2.87	-3.64
その他穀物	-8.30	-0.09	-1.73	82.94	-3.69	-8.03	-15.56	-1.39	-1.33	89.41	-4.04	-6.50
非穀物農産物	1.39	4.47	-0.02	-0.81	0.56	-0.57	0.11	-0.07	-4.25	-2.26	0.25	-0.03
畜産物	1.31	6.88	-0.49	0.16	0.90	-0.60	0.09	-0.24	-2.27	0.94	0.03	-0.22
加工農産物	1.94	7.79	-0.63	0.53	0.38	-0.46	0.11	-0.27	-4.73	0.69	0.04	-0.22
鉱業・製造業	-0.03	1.08	1.63	-0.46	0.19	0.26	-0.01	0.31	-0.37	-1.62	0.03	0.05
サービス	0.08	1.65	0.37	0.10	0.09	0.15	0.00	0.00	-2.62	-0.02	0.01	0.01
消費者物価指数(%)	-0.439	-5.131	-1.698	-0.156	-0.286	-0.393	0.001	0.001	6.047	0.513	0.017	-0.010
一人当り収入変化(%)	0.054	0.296	-1.474	0.259	-0.013	-0.086	0.026	-0.236	-0.617	0.833	0.026	-0.009
社会的厚生変化(%)	0.333	3.685	-0.077	0.334	0.232	0.224	0.022	-0.219	-4.892	0.343	0.009	0.003

2.3 アジア地域における水需給について

IPCC の地域影響に関する特別報告書(1997)によると、アジア地域では、他地域の発展途上国と同様に水資源が将来的に逼迫することが懸念されている。現在でも水資源が逼迫している国々では、温暖化はさらに状況を悪化させると予想される。このため、利用可能な水資源量(水資源賦存量)と水需要量との関連を踏まえた上で、現在及び将来の水需給関係を予測し、水資源からみたアジア地域各国の安全度評価が必要である。

今回検討した水資源モデルは、水資源賦存量の算定をするための「流域ベースの流出モデル(表面流出+河川流量)」と各流域における水需要を解析できる「水需要モデル」からなり、本年度は「流域ベースの流出モデル」のプロトタイプを構築した。流出モデルの再現性を検証するために、中国の代表的な河川流量データとの比較を行った。その結果、ピークの発生時期や大きさに差が見られるものの、アジア地域といった地域レベルでの水需給関係を評価するためには十分な

精度がある流出モデルが開発できた。図-4はこの流出モデルから得られた水資源賦存量（現状）と各流域の人口（メッシュに変換）から計算される一人当たりの水資源賦存量を示したものである。

水資源は現在でも不足している国が多く、水需要の増大とともに、さらに水資源の需給関係が逼迫して、経済発展に著しい影響を与える可能性がある。今後は、水需給モデルとのリンクをはかり、水資源からみた安全性の評価を行う予定である。

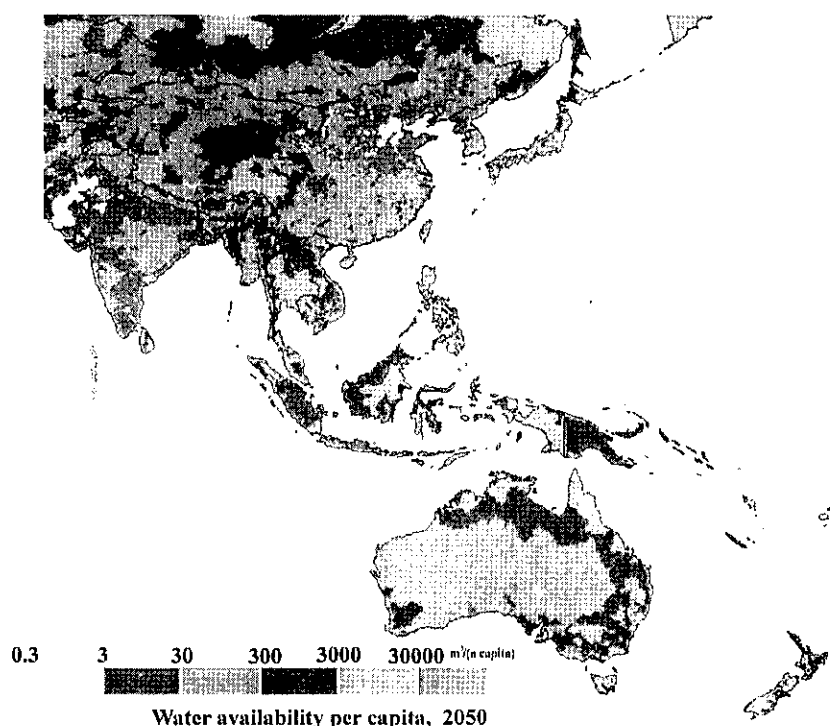


図-4 将来の一人当たりの河川流出量の予測値

2.4 都市大気健康影響評価の枠組み

アジア地域における大都市では経済開発が進むにつれ、エネルギー使用量が増大し、その結果、大気汚染が深刻な問題となっている。とくに乳幼児や高齢者などの健康影響が今後のエネルギー使用量が増大することにより懸念される。米国では大気中の浮遊粒子状物質（SPM）の基準値を強化するスケジュールを発表した（1997年6月）。これは従来の規制値である PM_{10} （粒径 $10\mu m$ 以下の浮遊粒子状物質）濃度 $50 (\mu g/m^3)$ に加え $PM_{2.5}$ （粒径 $2.5\mu m$ 以下）濃度を $15\mu m^3$ 以下とするものである。EPA の試算（USEPA, 1996a）によれば、規制強化により毎年数万人以上の死亡を回避できると推定している。こうした SPM による健康被害は米国のみにとどまらない。世界各国において、重篤な影響をもたらしていると推測されるし、今後の発展途上国を中心とする大気汚染の深刻化によって、さらに大きな被害をもたらすであろうと予測されている。

アジア地域におけるエネルギー使用量の増加の結果生じる、SPM による大気汚染を予測し、その健康影響を予測、評価しておくことは、アジア地域の環境安全保障を将来的に確保するためには、食糧、水資源とならんで、重要な要因となってきた。本研究ではこうしたアジア地域におけ

る都市大気汚染と特に SPM による健康影響について従来の調査研究を総合的にレビューし、今後進めるべきモデルを中心とした研究のフレームワークを提案した。

3. 今後の課題

アジア地域においては、急速な人口増加や経済発展により、環境の劣化が著しく、気候変動などにより、さらにこうした環境悪化は助長されると懸念される。アジア地域の環境安全保障を担保する対策について、定量的な分析と評価が緊急課題となってきた。本研究では食糧、水資源、都市大気といった分野においてモデルによる分析、評価を行える総合的なモデル作りを目指してきた。これまで得られた成果を踏まえて、今後必要な課題を示すと以下になるだろう。

食糧安全保障

- ・アジア地域の農業分野の環境変化や気候変動に対する脆弱性や適応性の評価
- ・また貿易といった市場メカニズムを通じた影響の評価
- ・食糧安全保障を確保するための要因と対応策の検討

水資源の確保

- ・水供給量と需要量のバランスを評価するための方法の開発とデータベースの構築
- ・特に農業、工業、都市用水など、分野別の水需要の把握と評価
- ・水管理上のソフト、ハードの対応策とその効果の評価

都市大気汚染

- ・都市大気汚染の予測及び評価手法の開発と適用
- ・健康影響の評価手法の精緻化と関連データの収集蓄積

以上のほかに、アジア地域が多様な国を含むこと、また中国やインドなどの大国を含むことから、単に国レベルの解析では不十分であり、地域分割して地理情報を活用したモデル化が必要である。

〔国際共同研究等の状況〕

IHDP 等が共催する第 2 回 HDP 公開会合(1997 年 6 月)がオーストリアの IIASA(国際応用システム分析研究所)において開催され、本研究の成果を発表した。また 1999 年 6 月に日本で開催される第 3 回 HDP 公開会合においても研究成果を発表する予定である(論文については採択済み)。

〔研究発表の状況〕

(1) 口頭発表

原沢英夫, 1997: 地球環境問題の人間社会側面の評価－HDP 研究のオープン会合で示された国際的活動, 地球環境変化の人間社会への効果とその構造変革に関するセミナー,

原沢英夫, 1997: 環境システムの視点からみた HDP 研究の課題, 環境システム研究, 25, 533-540.

高橋潔・原沢英夫・松岡譲, 1998: 気候変動による食料生産への影響－経済的影響の評価－, 第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集, 167-174.

Lu Xianu, H. Harasawa, K. Takahashi and Y. Matsuoka, 1998: Potential evapo-transpiration methods for the assessment of river runoff under climate change, *Environmental Systems Research*, vol. 26, 357-362.

(2) 論文発表

原沢英夫, 1996: 地球環境変動の人間社会側面研究 (IHDP) の研究の現状と今後の課題

原沢英夫, 1996: 温暖化が地球に与える影響とは? 温暖化の食糧生産・農業への影響, エネルギーレビュー, 17(3), 13-15.

原沢英夫, 1997: 地球環境変化の人間・社会的側面研究計画 (HDP), かんきょう, '97(2), 36-37.

高橋潔・松岡譲・原沢英夫, 1997: 二酸化炭素肥沃化効果を考慮した気候変動による穀物影響評価, 環境システム研究, 25, 121-131.

Takahashi, K., H. Harasawa, and Y. Matsuoka, 1997: Climate Change Impacts on Global Crop Production, *Jour. Global Environment Engineering*, 3, 145-161.

Takahashi K., H. Harasawa and Y. Matsuoka, 1999: Impacts of Climate Change on Food Production - An Economic Assessment -, *Jour. of Global Environment Engineering*, 4. (In printing)

(3) IHDP 関連の発表

Harasawa, H., 1997: Human Pressure to Sustainable Agriculture in Asia, 1997 Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, June 12-14, 1997, IIASA, Laxenburg, Austria.

Harasawa, H., 1999: Development of an integrated assessment framework for environmental security in the Asian Region. 1999 3rd Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, June 24-26, 1999. (Accepted)

Takahashi, K., H. Harasawa, and Y. Matsuoka, 1999: Impacts of environmental change on food security in the Asian region. 1999 3rd Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, June 24-26, 1999. (Accepted)

Lu Xianfu, 1999: Risk analysis of water resource scarcity in China, 1999 3rd Open Meeting of Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, June 24-26, 1999. (Accepted)

第1章 研究の目的と背景

アジア地域の発展途上国では、急激な人口増加や経済活動の拡大に伴う人間活動の変化、経済発展に伴う生活レベルの向上に伴い、基幹産業である農業などの一次産業活動や生活の基盤となる環境資源の持続不可能な利用や森林やバイオマスなどの再生可能資源の不適切な管理が原因となり、さらに貧困を助長するといった悪循環に陥っている。この悪循環を断ち切り、環境に配慮した開発（持続的発展）を行うためには、まず、人間活動に伴って生じている広域的な環境変化を把握し、さらにそれらが地域の人間居住や地域の社会・経済へ影響を及ぼす因果関係を明確にすること、これを踏まえ発展途上国が環境に配慮した持続可能な発展が可能となる方策を検討することが最優先課題となっている。

そして地域レベルで特定された相互関連性と、森林伐採による地球の温暖化を促進しているなど地球規模かつ長期的な点も視野に入れた『人間活動－環境変化・温暖化－社会・経済影響』を評価するシミュレーションモデルを構築することにより、一次産業を中心とした人間活動、環境・社会・経済変化との相互影響を定量的に把握できる。このモデルをアジア地域に適用することにより、発展途上国が温暖化を防止するとともに、貧困の解消など持続的な発展を実現するためにとるべき環境保全施策についての提言を行うことを最終的な目的としている。

本研究は、

- 1) 発展途上国における一次産業を中心とした人間活動の変化と環境変化・温暖化の相互作用の解明、
 - 2) 人間活動と環境変化を評価・予測するための人間活動－環境変化・温暖化－社会・経済影響モデルの開発と適用、
 - 3) 一次産業経済モデルによる持続可能な一次産業生産の方策に関する検討、
- の3つの観点から実施する。

初年度は、主として上記 1) 及び 2) を実施し、発展途上国における人間活動と環境変化及びその社会・経済影響に関する研究レビュー等を通じて人間活動と環境変化の相互関連要因の分析を行うとともに、既存の人間活動－環境変化、資源利用、社会・経済に関するモデルのレビューを行い、本研究の中心となる『人間活動－環境変化－社会・経済モデル』の基本的な構造を決定した。さらに、発展途上国の社会・経済と環境の現状を評価するための手法として環境・経済統合勘定システムについての有効性について検討した。

第2章 人間活動と環境変化のモデル化

2.1 人間・社会的側面からみた地球環境研究について～統合モデルの必要性～

(1) 地球環境研究とは

地球環境問題は、人間活動と地球環境の係わりから生じてくる問題である。研究の目標は、人類の生存、社会厚生を増大を図るためには、我々の欲望と地球への危険な人為的干渉をどの程度にバランスさせていかなければならないかを、具体的に つめていくことである。そのためには地球環境問題の危険性、生態系の応答、人類の応答などを地球全域を閉鎖系として取り扱うことが必須となる。そして、人間活動が地球に及ぼす影響程度、影響削減の可能性、実効性、コストあるいはその副作用を検討し、関連する科学的、技術的、経済的あるいは政治的知識を総動員し、それらを総合化することによって得られる知識を地球環境施策に反映させる必要がある。

こうした営みは、その目的からして従来の学術的研究とは異なる。つまり、地球あるいは人類に関する知見を高めるというよりも、地球環境施策あるいは我々の日々の活動にあたっての意志決定をする際に、いかに有用な情報を与えてくれるかが、研究価値を評価する大きなポイントとなる。通常の研究活動がもつ意義の一つである好奇心・探求心の充足は二の次となり有用性が第一義となる。その意味において、地理学、人類生態学、民族学あるいは地球物理学などといった有用性が必ずしも第一義とならない学問と地球環境研究とは峻別されるべきである。他方、工学、医学、経済学、法律学などでは、その応用による実用的意義が重要性をもっているものの、対象を一般化し普遍的な原理を見いだすことによって知識の止揚を図ることが、研究発展のタテマエとなっている。地球環境研究もかくあるべきであろうが、現在のところ、そうした段階に至っておらず、要素的学術研究をコアとするならば、それらと地球環境問題の間を取り持つシェルとしての実用性を社会にアピールし、存在意義を認知してもらうような研究を行わなければならない段階にある。

(2) 人類の将来に関する描象的議論からの脱却

地球規模の人為活動とその制約について初期の研究のうち、もっとも有名なものは18世紀から19世紀にかけてのマルサスの所説である。周知のごとく、マルサスは「人口論」にて、人口は幾何級数的に増加するが、食糧は算術級数的にしか増加せず、その増加速度の差異は、飢餓、伝染病の蔓延、戦争などとなって人口増加に対する非常に強い積極的防止作用として働くことを主張した。このマルサスの議論は、古典派経済学における「定常均衡の罫」論の発端であったが、その後、コール、フーバなどの新マルサス主義あるいはローマクラブの「成長の限界」などの議論もあって、人類将来に対する吉観論は、社会思想の一大潮流として定着するに至っている。

一方、これに対抗するかのごとく、楽観的な人間万歳主義、資源無限論あるいは「必要は発明の母」なる考え方は古くからあった。コンドルセらの空想的社会主義、あるいは最近のハーマン・カーンとか、ジュリアン・サイモンらの未来学者達の系譜である。サイモン (Simon, 1996) は人門の英知と努力を「究極的資源」とみなし、その資源がある限り、将来の環境問題、資源問題あ

るいは人口問題は解決されるとの立場をとる。こうした両論は、地球環境を巡るほとんどの場面にあらわれる。レスター・ブラウン (Brown, 1996) が繰り返し主張している食糧危機とそれに対抗する世界食糧危機あるいは世界銀行予測に関する問題点は、端的に論ずれば、人間の英知は今後どれだけの反収改良をもたらすことができるかの見解の相違であり、現在、日本の通産省が押し進めている「地球再生計画」は、この「究極的資源」が地球再生の決め球となるシナリオを唱い上げたものと考えることができる。こうした英知が、人類発展の原動力であり、その枯渇が地球破壊をもたらすことは言うまでもない。しかし、その時間的プログラム、定量的把握、あるいは具体的対応策については、これまであまり真面目に検討されておらず、悲観的要素あるいは楽観的要素を強調することによって、その結論はいかようにも変わるものであった。

1970年代初期に公表された「成長の限界」などのいくつかの計算は資源利用可能性や技術進歩に悲観的な設定を行いドウムズデイ (最後の審判日) 的結果を得たわけであったが、70年代後半に行われたレオンチェフ (Leontief, 1976) やヘレエラ (Herrera, 1976) が行った計算群は、社会公正性及び経済的合理性に一定の下限を与えることによって、破局回避はもとより、どちらかと言えばシャングリラ的世界の構築を与えるものであった。しかし、こうした計算の差異は、それらのモデルによって立つ抽象的世界像の差異であった。モデル作成者は、彼らの世界観を主観的に許容できる範囲にて数学的モデルに写し取り、その結果、それらは地球の二つの異なった将来を黙示的に示したことになるが、それが選択されなければならない必然性とか、どのようにして両者の道をきり換えることができるかと言った有用的、具体的側面において必ずしも満足なものではなかった。

こうした観点に立つならば、地球環境研究としてのモデル・シミュレーションによるアプローチは、人間の対応・適応能力はいかにすぐれているか、そしてそれらにより地球環境問題を克服するには現在どのような手当が必要であるかを、抽象的あるいは限定的議論ではなく、具体的かつ骨太に叙述する必要があった。

(3) 地球環境研究の課題と社会・経済システム・自然システムの統合モデル

人間社会と自然環境との係わりを研究するには、二つのアプローチがある。規範的 (normative) アプローチがその一つであり、他の一つは実証的 (positive) なアプローチである。そして、それらのアプローチから結論される人類と環境や資源の係わりの社会的「効率」や「公正」が、空間的あるいは時間的な広がりの中で論議され、地球環境に係わる種々の判断基準の根拠とされなければならない。一方、現象をどの程度リアリスティックに検討するか、あるいは、捨象して記述・検討するかによるアプローチの違いもある。

地球環境問題においては、ある特定の基本原理あるいは第一原理が卓越して現象を支配していることは数多くなく、従って、基本的には多分野にわたる詳細な検討が必要であり、それらを踏まえた上で種々の集計化と抽象化がなされる必要があろう。こうしたアプローチの相違は、それによって得られる結果の適用範囲を大きく変化させる。地球環境分野においてはこれらを混同した研究が多数見受けられ、結果の解釈と実用化を困難にしている。地球環境研究が基本的に目指すべき方向と目的については、本論の始めにも記したがそれらのうち、当面取り組まなければならないものを箇条書きするならば、以下のような物がある。

- ①. 地球温暖化、酸性雨問題、土壌劣化などの個々の地球環境問題に対するアドホック的な研究対応と政策提案
- ②. 人間活動と地球環境の係わりに関する構造同定とその把握に基づいた社会構造改革の提案
- ③. 貧困、食糧問題などの重要課題と地球環境問題の係わりに関する検討

第一の課題に関しては、現在、統合評価モデル（IAM: Integrated Assessment Model）分野などで精力的に行われている。第二、第三の課題に関する研究は、現在始まったばかりであるが、地球環境問題の関連分野及び目標の広さに目が眩んでいるというのが実状であろう。

まず、人間活動と地球環境の間には、社会・経済及び自然システムが介在する。多くの場合、どちらのシステムの影響・効果も無視することは出来ない。これらを総合し取り扱う必要性については、何回も主張されてきた。その一つの例として図2-1は、地球温暖化問題検討の統合フレームを示したものである。現在までにこのフレームに大なり小なり基づいた統合モデルが構築され、各種の検討が行われてきた。このような営みが実際の地球環境施策策定にあたっての判断根拠となるレベルまで成熟しているかは、現在、多くの論議を呼んでいるが、フレーム自体については受け入れられていると言ってよい。図2-1は気候変動に特化したものであるが、もう少し広い観点から地球環境問題に対応できるものとして、準備している統合モデルのフレームを図2-2に示す。図2-2では、研究手法の中心を人口、経済、土地収支、資源収支及び物質循環を対象とするコアモデルに置き、それらのサテライトとしての水資源、生態変化、ライフスタイル、技術進歩あるいは気候システムに対するモデルを配置しようと考えている。こうした解析を、どの程度の地域・時間スケールで行うか、及び、どの程度の地域情報の支援のもとで行うかが一つの問題となる。

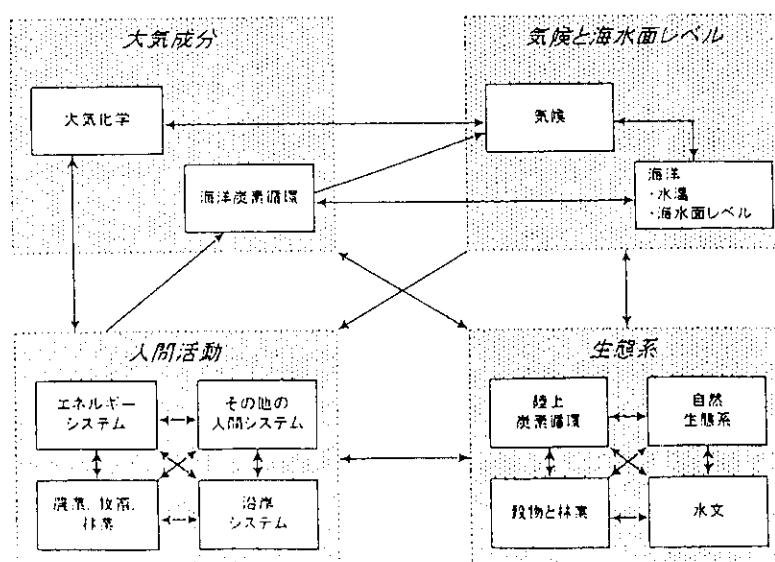


図2-1 気候変動問題検討のための統合フレーム

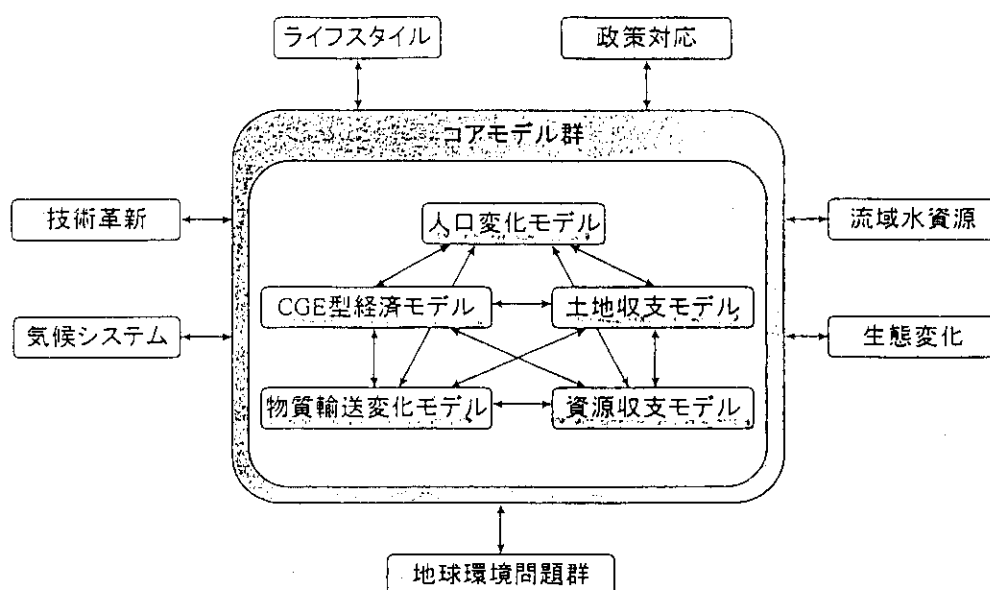


図 2-2 人間・社会的側面から見た地球環境問題検討のためのモデルフレーム

各コアモデルが共通した地域分割と時間スケールを持てば、取り扱いが容易であるが、データ取得上必ずしも容易なことではない。また、対象の性質上、空間分割を変更する必要も出てくる。例えば、表 2-1 は、図 2-2 に示すコアモデルの一つである経済モデルのうち、世界経済を取り扱う部分の地域分けである。この経済モデルでは一次生産を中心に 37 種の財（表 2-2）を取り扱っており、それらを一般均衡型の取り扱いでモデル化する。従来の経済モデル分野の常識から見ると過剰とも思われる地域と財区分は、現行の国際貿易体制と環境との係わりを解析していくには必須の道具立てであるが、一方では、これによっては国内分業やそれに伴う土地改変を追跡出来ず、適宜ズームング手法等によって、地域経済モデルで補強するといった、空間スケールによる階層構造を取る必要がある。図 2-3 はその例であり、図 2-2 に示したコアモデル群が、各国内にてそれぞれ各国別のコアモデル群を構成し、それらがグローバルモデルを通して連携するさまを示している。

一方、水、物質循環あるいは生態変化などは、こうした社会・経済的階層や区分とは異なった論理で取り扱われる。それらのシステムを駆動する自然的営為に基づいた地域分けが必要となり、それらとの統合も研究アプローチを規定する大きい要素となる。図 2-4 は現在、行っている水資源からみた中国南部付近の地域区分（単位流域区分）であり、こうした表章単位の相互連携は、この種の統合的アプローチを進めて行く上のキーポイントの一つである。

表2-1 経済モデルにおける地域分け

地域名	地域コード
オーストラリア	AUS
ニュージーランド	NZL
日本	JPN
大韓民国	KOR
インドネシア	IDN
マレーシア	MYS
フィリピン	PHL
シンガポール	SGP
タイ	THA
中国	CHN
香港	HKG
台湾	TWN
インド	IDI
残りの南アジア	RAS
カナダ	CAN
アメリカ合衆国	USA
メキシコ	MEX
中央アメリカとカリブ海地域	CAM
アルゼンチン	ARG
ブラジル	BRA
チリ	CHL
残りの南アメリカ	RSM
ヨーロッパ連合	E_U
オーストリア、フィンランド、スウェーデン	EU3
欧州自由貿易連合	EFT
中央欧州連合	CEA
旧ソビエト連邦	FSU
中東と北アフリカ	MEA
南アフリカ	SSA
残りの世界	ROW

表2-2 経済モデルにおける財区分

部門名	備考	部門コード
米生産	米	pdr
麦生産	小麦	wht
穀物生産	大麦、トウモロコシなど	gro
非穀物生産	果物、香辛料など	ngc
羊毛生産	羊毛	wol
家畜生産	家畜、ペットなど	olp
林業	原木、木炭など	for
漁業	魚介類など	fsh
石炭生産	石炭、コークスなど	col
石油生産	原油など	oil
ガス生産	天然ガス、生成ガス	gas
他の鉱物生産	鉄鉱石、銅鉱石など	omn
加工米製造	精製米	pcr
肉製品製造	牛肉、豚肉など	met
乳製品製造	牛乳、バターなど	mil
他の食品製造	小麦粉、食用油など	ofp
飲料及び煙草の製造	酒類、煙草など	b_t
繊維製品製造	毛糸、絹糸など	tex
衣類製品製造	衣類など	wap
皮革製品製造	皮革、毛皮製品など	lea
木材・木製品製造	加工木材、合板など	lum
パルプ・紙製品製造	紙、パルプ製品など	ppp
石炭・石油製品製造	ガソリン、潤滑油など	p_o
化学製品製造	ゴム、プラスチックなど	crp
非金属製品製造	セメント、ガラスなど	nmm
鉄鋼製造	各種鉄鋼製品	i_s
非鉄金属製造	銅合金、鉛合金など	nfm
金属製品製造	金属部品、ワイヤーなど	fmp
輸送機械製造	飛行機、乗用車など	trn
一般機械製造	エンジン、各種機械など	ome
他の製品製造	音響機器、玩具など	omf
電力、ガス、水道供給		egw
建設		cns
運輸サービス		t_t
他のサービス(民間)		osp
他のサービス(政府)		osg
不動産		dwe

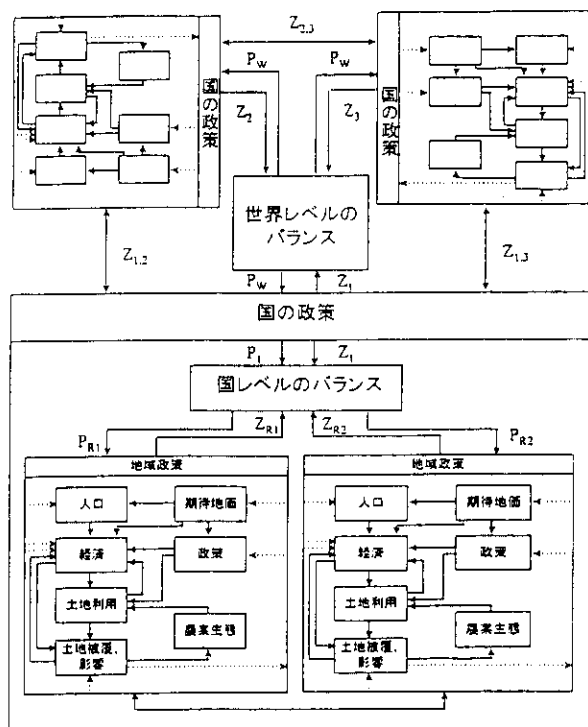


図2-3 国レベルのモデル群の世界リンケージ

(4) 既存学問への挑戦と問題点

前節で紹介したような地球環境統合モデルによる研究アプローチは、従来の環境研究や基礎研究には見られなかったいくつかの問題挑戦の契機となると共に、いくつかの問題点を抱えこんだ。それらのいくつかについて紹介する。

その対象となる時間スケールの問題である。地球環境問題では社会・経済活動を超長期にわたって取り扱う必要が生じている。経済学は今まで、5年から長くても10年くらいの期間を対象として計量経済モデルを適用してきたが、このようなモデルは30～100年以上という地球環境問題を分析することができない。このため、長期の価格調整メカニズムを分析する一般均衡モデル、長期の経済成長や環境投資の経路を分析する動学的最適化モデル、さらには技術やライフスタイルなどの结构的変化を分析するボトムアップ・モデルの開発を行わなければならない。

第二は、これらのモデルを使って、いろいろな環境対策オプションやその組み合わせがどのような効果を持つかを実世界を対象として行わなければならないことである。複数の国が協力して対策する場合の効果や、対策の時間的な割り当て方によって費用がどの程度違ってくるか等について、説得性をもった答えを用意できるかが問われている。現在、温暖化対策を中心として対策を後の世代に先送りすることの是非について、議論が激化している。このような次の世代への対策の先送りについては、の検討が不可欠となる。従来社会科学が得意としてこなかった分野である。現在、世代を超えて生じる分配問題に関して、経済学の分析枠組みを出来るだけ統一化する努力がなされつつある。そして、経済学の功利主義的なアプローチによって、世代間の公平性が大きく乱されないよう、社会的割引率の概念、設定にも細心の検討が行われるようになってきた。

第三は、地球環境問題により、対策を実施しなかった場合どの程度の被害が生じるかについての研究も盛んになってきた。例えば、気候変動に伴う農業生産の減少とそれによる価格上昇を予測し一般均衡モデルを用いて消費者余剰の減少分を推定したり、生命リスクや環境資産といった非市場的影響の評価についても世界規模で試みられている。特に、非市場的影響を世界規模で評価することから、南北間で生命価値の値付けが異なるといった新たな議論が起こっている。また、地球環境変化に社会がどこまで順応できるかという、適応行動のモデリング研究も盛んになりつつある。例えば、海水面の上昇に対して沿岸域の住民が理性的な行動をとった場合、どの程度の損害を減らすことができるか、酸性雨、土壌劣化の農業影響を国際市場によってどの程度吸収できるかといった研究である。これらの研究は統合モデリングによるアプローチの独断場である。

最後に、発展途上国を対象とした統合的モデルの適用には、未だ多くの克服しなければならない問題点があることが明らかにされてきた。発展途上国に統合的評価を適用する場合、経済発展の必要性、伝統社会の尊重、政策決定システムの違いから、先進国とは違ったアプローチが必要である。特に、伝統的経済システムと近代的経済システムの共存という経済の二重構造の故に、通常の社会・経済モデリングの適用には限界があり、ボトムアップ型のモデルの適用が不可欠となっており、これらの開発が急がれている。

(5) 持続可能な研究活動に向けて

さて、人間・社会的側面からみた地球環境研究は、上にも述べたように決して真理探究の学問ではない。地球環境と人類のつきあいを潤滑にする種々の社会ルールあるいは政策のガイダンスとして役立つことを目的とする実学である。従来、こうした実学的研究と実社会との関係は比較的簡単な枠組みでとらえることができた。研究者は政策ニーズあるいは直前のニーズを理解しながら研究方針をたて、基礎科学や各種統計をベースにして人間・社会活動を評価・解析し、なんらかの法則や予測を導き出す。社会はそれらを参照しながら政策決定、政治的交渉などの過程を進めていくと言ったナイーブな問題設定である。しかし、地球環境問題のような巨大で不確実な構造をもった問題の場合、このような枠組みは無力である。重要な要因が多すぎるうえに、これらの要因が複雑に絡みあっている問題では、総合的認識はもとより何が問題かについて明らかにすることも至難である場合が多い。しかも、世界中の人々や政府が当事者となっているため、問題認識についての合意が難しい。また、超長期的問題である場合も多く、社会や経済のシステムは構造的な変化をとげ、一部の自然の系さえも構造的に変わる可能性がある。このような問題では、問題の基本的認識あるいは設定においてさえ研究から実社会へ、あるいは実社会から研究への一方的な依存関係は存在し難い。両者はインターラクティブに進展しなければならず、そしてその経過において問題認識と解決策模索の過程が同時進行することになる。そのプロセスにおいては、理論的、演繹的な問題設定がなされないわけではないが、その本質は実践的な意義に求まるべきであり、その経過にて、経済理論、心理学、法律学あるいは自然科学などの個々の基礎科学に止揚化された原理・原則がフィードバックされなければならない。

実社会と既存の学問分野に対し、かくの如くのつきあい方をして始めて、人間・社会的側面からみた地球環境研究は、科学的営みとしての新たなパラダイの開拓と持続可能な発展の道が開けるものと確信している。

2.2 モデルの構築

(1) 発展途上国における人間活動・環境変化・社会・経済システム

発展途上国における人間活動と環境変化及びその社会・経済影響に関する研究レビュー等を通じて人間活動と環境変化の相互関連要因の分析（活動パターンと環境変化）を行った。図2-4は、発展途上国を対象とした人口-環境-経済に影響を及ぼしていると考えられる主要な4つの要因を示している。従来、環境破壊は人口増加、開発圧力による環境資源の枯渇や再生不可能な利用を中心として捉えられてきたが、さらに農村地域に見られる地域共同体による資源管理や土地所有などの制度の問題、また持続的な発展のために不可欠な農業生産性の向上を可能とする技術が挙げられる。

持続可能な開発を実現するための社会システム

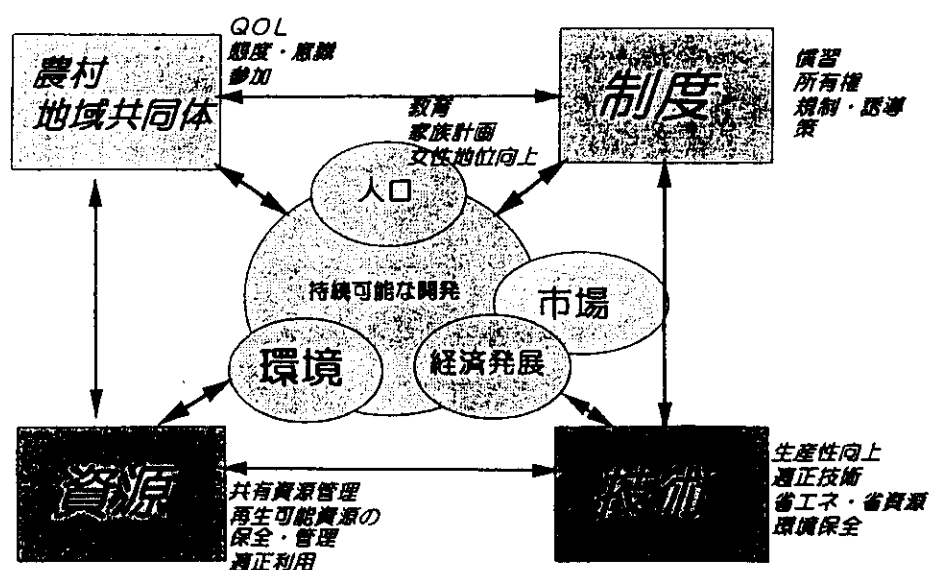


図 2-4 持続可能な開発を実現するための社会システムの関連要因

また環境変化も地域によって異なっている。アジア地域についてみれば、例えば、東南アジアでは、生産性の高い土地の利用を制限されている農村地域の住民が森林地へ入りこむことにより、森林破壊を招いたり、肥沃な土壌の消失や生物多様性の減少をもたらしている。そして農業生産力の低下、潜在的な森林生産の消失などを招き、地域共同体としての生活が成り立たなくなり、結果的に貧困を助長し、都市への人口流入を促進するといった悪循環がある。一方、世界の最貧困国であるネパールを含むヒマラヤの山岳地帯では、流域の植生被覆の破壊や土壌浸食が発生して、生産力の低下や日々のエネルギー源である薪不足、下流での洪水と土砂沈積などの環境変化が発生している。いずれも農業、林業などの一次生産活動など不適切な環境資源の利用から生じている。

(2) 人間活動－環境変化－社会・経済影響の評価モデルの構築

・既存のモデルのレビュー

既存の資源利用－環境変化に関する代表的なモデルを取上げ、その特徴を一覧としてののが表 2-3 である。モデルのタイプもシステムダイナミクス (SD) を利用したものから、一般均衡を利用したモデルまで多様である。

表 2 - 3 人間活動と資源利用のモデル

研究者	名 称	対象とする資源	手 法	備 考
Malthus 1792		人口と土地資源に制約された食料生産		人口転換過程の経済モデル
Club of Rome 1972		地球環境変化と人口増加	システムダイナミクス	人口調整、稀少化する天然資源を技術により代替する過程が入っていない
Emanuel et al. 1985 Solomon, 1986 Parry, 1988		気候変動と地球システム 生態系、農業システム、 植生・水利用		
Adams et al. 1993		気候変動の米国産穀に与える影響評価 生物物理的、経済的評価	空間最適化モデル (63地域、30種の 農産物) ミクロ (農場) レベル+国レベルの 農業セクター	土地の利用可能性・使用、労働、かんがい水が地域レベル で供給関数によって決定された、都市化、資源に与える 土地利用変化のフィードバックは入っていない
Fisher et al. 1988	BLS	人口、都市-農村人口移動、社会-経済 要因、資本の蓄積、市場	厚生経済学+一般均衡モデル	地域、国レベルでの需要供給、農地利用を予測
Rosenzweig 1993	BLS+ 穀物 モデル	世界の食料供給・需要と貿易、貧困のリ スク評価		土地利用変化の環境影響については無視
Rosenberg & Crossen 1991	FASOM	農業、森林業、水資源、エネルギーセ クター	農林業の動的、多市場、多期間 非線形モデル	気候変動の米国 4 州への総合的な経済影響の分析 M I N K レポートとして著名
FAO, 1978 他	AEZ	土壌と気候条件から潜在的な農業生産性 の評価		途上国の灌漑穀物などの土地評価に用いられている
Patron et al. 1978, 88, 93	CENTURY	自然、人口草地の植生、土壌有機物の動 態評価	プロセス指向のモデル	
Alcamo 1994	IMAGE2	人口、経済、技術革新など、農産物需要 変化をルール化して土地利用とリンク		価格、需要・供給、政策対応間のフィードバックが入っ ていない

BLS: Basic Liked Model, FASOM: Forest and Agricultural Sector Opti. Model, AEZ: Agro-Ecological Zone model

・モデルの基本的構造

人間活動-環境-社会・経済の相互影響に関する知見や既存の資源利用-環境変化に関するモデル等を評価するとともに、アジア地域における現象のモデル化に必要な知見を整理し、あわせてモデル構築・検証に必要なアジア地域の地理情報データ、社会・経済データを一部収集、整備した。図 2 - 5 は、本研究の中心となる人間活動-環境変化-経済・社会システムを表すモデルの枠組みを示したものである。

農林業を中心とした社会システムと水資源、土壌資源、土地資源などの環境資源からなる自然システムとの相互作用を主として扱うモデルである。人口増加、都市化、ライフスタイルの変化、技術革新や気候変動などの影響は外生的に与えるモデルである。農林業では穀物生産量の変動を物量で計ることが一義的に重要であるが、さらに穀物については、国内の市場価格の変動や国際取引（貿易）などによる国際的市場の動向についても考慮する必要があることから、一般均衡型の経済モデルを基本とすることとした。

引用文献

- Brown, L.R. (1996): Tough Choices, W. W. Norton & Company, New York.
- Herrera, A. (1979): Catastrophe or new society? a Latin America world model, International Development Research Centre, Ottawa, 108p.
- Leontief, W. (1977): The future of the world economy: a United Nations study, Oxford University Press, New York, 110p.
- Simon, J.L. (1996): The ultimate resource 2, Princeton University Press, Princeton, N.J., 734p.

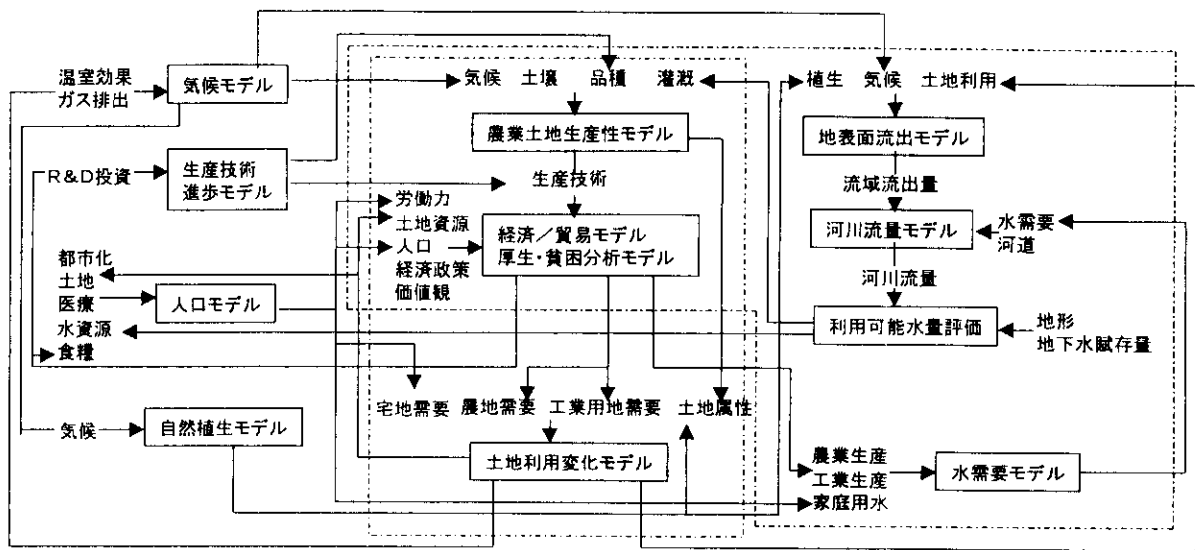


図2-5 人間活動-環境変化-経済社会モデルの枠組み

第3章 アジア地域の食料安全保障

3.1 アジア地域の人間活動と環境変化

国際的なHDP研究(IHDP: International Human Dimension Programme on Global Environmental Change)では、とくに発展途上国における主要な環境問題として、水資源、食糧安全保障、健康問題を掲げ、IHDPのコアプロジェクト候補として現在検討が進められている。水資源、食糧、健康はいずれも相互に関連しあっており、分野毎に分析するとともに、これらの要因と人間活動との関連、さらには社会・経済事象との関連を総体として把握することが必要である。また、温暖化は、気温変化や降水量変化という形で現れ、水資源や農業生産、さらには直接・間接的に健康に影響を与えようと考えられる。

・アジア地域における環境問題

表3-1はアジア地域における環境問題を一覧としたものである(UNEP, 1998)。主として取り上げられている環境問題はいわゆる公害問題であり、局所的、短期的な環境問題である。表にはさらに温暖化による影響を気候、農業、水資源、植生、健康(マラリア)の影響について、既存の知見をあわせて示している。アジア諸国は多くの国で公害問題などの環境問題について影響を受けているとともに、一部の国、特にインド亜大陸の諸国では、温暖化の影響が重なることが、予測されており、環境問題はさらに深刻化することが予想されている。

表3-1 アジア地域における環境問題の概要

国名 環境・資源問題	バングラデシュ	中国	インド	ミャンマー	ネパール	パキスタン	スリランカ	カンボジア	インドネシア	ラオス	マレーシア	フィリピン	タイ	ベトナム
土地・土壌資源	・	・	●	▲	●	●	▲	▲	▲	▲	・	●	▲	▲
殺虫剤・肥料	▲	▲	▲	・	・	▲	・	・	▲	・	・	▲	▲	・
森林破壊	▲	●	●	▲	●	▲	●	●	●	●	●	●	●	●
水資源	●	・	●	・	・	▲	▲	・	●	▲	・	▲	●	▲
産業公害	・	●	●	・	・	・	・	・	▲	・	▲	▲	▲	▲
酸性雨	・	●	▲	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
海洋・沿岸域劣化	・	・	▲	・	・	・	●	▲	▲	・	▲	▲	▲	▲
海面上昇	▲	▲	・	・	・	・	・	・	▲	・	・	▲	▲	・
都市過密・汚染	▲	●	●	・	・	●	・	・	●	・	▲	●	●	▲
廃棄物処分	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・	・
温暖化影響:水資源	++	0	+++	・	+++	・	0	0	0	0	0	0	0	0
米	0	0	--	・	0	・	0	0	0	0	0	0	0	0
小麦	---	・	---	・	---	・	・	・	・	・	・	・	・	・
植生	・	・	---	・	---	・	・	・	・	・	・	・	・	・
マラリア	0	--	・	・	---	・	・	・	---	0	0	0	0	・

(凡例) ●:優先度大 ▲:優先度中 ・:優先度小 -:該当せず

温暖化影響(++++:水資源増加、-----:米、小麦、植生、マラリア悪影響)

3.2 アジア地域における食料需給の現状

アジア地域における農業生産、食料需給の経緯と現状について示すと以下のように要約できる(中川、1997; Dupoint、1998)。

(1)一人あたりの食料摂取カロリー： 世界平均の一人当たりの食糧摂取カロリーは一貫して増加しており、途上国人口全体に占める飢餓人口の割合が低下し、世界の食料問題は改善の方向に向かっている。一人当たりの食糧摂取カロリーでみると、世界の主要地域別の一人一日あたりの食糧摂取カロリーの推移(FAO)によると、1960年代初頭の2240kcalから90年代半ばの2720kcalへと一貫して増加してきた。アジア地域では、1960年代初頭には、1850kcalを消費するに過ぎなかったが、その後の緑の革命の進展により、食糧増産の実現と経済発展に伴う食糧輸入の増加によって、90年代半ばには、2610kcalを消費するまでになった。

(2)飢餓人口： 世界の飢餓人口の推移を見ると、南アジアでは飢餓人口割合が33%から22%へとかなり低下しているが、この間に2%を上回る人口増加が起こったため、飢餓人口の絶対数は2億3800万人から2億5500万人に若干増加した。アジア全体では、飢餓人口割合が低下したが、90年代初頭の世界の飢餓人口8億4100万人の62%はアジア地域に存在している。南アジアでは、70年代と80年代を通じて緑の革命の進展によって小麦と米の増産が続き、食糧事情がかなり改善したが、それでも伝統的に肉食消費が少なく、90年代初頭でも5歳未満児の6割近くが栄養不良児と推定されており、高い乳児死亡率の主因となっている。

(3)穀物生産量と穀物収穫面積

世界の穀物生産量は1960年の8億2400万トンから1996年の18億6700万トンへと2.3倍に増加したが、この間に世界の人口は30億2000万人から58億100万人へと1.92倍に増加したので、世界の一人当たりの穀物生産量は、273kgから322kgへ18%増加した。一人当たりの食糧摂取カロリーが60年代以降増加してきたが、この食糧事情の改善は、世界の人口増加のテンポをうわまわって穀物生産が拡大したためである。しかし、農地には限りある中で人口増加が続いているために、世界の一人当たりの穀物収穫面積は一貫して減少している。

(4)穀物供給量と穀物需要量

・穀物供給量の増加要因： 穀物供給の増加要因としては収穫面積の増加と単収の上昇である。供給サイドにおいては単収の上昇率が高く、60年代、70年代、80年代を通じて年率2%を上回るテンポで世界の穀物の単収が上昇してきた。しかし穀物増産に大きく貢献してきた単収の上昇も90年代に入るとその上昇率は0.8%に低下している。収穫面積については、70年代は穀物貿易が急速に拡大し、国際市況が好況であったこともあって年率0.8%で収穫面積が拡大したが、80年代に入ると国際市況が低迷し、主要穀物輸出国で生産調整が行われたこともあって、逆に収穫面積は年率0.5%で減少した。90年代に入ると収穫面積は再び増加に転じているが、その増加率は0.2%と低い。

・穀物需要量の増加要因： 穀物需要の増加要因としては一人当たりの穀物消費量の増加と人口増加が挙げられる。需要サイドについては、人口増加の影響が大きく、その増加率は、60年代の2.0%

から 90 年代の 1.6%へと徐々に低下しているが、世界の穀物需要を着実に増加させる要因となっている。一人当たりの穀物消費量は、60 年代、70 年代は 1.0%、0.9% で増加したが、80 年代、90 年代には、0.1%、0.6%で逆に減少している。途上国では、一般に所得の上昇にともなって食用・飼料用の合計の穀物消費量が増加することが知られているので、特に 90 年代に入ってから途上国で潜在需要はあったものの、穀物供給が制限されたために、一人当たりの穀物消費量が抑制されていた可能性が高い。

(5) アジア地域の経済成長と穀物自給率

1980 年代半ば以降アジアの多くの途上国では、経済成長が本格化し、現在では世界でも最も高い経済成長を続けているが、この経済成長に伴って世界人口の 6 割近くを占めるアジアでの食糧需給構造も急速に変化してきた。

・穀物自給率の低下： アジアの主要国の穀物需給の推移を見ると、多くの国で近年穀物自給率が低下している。とくに日本、韓国、台湾、マレーシアなど経済発展がかなり進んだ国々では、穀物自給率の急速な低下がみられ、近年では、その自給率が 30%を下回っている。これらの国々の穀物自給率の低下は、これまで世界の他の地域ではみられなかった急激な低下で、1970～96 年の間に、日本の穀物自給率は、45%から 27%へ、韓国は 68%から 31%へ、台湾は、61%から 19%へ、マレーシアは 60%から 25%へとそれぞれ低下した。中国、インド、バングラデシュ、パキスタンのような人口大国では、依然として 90%以上の穀物自給率が維持されているが、経済発展が進めば、穀物自給率が低下する可能性もある。他方、メナム川デルタとメコン川デルタの大穀倉地帯をかかえるタイとベトナムでは、100%を上回る自給率が維持されている。

最近のアジア地域における穀物自給率低下の背景には、所得上昇に伴う食糧消費パターンの変化、都市化の進展に伴う農地転用の増加、緑の革命の効果の鈍化に伴う穀物単収の伸び悩みなどがある。

(6) 穀物輸入量の増加

世界の穀物需給は、米国の穀物在庫量が世界の緩衝在庫として機能してきたが、東西冷戦構造が崩壊し、国内では財政削減の要請が高まる中で、これまでのような大量の政府在庫を維持することが困難になった。世界の穀物需給は逼迫傾向を強めており、世界穀物市場の不安定性が高まっているが、アジアはこのような世界穀物市場への依存を強めている。60 年代以降アジアで穀物輸入量が増加し続けている。アジアの穀物の純輸入量は 1961 年には 1700 万トンであったが、96 年には、3 倍以上の 5740 万トンに増加した。アジアで穀物の純輸入量が増加しつづけているのは、人口増加と経済成長に伴う穀物需要の増加に、域内の穀物増産が追いつかないため、この両地域の輸入需要の増加を満たすために北中米とオセアニアの純輸出力が増加している。

食肉消費量の増加

その他にも、アジア主要国の一人 1 年間当たりの食肉消費量が、所得上昇にともなって食肉消費量が増加している。このため、食肉生産のための飼料用穀物の需要も増加している、などの特徴がアジア地域で食料安全保障を検討する際のポイントとなっている。

東アジア諸国の水準に比べてかなり少なく、その伸びも緩やかである。

3.3 アジア地域の食料安全保障の指標化

食料安全保障などの現状把握のための手法としては、指標化による方法が試みられている。例えば、IHDP の人間安全保障を総括的にみるための指標群の開発、適用 (Downing, 1992; Lonergan, 1997)をおこなっている。

アジア地域の各国の食料事情を比較検討するために、4つの要因を考慮した指標を作成した。4つの要因としては、一人あたりの GNP(家庭レベルの食糧購買力)、5才以下の幼児死亡率(個人レベルの食糧不足)、カロリー摂取量(国レベルの食糧不足)、そして人口増加率(将来食糧需要の伸び)を取り上げた(年度は90年度である)。発展途上国を対象に各要因毎に算定した平均値、標準偏差により基準化し、それらの平均をとることにより、点数化した(点数が低いほど食料事情が悪く問題となっていることを示す)。図3-1は、世界の途上国の指標値の分布を示したものである。中国では、指標値が高く、インドでは対照的に低いことが顕著である。中国については、急速な人口増加、ライフスタイル(とくに肉食指向)の変化、一部地域の農地の劣化や他の土地利用への転換などのために、穀物輸出国から輸入国に転換しているなど、将来の食糧事情の悪化が懸念されているが、アジア地域においては、食糧安全保障の面では途上国の中では良いほうである。最も懸念されるのが、インドをはじめとしたインド亜大陸の各国である。インドでは、人口増加が著しく2050年には、中国(15.6億人、世界銀行による世界人口長期推計による)を抜く人口(16.2億人)を擁すると予測される。地球温暖化はこの地域の穀物収量が大幅に減少すると予想されることから、アジア地域においてインドなどの食糧安全保障を担保するための仕組みづくりが必要になることは明らかである。

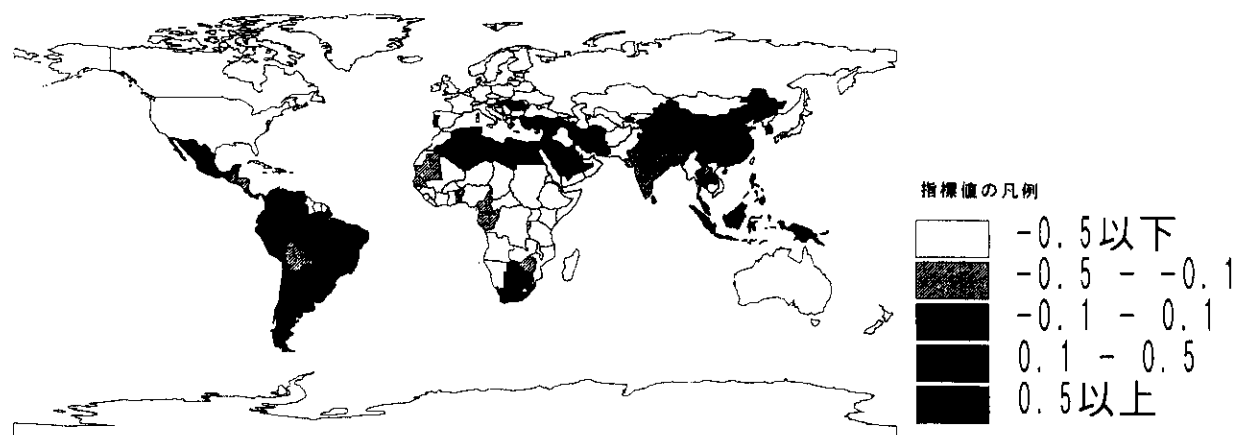


図3-1 発展途上国の食糧安全保障指標(指標値が大きい程、安全度が高い)

3.4 貿易を通じた食糧安全保障の可能性について

将来アジア各国で穀物収量が変化した場合の影響を経済モデルにより試算した。貿易データベースをもとに、一般均衡モデルを用い、その影響について検討した。貿易データベースは、世界貿易分析プロジェクトが開発提供しているものを用いた(GTAP1994年版)。世界を30地域に分割し、産業セクターを農業を中心に8セクターに分割している。

3.3.1 農業生産性の予測

温暖化の原因となる温室効果ガスの排出量削減について、各国における今後の取り組みに関する議論が続けられている。排出削減を実際に行うには多大な努力が必要であり経済に与える影響も大きい。そこで、各国における適切な政策設定のためには、温室効果ガスの排出削減が十分に行われず温暖化が発現した場合に引き起こされる影響について、広い分野にわたり定量的な評価が行われる必要がある。

温暖化の影響は、水資源、健康、海面上昇、生態系などを代表として多岐にわたり、本研究で取り扱う農業への影響も重要なものの一つである。農作物の生産性は、気温、降水量、蒸発散などの気候資源に大きく依存しており、気候変動の影響を直接的に受ける。これまで、気候変動により引き起こされる作物種毎の収量(単位面積当たり生産量)変化について多くの研究が行われてきた。その多くは、気温、降水量、日射量、湿度、風速などの気候データと、傾斜、土壌粒径、pHなどの土壌データ、加えて肥料投入量、灌漑などを入力情報として、単位面積当たりの収量を算定するモデルを設定し、将来の気候としてGCM(General Circulation Model、気候予測モデルの一種)の計算結果を利用して、将来の収量を算定するものである。これらの農作物収量変化の推定結果にはばらつきがありいまだ不確実な点が多いものの、今後その評価技術は改善されていくことが見込まれる。

さらに、問題の抑止や適応のための政策提言を目的とした場合、収量変化のような直接的な自然システムへの影響が人類にはたしてどのような影響を及ぼすのかを知ることが重要となる。そのためには、自然システムと人間活動の間に介在する社会・経済システムに関する理解が必要である。ここでは、経済システムを考慮に入れた気候変動影響の評価を行うために、生産性算定モデルと経済モデルを統合したモデルフレームを構築し、将来予測される気候変動が農作物生産を通して社会にどれほどの経済的な影響を与えるかを試算した。3.4.2ではモデルの説明と試算結果を示し、3.4.3では結果の考察と今後の研究の展開を議論する。

3.3.2 農業影響算定モデル

(1) モデルの概要

図3-2は本研究で開発した農業影響算定モデルを示している。まず気候変動モデル及び水収支モデルにより、農作物生産をとりまく水分、気温、日射量などの条件を算定する。気候変動モデルでは社会経済発展や人口のシナリオとGCM(大循環モデル)による二酸化炭素濃度倍増時の気候分布を入力として、将来の気温分布、降水量分布、大気中二酸化炭素濃度を生成する。

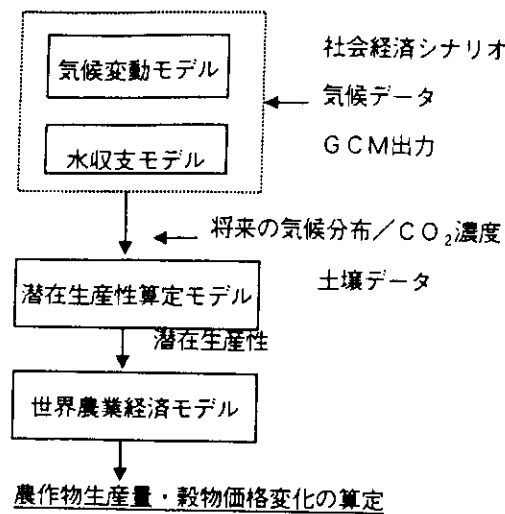


図3-2 農業影響算定のフロー

続いて水収支モデルでは、積雪、蒸発散、流出などを計算する。それらの気候データ、水資源データ、大気中二酸化炭素濃度及び土壌のデータを入力として、潜在生産性算定モデルでは、二酸化炭素並びにその他温室効果ガスの排出シナリオを入力として作物の成長過程をシミュレートすることにより、天水栽培において単位面積当たり達成しうる農作物収穫量(潜在生産性)を求める。世界農業経済モデルでは、潜在生産性の変化を生産技術変数の変化として用いて、国際・国内市場の需給量や貿易への影響を算定し、更に厚生分析を行う。

同様のアプローチを用いて、気候変動の経済影響の評価を試みた例としては、Fischer *et al.*(1994)、Kane *et al.*(1992)、Darwin *et al.*(1995)の研究が知られている。これらの研究はともに、気候・土壌条件から農作物生産性を算定するモデルと国際貿易を取り扱う経済モデルを組み合わせ、気候変動下での食糧需給量を世界規模で算定するという点で手法的に一致している。Fischerらは、USIADにより開発されたIBSNAT穀物モデル(International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer, 1989)とIIASA/FAPによって開発された一般均衡モデルBLS(Fischer *et al.*, 1988)をリンクさせ、貿易による適応を考慮に入れて気候変動の食糧供給への影響を評価した。Fischerらの報告によると、2060年時点の世界穀物生産量は、適応・対策を行わない場合、温暖化により1~8%減少し、穀物価格は24~145%上昇する。作付け時期の変更など農場レベルの適応を行えば、生産量変化は-2.5~+1%、価格変化は-5~35%まで抑制することが出来るとの結果を得ている。Kaneらの研究では、世界13地域、20産物に関する部分均衡モデルSWOPSIM(Sullivan *et al.*, 1992)を経済モデルとして使用した。その結果、気候変動により大きな生産量減少を被る地域はあるものの、その総体的影響は貿易によりかなり緩和され、世界GDPの変化は-0.17~0.09%程度となっている。Darwinらは、独自に開発した土地生産性評価方法とHertelらによって開発された一般均衡モデルGTAP(Hertel *et al.*, 1997)に基づいて世界8地域、13産物に関する一般均衡モデルFARMを開発し、-0.1~0.1%の世界GDP変化と算定した。

ここでは、AEZプロジェクト(FAO, 1978-1981)により報告された作物成長に関するパラメータを利用して独自に作物潜在生産性算定モデルを開発し、その計算結果を世界農業経済モデルにて取り扱われる世界30地域(表3-2)、8産物(表3-3)で集計して、世界農業経済モデルへの入力とした。潜在生産性モデルに地理情報システムを用いることで空間的に細密な分解能での生産性の算定を可能にしておき、経済モデルで取り扱う地域への集計を容易に行うことが可能である。

表3-2 地域区分

地 域 名	地域コード
オーストラリア	AUS
ニュージーランド	NZL
日本	JPN
大韓民国	KOR
インドネシア	IDN
マレーシア	MYS
フィリピン	PHL
シンガポール	SGP
タイ	THA
中国	CHN
香港	HKG
台湾	TWN
インド	IDI
残りの南アジア	RAS
カナダ	CAN
アメリカ合衆国	USA
メキシコ	MEX
中央アメリカとカリブ海地域	CAM
アルゼンチン	ARG
ブラジル	BRA
チリ	CHL
残りの南アメリカ	RSM
ヨーロッパ連合	E_U
オーストラリア、フィンランド、スウェーデン	EU3
欧州自由貿易連合	EFT
中央欧州連合	CEA
旧ソビエト連邦	FSU
中東と北アフリカ	MEA
南アフリカ	SSA
残りの世界	ROW

表3-3 対象とした生産セクター

部 門 名	備 考	部門コード
米生産	米	pdr
麦生産	小麦	wht
穀物生産	大麦、トウモロコシなど	gro
非穀物生産	果物、香辛料など	ngc
羊毛生産	羊毛	wol
家畜生産	家畜、ペットなど	olp
林業	原木、木炭など	for
漁業	魚介類など	fsh
石炭生産	石炭、コークスなど	col
石油生産	原油など	oil
ガス生産	天然ガス、生成ガス	gas
他の鉱物生産	鉄鉱石、銅鉱石など	omn
加工米製造	精製米	pcr
肉製品製造	牛肉、豚肉など	met
乳製品製造	牛乳、バターなど	mil
他の食製品製造	小麦粉、食用油など	ofp
飲料及び煙草の製造	酒類、煙草など	b_t
織物製品製造	毛糸、絹糸など	tex
衣類製品製造	衣類など	wap
皮革製品製造	皮革、毛皮製品など	lea
木材・木製品製造	加工木材、合板など	lum
パルプ・紙製品製造	紙、パルプ製品など	ppp
石炭・石油製品製造	ガソリン、潤滑油など	p_c
化学製品製造	ゴム、プラスチックなど	crp
非金属製品製造	セメント、ガラスなど	nmm
鉄鋼製造	各種鉄鋼製品	i_s
非鉄金属製造	銅合金、鉛合金など	nfm
金属製品製造	金属部品、ワイヤーなど	fmp
輸送機械製造	飛行機、乗用車など	trn
一般機械製造	エンジン、各種機械など	ome
他の製品製造	音響機器、玩具など	omf
電力、ガス、水道供給		egw
建設		cns
運輸サービス		t_t
他のサービス(民間)		osp
他のサービス(政府)		osg
不動産		dwe

3.4.2 潜在生産性算定モデル

本研究で開発した潜在生産性算定モデルについて簡単に説明する。詳しい説明は Takahashi *et al.* (1997) 並びに高橋ら (1997) を参照されたい。このモデルでは、気温、降水量、潜在可能蒸発散、光合成有効放射量 (PAR)、土壌の性質及び地勢、大気中二酸化炭素濃度を入力とし、穀物の成長を生物学的にモデル化し、潜在生産性を算定する。算定可能な作物は、食糧供給に重要と考えられる米、小麦(冬播、春播)、トウモロコシ(熱帯性、温帯性)など 12 作物である。計算は高解像度(緯度経度 5 分メッシュ)のグリッド毎に行うために、計算結果を適当な空間レベル(本研究では 30 地域)で集計したり、画像化された結果により耕作適地の移動を空間的に把握したりすることが可能である。

社会経済シナリオに IS92a シナリオ(中程度の経済発展・人口増加)を仮定した場合の、来世紀末における米、冬小麦、熱帯性トウモロコシの潜在生産性変化の推定値を表3-4に示した。IPCC(1996)によると、気候感度を2.5℃とした場合、IS92aシナリオでの来世紀末の大気中二酸化炭素濃度は約710ppm、平均気温上昇は 2.0℃と推定されている。気温変化と降水量の空間・季節分布を得るために、平均気温上昇と GCM 計算結果を組み合わせた。GCM 計算結果間にはおおきなばらつきが存在するために、複数(11種)の GCM 計算結果を用いてそれぞれについて潜在生産性の変化を計算した後に地域集計し、その中央値を代表値として用いた。また Is92a*は二酸化炭素施肥効果が無いとした場合である。実験室での研究結果から、植物は大気中二酸化炭素濃度増加により施肥効果を受け、生産性が上昇する(米、小麦などの C3 植物で 15~30%)と考えられているが、実際の農地では、同じく施肥効果を受ける雑草との競合など様々な理由により、施肥効果はあまりあらわれないという議論も存在する。本報告では、Cure *et al.* (1986) によりサーベイされた二酸化炭素施肥効果を考慮した場合(Is92a)としない場合(Is92a*)について検討することにした。

表3-4 潜在生産性変化の推定(%)

	米		冬小麦		トウモロコシ	
	IS92a	IS92a*	IS92a	IS92a*	IS92a	IS92a*
AUS	27	9	18	-15	42	8
NZL	14	-2	36	-1	40	7
JPN	17	0	31	-5	26	-4
KOR	13	-2	29	-7	26	-4
IDN	13	-2	-22	-44	30	-1
MYS	11	-4	-	-	28	-3
PHL	12	-4	-	-	29	-2
SGP	-	-	-	-	-	-
THA	10	-5	-	-	37	4
CHN	18	1	28	-7	30	-1
HKG	-	-	-	-	-	-
TWN	26	9	24	-10	28	-2
IDI	4	-11	-24	-45	31	0
RAS	14	-2	-12	-36	51	15
CAN	05	76	72	25	140	83
USA	17	0	33	-4	33	1
MEX	11	-4	-19	-41	24	-5
CAM	14	-2	-42	-58	29	-2
ARG	12	-3	27	-8	30	-1
BRA	13	-3	-21	-43	29	-2
CHL	50	29	37	-1	72	31
RSM	14	-2	0	-27	31	0
E_U	22	5	27	-8	35	3
EU3	09	80	74	26	166	102
EFT	55	34	66	21	84	41
CEA	20	3	29	-6	29	-2
FSU	85	59	66	20	74	33
MEA	25	9	24	-10	43	9
SSA	12	-3	-19	-41	28	-3
ROW	17	1	26	-9	44	10

(IS92a*は二酸化炭素施肥効果を考慮しない)

3.4.3 世界農業経済モデル

農作物生産性の変化が各地域の経済に与える影響を定量的に評価するために本研究で用いた世界農業経済モデルは、米国 Purdue 大学において開発された GTAP モデルを基に、30 地域 8 産物(表3-2、3-3)を取り扱うように農作物を中心に集計した一般均衡モデルである。

図3-3 に本モデルの価値・財のフローを示す。各地域での収入は家計に付与され、それは個人消費、政府消費、貯蓄に使われる。均衡条件下では、各地域の貯蓄の総和が投資の総和に等しくなる。生産活動に用いられる本源要素として土地、労働力、資本の3つを取り扱う。家計は土地・労働力を所有し、地域内の生産者に提供し代償として地代・賃金を受け取るが、地域をまたいだ取引は考慮しない。

生産者並びに消費者の行動をそれぞれ説明する。モデル中、各々の生産者は競争市場の仮定の下で自己の利潤最大化を目的とした生産活動を行う。またすべての生産セクタでは規模に関して収穫不変が仮定されている。各生産セクタでの代替構造は図3-4に示すようにモデル化される。企業は合成本源要素と合成中間財を固定比率で合成(Leontief 型技術)することにより財を生産する。合成本源要素、合成輸入中間財、合成中間財の形成は、CES(Constant Elasticity of Substitution)生産関数で行う。

家計は効用最大化を目的として消費活動を行う。個人消費、政府消費、貯蓄への割り振りは Cobb-Douglas 効用関数に基づき決定される。つまり、それぞれ支出の収入に占める割合は、収入の大小に関わらず一定である。個人消費は CDE (Constant Difference of Elasticities) 効用関数によりモデル化し、政府消費は Cobb-Douglas 効用関数でモデル化する。

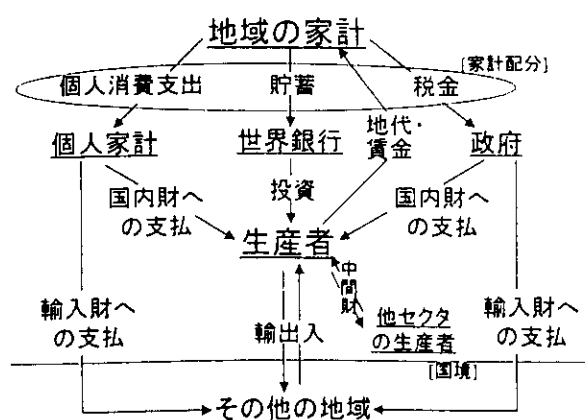


図3-3 世界農業経済モデルのフロー

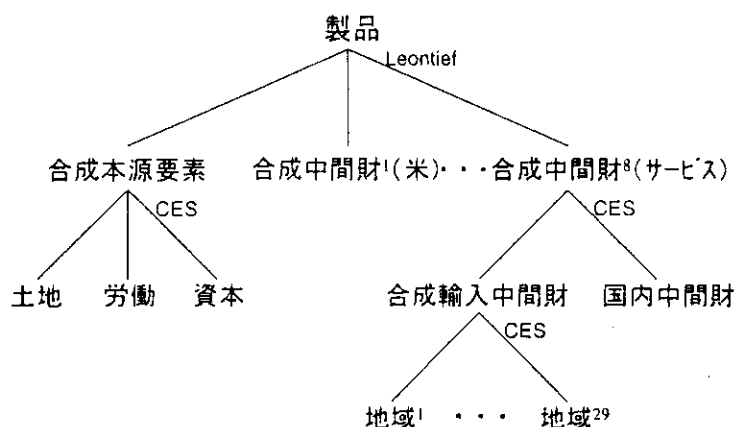


図3-4 生産の代替構造

世界農業経済モデル中では、気候変動による米、冬小麦、熱帯トウモロコシの潜在生産性の変化を、それぞれ「米」、「小麦」、「その他穀物」の生産セクタにおけるHicks 中立的技術変化として取り扱う。例えば、生産量 Q が 2 変数 X_1, X_2 の関数であるとする、外生的に与えられる技術変化は生産関数中で技術変化を表すパラメータ A_0, A_1, A_2 を用いて

$$Q = A_0 \times f(X_1 \times A_1, X_2 \times A_2)$$

とあらわされるが、Hicks 中立的技術変化は式中のパラメータ A_0 の変化で表現される。気候変動により各地域で表3-2のように潜在生産性が変化した場合の各産物の生産者価格、生産量、消費者物価指数、収入、1人あたり厚生、のそれぞれの変化を世界農業経済モデルを用いて算定し、いくつかの地域に注目して表3-5にまとめた。

表3-5 気候変動による6地域の経済影響

	IS92a(二酸化炭素施肥効果あり)						IS92a*(二酸化炭素施肥効果なし)					
	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E U	JPN	CHN	IDI	CAN	USA	E U
生産者価格変化(%)												
米	-18.24	-19.71	-8.64	-51.76	-17.07	-19.16	-0.01	-1.58	17.96	-40.16	-0.06	-4.93
小麦	-28.61	-27.47	38.64	-41.18	-28.27	-22.82	4.91	8.47	125.11	-13.10	4.76	8.92
その他穀物	-26.26	-29.14	-29.80	-59.35	-27.83	-27.51	1.81	0.79	1.80	-43.59	-1.46	-3.36
非穀物農産物	-1.68	-1.43	-1.75	-0.35	-1.57	-0.62	-0.01	-0.28	1.90	2.76	-0.10	-0.05
畜産物	-3.16	-5.81	-2.49	-6.21	-8.80	-1.48	-0.19	-0.09	2.84	-1.22	-0.59	-0.04
加工農産物	-3.30	-5.21	-1.22	-2.24	-2.16	-1.14	-0.15	-0.01	0.30	-0.35	-0.07	0.04
鉱業・製造業	0.10	0.12	-0.92	0.14	-0.11	-0.17	0.03	-0.12	-1.10	0.61	0.03	-0.02
サービス	0.14	0.38	-1.09	0.17	-0.10	-0.17	0.03	-0.16	-0.93	0.69	0.02	-0.02
生産量変化(%)												
米	1.88	2.48	-0.26	113.40	-0.51	0.82	0.11	-0.25	-1.76	105.99	0.23	2.03
小麦	-0.53	0.53	-6.22	105.10	-0.64	-7.20	-6.60	-3.97	-7.64	115.07	2.87	-3.64
その他穀物	-8.30	-0.09	-1.73	82.94	-3.69	-8.03	-15.56	-1.39	-1.33	89.41	-4.04	-6.50
非穀物農産物	1.39	4.47	-0.02	-0.81	0.56	-0.57	0.11	-0.07	-4.25	-2.26	0.25	-0.03
畜産物	1.31	6.88	-0.49	0.16	0.90	-0.60	0.09	-0.24	-2.27	0.94	0.03	-0.22
加工農産物	1.94	7.79	-0.63	0.53	0.38	-0.46	0.11	-0.27	-4.73	0.69	0.04	-0.22
鉱業・製造業	-0.03	1.08	1.63	-0.46	0.19	0.26	-0.01	0.31	-0.37	-1.62	0.03	0.05
サービス	0.08	1.65	0.37	0.10	0.09	0.15	0.00	0.00	-2.62	-0.02	0.01	0.01
消費者物価指数(%)	-0.439	-5.131	-1.698	-0.156	-0.286	-0.393	0.001	0.001	6.047	0.513	0.017	-0.010
一人当たり収入変化(%)	0.054	0.296	-1.474	0.259	-0.013	-0.086	0.026	-0.236	-0.617	0.833	0.026	-0.009
社会的厚生変化(%)	0.333	3.685	-0.077	0.334	0.232	0.224	0.022	-0.219	-4.892	0.343	0.009	0.003

3.4.4 考察

二酸化炭素施肥効果が起こらないとした場合の計算結果から見てみる。カナダで大きな生産性の増加が見られ、その結果生産者価格は大幅に低下する。農産物生産は増加するが、一方製造業やサービス業などでは生産量が減少する。消費者物価指数はそれら非農業生産での価格上昇を反映して上昇するが、生産者余剰の増加が消費者余剰の減少を上回るため、社会的厚生は 0.3% の増加である。表3-5 に示した地域の中では気候変動により最もよい影響を受ける地域であるといえる。インドでは小麦の生産者価格が 2 倍以上に上昇し、あらゆる業種で生産量が減少する。個人支出に占める農産物及び加工農産物消費の比率が高いこともあり(表3-7)、社会的厚生は 4.8% 減少と推定される。現状で多くの貧栄養層を抱えるインドでは、農産物消費の減少は深刻な飢餓問題を引き起こすと考えられる。日本では、生産性の低下により小麦とその他穀物の生産者価格上昇、国内生産量減少が見られるがその影響は小さく、総体的には社会的厚生は 0.02% 上昇する。米国においても日本と同傾向の変化が見られる。世界全体で見た場合に、社会的厚生は 0.046%、95 億米ドルの減少となる。

表3-6 個人支出に占める各産物の割合(%)

	JPN	CHN	IND	CAN	USA	EU
米	0.001	5.026	8.481	0.001	0.001	0.004
小麦	0.001	2.131	3.842	0.001	0.001	0.107
その他穀物	0.002	5.511	4.446	0.002	0.006	0.079
非穀物農作物	1.002	11.195	8.223	1.027	0.597	0.700
畜産物	0.178	10.636	9.212	0.233	0.097	0.804
加工農産物	16.090	27.074	21.394	11.345	8.289	15.566
鉱業・製造業	12.068	17.752	11.596	16.985	15.377	18.265
サービス	70.658	20.675	32.806	70.406	75.632	64.474
計	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

二酸化炭素施肥効果を考慮に入れた場合、米・トウモロコシの生産性は全地域で向上し、冬小麦については地域により変化する。世界全体で見た社会的厚生の上昇が期待されるが、その値は 0.41%、844 億米ドルである。地域別に見ると、中国と南アジアでの社会的厚生の上昇が大きい。これらの地域では消費者物価指数が大きく減少している。表3-6 からわかるように、これは価格が下がる米及びその他穀物の個人支出に占める比率が他の地域と比べて大きいためである。インドにおいても米・その他穀物の価格低下による正の効果は存在するが、小麦の価格上昇がそれを打ち消している。先進国においては、穀物の価格低下に加えてそれに起因する畜産物や加工農産物の価格低下があるにもかかわらず、個人支出の大半が製造業・サービス業による産物に用いられるので、社会的厚生は大きく向上しない。

二酸化炭素施肥効果を考慮した場合としない場合との比較から、温暖化の農業影響は施肥効果の程度

に大きく依存することがわかる。しかしながらその効果については大きな不確実さが存在しており、今後とも不確実さを取り込んだ影響評価を行っていく必要がある。

農作物の生産性は、気候変動により低緯度地域において減少し高緯度地域で増加する傾向がある。さらに低緯度地域には、個人支出に占める農作物の比率が高い途上国が多く位置しており、これらの国々は生産性低下による価格上昇のあおりを受けやすい。気候変動による農業影響は、これまで多くの温室効果ガスを排出してきた先進国ではなく途上国において深刻な影響を及ぼす可能性が高いといえる。特に施肥効果を考慮した場合世界全体の厚生は増加するものの、その地域的分布は不均一であり、途上国では負の影響を持つ国が存在することに注意する必要がある。温室効果ガス削減の議論において、まず先進国が早急な対策を講じることが重要であるが、途上国も自国への影響が大きいことを認識し可能な限り早い時期に削減努力を始める必要がある。

本研究の分析では、気候変動により農作物の土地生産性に变化が起きた場合に、その他の条件は変化しないとしてどれほどの経済的な影響が引き起こされるかを算定した。本研究の結果は、地域により異なる土地生産性の变化が各地域の経済に引き起こす挙動を考察するための基礎的な情報として有用である。しかしながらモデルによる評価が政策決定の根拠として実際に用いられるためには、将来の影響をより現実的に推定することが必要であり、農作物の土地生産性の变化だけではなくそれを取り巻く様々な因子の将来変化についても取り扱われねばならない。取り扱うべき因子としては、気候変動による生産技術変化以外の生産技術進歩、人口の変化、関税率などの各地域での政策変化、各地域消費者の嗜好の変化などが挙げられる。

3.4.5 まとめ

温暖化の影響を受けた場合の農業生産性の变化を外生的変数として与え、現在の貿易条件を仮定した場合の影響を見た。温暖化の影響と同様な気候変化があり、人口は現状といった仮定で計算しているが、貿易を通じて穀物価格が変化することにより、各国への経済的に影響が異なることが示されている。表 3-5 は外生的に与えた生産性の变化(%) と経済的影響について6カ国/地域についてまとめたものである。インドで生産性が悪化すると農産物価格が高騰し、社会的な厚生(この場合は消費者余剰ではかっている)が5%程減少することが示されている。人口の急増による食糧需要の増大と、温暖化など環境変化による生産性減少による供給量の減少から生じる需給のアンバランスは、国際的な貿易を通じても解消しない可能性が高く、農産物価格の高騰は人々の食糧確保を困難にする可能性が高い。穀物需給を国際的な市場メカニズムに任せるだけでは食糧安全保障を保つことは困難であり、余剰食糧の融通などの機構を考慮する必要がある。

食糧需給については、中国とともに、インドが問題であること、食糧生産は、人間活動の活発化によって圧力を受けつつあるが、さらに温暖化は、地域的な食糧生産に影響を与える。経済モデルによる試算からは、貿易によりこうした地域的な食糧生産の差異を相殺する方向に働くが、経済発展の差は輸出・入を考慮した食糧の確保面での格差をもたらすと考えられる。

引用文献

- Cure, J.D. and B. Acock (1986): Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey, *Agricultural and Forest Meteorology*, 38, pp.127-145.
- Darwin, R., M. Tsigas, J. Lewandowski and A. Raneses (1995): *World Agriculture and Climate Change*:

- Economic Adaptations, Agricultural Economic Report 703, USDA/ERS.
- Downing, T.E., 1992: Climate Change and Vulnerable Places: Global Food Security and Country Studies in Zimbabwe, Kenya, Senega and Chile. Environment Change Unit.
- Dupont, A, 1998: The Environment and Security in Pacific Asia, International Insitute for Strategic Studies, Adelphi Paper 319.
- FAO (1978-1981): Report on the Agro-Ecological Zones project, Vol.1-4, World Soil Resource Report 48, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Fischer, G., K. Frohberg, M.A. Keyzer and K.S. Parikh (1988): Linked National Models: A Tool for International Policy Analysis, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Fischer, G., K. Frohberg, M.L. Parry and C. Rosenzweig (1994): Climate change and world food supply, demand and trade, Global Environmental Change, Vol.4(1), pp.7-23.
- Hertel, T.W. (1997): Global Trade Analysis, Cambridge University Press, New York.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer Project (1989): Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 2.1, Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, H.I.
- IPCC (1996): Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kane, S., J. Reilly and J. Tobey (1992): Climate Change: Economic Implications for World Agriculture, Agricultural Economic Report 647, USDA/ERS.
- Lonergan, S., 1997: The Role of Environmental Degradation in Population Displacement. Global Environmental Change and Human Security Project, IHDP Research report 1. 84pp.
- 中川光弘・長沢淳・井上荘太郎、1997:世界米小麦需給モデルによる地球温暖化の影響予測、農総研季報、36、農業総合研究所.
- Sullivan, J., V. Roningen, S. Leetmaa and D. Gray (1992): A 1989 Global Database for the Static World Policy Simulation (SWOPSIM) Modeling Framework, Staff Report AGES9215, USDA/ERS.
- Takahashi, K., H. Harasawa and Y. Matsuoka (1997): Climate change impact on global crop production, J. of Global Environment Engineering, 3, pp.145-161.
- 高橋 潔・松岡 譲・原沢英夫 (1997): 二酸化炭素肥沃化効果を考慮した気候変動による穀物影響評価, 環境システム研究, 25, pp.121-131.
- UNEP, 1998: Global Environment Outlook. 264pp.

第4章 アジア地域の水需給モデルの開発と適用

4.1 本研究の背景と目的

4.1.1 背景

温暖化により影響を受ける可能性のある代表的な分野として、自然生態系、水資源、農業、林業、健康、社会システムなどがあげられ、それぞれの分野でさまざまな地域で研究が進められている。これらの分野の中でも、水資源への影響は他分野にも大きく影響し、人間社会にも重大な影響を及ぼす。「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)は、気候変動による水資源への影響については、「高緯度地域では降水量の増加により流出量が大きくなり、逆に低緯度地域では増加する蒸発散と減少する降水量のために流出量が小さくなる傾向がある。」(IPCC 第2作業部会, 1992)と報告している。すなわち、気候変動により水供給量にますます大きな格差が生じるというものである。

本研究では、気候変動下でのアジア全域・地球規模の水資源問題を需要と供給の両面から評価するために、図4-1のフレームに基づいて河川流量推計モデル、水需要推計モデルを開発し、それらを用いた推計を行った。

さて、地球規模で各種影響評価を行う場合、全球についての事前情報が得られるのはごくまれである。特に河川流量への影響を考える場合、洪水または渇水の可能性を予測するものであり、大きなタイムスパンでの平均的な結果が得られればよいというものではなく、最大流量及び最小流量の予測が重要である。詳細に河川流量を予測するためには降雨-流出量の応答関数を場所的に定めておく必要があり、事前に詳細な情報を必要とする。そこで、本研究では事前情報の入手が困難な地域での解析を可能にするために、容易に入手できる情報のみで日毎に流出解析を行う手法を開発した(図4-1の河川流量モデル)。

水需要は人口や経済状態、ライフスタイルなど気候以外の決定因子に強く依存するため、気候のみの関数として推計を行うことは出来ないが、本研究ではいくつかのその他因子を将来にわたって一定と仮定しモデル化を行った(図4-1の水需要推計モデル)。将来気候下での水需要の変化を調べるために、過去の水使用量についての指標と主気候因子との間の関係を、農業部門と家庭部門についてそれぞれ統計データに基づいて分析した。その関係を用いて、2100年における農業水需要と家庭部門水需要を推計した。

中国をはじめとする東アジア地域は世界人口の約20%をしめ、今後20年の間に更に1.5倍になると予想されている。中国は世界最大の穀物生産国であり、中国における水資源の変化が世界の穀物市場にも大きく影響を及ぼす可能性がある。本研究では、開発した手法を用いて、中国を初めとする東アジア地域で気候変動が水資源に与える影響を評価することを目的とする。

4.1.2 本報告書の構成

本報告書は、水の供給量を評価するための河川流量モデルの説明とその適用、水需給モデルの説明と適用について報告する。現段階では流量推計が先行し、需給推計モデルについては予備的な研究結果の報告となっている。まず4.2では、気候変動が河川流量などの水資源へ与える影響などについて過去に行われた研究について述べ、その中での本研究の位置づけ、特徴を述べる。

4.3 では、本研究で流量モデルとして開発した4つのサブモデルの詳細とそれぞれのサブモデルのつながりについて述べる。4.4 では、開発したモデルを日本で適用した際のモデルの検証について述べる。4.5 では現状のデータを用いて、アジア地域全体を対象として流量推計を行い、観測データとの比較する。4.6 では、将来気候データを用いて、気候変動後の流出量と河川流量を算定し、気候変動が水資源に与える影響について述べる。4.7 では、水需要推計モデルの説明と適用を紹介する。

最後に 4.8 で結論として研究全体をまとめ、今後の取り組みを議論する。

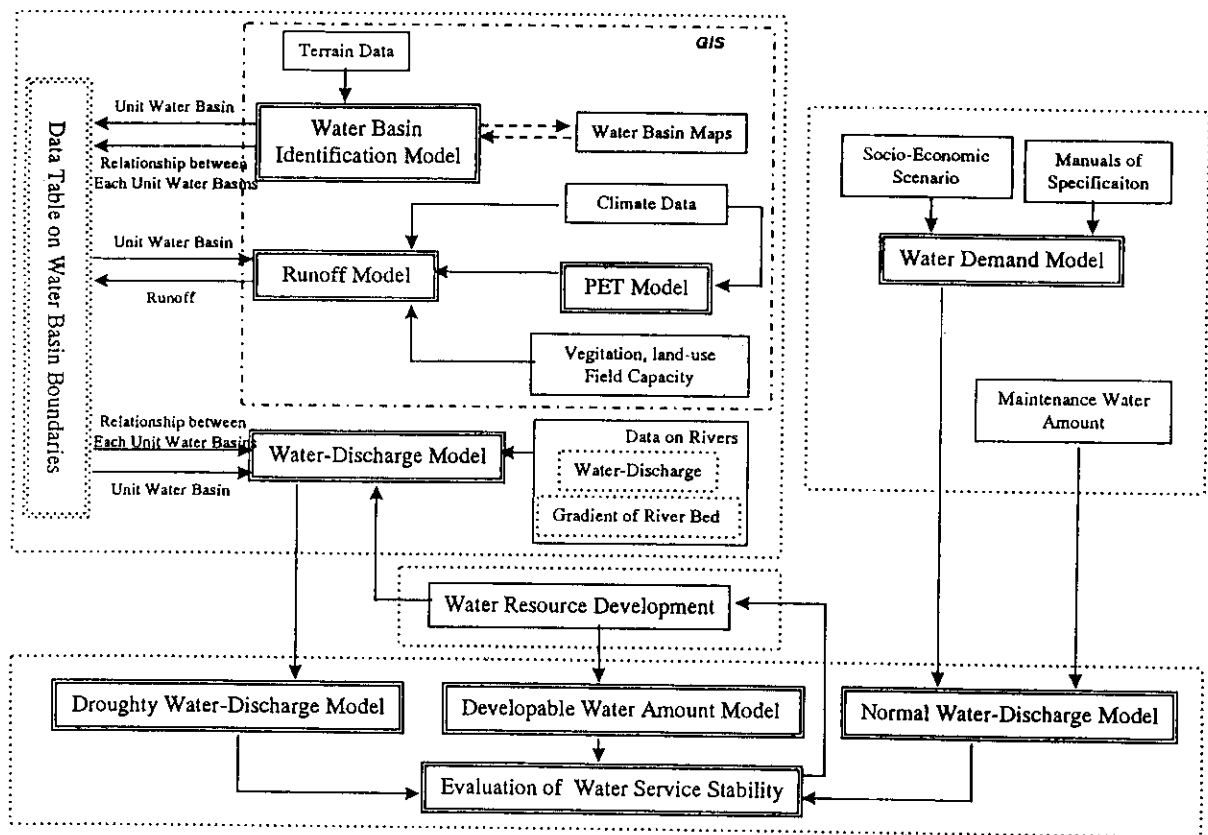


図4-1 気候変動の水資源影響評価フロー

4.2 既存の流量推計モデル研究と本研究の特徴

4.2.1 既存の研究

気候変動が水資源に与える影響についての研究は、IPCC「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の第2作業部会(WG2)にて多数報告されている(IPCC 第2作業部会, 1992)。これらの報告によると、これまで行われてきた研究は大きく3つに分けられる。それらは、①流出と気候因子の過去の長期変動の成分に関する解析、②大気中の微量ガス濃度を増加させ(例えば二酸化炭素濃度を2倍とする)、GCMを用いて地域気候と水文特性の変化を直接見積もる方法であり、③は降水量・流出の応答関数にGCM出力を含む気候データを入力として与え、流域の水文状態の変化を決定する方法である。多くの研究者が③の方法を用いて報告を行っている。例えば、カリフォルニアのサクラメント川で Gleick (1986, 1987)が行った研究では、二酸化炭素濃度2倍時のGCM出力を用いてシミュレーションした結果、冬の流量は16~81%増加し、夏は30~68%減少していると報告している。GCM出力を用いた研究では使用したGCM出力により異なった結果が得られるが、アメリカで行われたGCMを用いた研究結果を解析してみると、「地球温暖化により北緯55度以南で流出量は減少、北米北部で流出量は増加する」との結果を得ている。

また、最近では世界規模で水資源に与える影響を評価するモデルも開発されている。ドイツ Kassel 大学の CESR(Center for Environmental System Research)は、WaterGAP (Joseph Alcamo *et al.*, 1997)というモデルを開発した。WaterGAPは流出のみではなく、水需要量も考え将来の水の安定供給性を評価しているが、ここでは流出過程の部分のみ述べることにする。WaterGAPでは経度×緯度=0.5°×0.5°のメッシュ毎に流出量を算定し、Klepperによる全世界の1162流域区分について、流量を算定している。算定年度は1995年、2025年及び2075年である。2025年と2075年については、MPI(Max-Planck-Institut)モデルとGFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)モデルの2つのGCM出力より気温と降水量のデータを作成し、流出モデルに入力することで算定している。WaterGAPでの流出モデルでは、まず土壌水分量を考え土壌水分の変化量は降水と融雪の合計から蒸発散量と流出量を差し引いたものとする。ここで、融雪は0℃以上で起こるとし、森林では気温が0℃から1℃上昇する毎に1日あたり2mm、その他では0℃から1℃上昇する毎に1日あたり4mm融雪すると仮定している。また、蒸発散量はPenman-Monteith式により求めている。流出量については有効降水量(降雨量と融雪量の合計)と土壌水分量から求め、帯水層への流入割合を考え、地表面流出量と基底流量に別けて求めている。帯水層への流入割合は土壌成分、勾配および帯水層の種類により求めている。WaterGAPを用いたシミュレーションの結果、まず1995年に比べて2025年では、世界の大部分の地域で流出量に大きな変化は見られないが、中国華中及び華南地区では流出量が20~50(mm/year)増加し、ガンジス・ブラマプトラ川下流付近では150(mm/year)以上の流出量増加、アマゾン川下流では150(mm/year)以上流出量が減少すると報告している。また、2075年は、中緯度地域では流出量に大きな変化は見られないが、華中・華南では50~150(mm/year)流出量が増加し、ガンジス川流域では150~500(mm/year)流出量増加、アマゾン川下流では同様に150(mm/year)以上の流出量があると報告している。

日本でも気候変動による水資源への影響が多数研究されている。これまでに行われてきた研究は、そのほとんどが想定する時点(例えば二酸化炭素濃度 2 倍時)における気温変化量と降水量変化率を仮定し、降水流出解析を行い流量の変化を調べるものである(西岡ら, 1997)。温度変化が蒸発散及び降雪・融雪に影響を与え、それに加え降水量が変化することによって流出量が変わるという筋道で計算を行っている。

日本でこれまで行われてきた研究は、大きく 2 つに別けることができる。1 つは気温変化量と降水量変化率を一定として長期流出の数値実験を行う「平衡実験」で、もう 1 つは目標時点まで気温変化量と降水量変化率を時間的に徐々に変化させる「漸増実験」である。

安藤 (1994) は比較的単純な平衡実験を行った。これは、既往の日単位降水量系列を降水量変化率分だけ増減させ、気温変化量については降雪・融雪および蒸発散に影響を及ぼすとする集中型長期流出モデルによる平衡実験であり、過去 21 年分の日単位の降水流出資料から流出モデルの再現性のよい 11 年を選び出し、各年について 1 年間の日単位の流出計算を行っている。それにより各月流量および年流量を求め、実績流量と比較している。その結果、温暖化により 1,2 月の流量が増加し、気温変化量が $+3^{\circ}\text{C}$ あっても降水量変化率が $+10\%$ あるなら蒸発散量と流出量増加が打ち消すと報告している。

田中丸・角屋 (1991, 1992) は輪島柳田流域と永源寺ダムの 2 つの流域で「年間一様シナリオ」に基づく平衡実験を行い、水深換算積雪量や月流量・月蒸発量・年間水収支・必要貯水容量を求めた。また、流域近辺の気象観測点(金沢・伏木・彦根・京都)の長期気象データから、温暖期および寒冷期の季節変動シナリオを設定して積雪量・月流量・年間水収支を、それぞれ温暖期および寒冷期について比較検討した。その結果、気温上昇に伴い蒸発散量は 5~12%増加し、降水量が 10%増加するならば流量は 10%増加し、10%減少するならば流量は 14~18%減少し、気温が 4°C 上昇するときには積雪がなくなると報告している。

宇治橋 (1994) は、「年間一様シナリオ」と後述する宝らの「GCM 季節変化シナリオ」を部分的に採用し、分布型流出モデルを用いて豪雪地帯の積雪深の空間分布を調べた。その結果、気温が 3°C 上昇すると融雪期が 1 ヶ月早まり、降水量が 10%減少すると低水時で流量が 30%増加し、高水時では流量が 10%減少するとの結果を得た。また、降水量が 10%増加しても低水時で流量が 10%増加するものの高水時では流量が 30%減少すると報告している。

小尻 (小尻, 1992 ; 堤ら, 1993) は日降水量系列の発生に工夫を行った。すなわち、パターン分類手法を用いて、過去何十年かの実績月単位降水量の年パターンを分類し、各パターンの発生確率、パターン内の月降水量の推移確率を求めておき、パターン毎の日降水量系列を乱数発生手法により十数年から 100 年分与える。流出に関しては、分布型の多層メッシュ型流出モデルを用い流域末端の流量について整理し、月別平均流量、流況曲線、渇水の生起頻度・規模の定量的評価指標などを対象に、発生した時系列の平均値について検討している。

建設省土木研究所では、益倉・吉谷 (1992) が「年間一様シナリオ」、「気象庁 GCM に基づく季節変化シナリオ」、「降水強度ごとに降水増加率が異なるシナリオ」、「温暖期および寒冷期の降水量特性に基づく季節変化シナリオ」など 16 のシナリオの下で、1km メッシュをベースとした分布型流出モデルによって、利根川八斗島地点の 5 年の実績流況と比較した。その結果、融雪時期が早くなるため、2,3 月に流量が増加するものの、5,6 月は減少し、さらに、 3.5°C の気温上昇よりも 10%の降水量変化の方が影響が大きいと報告している。北海道開発局 (中津川・西村, 1992)

では、石狩川水系豊平川支流の定山溪ダム流域における融雪予測モデルに、GCM 出力に基づく温暖化シナリオ(気温上昇は 3~4℃)を設定して、融雪流出が 15 日程度早まりピークが 4 月上旬になると報告している。

また、宝ら (Takara *et al.*, 1991 ; 宝・小尻, 1993) は漸増実験を行った。これは二酸化炭素濃度 2 倍時まで気温および降水量が線形的に変化するというものである。気温変化量と降水量変化率が年間を通じて一様な「年間一様シナリオ」と、二酸化炭素 2 倍時のいくつかの GCM 出力から日本付近に着目して気温変化量と降水量変化率を読み取り、それを用いた「GCM 季節変化シナリオ」を使用している。この研究では、過去の実績日単位降水量時系列から、モンテカルロ法により将来 40 年分の降水量時系列を繰り返しを許して取り出し、降水量変化率に応じて変化させる。こうして得た 40 年分の時系列を 1000 系列発生して、二酸化炭素濃度が 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 倍時での日単位流況を 6 個並列した 4 段直列タンクモデルにより 1000 系列求める。この 1000 系列のデータから、日単位流況の基本統計量、極値流量の分布、確率流量、渇水の生起頻度・規模の定量的評価及び月流量などを求め、温暖化がない時のシナリオの流況と比較している。ただし、降雪・融雪は考慮していない。その結果、気温が 3℃ 上昇し降水量が 10% 減少したとすれば、流量が 40% 減少すると報告している。

4.2.2 本研究の特徴

これまで行われてきた研究は、以下に示す 2 つのいずれかの観点から気候変動による影響評価を行っていた。

- ①地球規模の評価であれば、地表面上を緯度・経度で区切ったメッシュ毎に流出量を算定するだけか、または大流域区分（例えば、長江のような大河川も 1 流域単位とみなす）毎に、月単位または年単位で流出量を算定する。
- ②地域的にある特定の流域をとりあげて河川流量を算定する。

しかし、本研究は東アジア地域全域を対象とし、広範囲の地域について、微細な流域区分を行い、流域毎に応答関数を与え、毎日流量を算定することを特徴としている。

このように、本研究は対象を広大な地域としつつ、局地的な特徴を保つことによって、水資源影響の局所性を再現し、温暖化影響を適切に評価しようとすることを目的としている。

4.3 本研究で開発した流量推計モデルについて

4.3.1 概要

気候変動による水資源への影響評価を行うためには、降水から流出にいたる水循環の過程を簡潔かつ正確に表現するだけでなく、洪水や渇水などの河川流量や地下水の量を算定・予測し、洪水制御や河川水、地下水の利用など河川や地下水などの水資源開発・管理保全に必要な情報を提供することが重要である。

そこで、標高データと各種気象データを入力として、東アジア全域での地表面流出量と全主要河川での流量を1日毎に算定するモデルを開発した。図4-2にその概要を示す。このモデルは大きく4つのサブモデルに分けられる。第一は、流出量を算定する上で必要となる蒸発散量を推定するために、気温・風速などの各種気象データを入力として可能蒸発散量を求める可能蒸発散量算定モデルである。第二は、可能蒸発散量・降水量・気温を入力として、地表面付近での水収支を取り扱い地表面流出量を算定する水収支モデル、第三は、河道位置及び流域情報を得るために、標高データを入力として河道位置を決定し流域を扱いやすい大きさに分割する流域分割モデルである。第四は水収支モデルで算定された地表面流出量を入力として、流域分割モデルで得られた流域図をもとに河川流量を算定する河川流量算定モデルである。4.3.2 節以降で各モデルについて詳しく述べることにする。

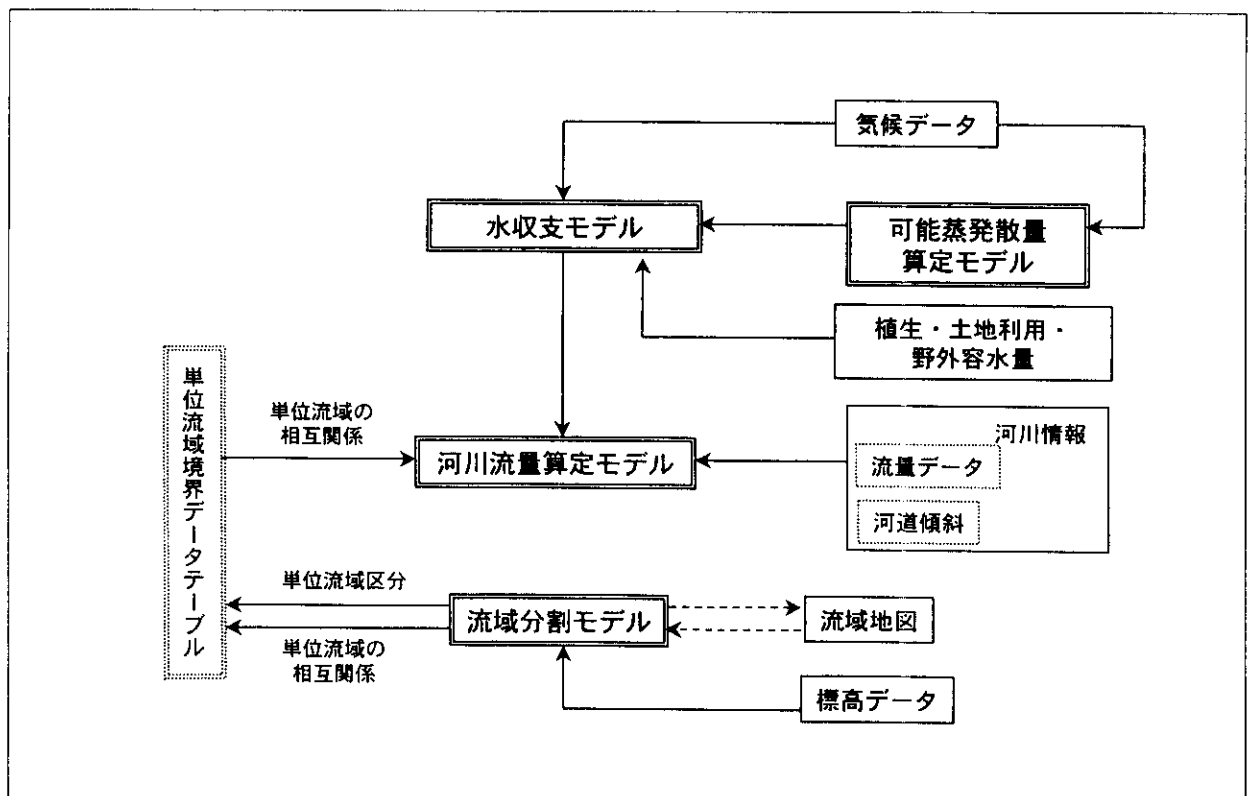


図4-2 本研究で開発したモデルのフローチャート

4.3.2 可能蒸発散量算定モデルについて

河川流域の降水量から蒸発散や土壌浸透などの損失量を差し引いたものが河川への流出量となる。従って、流出量を求めるには蒸発散量が必要となるが、これは風、気温、湿度などの気象条件、裸地、草地、林地などの地表条件、植物の種類、密生度、生育状態などの植生、土壌の種類、土壌水分、土壌の熱的性質などの多くの要因が関係する。また、蒸発散量を実測することも難しい。そこで蒸発散量を算定する際の指標として、地表面を密に覆った緑草地に十分な水を供給した場合に失われる蒸発散量を可能蒸発散量と定義し、これを蒸発散量算定のベースとする。可能蒸発散量の推定方法は、Thorntwaite, Budyko, Penman などによって提案されているが、本研究では Penman/FAO24 式 (Burman *et al.*, 1994・Doorenbos *et al.*, 1992) による可能蒸発散量推定モデルを作成した。

4.3.3 水収支モデルについて

広い面積をもった流域の流出解析を行う場合、蒸発散量及び土壌水分量の変化を無視することはできない。本研究では、河川の流出の前段階として地表面付近での水収支を考え、河川に流れ込む水量である地表面流出量を算定することにした。本節では土壌水分量・蒸発散量・流出量の算定方法及び算定条件について述べる (Vorosmarty *et al.*, 1989・平岡ら, 1994)。

- (1) 土壌水分量については、降水量が可能蒸発散量を上回る時期、すなわち湿潤な時期にはについては野外容水量まで増加することができ、可能蒸発散量を下回る乾燥した時期には水分欠損量の関数になると考える。

$$\frac{dSM}{dt} = (P_r + R_s - PET) \quad \text{if } P_r + R_s \geq PET, SM < FC \quad (4.1a)$$

$$\frac{dSM}{dt} = 0 \quad \text{if } P_r + R_s \geq PET, SM = FC \quad (4.1b)$$

$$\frac{dSM}{dt} = -a \cdot SM (PET - P_r + R_s) \quad \text{if } P_r + R_s < PET \quad (4.1c)$$

ここに、

SM : 土壌水分(mm)

P_r : 降雨量(mm/day)

R_s : 融雪による補充水分量(mm/day)

FC : 野外容水量(mm)

PET : 可能蒸発散量(mm/day)

a は FC に依存する水分継続関数の傾きであり、次式で求める。

$$a = \frac{\ln(FC)}{(1.1282FC)^{1.2756}} \quad (4.2)$$

- (2) 湿潤な時期には可能蒸発散量と同等の蒸発散が発生するとし、乾燥した時期には降水量が

ら土壤水分の変化量を差し引いた値とする。

$$ET = PET \quad \text{if } P_r + R_s < PET \quad (4.3a)$$

$$ET = P_r + R_s - \frac{dSM}{dt} \quad \text{if } P_r + R_s < PET \quad (4.3b)$$

ここに、

ET : 蒸発散量(mm/day)

- (3) 湿潤な時期にて土壤中の水分量が野外容水量を超える時期には、土壤から河川への流出がある。土壤水分量が野外容水量に達しない時期には河川への流出はなく、補充される水分は全て土壤に貯留される。

$$RO = 0 \quad \text{if } P_r + R_s < PET \quad (4.4a)$$

$$RO = 0 \quad \text{if } P_r + R_s \geq PET, SM < FC \quad (4.4b)$$

$$RO = \max\{SM + P_r + R_s - PET - FC, 0\} \quad \text{if } P_r + R_s \geq PET, SM \geq FC \quad (4.4c)$$

ここに、

RO : 単位時間あたりの有効流出高(mm/day)

である。

- (4) 融雪による水分補充量(P_s)と積雪量(SP)については、気温が基準温度 T_0 を下回った場合には降水が全て降雪になるとし、融雪は気温が T_0 以上のときに起こるものとする。

$$\begin{cases} P_r = 0, P_s = PPT \\ \frac{dSP}{dt} = P_s \\ R_s = 0 \end{cases} \quad \text{if } T \leq T_0 \quad (4.5a)$$

$$\begin{cases} P_r = PPT, P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} = -K(T - T_0) \\ R_s = -\frac{dSP}{dt} = K(T - T_0) \end{cases} \quad \text{if } T > T_0, SP > 0 \quad (4.5b)$$

$$\begin{cases} P_r = PPT, P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} = 0 \\ R_s = -\frac{dSP}{dt} \end{cases} \quad \text{if } T > T_0, SP = 0 \quad (4.5c)$$

ここに、

PPT : 単位時間当たりの降水量(mm/day)

SP : 積雪量(mm H₂O)

K : 融雪に関する係数(mm/day/°C)

T_0 : 基準温度(°C)

T_0 は融雪し始める温度、 K は気温 1°C 当りに融雪する割合を示し、風速や照射などの融雪に影響を及ぼす気候要因により決定される。Vorosmarty ら (1989) は、 T_0 について $-3 \leq T_0 \leq 0$ (°C)、 K について $2 \leq K \leq 7$ (mm/day/°C)と報告している。本研究では、これらを参考にして、 $T_0 = -1$ (°C)、 $K = 4.5$ (mm/day/°C)とした。

上記の水収支モデルにおいて、野外容水量が重要なパラメーターとなる。野外容水量とは、土壌が水分で飽和状態となった状態から重力による損失分を差し引いた水分量であるが、これは、土壌の質、土壌を覆っている植生等により影響を受ける。本研究では Webb (1991) が行った方法を採用して算定を行った。これは、Zobler (1986) が作成した土壌深さ及び土壌の種類の地図を用い算定したもので、野外容水量を、土壌の組成・土壌のプロフィール・土壌に植生している植生の根入れ深さのうち最小値を用いて表したものである。

4.3.4 流域分割モデルについて

流域界、河道位置の情報が十分に得られない地域で流出解析を行うには、まず流域区界の同定が重要となる。そのために本研究では、標高データを用いて流域を分割するプログラムを開発した。これにより、流域の大きさ、形状、河道位置などをあらかじめ特定しておく。黄河、長江などの大流域を単一の流域区分で流出解析を行うことは種々の不都合があり、それらの流域に関しては、解析を行う上で取り扱いやすい大きさの流域(以後単位流域と呼ぶことにする)に分割しながら、流域界及び河道位置を決定する。

本プログラムでは標高メッシュデータ (Digital Elevation Model : DEM) を入力とし、単位流域及び河道位置を出力する。これは「水は高い所から低い所に向かって流れる」という簡単な原理に基づき、流域区分を行うものである。本プログラムの計算手順を以下に示す。

- (1) 最初に、周りがすべて大きい標高で囲まれた、“窪地”の処理を行う。窪地は流下方向の決定の妨げとなるためこれを埋める。すなわち、窪地があった場合、周囲 8 メッシュのうちで

最も標高が小さいメッシュと同標高とする。

- (2) 次に、各メッシュ毎に流下方向を決定する。本プログラムでは、周囲 8 メッシュのうちで最も小さいメッシュに流下するものとする。ただし、最小の標高が同一のメッシュが 2 つ以上ある場合には、それらに隣接するメッシュのうち標高が最小のメッシュに流下するものとする。
- (3) 標高の小さい場所から流れを逆にたどり河道位置を決定する。
- (4) 最後に流域の区分を行う。まず、河道が合流したら合流点より上流を一つの単位流域とする。さらに、流域内のメッシュの数がある一定の数を超える場合、その流域を一つの単位流域とする。本研究では、500 メッシュを超えた場合に流域を区分するよう設定した。

4.3.5 河川流量算定モデルについて

河川流量算定モデルでは 4.3.3 節で算定した単位流域内の流出量（有効流出量）を入力として、河道へ流入する量 $\tilde{Q}$ と河道から下流の単位流域へ流下する量 Q を求める。流出解析手法には合理式、単位図法、流出関数法、タンクモデル法、キネマティックウェーブ法など種々の方法が提案されている。これらの解析法のほとんどが観測流量データから多数のモデルパラメータを推定する必要がある。これに対して、貯留関数法は 2 つのパラメーターで有効流出量のみを入力として、算定可能であり、適用例も豊富にあるためパラメーターの設定が容易である。従って、貯留関数法を用いれば、流域情報がほとんど得られない地域でも概算的な流出解析が可能である。本研究では貯留関数法を流出解析手法として採用し、河川流量の算定を行うことにした。本節では貯留関数法を用いた河川流量算定モデルを説明する（木村，1962・建設省河川局，1977）。

- (1) 単位流域から河道への流入量を算定するにあたり、有効流出量が流域内に貯留され、その貯留高に応じた流量が河道に流入すると考えると、水量保存則から次式が得られる。

$$\frac{dS_i}{dt} = RO_i - \tilde{Q}_i \quad (4.6)$$

ここに、

S_i : 第 i 単位流域内の貯留量(m^3/day)

t : 時間(day)

RO_i : 有効流出量(m^3/day)

$\tilde{Q}_i$: 第 i 単位流域から河道への流入量(m^3/day)

ただし、 RO_i は式(4.4)で算定した RO を単位流域ごとに合計し、第 i 単位流域の面積を乗じることにより、単位を m^3/day に換算したものである。

S_i と $\tilde{Q}_i$ の関係について次式を仮定する。

$$S_i = K\tilde{Q}_i^p \quad (4.7)$$

ここに、

K , p : 単位流域ごとに与えられる定数

である。

K と p は本来観測流量より決定されるものであるが、本研究では観測流量データが十分に得られない地域で解析を行うことを目的としており、木村 (1978) によって提案された次式を用いることにする。

$$K = 43.4 \cdot C \cdot I^{-1/3} \cdot L^{1/3} \quad (4.8)$$

ここに、

C : Izzad 定数 (自然流出については $C = 0.12$)

I : 流域平均勾配

L : 流域延長 (km)

また、 p について木村 (1978) は $1/3$ を提案しているが、本研究で扱う流域は大きなものであるため、河道区間について提案している $p = 0.6$ を採用することにした。また、 L は各流域の最上流端と最下流端の間の直線距離と定義する。

RO_i が与えられると、式(4.6)を数値積分することにより S_i を求めることができる。本モデルでは計算間隔を Δt として式(4.6)を次式のように差分形式にした。

$$\frac{S_i(t + \Delta t) - S_i(t)}{\Delta t} = (RO_i(t) - \tilde{Q}_i(t)) \quad (4.9)$$

式(4.9)で求めた S_i を式(4.7)に代入することにより、 $\tilde{Q}_i$ を求める。また、有効流出量が急激に変化し、貯留量が負となる場合には、計算時間間隔を適宜短くしている。

(2)河道区間についても同様に取り扱うことができる。上流流域からの流入分を考慮した対象流域を通過する河川での連続式は次式で表される。

$$\frac{dS_i}{dt} = \sum_{j=1}^{\text{上流単位流域}} Q_j + \tilde{Q}_i - Q_i \quad (4.10)$$

ここに、

S_i : 第 i 単位流域中の河道貯留量(m^3)

Q_i : 第 i 単位流域から下流単位流域への流下量(m^3/day)

j : 第 i 単位流域の上流単位流域

である。

S_i と Q_i の関係について次式を仮定する。

$$S_i = K \cdot Q_i^p \quad (4.11)$$

ここに、

K ， p ：単位流域ごとに与えられる定数
とする。 K と p は流域毎の流出量の算定と同様に木村（1978）によって提案された次式を用いるとする。

$$\begin{aligned} K &= 0.116 \cdot L \cdot I^{-0.5} \\ p &= 0.6 \end{aligned} \quad (4.12)$$

ここに、

I ：流域平均勾配

L ：河道区間長 (km)

である。

4.4 日本におけるモデルの検証

4.4.1 日本における流域分割モデルの検証

4.4.1.1 日本での流域分割作業

前章で述べた流域分割手法の妥当性を検討するために、河道位置、流域区分情報ともに詳細に得られる日本で流域分割作業を行い、プログラムの検証を行う。日本での流域分割には国土地理院・数値地図情報の 250m 標高データを使用した。この標高データでは湖やダム湖、河口付近の広幅河川などの陸水や埋立地に相当する地域を標高値でなく別のインデックスで処理している。この部分については一律 0.1m の標高を与えた。また埋立地についても標高 0.1m とした。次に海岸付近の分割をスムーズに行うために、海域の標高値 5 分メッシュ(約 10km メッシュ)データ (Edwards, 1989) から抜き出し、これと 250mDEM を貼り合わせたものを流域分割に用いる拡張 DEM とした。流域分割作業の空間解像度は南北 7.5 秒、東西 11.25 秒である。

4.4.1.2 流域分割モデルの妥当性の検討

本節では、流域分割モデルにより算出した河道位置と流域分割図が、実際のデータと比較してどの程度の精度であるのか検討している。まず河道位置に関しては、流域分割プログラムで算出した河道ベクトルと実際の河道ベクトルとを GIS 上で重ね合わせて比較した。実際の河川データは、国土地理院・数値地図情報に含まれているものを使用した。流域分割については、ある河道上の点を指定し、その点から両者の上流の単位流域を探して上流流域を求め、二つの上流流域が一致している部分の面積に対する実際のデータによる上流流域の面積の割合を調べた。この割合を一致率と呼ぶ。この一致率は、流量年表 (建設省河川局, 1993) の流量観測点を基準にして、観測点より上流流域について調べた。ただし実際のデータから作成した単位流域ラスタは 1km メッシュで作業している。

4.4.1.3 検討の結果

(1) 河道位置について

図 4-3 は愛知県とその周辺地域(35:45N-34:30N, 136:30E-138:15E)について流域分割プログラムで算出した河道ベクトルと、実際の河道ベクトルを重ね合わせた例である。太線は算出した河道、細線は実際の河道位置を示す。灰色の線は海岸線及び県境である。実データは上流側まで細かく描かれているものの、それらを除けば算出河道と実河道はほぼ一致していることが読みとれる。

計算による河道は、実データに比べると粗く感じられるが、これについては分割する単位流域の大きさを小さくするように設定すれば、細かい河道を算出することが可能となる。ただし平野部では、土地の高低差が少ないため実際と異なる河道を示しているところがある。この原因に 250mDEM では表現できない微小な標高差による分割の誤りなどが考えられる。また、治水工事などによる河道の移動に起因する場合もある。例えば木曽川水系は江戸時代前期から何度も河道を付け替えを行っている (木曽三川～その流域と河川技術編集委員会, 1988)。同様の方法で、関東・中部・近畿・中国・四国・九州地方で河道位置の比較を行った結果を以下に示す。

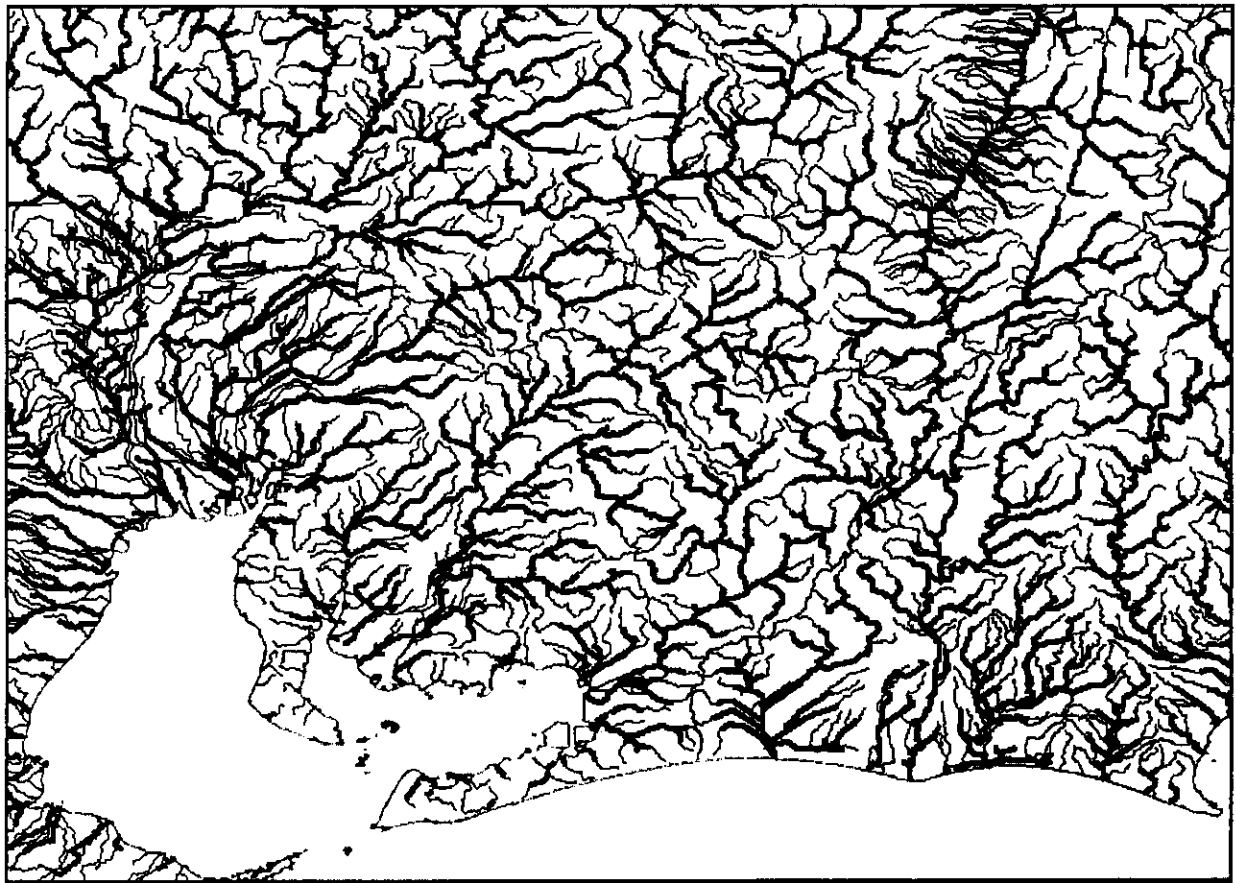


図4-3 作成した河道ベクトルの適合例

1) 関東地方

関東地方で河道位置を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・ 利根川は、銚子港で太平洋に流下するが、計算では江戸川放水路に合流し東京湾に流出している。
- ・ 計算によれば、江戸川下流と荒川下流が合流し、実際の両河川の河道位置の中間位置を通じて東京湾へ流出する。
- ・ 山間部においては、河道位置に大きな違いは見られなかった。

2) 中部地方

中部地方にて、河道位置を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・ 庄内川は名古屋市西部で伊勢湾に流下しているが、計算では木曽川に合流し愛知県と三重県の県境で伊勢湾に流出する。
- ・ 根尾川は大垣市付近で掛斐川に合流しているが、計算では岐阜市付近で長良川に合流していた。
- ・ 矢作川は愛知県碧南市付近で知多湾に流下しているが、計算では矢作古川を流れ渥美湾に流出していた。
- ・ 豊川は上流の鳳来湖付近で河道のずれが見られた。

- ・日本アルプスなどの山間部では河道のずれは見られなかった。

3) 近畿地方

近畿地方にて河道位置を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・大阪市、東大阪市付近にて河道のずれが目立った。
- ・大和川は大阪市南部で大阪湾に流出しているが、計算では大阪市北部で淀川に合流していた。
- ・桂川は京都市の西部を流れ淀川に流出しているが、計算では京都市のほぼ中央を流れていた。
- ・名張川は実際には三重県上野市を通過しないが、計算では上野市を通過していた。
- ・武庫川は兵庫県と京都府の県境の三国岳で源を発し、兵庫県三田市・宝塚市を通り尼崎市付近で大阪湾に流出しているが、計算では上流付近が加古川の支流である東條川に合流していた。
- ・紀の川の支流である貴志川は高野山に源を発し、和歌山県岩出町付近で紀ノ川に合流しているが、計算では紀ノ川には合流せず、海南市付近で紀伊水道に流出していた。
- ・紀伊半島では河道のずれは見られなかった。

4) 中国地方

中国地方にて河道位置を比較した結果以下のことが分かった。

- ・江の川の上流河川である可愛川は広島県と島根県の県境の阿佐山に源を発し、南東方向に流下し土師川ダムを越えた後、北東方向に流下し広島県三次市付近から江の川となるが、計算では三次市付近から南西の方向に流下し、太田川の支流の三條川に合流している。
- ・中国地方では平野部が少ないため、他の地方に比べると河道のずれは少なかった。

5) 四国地方

四国地方にて河道位置を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・計算では重信川の支流の石手川が重信川に合流せず、直接伊予灘に流出していた。
- ・計算にて四万十川の支流の中筋川に実際には存在しない河川が合流していた。
- ・那賀川の河口付近で河道のずれが見られた。
- ・中国地方と同様に他の地方と比べると河道のずれは少なかった。

6) 九州地方

九州地方にて河道位置を比較した結果、以下のことが分かった。

- ・筑紫平野では、筑後川などの河口付近に河道のずれが見られた。
- ・熊本平野では、緑川などの河川で河口付近に河道のずれが見られた。
- ・宮崎平野では、大淀川河口付近で河道のずれが見られた。
- ・嘉瀬川は筑紫山地西部の天山に源を発し佐賀市の西側を流れて有明海に流下する河川であるが、計算では佐賀市の中心部を流れて筑後川に合流していた。
- ・白川は阿蘇山周辺で源を発し熊本市の中心部を通過し島原湾に流下する河川であるが、計算では熊本市付近で南西方向に流下し緑川に合流していた。
- ・菊池川は熊本県北部の菊池市付近で源を発し玉名市付近で有明海に流下する河川であるが、

計算では菊池川の南を流れる唐人川に合流している。

(2) 流域分割について

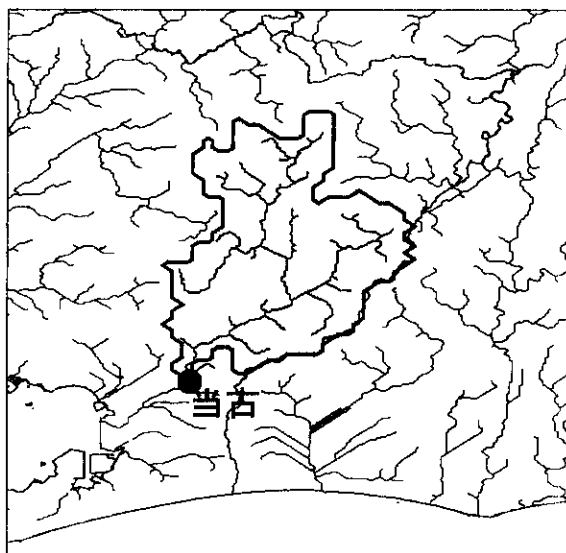


図4-4 当古観測所より上流域の比較

流域の比較については、例として豊川水系の当古観測所付近（34:48:20N, 137:25:00E 付近）から上流の流域面積と形状を比較した結果の例を図4-4に示す。図中の太枠は実際のデータから求めた流域、灰色の塗りつぶし部分は、本プログラムより算出した流域分割による流域、細線は計算河道である。位置・形状ともにほぼ一致している。実際データに基づく上流流域の面積は633.1km²であるのに対し、算出結果による上流流域の面積は668.2km²であった。実際の流域に対する算出結果による流域が一致する割合（一致率）は97.4%であった。また実際の流域に対して算出結果による流域が一致しない割合は8.2%、算出結果に対して実際の流域が一致しない割合は2.5%であった。算定結果による流域の方がやや大きくなっているが、両者の空間解像度の違いを考慮すれば実際の流域とほぼ一致したといつてよい。同様に、関東・中部・近畿・中国・四国・九州地方の全ての流量観測点より上流流域について一致率を調べた。

4.4.1.4 本モデルによる河道分割に関する考察

前節において各地方での河道比較を行ったが、以下、それらをまとめると下のようになる。

(1) 人工的な河川の流路変更に基づく誤り

元来日本では洪水・氾濫の絶ず、その被害を防止・軽減するために、河川の流路変更を行ってきた。利根川、矢作川、大和川、菊池川などがその例であり、これらの河川の適合率はいずれも低かった。

(2) 地盤沈下に基づく誤り

地盤沈下が著しく生じている地域では、これに起因する河道位置推定の誤りが数多く見られた。
・埼玉県北葛飾郡鷺宮町・栗橋町：渡良瀬川が埼玉・茨城・千葉県との3つの県境で利根川

に合流しているが、計算では北葛飾郡で合流していた。

- ・神奈川県川崎市川崎区：鶴見川は鶴見区を通過しているが、算定では川崎区を通過していた。
- ・兵庫県尼崎市：武庫川は尼崎市と西宮市の中間を流下しているが、算定では尼崎市の中心部を流下していた。
- ・佐賀県杵島郡白石町：実際に河川は存在しないが、計算では六角川の支流が存在していた。

(3) 標高データの精度

広大な地域にわたって、起伏が小さい場合は、標高データの精度が不足すること起因する誤りが生じる。例えば、筑後平野では平均傾斜が約 1/10000 程度であり、ここを流下する筑後川や嘉瀬川では河道のずれが見られた。

4.4.1.5 河道の修正について

前節でも述べたように、本プログラムの算定では河道位置上流流域などに誤りが生じる流域が存在した。算定流域の大きさ・形状の相違は、流域解析を行う上で、大きな問題となる。実際の流域に一致させるには流域分割プログラムで算出した単位流域とその上流・下流情報を修正する必要がでてくる。本節では、修正方法と修正結果について述べる。

まず修正方法について述べる。河道位置を比較し、別途入手した実際の河道情報と異なっている部分があればその付近の単位流域と流下方向を調べる。次に上流・下流情報において流下方向の間違ってしている単位流域に対しては、実際の河道に合わせるように下流の流域を変更する。実際の河道と計算した河道とが異なっている単位流域の下流となる単位流域を付け替えれば修正が可能である。

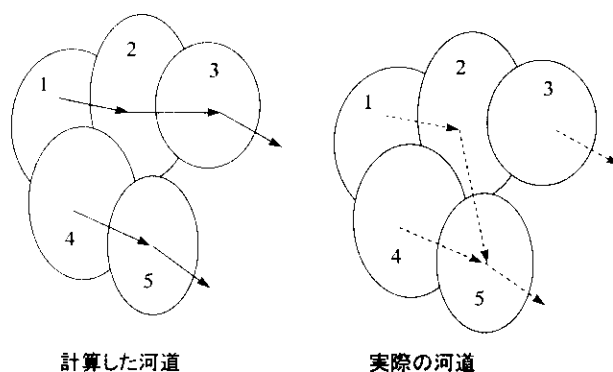


図4-5に河道位置修正の例を示す。この場合、算定により求めた2番の流域の下流流域を3番から5番へと付け替えれば修正ができる。

図4-5 河道位置修正の単純例

次に修正の実例について述べる。図4-6は矢作川岩津観測所の上流流域について、別途入手した流域情報に基づいて算出流域の修正を行ったものである。図4-6では左側が修正前を、右側が修正後を示す。左側の図において、修正前の岩津観測所より上流流域は、

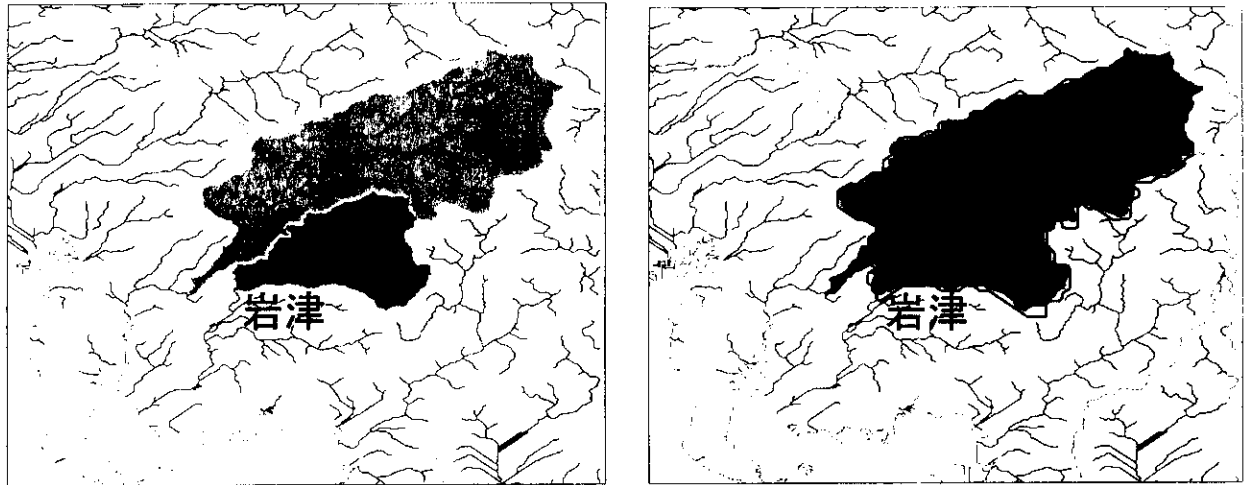


図4-6 流下方向補正による流域修正例（左：補正前、右：補正後）
矢作川岩津観測所上流流域

薄く塗りつぶされた流域のみであった。そこで、左側の図で濃く塗りつぶされた部分の下流流域を薄く塗りつぶされた流域に付け替えたところ、岩津観測所の上流流域は右側の図で塗りつぶされた部分となった。右側の図において太線で示されているのが実際の流域界であり、補正後の流域は実際の流域よりも若干大きくなっているが、補正前に比べ格段に実際の流域の大きさ・形状に近づいたといえる。また、岩津観測所の上流流域での一致率は、修正前が28.5%で、修正後は88.3%と飛躍的に向上した。

以上の検討から平野部で不適合が生じるときがあるものの、上・中流では実際流域、算定流域ともほぼ一致することがわかった。また不適合があったときは、補正することで比較的容易に流域修正を行うことができる。こうした作業は使用する標高データの空間解像度に依存するが、詳細な河川情報や流域情報がない国や地域でも十分使用できると考えられる。

4.4.2 日本における河川流量算定モデルの検証

4.4.2.1 日本での河川流量の算定

流域情報がほとんど得られない地域で河川流量の算定作業を行う場合の妥当性について、詳細な河川流量が得られる日本にて河川流量の算定を試み、妥当性の検討を行った。可能蒸発散量の推定には、Thorntwaite式を用いた (Mintz *et al.*, 1993)。

入力として1993年のアメダス観測データを使用した。地域気象観測システム、アメダス (AMeDAS, Automated Meteorological Data Acquisition System) では、降水量(mm)の観測を全国約1300地点で行っており、これは約17km四方に1地点の空間密度に相当する。また、このうちの約840地点では風向・風速(m/s)・気温(℃)・日照時間(h)の観測も行っている (朝倉ら, 1995)。観測データの時間間隔はどのデータも1時間である。

本検討では、地表面流出量の算定はメッシュ毎ではなく、単位流域毎に行う。アメダス観測は地点データごとであるため、Thiessen法によって流域ごとの平均値を算出することにした。欠測値については、次のような処理をした。降水量では、観測の空間間隔が約17kmであることから、欠測地点から半径25km ($\approx 17\text{km} \times 1.5$) 以内に入る観測地点の観測値の平均をとり、それを欠

測地点での降水量とした。降水量以外のデータは同様の方法で欠測地点から半径 40km ($\approx 17\text{km} \times 1300/840 \times 1.5$) 以内の観測地点の平均をとることで対応した。

本節の検討では、気温は Thornthwaite 式による可能蒸発散量推定に使用し、降水量は単位流域内の流出量の算定に使用した。計算間隔は可能蒸発散量については 1 日、地表面流出量の算定については 1 時間、河川流量の算定については 1 時間とした。算定においては次のような仮定を用いた。単位流域での地表面流出量の算定において、野外容水量は一律 100mm とした。ある単位流域から下流へ流下する流量について、単位流域内の河道を通過するのは一律 1 時間であると仮定した。また、流域分割モデルで算出した河道には、ダムや用水路などの水資源施設が存在しないものとし、流域に降った降水は算出河道を伝って流下するものとした。河川流量算定モデルで流域内での貯留関数(式 3.24)中の p の値について前章では 0.6 としているが、本章の検討では単位流域の大きさを考慮して木村 (1978)の提案している $p = 1/3$ を採用した。

4.4.2.2 検討結果

4.3 で述べたモデルを使用し、日本におけるいくつかの流域の流出量を求めた。本節ではこのモデルにより算定された流量と、流量年表による観測流量の比較検討した結果を報告する。ここでは算定結果の比較を行うために、例として東海地方の主な水系域に属する河川について、1993 年の流量年表の流量 (建設省河川局, 1993) と、同年のアメダス観測値から算出した年間流量 ($10^4\text{m}^3/\text{year}$) 及び年間流出高(mm/year)を比較したものを表 4-1 に示す。なお、流量年表の流域面積は流量年表の記載値である。

表 4-1 に示す項目のうち算定結果の流域面積は、流域分割プログラムで算出したものであり、表に示した観測地点から上流の流域面積である。また、山口、忠節、枇杷島の各観測所付近は、計算河道位置が実際河道位置から外れていたが、計算では観測所はその近辺にある計算河道上にあるものとして算定を行った。

表 4-1 流域流出量算定結果と流量年表の流量との比較

水系名	河川名	観測 地点名	算定結果			流量年表		
			流域面積 (km^2)	流出流量 ($10^4\text{m}^3/\text{年}$)	流出高 (mm/年)	流域面積 (km^2)	流出流量 ($10^4\text{m}^3/\text{年}$)	流出高 (mm/年)
木曽川	根尾川	山口	402.3	105,643	2,626.0	397.0	135,628	3,416.3
木曽川	長良川	忠節	1,701.3	351,128	2,063.9	1,606.8	417,456	2,598.1
木曽川	木曽川	犬山	4,801.3	949,179	1,976.9	4,683.8	1,076,975	2,299.4
庄内川	庄内川	枇杷島	648.9	68,830	1,060.6	705.0	92,672	1,314.5
豊川	豊川	当古	668.2	95,025	1,422.2	634.0	95,154	1,500.8
天竜川	天竜川	鹿島	5,020.1	820,665	1,634.8	4,880.0	887,357	1,818.4

表 4-1 に示した各観測地点における流出流量及び流出高は、流量年表から求めた流出量及び流出高に比べ小さい。流域面積の違いは、流出量及び流出高の相違に大きな影響を与えるほどのものではない。流出流量の差異を検討するために、地表面流出量関係の諸量を表 4-2 に掲載す

る。

表4-2 各観測地点より上流流域の水収支 (1993年算定値)

水系名	河川名	観測 地点名	流域面積 (km ²)	流出流量 (10 ⁴ m ³ /year)	降水量 (mm/year)	蒸発散量 (mm/year)	流出高 (mm/year)
木曽川	根尾川	山口	402.3	105,643	3,388.8	761.5	2,626.0
木曽川	長良川	忠節	1,701.3	351,128	2,833.2	764.7	2,063.9
木曽川	木曽川	犬山	4,801.3	949,179	2,689.4	706.0	1,976.9
庄内川	庄内川	枇杷島	648.9	68,830	1,863.5	800.3	1,060.6
豊川	豊川	当古	668.2	95,025	2,239.2	810.3	1,422.2
天竜川	天竜川	鹿島	5,020.1	820,665	2,279.3	639.2	1,634.8

まず年降水量に関し、表中に挙げた観測地点のうち比較的上流に位置する根尾川山口観測所の上流域では 3,388.8mm でもっとも大きな値をとった。上流域に高い山が存在しない庄内川流域は 1,863.5mm と少なく、1,500mm 以上の差があるが、その他は 2,200～2,800mm 程度であった。忠節、犬山観測所の上流域における 1956～1984 年までの 29 年間の年平均降水量はそれぞれ 2,743mm、2,307mm と報告 (木曽三川～その流域と河川技術編集委員会, 1988)されており、平年値より多かった 1993 年の降水量の算定値は妥当な範囲にあると考えてよい。

次に蒸発散量について検討する。表4-2に挙げた観測地点では年蒸発散量が 640～810mm の範囲にあり、降水量ほど地点間での顕著な差はない。蒸発散量は気温と緯度による日照時間から求められるため、飛騨山脈・木曽山脈を上流とする木曽川や、木曽山脈・赤石山脈を上流とする天竜川では少なく、これらの観測地点の中では南部に位置する庄内川や豊川は多くなる。わが国の年蒸発散量は 550～900mm 程度 (鮎川ら, 1992) といわれており、今回求めた蒸発散量は、その範囲に入っている。

一方、本モデルは日単位の流出流量を算定していることから、日流量についての比較も参考になる。図4-7は、豊川当古観測所における 1993 年のアメダス観測値を用いて算定した日流量と、同年の流量年表に記載された日流量を比較したものである。実測流量のグラフの中で突出している部分は、その日もしくは以前に流域内に降雨があったためである。それらの突出部に関しては、両者は一致する。しかし、降水がないときの流量変化は実測とかなり異なっている。これは本モデルでの低水時の貯留状況や河道条件が実際とかなり異なっているためではないかと考えられる。これは流域ごとにパラメーターを推定して、それらを用いればより実際に近い量が算定されるであろう。本モデルでは簡単のため、どの流域もパラメーター値を統一してあるため、こうした差異ができたものと考えられる。なお、同様の実測値と推計値との比較を、本節で対象とした当古観測所以外に根尾川山口観測所、長良川忠節観測所、木曽川犬山観測所、庄内川枇杷島観測所、天竜川鹿島観測所についても行い、同傾向の結果を得た。

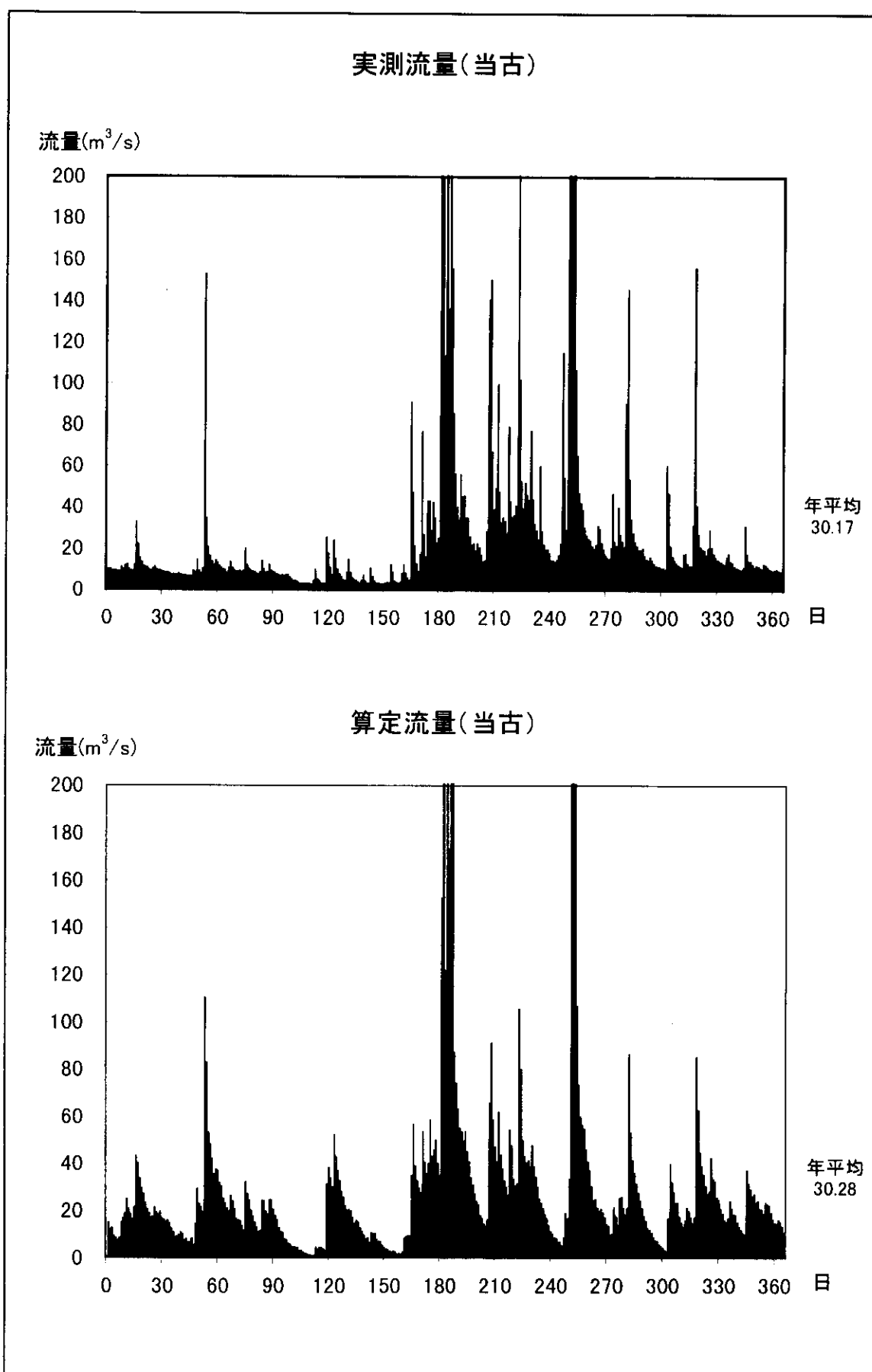


図4-7 当古観測所での日流量の比較

次に、表4-2のThiessen法で求めた降水量と表4.1の流量年表による実際の流量について検討してみる。降水量の値が実際に近いとすれば、庄内川・豊川を除く流域では流出割合は80%以上となり、従来の研究(土木学会, 1985)と比べかなり大きい値となる。また蒸発散量の推定が実際に近いとすれば、図4-6で比較的小さい年降水量値を取る庄内川流域でも降水量は2,100mmを越す。その他、流量年表の年間流量が、流域流出量算定モデルによる年間流量を上回る原因については以下のことが考えられる。

1. 水位-流量曲線から得られる流量の値は、特に流量が大きい場合に過大な値に見積もる傾向がある(木曾三川~その流域と河川技術編集委員会, 1988)。
2. 流域からの流出流量は、全て河道へ流入すると仮定しており、計算値には流量観測地点より上流部から隣接流域への導水や地下水流入分も加えられている。
3. アメダス観測値をThiessen法により空間的内挿しているが、この方法では観測地点から離れたところでの局地的な降水量増加を考慮できない。
4. 観測地点に欠測データがあったときの処理から誤差が生ずる可能性がある。
5. Thornthwaite式に基づく蒸発散量に誤差がある。

4.4.3 日本でのモデル適用性について

本章では、開発モデルをアジア地域で適用する前に、その適用の妥当性を検討するために、詳細なデータが揃っている日本に適用し、算定した河道位置や流域形状、流出流量を実際のデータと比較した。流域分割モデルと河川流量算定モデルによる算定値を実測値と比較し以下の結果を得た。

(1) 流域分割モデルによる河道及び流域位置について

- ・ 算出河道・流域とも上流及び中流では、実際の河道・流域とほぼ一致する。
- ・ 河道位置が何らかの理由でずれて算出される場合、その地点からの上流流域の面積、形状は大きく異なってしまう。
- ・ 河道整備がされていない時代の河道位置は計算位置と一致するケースが多く見られた。特に平野部にて、この現象が多く発生した。
- ・ 流域が実際と異なっても、単位流域間の連結関係に修正を行えば実際の流域とほぼ一致させることができた。

(2) 河川流量モデルによる年間流量及び日流量の算定について

- ・ 本モデルで算定した流量は実測流量より小さくなるケースが多かった。
- ・ 日流量の比較から、低水時では実測値と異なるときがあるが、大略の変動状況はほぼ一致した。
- ・ 観測値に近い流量を算定するには、流量算定地点付近の流域分割及び河道位置が正しく算出されている必要がある。

本章で行った検討の結果、標高差が大きい上流・中流流域については流域形状・河道位置共に

よい結果が得られ、年間流出流量の算定結果の適合性もかなり良好なものであった。しかし標高差の小さい平野部では、実際の河道とは外れた河道が算出される場合があった。このような流域では流域面積も正確に表現できない。しかし、これは現状の河道と比較したときに起こるのであって、過去の河道状況と比較するならば必ずしも外れておらず、算定結果と一致する場合が多かった。また河道位置が異なって算出されても、その付近の単位流域間の連結関係を補正することで、簡単に修正することができた。従って、平野部での河道位置について追加的な情報を利用することによって、算出河道位置が実際と異なっても修正が可能であり、本研究の手法によって流域分割を行うことが可能である。

河川流量の算定結果について、本研究で採用した、流出量を降水量と蒸発散量の差から求め、流出水は計算河道を伝って流れるという算定手法による結果は、観測値と大きく異なるものではなかった。

以上のことから、前章で提案したモデルは、平野部付近について河道位置の修正作業を行う必要があるものの、十分使用に耐えうるものと判断できる。従って、次章では、本モデルを詳細な流域区分及び観測流量の獲得が困難なアジア地域に適用し、気候変動が河川流量に与える影響評価に本モデルを用いることにする。

4.5 現状気候下におけるアジア東部への適用について

4.5.1 入力気候データ

現状に関する算定には、ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecast)が整理している気象データを用いた。これらのデータは実測値に基づき客観解析法によって補間したものである。本研究ではECMWF気候データのうち、可能蒸発散量の算定については、6時間毎の風速、気温、露点温度、雲量、アルベドを使用した。また、地表面流出量については、6時間毎の気温、降水量を使用した。これらの気象データの空間解像度は経度×緯度=1.125°×1.125°である。また、算定年は、日毎の観測河川流量データの入手状況にあわせて1983年とした。

4.5.2 現状時における地表面流出量の算定結果

前節で示した気候データを入力として、東経60度から160度、南緯15度から北緯60度の領域について、経度×緯度=0.5度×0.5度の各メッシュごとに、可能蒸発散量を算定し、つづいて地表面流出量を算定した。水収支モデルを用いて地表面流出量を算定するためには、初期土壌水分量及び初期積雪量の入力が必要となるが、初期値をそれぞれ0(mm)として、前年すなわち1982年について一年間計算し、1982年12月31日の土壌水分量と積雪量を初期値として1983年について算定した。多雨地帯であるインドのアッサム地方やバングラデシュ、ニューギニア島で高い流出高を示している。更に、中国のタクラマカン砂漠周辺では、年間流出高がほぼゼロとなる。

4.5.3 東アジア地域での流域分割作業

4.3.4で述べた流域分割モデルを用いて、空間解像度が経度×緯度=2分×2分のDEMを入力として、東経70度～160度、北緯55度～16度にわたる範囲の流域分割を行った。日本での検討作業の際、本モデルを用いて算定した河道位置は、特に平野部での修正作業が必要であった。したがって、本算定においても河道位置と地図情報との比較作業を行った。その結果、以下に示す河川について修正の必要があった。修正作業については、4.4.1.3(3)で述べたように単位流域境界表にて上流・下流関係を修正することで行った。

- (1) 黄河：山東半島の南で黄海に流出していたため、山東半島の北で渤海に流出するよう修正した。黄河は人為的に流下方向を変えられており、手作業での流下方向の修正はやむえないものとする。
- (2) 長江：実際より北部にて黄海に流出していたため、上海市の北で東シナ海に流出するよう修正した。
- (3) アムール川：ロシアのウラジオストクで日本海に流出しており、樺太の西ニコラエフスクナアムールでオホーツク海に流出するよう修正した。
- (4) 西江：西江は中国南部の広西壮族自治区から広東省に流れ、香港の西に位置する珠江に流下する川であるが、計算では海南島の北西に位置する欽州でトンキン湾に流出していたため、修正を行った。

4.5.3 現状における河川流量の算定結果

アジア東部における河川流量について、4.3.5 で述べた河川流量算定モデルを用いて、4.2 で算定した流出量を入力とし、4.3.4 で算定した流域分割に基づいて算定を行った。河川流量算定には、各単位流域及び各河道区間の初期貯留量・初期流量が必要となるため、水収支モデルと同様に、初期値をそれぞれゼロとして1年間の助走計算を行った。

まず、主要河川における年間平均流量の算定値と過去数十年における観測平均流量(Gleick, 1995) を表4-3に示す。

表 4-3 主要河川における平均流量の観測地と算定値の比較

河川名	流量観測点名	観測期間	観測平均流量(m ³ /sec)	算定流量(m ³ /sec)
アムール川	Komsolmolsk	1933-84	9739	6915
ゴダバリ川	Polavaram	1901-79	3061	2596
ガンジス川	Farakka	1949-73	12037	8190
ブラマプトラ川	Bahadurabad	1969-75	19674	16364
西江	Wuzhou	1976-83	7085	9010
長江	Datong	1923-86	25032	27935

観測流量と算定流量を比べると、1割から3割程度の差異が見られた。表4-3にあげたような河川の流量は観測年により大きく異なり、過去数10年の平均流量と比較を行うことには問題がある。しかし、算定年の流量を入手することができなかったためこれらと比較対象としたものである。

次に、CISNAR(中国科学院自然資源総合考察委員会)より入手した日流量データとの比較を行う。比較したデータは、中国黒竜江省を流れる嫩江の中流部に位置する江橋観測所における1983年の日流量データである。嫩江は大シンアンリン山脈と小シンアンリン山脈に源を発し、アムール川に流下する松花江の支流である。図4-8a及び4-8bにそれぞれ江橋観測所における実測流量と算定流量を示す。両者を比較してみると、算定流量の方が、実測流量よりピーク流量が1割から2割ほど多く、ピーク時も2,3日遅れている。しかし、それ以外の点ではほぼ実測流量と合致しており、事前情報が全くない地域で行った流出解析としては十分算定条件を満たすものであると思われる。本来なら、気候条件・土地利用状況などが異なる多数の地点で算定流量と実測流量を比較し検証を行うべきであるが、中国の河川の詳細な情報を得ることは現在のところ不可能であり、これ以上の検討は今後期待される。

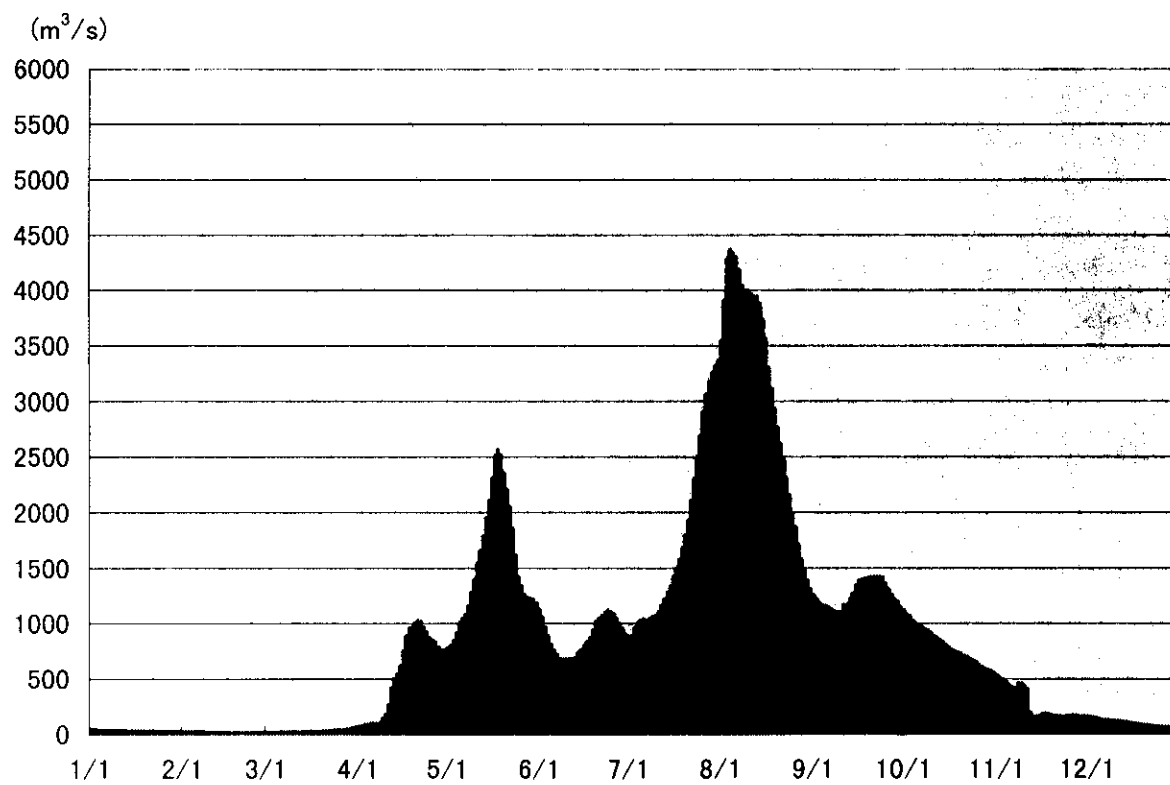


図4-8a 実測日流量

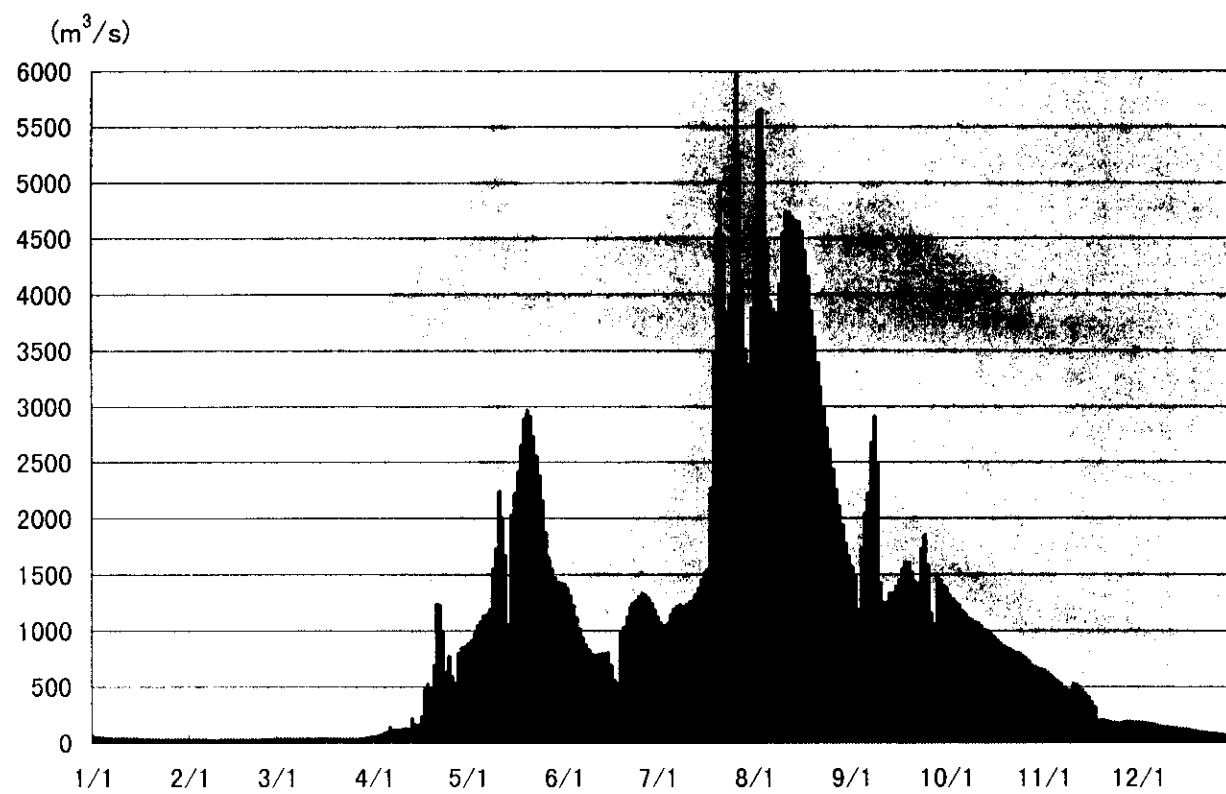


図4-8b 計算日流量

4.6 気候変動が水資源に及ぼす影響について

4.6.1 入力気候データについて

4.6.1.1 概要

本研究は、地球温暖化をはじめとする気候変動が水資源に与える影響を評価することを目的としている。そのためには、気候変動が起こった場合の各種気候データが必要となる。基準とする年の気温及び降水量に適当な変化を与えて気候変動後の入力データを作成している例もあるが、一般的には GCM(General Circulation Model)による出力を気候変動後のデータとして用いる。GCM とは、様々な大気圏を中心とした地球物理学現象をモデルで表現しシミュレートするモデルであり、たとえば、二酸化炭素濃度が2倍になった場合の全地球上での気象データなどを算定することができる。本研究で使用した GCM 出力は、大気中の平均二酸化炭素濃度が現状の2倍になった場合及び現状濃度下の気象データである。そこで、GCM の出力を用いて気候変動による各種影響評価を行う場合、平均二酸化炭素濃度二倍時の平均気温と一倍時の平均気温の差から、気温が $x^{\circ}\text{C}$ 上昇した場合について影響評価を行う場合が多い。将来気温が何度上昇するかを推定するのは難しい問題であり、現在世界中で様々な角度から算定が試みられている。本研究では IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)が 1992 年に定めた二酸化炭素排出シナリオに基づく、2100 年における気温上昇を用いることにした。次節以降で本研究で使用した二酸化炭素排出シナリオ及び GCM 出力について述べる。

4.6.1.2 本研究で用いた二酸化炭素排出シナリオ

IPCC が 1992 年に定めた IS92 二酸化炭素排出シナリオには、IS92a～IS92f まで 6 つのシナリオがあるが、本研究では 6 つのシナリオの中で二酸化炭素排出量が中位と予測される IS92a シナリオを用いた。IS92a 排出シナリオに基づき気温上昇を計算した結果、2100 年には 1990 年に比べて 2.054°C 上昇する(IPCC 第 3 作業部会, 1992)と報告されている。従って本研究では、1990 年に比べて全世界の平均気温が 2.054°C 上昇したと仮定した場合についての推測を行うものとする。

4.6.1.3 本研究で用いた GCM 出力

現在まで、様々な研究機関にて GCM が開発され、計算が行われた。本研究ではこれらのうち、日毎の出力値を入手できた UIUC(University of Illinois at Urbana-Champaign)モデルの出力を用いることにした。UIUC モデルはに Schlesinger らによって開発されたものであり、空間解像度は経度×緯度= $4.0^{\circ} \times 5.0^{\circ}$ で、1996 年に行われた計算では、二酸化炭素濃度二倍時と一倍時での全世界平均気温の差は 3.4°C の結果を得ている。この UIUC 出力には気温、降水量以外に風速・湿度など多くの気象データが保存されている。本研究では、UIUC 出力のうち日単位降水量・平均気温・風速・雲量・相対湿度の計算値を用いて計算を行っている。

4.6.1.4 将来気候データの準備

前節で述べた GCM 出力を用いて影響評価を行うが、GCM 出力の空間解像度が粗いため、事

前に補間作業を行う必要がある。気温についてはスプライン補間、それ以外のデータについては $1/r^2$ 重み付け補間により、経度×緯度=0.5°×0.5°に補間した。その後に、次式に従い将来気候データを求めた (Takahashi *et al.*, 1997)。

気温について：

$$T(t) = T(\text{present}) + (T(\text{pertubed}) - T(\text{base})) \times \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \quad (4.13a)$$

降水量・風速・雲量・相対湿度について：

$$R(t) = R(\text{present}) + R(\text{present}) \times \left\{ \frac{R(\text{pertubed})}{R(\text{base})} - 1 \right\} \times \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \quad (4.13b)$$

ここに、

$T(t)$, $R(t)$: t 年における各気候データ

$T(\text{present})$, $R(\text{present})$: 現在の各気候データ

$T(\text{pertubed})$, $R(\text{pertubed})$: GCM により得られた二酸化炭素濃度 2 倍時における各気候データ

$T(\text{base})$, $R(\text{base})$: GCM により得られた二酸化炭素濃度 1 倍時における各気候データ

$T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})$: 想定される基準年と t 年との間の世界平均気温変化

ΔT : GCM における二酸化炭素濃度 1 倍時と 2 倍時の間での世界平均気温変化

である。本研究では、 $t=2100$ 年、 $T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})=2.054^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T=3.4^\circ\text{C}$ とした。

また、アルベドについては現状のデータ(1983 年)を使用した。

4.6.2 地表面流出量の変化

4.6.1 で述べた将来気候データを用い、可能蒸発散量算定モデルを用いて、気候変動後の可能蒸発散量を算定した。その後、水収支モデルを用いて気候変動後の地表面流出量を算定した。これを現状(1983 年)の地表面流出量と比較する。図 4-9 に気候変動後の流出量と現状での流出量の差を示す。この図から二酸化炭素濃度の増加により、低緯度地域での流出量は減少傾向にあり、高緯度地域では増加傾向にあることが分かる。中国華南地区や東南アジア地域は世界でも有数の穀倉地帯であり、これらの地区での農業生産に与える影響も懸念される。また、これらの地域は現在急速な経済発展のため水需要量が大幅に増大しており、二酸化炭素濃度が増加し続けた場合これらの地区への安定水供給性に大きな問題が生じるであろう。また、インド東部のアッサム地方やニューギニア島、フィリピンのミンダナオ島での流出量が大幅に減少している。アッサム地方での流出量の減少はプラマプトラ川の流量に大きく影響することが懸念され、ニューギニア島やフィリピンなどの島国でこれほどまでの流出量の減少は渇水の危険性を高くする。しかし逆に流出量が大幅に増加する地域もある、インドのパンジャブ地方では大幅に流出量が増大しており、インダス川の氾濫が懸念される。

4.6.3 河川流量の変化

4.6.2 で算定した気候変動後の地表面流出量を入力とし、4.3.5 で述べた河川流量算定モデルを用いて、東アジア全域の主要河川での気候変動後における河川流量を算定した。6.2 と同様に、現状での河川流量と比較する。現状での河川流量に対する気候変動後と現状での流量の差の比を％表示で表したものを図4-10に示す。黄河や長江といった東アジアのほとんどの河川で流量が大幅に減少するのが分かる。しかし、黄河と長江を除く華北および華中での河川では流量がやや増加するか、もしくは増減がほとんどない。また、前節で述べたように、インド北部のパンジャーブ地方での降水量の増加により、インド東部を流れる河川の流量は大幅に増加している。また、インド中部のゴダバリ川でも流量が大幅に増加する。ゴダバリ川は年間平均流量が $3000\text{m}^3/\text{sec}$ の比較的大きな河川であり、この河川での大幅な流量増加は河川氾濫を招く。いくつかの河川の年平均流量の増減率を表4-4に示す。

表 4-4 長大河川の年平均流量の増減率

河川名	増減率(%)
アムール川	-58
黄河	-52
長江	-50
イラワジ川	-33
ブラマプトラ川	-44
ガンジス川	5
ゴダバリ川	42

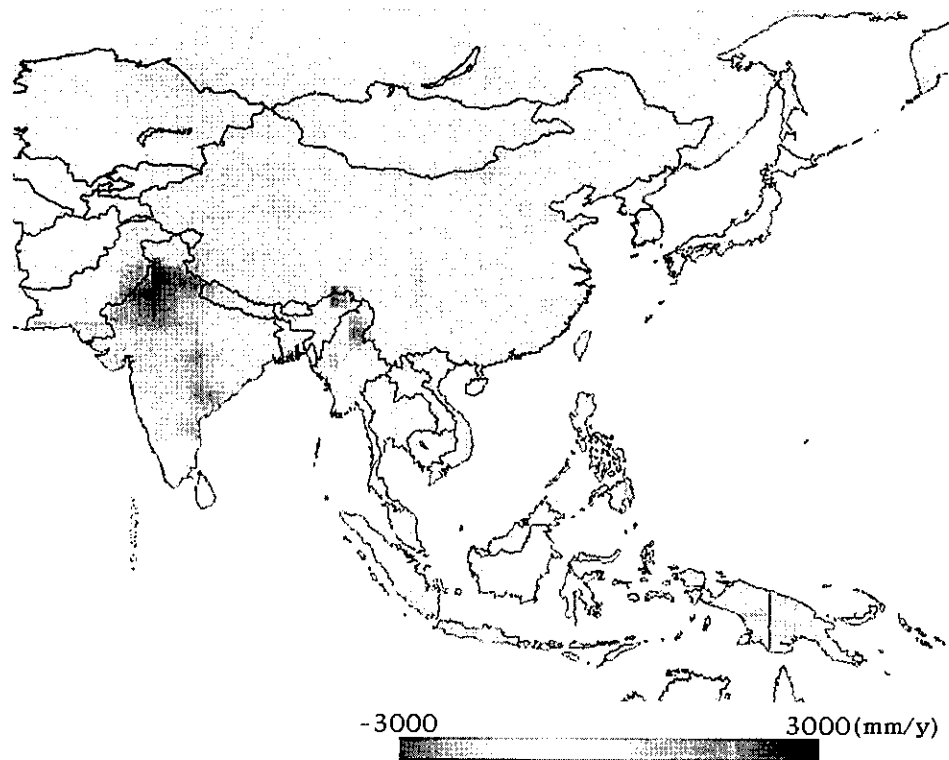


図4-9 気候変動後の流出量と現状での流出量の差

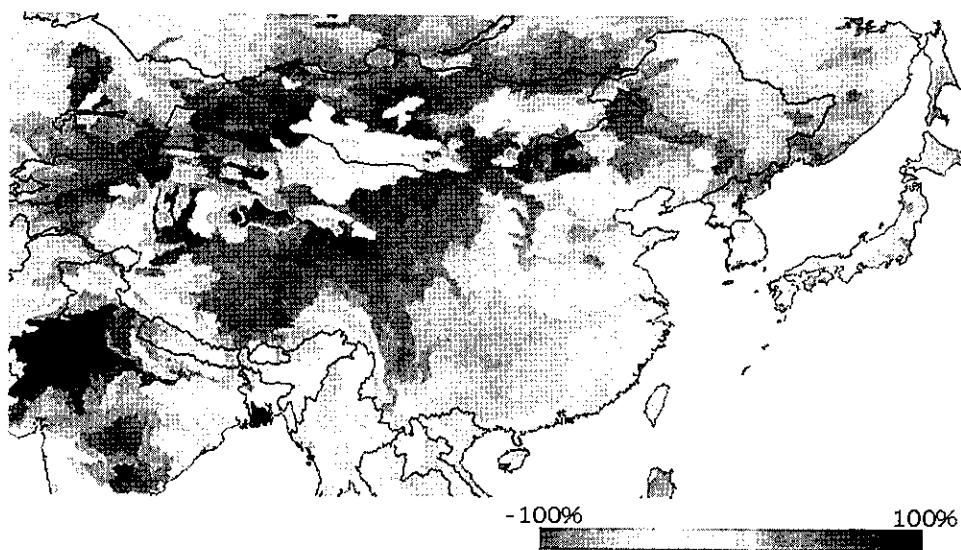


図4-10 現状での河川流量に対する気候変動後と現状での流量の差の比

4.7 気候変動により引き起こされる中国の水需要変化

ここまでは、気候変動により引き起こされる水供給への影響について議論を進めてきたが、本章では気候変動により引き起こされる水需要への影響についての評価を行う。水供給に比べて、水需要は人口や経済状態、ライフスタイルなど気候以外の決定因子に強く依存するため、気候のみの関数として推計を行うことは出来ないが、本研究ではいくつかのその他因子を将来にわたって一定と仮定し、中国全体について推計を行った。

将来気候下での水需要の変化を調べるために、過去の水使用量についての指標と主気候因子との間の関係を、農業部門と家庭部門についてそれぞれ統計データに基づいて分析した。その関係を用いて、2100年における農業水需要と家庭部門水需要を推計した。

4.7.1 気候変動が農業水需要に与える影響

4.7.1.1 気候変化と農業用水

気候変動により各用水部門での水需要量は影響を受けるが、その中でも農業は最も影響を受けやすい用水部門である。全球平均では、総取水量中の農業用水の占める割合は70%、総消費水量でみると90%を占める。1950～80年の間で、世界全体の総用水量増加の60%が農業に当てられた。中国においては、農業用水量中の大部分を農作物灌漑が占め、灌漑用水量は総消費水量の82%を占める。農業用水中における灌漑用水の占める割合が支配的に大きい点に注目して、単位面積を灌漑するために必要な水量（灌漑インデックス）をもって農業水利用の指標とした。

将来の気候変動は作物の蒸発散変化を通じて灌漑水利用に影響を与える。Kos(1970)によると、1.5℃の気温上昇により、灌漑に要する水量は20～30%増加し、4.5℃の気温上昇では2倍になる。過去の年平均気温と灌漑インデックス、降水量と灌漑インデックスの相関が、図4-11に示されている。この図から灌漑インデックスは年平均気温と密接な関係があることが分かる。一方、灌漑インデックスと年降水量との関係には明確な傾向が現れていない。さらに、大気中CO₂濃度が増加した場合、作物の水利用効率は向上し、気温上昇による灌漑水需要増加は打ち消される可能性もある。

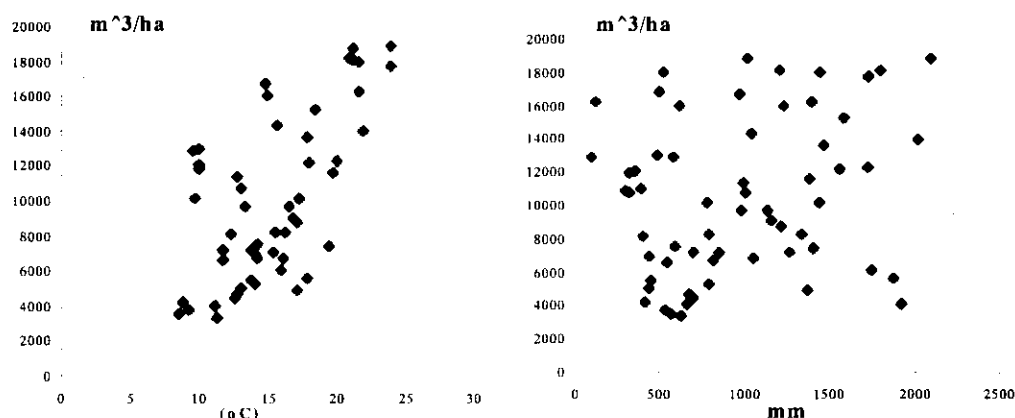


図4-11 灌漑インデックスと年平均気温（左）と灌漑インデックスと年降水量（右）

4.7.1.2 灌漑水需要予測

(1) モデル

気候変動は複雑なメカニズムを通じて灌漑水需要量に図 4.1 に表れているような影響を与えると考えられるが、ここでは作物の蒸発散変化を用いて、水需要変化を推計するモデルを設定する。農業水需要の予測には以下のモデルを用いた。

$$WD(irri.) = A \times B$$

ここで、 $WD(irri.)$ は年灌漑用水需要、 A は一人当たり灌漑面積と人口から推計される有効灌漑面積、 B は灌漑インデックス。 B は以下の式によって推計される。

$$B = \frac{PET - P}{f}$$

ここで、 PET は生長期間の潜在可能蒸発散、 P は生長期間の降水、 f は灌漑効率である。作物の実蒸発散の代わりに潜在可能蒸発散が使われており、その結果灌漑に要する水量を過大に見積もっている。しかしながら、降水については有効降水量の代わりに総降水量を用いているので、過小の灌漑水量見積もりとなる。これらは互いにある程度打ち消しあうと考えられる。灌漑効率 f は現状の灌漑水利用量に合うように、地域毎に調整した。

(2) データと仮定

将来の月降水量と月平均風速は、ECMWF による 1981～83 年の月降水量平年値と月平均風速平年値に、Schlenginger(1996)の大循環気候モデルによる大気中二酸化炭素濃度 1 倍時と二倍時の降水変化比と風速変化比をそれぞれ掛け合わせて得た。月平均気温、月平均露点は、ECMWF による 1981～83 年の月平均気温平年値と月平均露点平年値に、同じく Schlenginger(1996)の大循環気候モデルによる大気中二酸化炭素濃度一倍時と二倍時の月平均気温差と月平均露点差をそれぞれ足し合わせて得た。この将来気候シナリオの作成に際して、現状から 2100 年までの世界平均気温上昇が湧昇拡散型の簡易気候モデルを用いた IS92a シナリオに沿った温室効果ガス排出シナリオに基づく気候感度 2.5℃と仮定した場合の世界平均気温上昇推計値 (2.084℃) になるように、Parry et al.(1992)で提案された手法を用いてスケーリング操作を行った。

PET は PENMAN 法を用いて、上の操作で作成された気候シナリオを用いて推計した。作物の生長期間は、月の気温が 10℃以上の日数を用いた。来世紀における技術進歩による灌漑効率の向上を考慮して、灌漑効率は 2100 年には現状の 70%になると仮定した。一人当たり灌漑面積は、1990 年と 2100 年で変化しないと仮定した。また、2100 年の人口としては 16 億人を仮定し、その空間的な分布は現状と変わらないとした。

(3) 予測

上に示したデータと仮定に基づいて、2100 年時点での灌漑による水需要を推計した。東部地域と Yunan 省では、年灌漑水需要は 6000～8000 万トンに達する。Xinjiang の北西部では作物の生長期間中の蒸発散が大きく上昇するため、年灌漑用水需要は約 10000 万トンまで上昇する。一方、中国中部地域では、比較的多い降水量のために、灌漑水需要は気候変動下においても 200～

400 万トンである。

4.7.2 気候変動が都市における家庭の水需要に与える影響

4.7.2.1 都市における家庭の水需要と気候

蒸発散と降水量が気候変動により変化するため、気候変動は家庭部門の水利用量にも影響を与える。家庭部門における水を使用する活動は多岐にわたるが、そのなかでも庭の水遣りとお風呂は気候変動に対して最も感度の高い水利用活動である。図 4-12 は、一人当たり家庭用水量と年平均気温の間の相関を示している。中国における都市域の家庭水利用は、気温に対して線形の関係を持っていることがわかる。

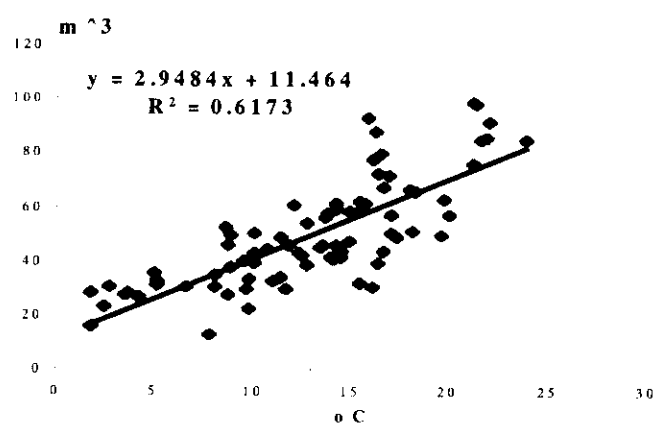


図 4-12 一人当たり家庭部門水需要と年平均気温

4.7.2.2 家庭部門水需要予測

(1) モデル

前に示した都市域における家庭部門水需要と年気温の統計的関係に基づいて、将来気候下における都市域の家庭部門水需要を推計するために、以下のモデルを適用した。

$$WD(resi.) = I \times P \times R$$

ここで、 $WD(resi.)$ は年家庭部門水需要、 I は一人当たり家庭部門水需要、 P は総人口、 R は農業人口を考慮に入れるための調整係数である。気温以外にも一人当たり家庭部門水需要に影響を与える因子（収入レベル、ライフスタイル、水道価格など）は多く存在するが、ここでは年平均気温のみを将来の一人あたり水需要を変化させるドライビングフォースと考え、中国の将来の家庭部門水需要を推計した。 I の推計には、図 6.2 から得られる以下の関係式を用いた。

ここで、 T は年平均気温である。

$$I = 2.9484T + 11.464$$

(2) データと仮定

2100 年時点の年平均気温は、灌漑用水推計で用いた月平均気温シナリオの年平均を用いた。

2100 年の人口は、灌漑用水推計と同じ仮定を用いた。

将来において都市化率は 55%に達し (UNU/IAS)、また農村地域における一人あたり家庭部門水需要は都市の 70%であると考え、農業人口を考慮に入れるための調整係数 R は 0.865 ($0.55+0.45*0.7$) とした。

(3) 予測

図 4-13 は、県毎の 2100 年時点における家庭部門水需要である。人口密度の高い中部地域の県では、高い家庭部門水需要が見られる。これらの県での年需要は 10000 万トンに達すると考えられ、現状でも水不足の問題が顕在化しているこの地域では、それがさらに深刻になることが懸念される。

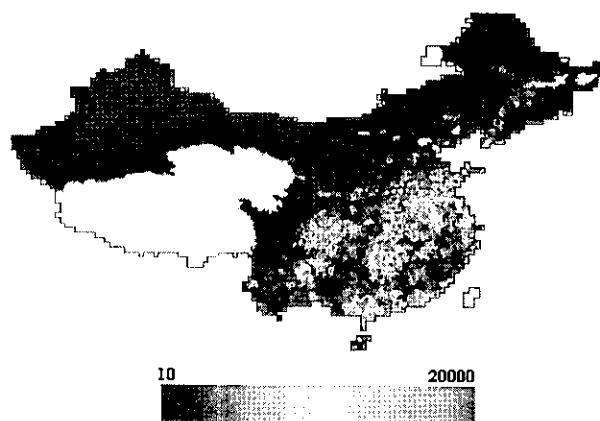


図 4-13 県毎家庭部門水需要 (万トン、2100 年)

4.8 結 論

本研究では、流域情報、観測流量データがほとんどない地域で、標高データと数種類の気候データのみから河川流量を算定するモデルを開発した。本モデルを日本に適用し検討を行ったところ、河道位置については一部修正の必要性はあるが、若干の修正を行うことによって実際の流域とほぼ一致させることが可能となった。また、修正した流域分割を用いて河川流量を算定したところ、十分目的とする精度をもった結果を得ることができた。

気候変動が水資源に与える影響評価として、GCM 出力から気候変動後の各種気象データを作成し、これを本研究で開発したモデルに入力し、気候変動後の地表面流出量と河川流量求めた。また、別途算定した 1983 年での地表面流出量と河川流量を気候変動後の算定値と比較することにより影響評価を行った。その結果、以下に示す事柄が明らかになった。

(1) アジア全域について地表面流出量の算定を行った結果、二酸化炭素排出量の増加により

- ・アジア全域のほとんどの低緯度地域で流出量が減少し、インドのアッサム地方やニューギニア島では大幅に減少する。
 - ・インド東部のパンジャブ地方では逆に流出量が大幅に増加する。
 - ・アジア地域の高緯度地域では流出量が増加傾向にある。
 - ・中央アジア付近では砂漠化が進行する。
- ことが明らかとなった。

(2) 東アジア地域について河川流量の算定を行った結果、二酸化炭素排出量の増加により

- ・中国華南の河川は大幅な流量減少がある。
 - ・中国華中、華北の河川は、黄河、長江を除いて流量の大きな増減は見られない。
 - ・インド西部及び中部の河川は流量が大幅に増加する。
 - ・中国東北部の松花江、アムール川は冬期において流量が大幅に増加する。
 - ・黄河、長江の中国二大河川は 50%ほど流量が減少する。
- ことが明らかとなった。

本研究で用いた将来シナリオは 1 種類のみであり、地域的な情報を得るのに使用した GCM 出力も 1 種類のみであった。しかし、二酸化炭素排出量の予測はシナリオにより大きく異なり、また、GCM 出力もモデル毎で大きな違いがある。そのため、将来予測を行う際には複数のシナリオ仮定と複数の GCM 出力を用いて、幅のある予測を行うべきである。今後は、本研究で開発したモデルと複数のシナリオ仮定、GCM を用いて幅を持たせた予測が必要であろう。

気候変動による水供給への影響だけではなく、需要への影響も考慮に入れた包括的な分析フレームの構築の予備的研究として、水需要モデルを設定し、将来気候シナリオに適用した。過去の水利用と気候因子の観測値の相関を分析したところ、灌漑インデックスは年平均気温と強い正の相関を持ったが、降水量との関係はあまりなかった。人口変化と灌漑効率の改善を考慮に入れて

2100 年時点の灌漑水需要を推計したところ、北 Xinjiang の県では急激な増加が見られた。また、都市における家庭部門の水需要も年平均気温と線形に近い関係を持っていることが分かった。

今後、工業用水需要推計の手法についても開発を進め、需給の比較分析、さらに具体的な対策の提案を行っていく必要がある。

参考文献

- 安藤義久，1994，地球温暖化シナリオによる河川流出への影響評価に関する一考察，
水利科学，38(4)，pp.34-44.
- 朝倉 正・関口理郎・新田 尚，1995，気象ハンドブック，朝倉書店.
- Burman,R., L. O. Pochop, 1994, Evaporation, Evapotranspiration and Climatic
Data (Developments in Atmospheric Science, 22), Elsevier.
- Carter, T.R., M.L. Parry, H.Harasawa and S. Nishioka, 1994, IPCC Technical
Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations, Department of
Geography, University College London, UK and Center for Global Environmental
Research, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Cogley, J.Graham, 1991, GGHYDRO-GLOBAL Hydrographic Data release 2.0,
Trent Climate Note 91-1
- 土木学会，1985，水理公式集.
- 土木学会，1988，土木学会水理委員会水理公式集例題集編集小委員会，水理公式集
例題集(昭和 60 年度版).
- Doorenbos,J., W. O. Pruitt, 1992, Crop water requirements,FAO irrigation and drainage
papaer 24, FAO.
- Edwards,M.O., 1989, Global gridded elevation and bathymetry(ETOPO5), Digital
raster data on a 5-minute Geographic(lat/long) 2160×4320(centroid-
registered) grid, CO:NOAA National Geophysical Data Center.
- Gleick,P.H., 1986, Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of
global climate changes. *J. Hydrology* 88, pp. 99-116
- Gleick,P.H., 1995, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources,
Oxford University Press, 1995
- 平岡正勝・井上頼輝・宗宮 功・松井三郎・武田信生・森澤眞輔・津野 洋・松岡 譲，
1994，地球環境サイクルの保全と管理，pp.46-57.
- IPCC 第 2 作業部会(西岡秀三監訳)，1995，地球温暖化の影響予測，中央法規
- IPCC 第 3 作業部会(天野明弘・西岡秀三監訳)，1992，地球温暖化の経済・政策学，
中央法規出版.
- Joseph Alcamo et al., 1997, Global change and global scenarios of water use and
availability: An Application of WaterGAP1.0, CESR University of Kassel, 1997.

- 建設省河川局, 1977, 建設省河川砂防技術基準(案), 調査編, pp.120-135.
- 建設省河川局, 1993, 流量年表, 日本河川協会.
- 木村俊晃, 1962, 貯留関数法(Ⅱ), 土木技術資料, 4巻1号, pp.41-51.
- 木村俊晃, 1978, 貯留関数法の最近の進歩, 第22回水理講演会論文集.
- 木曾三川～その流域と河川技術編集委員会, 1988, 木曾三川～その流域と河川技術, 中部建設協会.
- 国立天文台, 1996, 理科年表 平成8年, 丸善.
- 小尻利治, 1992, 地球温暖化が及ぼす利水システムの安全度への影響評価に関する研究. 第4回水資源に関するシンポジウム, pp.11-20.
- 益谷克成・吉谷純一, 1992, 気候変化に伴う利根川の流量変動評価. 第4回水資源に関するシンポジウム, pp.751-756.
- Mintz, Y., G.K.Walker, 1993, Global fields of soil moisture and surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp.1305-1334.
- 中津川誠・西村豊, 1992, 地球温暖化による融雪パターンの変化について, 土木学会 第48回年講Ⅱ, pp.658-659.
- 西岡秀三・原沢英夫, 1997, 自然・人への影響予測 地球温暖化と日本, 古今書院.
- Shelesinger, M.E., 1996, Development of the geographical climate scenarios for the impact analysis of Energy Modeling Forum 14, Proceedings for Energy Modeling Forum 14 Workshop, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Takahashi, K., Hideo Harasawa, Yuzuru Matsuoka, 1997, Climate change impact on global crop production, *Journal of Global Environment Engineering*, vol.3, pp.145-167.
- Takara, K., T.Kojiri, S.Ikebuchi, and T.Takasao, 1991, A simulation study on catchment response change due to global warming, *Environmental Hydraulics*, Lee & Cheng (eds.), Balkema, pp.1451-1456.
- 宝馨・小尻利治, 1993, 地球温暖化による流域水文応答の変化に関する数値実験, 土木学会論文集, 479/Ⅱ-25, pp.1-10.
- 田中丸治哉・角屋睦, 1991, 気温上昇が流域水文循環に与える影響, 京都大学防災研年報, 34B-2, pp.189-207.
- 田中丸治哉・角屋睦, 1992, 気温上昇が流域水文循環に与える影響(2), 京都大学防災研年報, 35B-2, pp.183-195.
- 堤将彦・小尻利治・池田繁樹, 1993, 地球温暖化による水需要形態の変化. 土木学会 第48回年講Ⅱ, CS77, pp.68-69.
- 宇治橋康行, 1994, 地球温暖化による流域水文応答の変化の数値実験, Ⅲ.他雪流域, 平成5年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書「地球温暖化のもとでの水資源システムの安全度評価と耐渇水方策に関する総合的研究」
- United Nations University/ Institute of Advanced Studies, 1999, China's sustainable development framework: a summary report, forthcoming.

- Vorosmarty, C.J., Berrien Moore III, A. L. Grace, M. P. Gildea, 1989, Continental scale models of water balance and fluvial transport : An Application to South America, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 3, No. 3, pp.241-265.
- Webb, R.S. et al., 1991, A global data set of soil particle size properties, NASA Tech. Men, 4286, 1991.
- Zobler, L., 1989, A world soil file for global climate modeling, NASA Tech. Men, 87802.

第5章 アジア地域における都市大気汚染の健康影響の評価手法開発の予備的検討

5.1 背景

1997年6月25日、米国のクリントン大統領は米国における大気中の浮遊粒子状物質（SPM）の基準値を強化するスケジュールを発表した。これは従来の規制値である PM_{10} （粒径 $10\mu m$ 以下の浮遊粒子状物質）濃度 $50(\mu g/m^3)$ に加え $PM_{2.5}$ （粒径 $2.5\mu m$ 以下）濃度を $15\mu m^3$ 以下とするものである。EPA の試算（USEPA, 1996a）によれば、規制強化により毎年数万人以上の死亡を回避できると推定している。こうした SPM による健康被害は米国のみにとどまらない。世界各国において、重篤な影響をもたらしていると推測されるし、今後の発展途上国を中心とする大気汚染の深刻化によって、さらに大きな被害をもたらすであろう（Working Group on Public Health, 1997）。

いくつかの国における疫学的な研究（Smith, 1993; USEPA, 1996a, b）によって、浮遊粒子状物質（Suspended Particle Matters, SPM：大気中に浮遊する粒子状物質で粒径が $10\mu m$ 以下の粒子（ PM_{10} ）であるもの）への暴露が、死亡や疾病の大きな原因となることが明らかになってきた。大気中の微粒子のうち粒径が $10\mu m$ 以上のものは沈降が早く、また、鼻腔・咽喉頭でほとんどが捕捉される。それに対し、粒径 $10\mu m$ 以下の微粒子は滞留時間も長く、肺泡到達沈着率も $20\sim 90\%$ 以上と極めて高い。浮遊粒子状物質により特に影響を受ける器官は、心臓、血管及び呼吸器である。

USEPA や WHO の研究によると、浮遊粒子状物質の濃度の高い地域では、急性及び慢性の肺疾患（気管支炎、喘息、息切れなど）の患者が多いという疫学的研究結果がでている。また、ラットを浮遊粒子状物質中に暴露させた研究によると、暴露により気管支の反応、不整脈、肺炎の激化などが観察された。最近の研究（Wilson ら, 1996）では、吸引された微粒子やエアロゾルは、肺機能や血漿の濃度に直接障害を与えることもわかってきた。WHO をはじめとする各機関は浮遊粒子状物質の規制を行っており、表 5-1 に示すような濃度基準値を設定している。

表 5-1 浮遊粒子状物質の濃度基準

	基準時間	大気濃度($\mu g/m^3$)		
WHO (TSP ^{a)} 濃度)	年平均	60~90		
	日平均	150~230		
EPA (PM_{10})	年平均	50		
	日平均	150		
日本 (PM_{10})	1時間値の1日平均	100		
	1時間	200		
中国 (PM_{10})		class1 ^{b)}	class2 ^{b)}	class3 ^{b)}
	年平均	20	60	100
	日平均	75	150	250

a)SPMはTSPの約50%

b)中国の環境基準class1は観光地、史跡、class2は住宅地、田園地域、class3は工業地域、交通密集地域での基準

次に、問題となる浮遊粒子状物質について説明する。大気中の粒子状物質はその生成過程に応じて、一次粒子と二次粒子に分類される。一次粒子は、「燃料及びその他の燃焼に伴って発生する粒子」や「物の破碎、選別その他の機械的処理、または堆積に伴って発生、飛来する粒子」であり、煤塵やディーゼル排気粒子（DEP）は前者に、粉塵は後者にあたる。二次粒子は、ガス状の物質として大気中に放出された物質が、大気中において光化学反応や中和反応を経て粒子に変化したもので、硫酸塩（ SO_4^{2-} 化合物）、硝酸塩（ NO_3^- 化合物）などがこれにあたる。

したがって、一次粒子とは大気中に放出された時、既に粒子としての性状を持つものであり、二次粒子とは放出時に気体であった物質が、主として大気中の化学反応により粒子化したものである。したがって、エネルギー消費を起源とする大気汚染物質には、 SO_2 、 NO_x 、煤塵、DEP などがあるが、これらはすべて浮遊粒子状物質になる可能性がある。

地球規模における粒子状物質の発生の人為起源と天然起源の比は、約1:50であるが、人為起源の粒子状物質のほとんどが粒径が $10\mu\text{m}$ 以下であること、天然起源のほとんどが $10\mu\text{m}$ 以上であること、また、天然起源で $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粒子状物質は局所的かつ間欠的であるため定常的な発生源にはなりにくいことなどを理由に、ここでは浮遊粒子状物質の発生源を人為起源（エネルギー消費起源）に限定した。

世界各国において大気汚染への関心が高まっているにもかかわらず、現在のところ、将来におけるエネルギー消費から大気汚染物質の排出量算定、濃度の算定、そしてその影響の見通しまでを結合し、定量的に示したモデルはない。このような背景から、ここでは、最近気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が開発した将来のエネルギーシナリオを使用して、世界全域において大気汚染によってもたらされる健康被害、特に乳児の死亡に中心をおき、乳児死亡者数の増加や相対危険度の増加を評価する枠組みを示す。

5.2 既往の研究

世界規模の浮遊粒子状物質暴露による健康影響評価を行った研究結果を表5-2にまとめた。

表5-2 既往の研究で報告された健康影響

研究者	対象地域	健康影響	WHOの基準を満たした場合
World Bank, 1992	世界全域	1980年代半ばにて約13億人がWHOの基準を超える濃度のSPMに暴露。 SPM濃度がWHOの基準を超える都市域では呼吸器障害のために労働者1人当たり0.6～2.1日/年の労働時間が損失。	発展途上国で1年間に30～70万人の乳児の死亡が避けられる。 14歳以下の子供の慢性的な喘息が半減する。
World Bank, 1997	中国	34.6万人以上が呼吸器系疾患のために入院しており、毎年680万人が救急室に運ばれている。 SPM濃度が $1(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 増加する毎に百万人当たり、6人の死者、61人の慢性気管支炎患者、2,608人の喘息患者が発生し、18.3万人が呼吸器に何らかの症状を起こしている。	汚染のひどい地域において環境基準class2を維持したとき1年間に17.8万人の乳児の死亡が避けられる。
Florig, 1997	中国	大気汚染に起因する呼吸器系疾患や心臓病の患者数は110万人。	
Moore, 1997	アメリカ合衆国、発展途上国	アメリカ合衆国では毎年5万人がSPMで死亡。 メキシコでは毎年1.3万人の乳児死亡。	発展途上国で1年間に30～70万人の乳児の死亡が避けられる。

5.2.1 開発途上国における健康影響

1992年に報告された世界銀行の研究（World Bank, 1992）では、今後増加の見込まれる自動車交通および電力を中心とするエネルギー需要の増加が、現在利用しているままの技術によって充当されるならば、これらの排出源からの汚染物質の排出は2030年には交通部門にて5倍、発電部門にて11倍になると推定した。しかし、これらの大半は、エネルギー効率と排出抑制技術の改善を行うことによって削減が十分可能であると結論付けている。

1980年代初頭において、バンコク、北京、カルカッタ、ニューデリー、テヘランなどの都市では、 $150\sim 230\mu\text{g}/\text{m}^3$ （WHOのガイドラインにて年に7日以上超過してはならない濃度）を年に200日間以上超過していた。また、低所得国の都市におけるSPM濃度は、高所得国の都市よりもはるかに高い。実際、汚染の程度によりそれぞれの国の都市を4クラスに分けると低所得国が最も上位となる。また、低所得国における汚染の進んでいない都市ですら、高所得国では最も汚染が進行しているクラスとなる。さらにこのSPM濃度の差は過去10年間にわずかに広がっている。これは高所得国が排出抑制措置を施してきたのに対し、低所得国では大気汚染がさらに進行したことに起因している。

世界各地の約50都市の報告値（UNEP/GEMS, 1988）から推定すると、1980年代半ばにWHOのSPM環境基準を超える地域に住む人口は約13億人に達すると算定される。これらの高濃度なSPM暴露による健康影響についても様々な推定が行われており、人間への健康影響、すなわち病気、死亡が最も重要であることが報告されている。途上国における健康面へのリスクは、先進国における疫学的研究から推定されるが、途上国では一般に健康状態や栄養摂取が不十分であり、より大気汚染の影響を受けやすいと考えられる。先進国で観測される程度のSPMでも呼吸器障害を引き起こし、SPMの濃度が高くなるにつれて死亡者が増加することも報告されている。特に、慢性肺炎や心臓病を患っている高齢者の死亡が目立つが、これは大気汚染の影響がすでに健康を損なっている人々に対して顕著に現れるためである。

概算では、SPM濃度がWHOの安全レベルまで引き下げられれば、発展途上国において年間30～70万人の乳児死亡が回避できると推定している（World Bank, 1992）。この死亡数は、高濃度のSPMが観測されている都市域においては全死亡数の2～5%に相当し、それらの多くは中国やインドから生じるものであった。SPM濃度の引き下げによる効果は死者の減少だけでなく、都市域における14歳以下の子供の慢性的な喘息を半減させ、今後呼吸器障害を引き起こす機会も減少させる。

SPMによる大気汚染により経済生産性も損なわれる。WHOガイドラインを超えるSPM濃度を有する都市域においては、成人1人当たりの年間の労働時間は、0.6日間以上、おそらくは2.1日間が呼吸器系疾患により失われていると世界銀行では報告している。

多くの途上国では、都市大気汚染だけでなく屋内汚染も呼吸器系疾患の原因として重要である。暴露人口の大半は女性や子供であり、WHOの概算（Smith, 1993）では4～7億人が屋内汚染にさらされている。この数は屋外汚染に対する暴露人口よりは少ないが、暴露される度合いが屋外汚染の数倍におよぶことも多々ある。

貧困な農村地域の家庭の台所におけるバイオマス燃料からの排煙中の、SPM濃度はWHO基準の数倍以上であること（Smith, 1993）が報告されており、家庭で炊事に携わることの多い主婦は日

に数時間程度、高濃度の SPM にさらされている。屋内汚染は健康に大きな影響を与えている。とくにバイオマス燃料による影響が 10 年程前から注目されはじめ、それらの報告を総合すると、年に 400 万人程度の乳児死亡の原因となっていると推計される。これらの排煙は呼吸器系感染に対する免疫力を低下させ、暴露を繰り返すことで慢性呼吸器障害、慢性気管支炎、肺気腫、心臓病を引き起こす。ネパールとインドにおける研究では、バイオマスの排煙にさらされる非喫煙女性は若い頃からそのような環境におかれるために、慢性呼吸器系疾患が非常に多くなっている。

5.2.2 中国における健康影響

中国の多くの都市における粒子状物質の濃度は世界でも最も高いレベルにあり、WHO や中国国内の環境基準を大きく上回っている。主要都市における TSP 及び SO_2 の濃度は WHO ガイドラインの 2~5 倍に達する。しかし、1985 年と比べ石炭の消費量が倍増しているが、粒子状物質の排出量は横這い状態にあり、TSP 濃度は大都市においては減少傾向にある。これは家庭におけるガス燃料の使用が増加したこと、高煙突化、工場の郊外移転などが理由に挙げられる。

一方、1990 年以降、中小都市では粒子状物質の濃度はやや増加傾向にある。しかし中国全土で見ると、大都市住民は依然として中小都市住民の 30% 以上が高濃度の粒子状物質に暴露されている (World Bank, 1997)。

また、屋内汚染は農村地域において健康を損ねる重要な要因である。SPM は慢性気管支炎、下痢、知能障害等を引き起こし、場合によっては死亡の原因である。中国の呼吸器系疾患による死亡率は他の発展途上国の 2 倍以上となっており、とくに喫煙率の低い女性の死亡率が高い。

1980 年代末期から、中国ではいくつかの大気汚染による健康被害の研究 (UNEP/WHO, 1993) が行われた。ここでは北京、瀋陽、重慶などの激しい大気汚染に見舞われている地域における疫学的研究を紹介する。

1989 年に北京の 2 つの住宅地域で行われた調査 (Xu ら, 1994) では、大気汚染と日死亡数の関係が研究された。それらの結果、粒子状物質の濃度が 2 倍になると全死亡数は 4% 増加するとの結果を得た。この結果から推測するならば、濃度の倍増により慢性閉塞性肺疾患による死亡数は 38%、心肺疾患による死亡数は 8% 増加することを意味した。

瀋陽での調査 (Wells ら, 1994) は、1992 年に住宅地域と商店街で行われたもので、北京での調査と同様に高濃度の粒子状物質暴露下の観測である。この結果では、濃度が $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 増加すると全死亡数は 1.7% 増加すると推計されている。

重慶での調査 (World Bank, 1996) は 3000 人の成人と 300 人の小学生を汚染濃度・季節などにわたり横断的に調査し、浮遊粒子状物質濃度と健康影響の間に強い相関関係を見出した。

中国や世界各地における疫学的調査から得られている量-反応関係を用いることで、中国全域への健康影響の程度を推定することができる。表 5-3 は World Bank (1997) により、中国の環境基準 class2 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を遵守した場合に、中国国内にて避けられる被害の大きさを算定した結果である。SPM 濃度が class2 に押さえられた場合、17.8 万人の乳児の死亡、34.6 万人以上の入院、680 万人の救急室利用が避けられるとの結果を得ている。

表 5 - 3 環境基準遵守時 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) に避けられる被害数

健康被害等	避けられる被害数(千人)	
	大気汚染	室内汚染
乳児死亡	178	111
入院	346	220
救急室利用	6,779	4,310
小児喘息	661	420
喘息	75,107	48
慢性気管支炎	1,762	1,121
呼吸器系諸症状	5,270,175	3,322,631
活動制限時間(年)	4,537	2,885

室内は、室外以上に汚染されている場合も多い。中国におけるいくつかの調査 (UNEP/WHO, 1995) によると、バイオマス燃料や石炭燃焼によって生じる粒子状物質濃度は室内で $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上となるのが通常であり、とくに台所では $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ にも達する。

表 5 - 3 に示すように、室内汚染に対して環境基準が守られた場合には 11.1 万人の乳児死亡が避けられる。室内の燃料燃焼による健康影響は、喫煙被害に匹敵しうる程度であり、女性や子供に何らかの病状が発生している可能性が高い。しかし、これは都市ガス供給の普及により改善されつつある。

世界銀行の調査 (World Bank, 1997) では、これらの大気汚染による影響の経済的評価を行うために WTP 法を使用した。換算単位としては、アメリカの中間的な値である 1 統計的寿命あたり約 300 万ドルをもとに、両国間の所得格差を考慮し都市域で 6 万ドル、農村地域では 3.18 万ドルとしている。また、労働力損失による換算も並行して行っている。この方法では死亡によって失った賃金ロスを計上し、1 死亡あたり都市域で 9000 ドル、農村地域で 4800 ドルを使用している。これらの方法による大気汚染に起因する乳児死亡の損害額は、WTP 法では年間 107 億ドル、後者の方法では年間 16 億ドルとなった。

表 5 - 4 にこれら 2 つのアプローチによる健康被害等の推計額を示す。この都市大気汚染全体の被害額である 320 億ドルは中国の GDP の 5% にも達するものである。

Florig (1997) の推計では、中国における大気汚染に起因する年間死亡数は、110 万人程度にものぼっており、全死因による死亡率はアメリカよりも低いものの、大気汚染による死亡率はアメリカの 7~10 倍である (表 5 - 5)。中国北部の中規模都市における TSP 濃度は $410 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、南部の都市では $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、いずれも中国の環境基準や WHO のガイドラインを大きく上回る。

室内汚染には屋外からの汚染物も含まれているが、室内での燃料燃焼がおもな排出源であり、今までに発表された 100 以上の報告 (UNEP/WHO, 1995) をまとめると、表 5 - 6 のような濃度値となっている。

表 5 - 4 健康被害時の推計額（百万ドル、世界銀行、1997）

健康被害等	推計法	
	WTP法	労働力損失
都市大気汚染	32,343	11,271
乳児死亡	10,684	1,597
疾病	21,659	9,674
活動時間の損失	3,842	3,842
慢性気管支炎	14,092	2,107
その他健康影響	3,725	3,725
室内汚染	10,648	3,711
乳児死亡	3,517	526
疾病	7,131	3,185

表 5 - 5 中国における主な死因（Florig, 1997, 千人）

死因	年間死亡数	年齢調整を行った死亡 リスクの対アメリカ比
大気汚染による肺疾患、心臓病	1,100	7-10
喫煙による肺疾患、心臓病	800	0.4
高血圧による発作	600	2
感染症（肺炎を除く）	500	3
自殺	300	1.6
肝臓ガン	250	10
転落死、溺死	200	3
交通事故	135	0.5
全死因	8,000	1.1

表 5 - 6 中国の室内での T S P 平均濃度

地域	燃料	室内濃度の代表値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		冬	夏
都市	石炭	700	270
	ガス	350	170
農村	石炭	900	250
	バイオマス	3500	950

5.3 影響評価方法の枠組み

本評価には、IPCCのエネルギー消費見通しと2つのモデルを大きな構成要素としている。

5.3.1 濃度算定モデル

まず、1990年から2050年までの石炭、石油及びガスの3燃料種と、発電、工業、民生・商業及び運輸の4部門毎の燃料消費量をIPCCのエネルギー消費見通しから抽出する。これらの見通しから濃度算定モデルを使用して浮遊粒子状物質の大気濃度を算定する。このモデルは、地域別に燃料別部門別の排出原単位を求め、それにエネルギー消費量を乗じて排出量を算定し、日本において求めた排出強度と濃度の関係を利用して各地域の濃度を算定するものである。

5.3.2 健康影響モデル

2つめの健康影響モデルは、浮遊粒子状物質の暴露による将来の健康影響被害の見通しを算定するものである。このモデルでは、浮遊粒子状物質の濃度上昇に伴う相対危険度（relative risk, RR）変化による世界各地の死亡者数の変化見通しを推計する。本研究で開発したモデルのフローを図5-1に示す。また、地理情報システム（GIS）を用い、各サブモデルの結果や入力データを世界地図上に視覚的に示している。

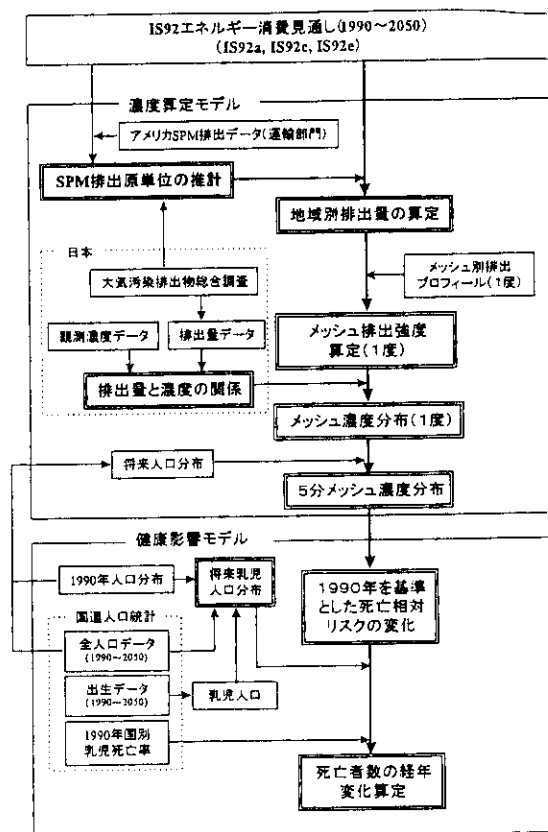


図5-1 エネルギー消費に伴うSPM濃度の影響評価の枠組み

参考文献

- Florig, H. K., 1997: China's air pollution risks, *Environmental Science and Technology*, 31(6), 274-279.
- Moore, C. A., Sickness and death due to energy - related air pollution, available from: <http://solstice.crest.org/renewables/repp/moore.pdf>
- Smith, K. R., 1993: Fuel combustion, air pollution exposure, and health: The situation in developing countries, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 18, 529-566.
- UNEP/GEMS, 1998: Assessment of urban air quality, Geneva.
- UNEP/WHO, 1993: Proceedings of the WHO/UNEP air pollution Workshop, WHO/EHG/PCS/95. 22.
- UNEP/WHO, 1995: Indoor air pollution database for China, WHO/EHG/95.8
- U. S. EPA, 1996a: Review of the national ambient air quality standards for particulate matter: Policy assessment of scientific and technical information, Washington D. C.
- U. S. EPA, 1996b: Air quality criteria for particle matter EPA: Office of Research and development, EPA/600/P - 95/001cF, Washington D. C.
- Wells, G. J., X. P. Xu and T. M. Johnson, 1994: Valuing the health effects of air pollution: Application to industrial energy efficiency projects in China, World Bank, Washington D. C.
- Wilson, R. and J. Spengler, 1996: Particles in our air, concentrations and health effects, Harvard University Press.
- Woodruff, T. J., J. Grillo, and K. C. Schoendorf, 1997: The relationship between selected causes of post neonatal infant mortality and particle air pollution in the United States, *Environmental Health Perspectives*, 105(6), 608-612.
- Working group on public health and fossil-fuel combustion, 1997: Short - term improvements in public health from global - climate policies on fossil-fuel combustion: an interim report, *The Lancet*, 330(9088), 1342-1349.
- World Bank, 1992: World Development Report 1992, Development and the Environment, Oxford University Press.
- World Bank, 1996: China: Issues and options in health financing China and Mongolia department, Washington D. C.
- World Bank, 1997: Clear Water, Blue skies: China's Environment in the New Century.
- Xu, X., J. J. Gao, D. W. Dockery and Y. Chen, 1994: Air pollution and daily mortality in residential area of Beijing, China. *Archives of Environmental Health*, 49(4), 216-222.