

B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

(5) 水資源に関連する社会システムの脆弱性評価に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域 環境計画研究室 原沢英夫・高橋潔

広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 福島武彦・尾崎則篤

平成11～13年度合計予算額 29,098千円

(平成13年度予算額 9,140千円)

[要旨] 生物圏と社会経済システムを結ぶ水資源に着目し、気候変化の水資源（水質を含む）に対する影響を評価するために必須の気象、河川（流量、水質）データをもとに地理情報システムを利用したデータベースを作成して、地域の気象現況及び特性を解析した。あわせて全国の河川を対象とし、気象と水質の関連から、気温・降水量と水質の関連性が強いこと、地域的な差異があることが分かった。

地理情報システムを活用した気象、河川（流量、水質）、流域・行政境界データベースの充実を図るとともに、①温暖化の河川流量へ及ぼす影響を評価するモデルの構築と試算、②温暖化の積雪への影響の一環としてスキー場への影響の評価モデルを構築し、適用した。気温が1～5℃上昇する増分シナリオを用いた予測では、冬場の積雪減少による流出量増加、春季の流出量減少の可能性が示唆された。また、平均気温が3℃上昇した場合、積雪量が減少するためスキー場への影響として客数が3割程度減少すると予測された。

[キーワード] 水資源への影響、河川流出への影響、流量と水質、積雪の影響、河川流量

1. はじめに

本研究は、地球温暖化の生物圏への影響を脆弱性という視点から解析、評価し、今後進行するであろう温暖化に対して、どの生態系、どの地域が脆弱かを評価できる脆弱性マップを開発することを目標としている。地球温暖化の影響は自然生態系のみでなく、社会経済システムへ大きな影響を及ぼすが、幾重にもリスク回避の手立てがとられているために、自然生態系に比べて影響の検出は困難な場合が多い。環境基本計画で自然との共生があげられている点から、自然生態系と人間活動、社会・経済システムとの係わりはたいへん大きいものがある。そこで生物圏と社会経済システムの境界領域として水文・水資源分野への影響をとりあげ、解析評価することが、ますます重要になってきた。

2. 研究の目的

本研究では、水資源に着目して、地球温暖化の影響及び、社会・経済システムのもつ脆弱性を評価する指標の開発を通じて評価することを目的としている。

本研究は、以下の3つの課題からなる。

- ①水資源量・質に関する水資源データベースの作成
- ②水資源量・質の現状評価と影響評価
- ③温暖化の水資源への影響の評価手法の開発と適用

とくに地理情報システムを活用した水資源データベースの充実を図るとともに、データベースを利用した河川流出量予測モデルを作成し、対象流域に適用してモデルの妥当性、適用性を検討した。また、水資源への影響を評価する際に、積雪の影響が非常に大きいことを考慮して、積雪がとくに影響を与える可能性が高いスキー場への影響について検討した。

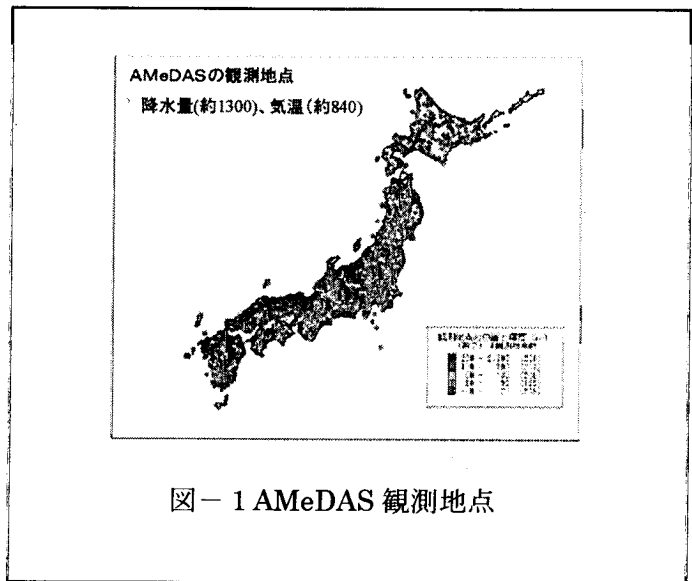
3. 研究方法と成果

3. 1 水資源データベースの作成

(1) 水資源データベースの概要

温暖化の水資源への影響を評価するための基本的なデータを収集し、地理情報システムを利用したデータベースを作成した。気温、降水量については、AMeDAS（アメダス）データ（1976年～2001年、降水量観測地点約1300点、気温等観測地点約840点）を通年で解析、処理できるように加工した上で、データベース化を行った（図－1はAMeDASの観測地点を図示したものである）。

また、河川流量（河川流量年表）、河川、湖沼水質（公共用水域水質データ）を入力するとともに、表示や解析に必要な日本地図（市町村、県境界）、河川・流域などの地図情報を合わせて入力して水資源関連の任意期間、地域について抽出し、解析、表示できる仕組みを作成した。表－1は水資源データベースの収集・蓄積したデータ一覧である。



図－1 AMeDAS 観測地点

表－1 水資源データベースの収集データ一覧

区分	データ項目	収録データ
気象データ	気温	アメダスデータ
	降水量	
	日照量	アメダスデータ
	相対湿度（月別平年値）	理科年表 2001
流量データ	河川流量	流量年表データファイル
	河川流量観測地データ	国土数値情報 KS-274
河川、湖沼水質データ	公共用水域水質項目	環境省
流域界データ	流路位置	国土数値情報 KS-272
	流域界	国土数値情報 KS-273
ベースマップ	行政界	数値地図 25000(行政界・海岸線)

(2) データベースを用いた解析

① 水資源データベースによる解析と表示例

水資源データベースは収録したデータ項目の経年的な変化や、分布状況を地図で分析することが可能である。このデータを用いた解析結果の一部を図-2以降に示した。図-2は前橋（群馬県）における、12月の月平均気温と降水量の経年変化を示している。月平均降水量については、1976年以降、わずかに増加啓子うにあるが、あまり明確ではない。

一方、月平均気温については、上昇傾向が明らかであり、回帰分析による結果（得られた回帰直線を図中に表示）から、10年で0.43℃平均気温が上昇しており、1976年以降25年間では、約1℃上昇している。

図-3は、真冬日、真夏日、熱帯夜の日数の経年変化である。真冬日は、日最高気温が0℃以下の日、真夏日は、日最高気温が30℃以上になった日、熱帯夜は、夜間の最低気温（一般に日最低気温で表す）が25℃以上の日を指している。前橋では、真夏日が増加傾向にあり、回帰分析からは、10年間で8.5日、76年以降25年間で20日以上増加している。また、熱帯夜の数は、真夏日よりも傾向ははっきりしないが、10年で4.1日、この25年間では、約10日増加している。

図-4は、月平均でみた昼夜の気温差の経年変化をもたものである。気温差が減少傾向にあり、10年で、

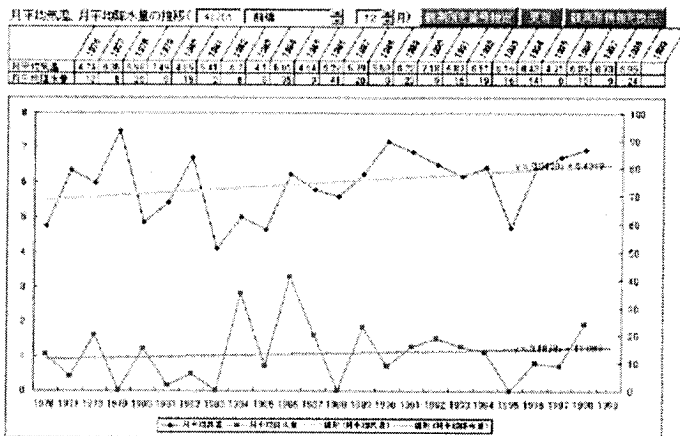


図-2 月平均気温と降水量の経年変化（前橋）

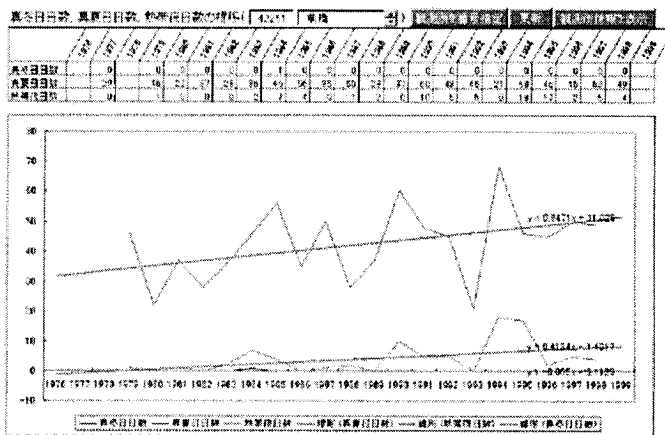


図-3 真冬日、真夏日、熱帯夜日数の経年変化（前橋）

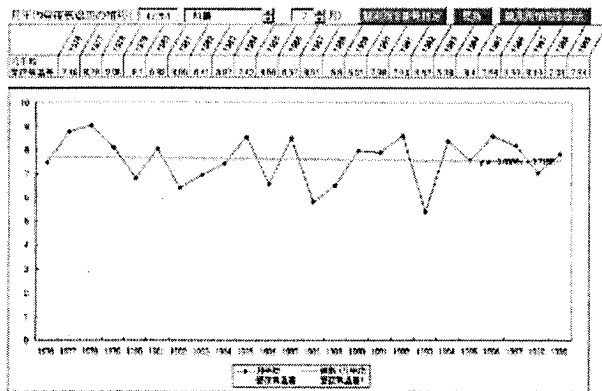
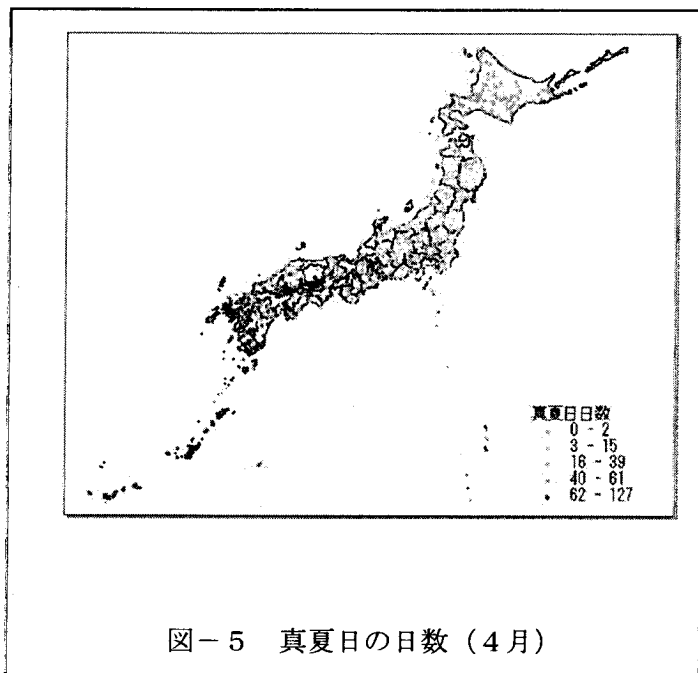


図-4 月平均昼夜気温差の経年変化（前橋）

0.09℃の減少、25年間では、約0.23℃の減少を示している。IPCCの第三次評価報告書では、温暖化が進行するにつれて、暑い日が増加すること、寒い日が減少すること、そして昼夜の気温差（日最高気温－日最低気温）が狭まると結論している。前橋でもこうした傾向がAMeDASのデータからも確認できる。

図－5は、全国の真夏日の日数を示したものである（4月の例）。真夏日は、真夏の暑さを示す指標として用いられるが、地域によっては春季から秋季にかけて真夏日が発生しており、温暖化は月平均値などで代表される平均的な気温変化だけではなく、こうした真夏日の発生状況の変化となって現れると考えられる。こうした気候の極端な現象（異常気象）については、解析事例や将来予測事例がほとんどなく、過去の観測記録を解析、評価したうえで、将来の影響評価を行うことが必要であると、指摘しうる。



図－5 真夏日の日数（4月）

3. 2 温暖化の水質に与える影響

（1）研究の方法

河川・湖沼水質に及ぼす温暖化などの気象変動の影響を定量的に予測する方法を開発し、既往の河川・湖沼水質と気象観測データの統計的解析を行った。統計的手法を用いる場合には、流域特性の経年的な変化、気象要素の相互作用、地球温暖化による気象プロセスの辺か、気候変動の時間スケール、非線形性などの影響が、ある。これらの諸要因を取り上げて、水質への予測の影響を検討した。

（2）温暖化の水質への影響評価

9年間の全国主要27河川における6項目の水質データ（月1回）とアメダス気象データ（日データ）、8～19年間にわたる全国5河川での水温とアメダス気象データ（日データ）等を用いて、気温、降水量、水質との解析を行った結果、以上の諸点が分かった。

- ① 全国河川の解析から、大部分の河川で気温の上昇に伴い、水温、SS、D0飽和度は増加し、D0濃度は減少することが、定量的に予測された。また、降水量の増加により、気温、pHは低下し、BOD、SS、D0濃度は増加することがわかった。表－2は解析結果を夏季と冬季について示したものである。
- ② 気温－D0濃度、D0飽和度の関係は、地域により傾向が異なることがある。
- ③ 降水量の影響（流量でほぼ同じ結果）を取り除いた後でも、気温－水温の傾きは夏季に1.4(℃/℃)と、他の季節に比べて有意に高い。この原因は、夏季では日射量の影響が気温に重なって

るためと考えられ、その大きさは流域特性との関係によって変化すると考えられる。

表-2 27河川における夏と冬の各水質項目の気温と降水量に対する関係

(影を付した部分は有意な相関が見出されなかった関係を示す。太枠で囲った部分は1~3月平均値と7~9月平均値とで差が見出された関係を示す。)

対象項目	項目-項目	冬季 (1~3月)	夏季 (7~9月)
水温	気温-水温(°C/°C)	0.63	1.37
	降水量-水温(°C/(10%))	0.02	-0.13
BOD	気温-BOD(倍/°C)	1.024	1.102
	降水量-BOD(倍/(10%))	0.99	0.98
DO濃度	気温-DO濃度((mg/l)/°C)	-0.24	-0.055
	降水量-DO濃度((mg/l)/(10%))	-0.013	0.026
DO飽和量	気温-DO飽和量((%)/°C)	-0.67	2.1
	降水量-DO飽和量((%)/(10%))	0.026	0.11
SS	気温-SS(倍/°C)	1.14	0.92
	降水量-SS(倍/(10%))	1.02	1.03
pH	気温-pH(1/°C)	0.012	0.082
	降水量-pH(1/(10%))	-0.022	-0.013

3.3 河川流出の影響評価モデルの構築

(1) 流出モデルのレビュー

水資源の影響評価においては、将来予測される降水量の変化をもとに流出量の変化を予測することが必要である。アジア地域における水資源の供給量と水需要量の予測、評価モデルとしてはメッシュタイプの分布型モデルが開発され、適用されてきた(高橋他、2000)。しかし、日本のように狭隘の国土の日本では、水資源量については、より地域特性を考慮した予測評価モデルが必要となる。

そこでまず水資源予測評価に用いることができる流出モデルについてレビューし、日本の流域別に提要しうる流出モデルとして、比較的変数の特定が容易な流出モデルを研究対象として選び改良を行った。

流出モデルは、何を予測対象とするかによって、「ピーク流量算出モデル」と「ハイドログラフ(流出波形)算出モデル」に分類される。さらに、ハイドログラフ算出モデルは、降水量と流出量の応答関係をブラックボックスとして扱う「ブラックボックスモデル」と物理的に扱う「物理モデル」とに分類される。ブラックボックスモデルについては、さらに降水量と流出量の応答関係を線形で設定した「線形モデル」と、貯留の概念を導入し非線形応答関係を設定した「非線形モデル」とに分けられる(図-6、表-3)。

図-6 流出モデルの概要

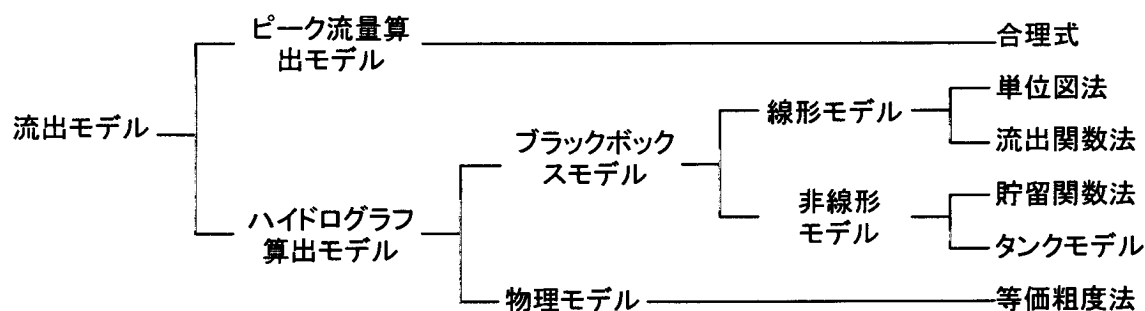


表-3 流出モデルの概要

モデル種	流出現象の捉え方
合理式	流出量は到達時間内雨量に支配されるという仮定の基に、流出量と到達時間内雨量に直線関係を与えている。
単位図法	流量は過去の雨の加重平均であることを表している。
流出関数法	基本的には単位図法と同じであるが、集水到達現象に着目している。
貯留関数法	貯留高と流出高の間に 1 価関係を仮定し、貯留高を媒体変数として降水量を流出高に変換する。
タンクモデル	基本的には貯留関数法と同じであるが、貯留高と流出高の関係に直線関係を仮定しているのが特徴である。
等価粗度法	流域を短傾斜面と見なし斜面における雨水流下現象を水流の運動法則（マニング）と連続の関係を用いて水理学的に追跡するもの。

(2) 流出モデルの構築と検証

本研究では、D. Yates が開発したタンクモデル型の WatBal (An Integrated Water Balance Model for Climate Impact Assessment of River Basin Runoff) を用いた。WatBal は、極力少ないパラメータを用いて、種々の条件に対して計算を実行することを目的として 1994 年に開発されたモデルであり、表計算ソフト上で稼動するマクロプログラムであり、ユーザインターフェースは Visual Basic で開発されている。

このモデルは大きく 2 つのモデル要素から構成されている。ひとつは対象地域に対する水資源の供給と流出に関する部分であり、もうひとつは Priestly-Taylor Radiation Approach を用いた蒸発散に関する部分である。つまり、降水・流出の関係からなる単純なタンクモデルと蒸発散モデルを、対象領域の土壌を介して組み合わせたモデルである。本モデルを水資源データベースと地理情報システムを通じてリンクさせた。本モデルを用いて試算するために、1 流域に適用した。対象流域を図-7 に示した。

1995年1月から1999年12月までの60ヶ月を計算対象期間としてモデルのパラメータの推定を行い、その値をもとに、モデルを構築した。さらに温暖化により気温が1℃から5℃上昇した場合を想定して、シミュレーションの結果得られた予測流量を図-8に示した。冬季(12月から2月)の流出量が増加し、春季(3月から6月)の流出量が減少する傾向が、気温の変化量が大きいほど、強く現れた。夏季から秋季(7月から11月)にかけては、ほとんど変化が見られなかった。

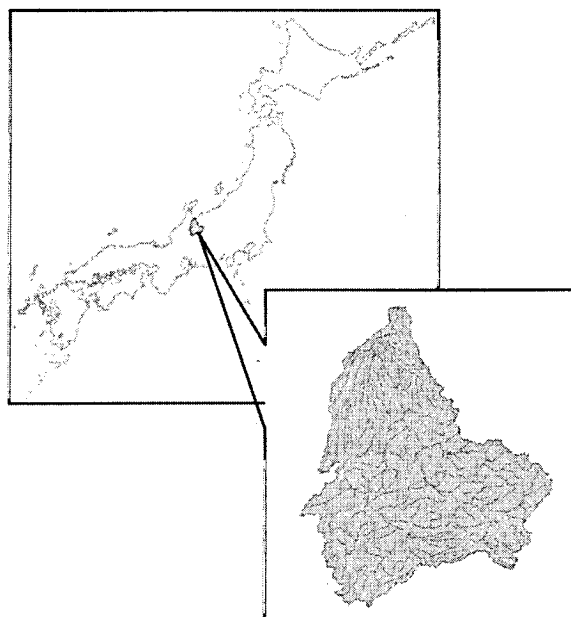


図-7 解析対象流域(神通川)

また、年間の流出総量は、気温が上昇に伴い、若干増加する傾向が見られたが、その範囲は1%から3%程度にとどまり、気温の上昇による影響はほとんど見られなかった。気温の上昇による蒸発散量の増加がうまくモデルに反映されていない可能性が示唆された。

(3) 複数流域への適用と結果

将来気候値として本研究プロジェクトで共通で用いている気候シナリオを用い、かつ適用地点を複数選定して、水資源への影響を検討した。

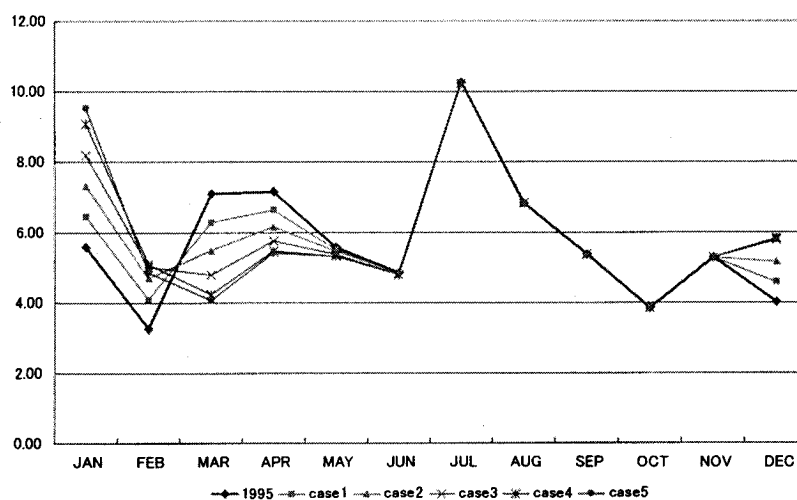


図-8 1～5℃上昇した場合の流量変化の例 (case1: 1℃～case5: 5℃)

対象とした流域は、全国を地方に分け、河川の下流及び河口付近で流量観測が実施されている河川を選択した(流出モデルの予測精度を検証するためには流量データが必要なため)。また、流量データについては、1995～1999年が利用できることから、1995～1997年で流出モデルの係数の決定を行い、1998、1999年の2年間の流量データでフィティングの良さを確認することにした。

図-9が対象とした流域を示したものである。また表-4は各流域の概要をまとめたものである。

図-10は、四万十川について流出モデルの当てはまりの良さを示したものである。すなわち、流出モデルを1995～1997年の実流量データから係数を算定し、その係数を用いた流出モデルを1998、1999年に適用して、実流量との差を比較したものである。ピーク流量に適合度はさほど良くないが、低水流量部分は十分に再現できている。

この流出モデルに、IPCCの気候シナリオを入力条件として計算した。図-11は用いた気候シナリオ(CCSR/NIES)の例である。気候シナリオについては、10年間で平均を算定した上で流出モデルの入力とした。図は気温、降水量の100年間の傾向をみるために平均値をプロットしたものである。

結果の一例を図-12に示した。2020年、2070年で気温が高く、降水量が増大する傾向を示している。予測流量で見ると、30年までは夏季のピーク流量が多く、60年までは、比較的流量が少ない時期が続き、2060年以降は、降水量が増大するのを反映して、流量も変化するが、夏季に集中する傾向から、年間を通じて流量が増大する傾向が見られる。

(4) 今後の課題

温暖化の河川流出量への影響を評価するため、水資源データベースのデータを入力とするタンクモデル型の流出モデルを適用した。対象として8河川では、取水量が多い多摩川以外では、実流量を十分再現できることがわかった。気候シナリオを入力として将来の流量予測か

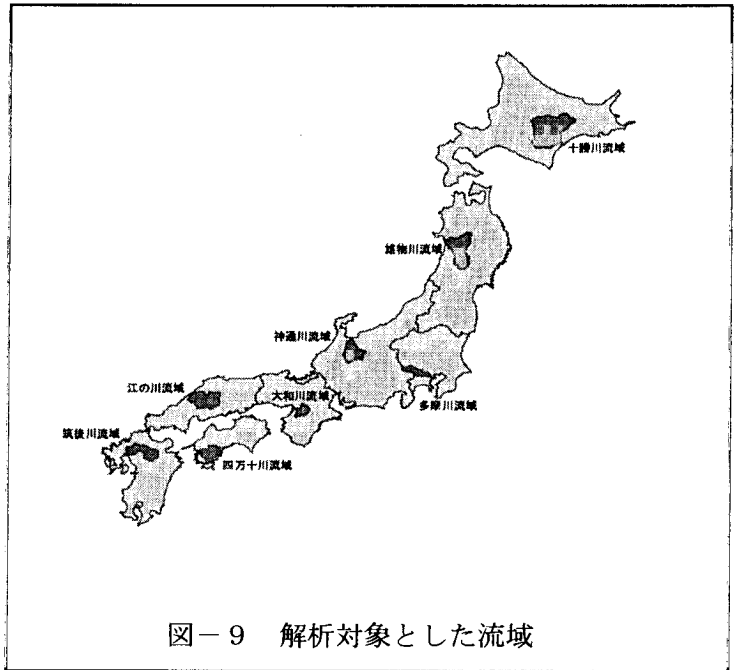


図-9 解析対象とした流域

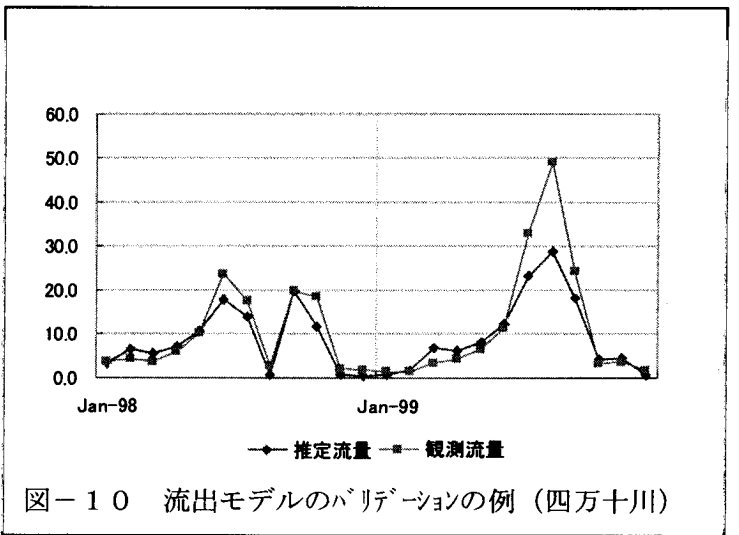


図-10 流出モデルのバリデーションの例(四万十川)

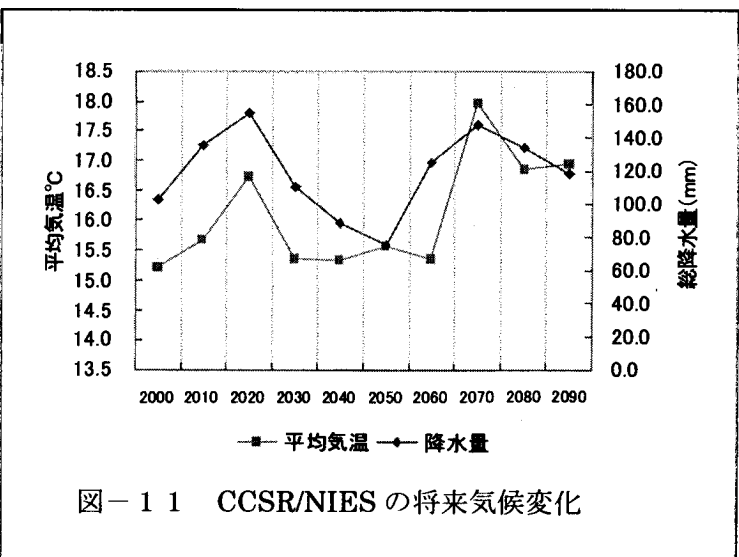


図-11 CCSR/NIESの将来気候変化

らは、降雨量や気温の変動により流量が大きく変化すると予測された。

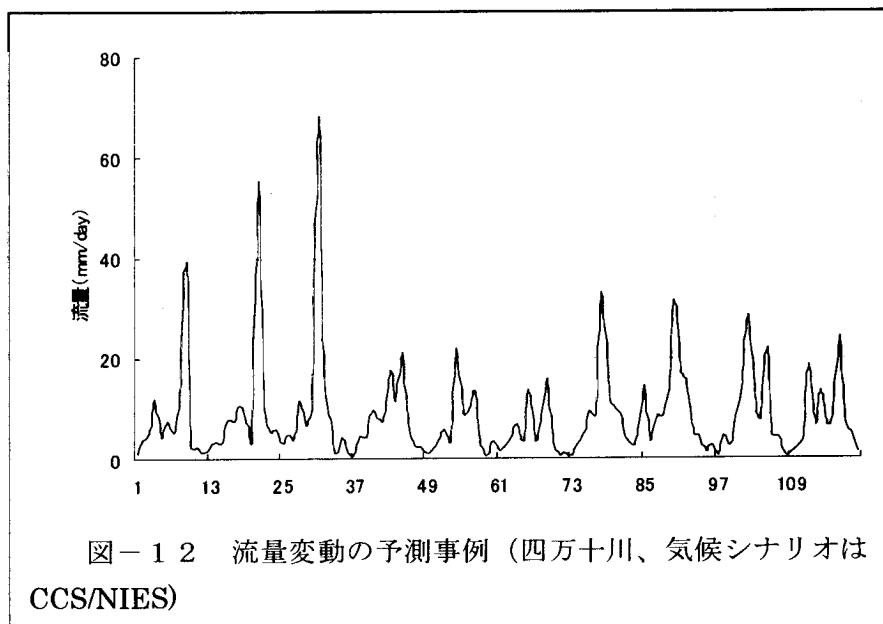


表-4 対象流域の流量観測地点と流域面積

河川名	観測所の河口からの距離(km)	流域面積(km ²)
十勝川	21.0	8276.9
雄物川	13.2	4034.9
多摩川	7.0	1040.0
神通川	28.1	2688.0
大和川	17.0	962.0
江の川	9.1	3807.0
四万十川	9.5	1807.6
筑後川	25.9	2315.0

3.4 降雪の社会経済影響

(1) 温暖化のスキー場への影響

温暖化のスキー場への影響については、スイスアルプスにおける温暖化がスキーリゾートに及ぼす影響についての研究がある。温暖化の水資源への影響の1局面として社会的な活動、特に冬季の主要なレジャー活動であるスキー産業を選び、温暖化がもたらす積雪変化による影響を調べた。

従来、スキー産業に影響を与える因子を明らかにすることを目的とした研究としては、個別のスキー場を対象とし、その変遷を調べることによって、スキー客数に及ぼす影響や、スキー場がその地域の経済に及ぼす影響を調べる調査などがある。これらの研究からスキー客数に及ぼす影響因子として、立地、交通条件、平日か休日、また競合する近郊のスキー場の存在などが挙げられる。またスキー場がその近郊の住民に対して大きな雇用機会になっていることも明らかにされ

ている。一方気象の影響については、積雪の影響が非常に大きいとされながらも、その影響に関しては必ずしも十分定量的に明らかにされているとは言い難い。本研究では、冬季の気温、積雪量の変動がスキー客数にどのような影響を及ぼしているのかを定量的に解析し、また将来温暖化が生じた際、どの程度の規模の影響が生じるかを推測した。

(2) 影響評価に用いたデータ

東北地方6スキー場、近畿地方1スキー場の合計7つのスキー場の索道輸送人員のデータを東北索道協会及びスキー場より入手した(表-5参照)。スキー場における冬の索道輸送人員は、スキーリフトの輸送人員でありこれをスキー客数の指標とした。また、各地点にもっとも近接するAMeDASデータを用いた。AMeDASデータのうち本研究で用いたものは気温、降水量、風速、積雪深である。解析期間は1989~1996年度、Aスキー場のみは1995~1999年度である。

Aスキー場に関しては、スキー場における日別積雪量を入手している。しかし他の東北のスキー場については日別値を入手していない。そこで最近傍のAMeDASデータより積雪深の推定を行った。まずスキー場の最近傍のAMeDASデータにより、気温、降水量、風速の関数として積雪深を測するモデルを構築した。次にそのモデルに基づき、スキー場の積雪深を推定した。推定に際しては気温のみが標高の違いに応じて異なるとし、降水量、風速は対応する最近傍のAMeDAS地点に等しいと仮定した。気温の推定には、一般的な大気の湿潤大気の減率 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ を用い、モデルの構築にあたっては、1988~1997年のデータを用いた。なお、解析の都合上閏年の2/29は省いている。

表-5 解析の対象としたスキー場とアメダスデータの概要

スキー場名	所在地	データ内容	単位	アメダス地点番号	スキー場との直線距離(km)	高度差(m)
八甲田スキー場	青森	月別輸送人員	千人	31482	4.5	71
大鱈スキー場	青森	月別輸送人員	千人	31646	8.5	260
雫石スキー場	岩手	月別輸送人員	千人	33421	6.0	735
リゾートパークオコクハスキー場	宮城	月別輸送人員	千人	34096	8.0	590
猪苗代スキー場	福島	月別輸送人員	千人	36276	1.0	29
会津高原たかつえスキー場	福島	月別輸送人員	千人	36641	14.5	137
Aスキー場	滋賀	日別輸送人員	人	52381	12.0	785

(3) 積雪深の推定方法

積雪深の予測は水量および熱量の収支に基づき行った。ある日の積雪はその前日の積雪と、当日の気温、日照強度、そして降水(=降雨+降雪)が与えられることによって、単位面積あたりの積雪層の水量、熱量の収支は以下のように決まる。

$$W_t(n) = W_t(n-1) + W_p(n) - W_{melt}(n) \quad (\text{水量の収支}) \quad (1)$$

$$Q_t(n) = Q_t(n-1) + Q_s(n) + Q_m(n) - Q_{melt}(n) \quad (\text{熱量の収支}) \quad (2)$$

$$Q_m = R_n + H + LE + Q_p \quad (3)$$

ただし、 W_t : 積雪層の含水量(m) ($=W_{ice}$ (雪氷層) + W_w (積雪層内間隙水))、 W_p : 降水量 ($=W_r$ (降雨量) + W_s (降雪量))、 W_{melt} : 融解による地上浸透量、 n : 暦日、 Q_t : 積雪層の総熱量(cal/m^2)、 Q_s : 新雪の熱量、 Q_m : 融解熱量、 Q_{melt} : 間隙水の流出による消失熱量、 R_n : 放射熱量、 H : 顕熱交換量、 LE : 潜熱交換量、 Q_p 降雨による熱量である。

計算のステップは一日単位とした。また、積雪層は計算を簡単にするために深さ方向に一様であるとしている。すなわち、雪温や圧密度等は、前日までの積雪と、当日の新雪とを平均化したのち翌日の計算ステップに移行する。

降水 W_p は降雨 W_r と降雪 W_s によって構成される。ここでは気温 $4^{\circ}C$ 以上の場合降雨が、 $0^{\circ}C$ 以下の場合降雪が、また $0\sim 4^{\circ}C$ の場合はその温度に比例する割合で降雨と降雪が生じるとした。

積雪層は氷結部分と間隙水の部分とで構成される(間隙水温は $0^{\circ}C$ とした)。融解熱によって融解した水は積雪層に保水される。保水能を越えた水量は地上に浸透するものとする。可能保水量 W_{tMAX} は W_{ice} 、可能保水率 r 、 ρ_s : 積雪層にしめる氷結水の割合(-)を用いて以下のように表される。

$$W_{tMAX} = r \cdot W_{ice} \quad (4)$$

$$r = 0.0015 \rho_s \quad (\rho_s > 0.4)$$

$$= 0.001 \rho_s \quad (\rho_s < 0.4) \quad (5)$$

融解熱量 Q_m は雪氷の温度変化または融解を引き起こす。 $Q_m > 0$ の場合は雪氷の温度を上昇させる。 $0^{\circ}C$ を越えた熱量は雪氷を融解させる。 $Q_m < 0$ の場合は間隙水を再凍結し、それを越えた(負の)熱量は、雪氷の温度を下降させる。

融解熱量の各項目の計算(式(4))は尾崎らの河川熱収支の計算方法とほぼ同様である。ただし表面における短波放射の反射率は河川とは異なるため山崎らの実験式を用いた。

積雪層は日数が経過するごとに、圧密を生じ、積雪層における氷雪の圧密 ρ_s (-) を変化させる。新雪における ρ_s は 0.1、その後の圧密過程は以下のように表されるとした。

$$\rho_s(n) = \rho_s(n-1) \times (1 + W_{ice}/\eta) \quad (6)$$

$$\eta = ((1.08 \times 10^2) \cdot \exp(21.0 \rho_s(n-1))) \quad (7)$$

ただし η : 粘性圧密係数(g/cm)である。積雪層の深さ方向の変化の取り扱いについては、基本的には深さ方向には一様であると思なしたが、この点については実情と大きく異なる点が生じたが、詳細は成果(藤森他、2001)を参照されたい。

以上の計算から、気温、降水量、湿度、風速、緯度、日照時間が与えられると積雪深を算出することができる。ただし、ここに示した諸元のうち湿度は本研究では入手できていない。そこで、各地点で湿度を $0\sim 100\%$ まで 10% 刻みで変化させ、最も実測に近い値を与えるものとして湿度を定めた。フィッティングは不一致日数が最小になるように行った。不一致日数とは、各日の積雪の有無が実測と予測とで一致しない日数である。

(4) スキー客数に影響を与える因子

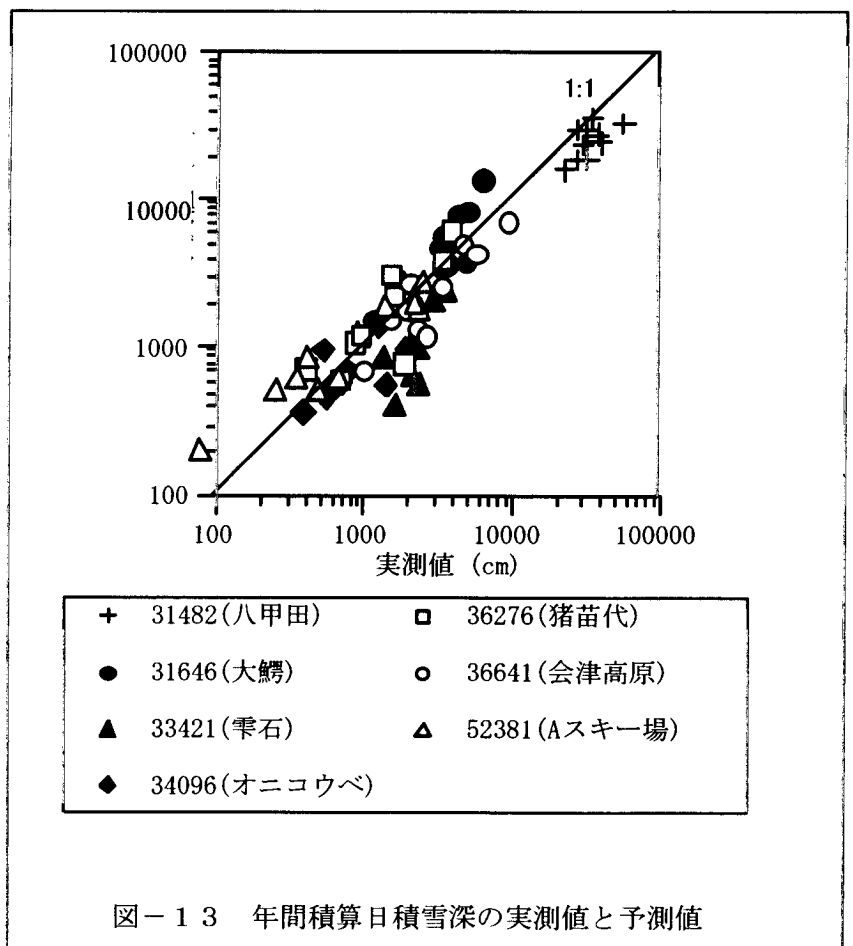
各スキー場の平均的なスキー客数に影響を与える最も基本的な因子としては、スキー場の立地条件(近郊都市とのアクセス性、競合するスキー場の条件)、スキー場そのものの状況(規模や設備状況)がある。また経年的な変動に影響を与える因子としては上記立地条件の経年的な推移に加え、全般的な経済状況、流行(スノーボードなど)、リフト券の価格、降雪器、造雪機の使用状況、そして積雪状況などが考えられる。

本研究における解析の目的は積雪量がスキー客数に及ぼす影響を調べることであるが、実際には影響因子は様々であり、積雪量はそのうちのひとつにすぎない。そこでそれら様々な要因が全国的な傾向にどのように表れているかを全国的なデータに基づいて検討した。スキー人口は最近では減少傾向にあるが、これはスキー産業の成熟とスキー人口の中核をなす若年人口の漸減などが原因と考えられている。そこで1991年までは人口は増加するもののそれ以降直線的に減少していると見なし直線的に補正し、2000年現在の値に指数化した。1991年をピークとしたのは減少傾向がバブル崩壊をきっかけに生じたと考えたからである。

そのほかの影響については、まず立地条件の変化については各スキー場についてその具体的な情報を詳細に確認することはできなかったが、スキー場の客数の推移をみたところ、急激な変化は観察されなかった。スキー場そのものの設備であるが、索道統計によると解析期間内にリフトを新設したスキー場はなく、大幅な変更はないものとした。また、降雪器、造雪機については、研究対象とした各スキー場に直接問い合わせたところ、ひとつのスキー場をのぞいてすべて降雪器を用いていた。その使い方は主に雪質の改善であり、それによる積雪状況の大幅な変化はないと考えられる、とのことであった。以上の考察から積雪深以外の変動が積雪-客数の相関に大きな偏りを生じさせていることはないと思われた。

(5) 積雪層モデルによる積雪深

まず湿度を用いたパラメータフィッティングを、今回適用する7箇所の各アメダス地点において行った。湿度を50~100%まで10%刻みに変化させ、モデルの計算を行い年平均の不一致日数を指標として実測値と比較した。なお、検



討に用いた期間は 1988/09/01～1997/08/31 までとした。積雪シーズンの区切りのはじめは 9 月 1 日とし、そこで区切られる一年間を「シーズン年」と呼ぶことにする。例えば 1988/09/01～1989/08/31 の一年間は 1988「シーズン年」とする。結果より、50～100%の間、平均的には 80、90%の間に極小があること、そして、計算上の積雪深は湿度の上昇とともに下がる傾向であった。これは湿度が蒸発潜熱に大きな影響を与え、湿度の上昇とともに蒸発潜熱が少なくなり、それによる積雪層の温度低下が少なくなるためであった。

この結果から、各地点で不一致日数の極小を与える湿度をその地点での値として採用することとした。全般的な一致の程度をみるために、各地点でシーズン年ごとの一年間の積算日積雪深を集計し、全地点での比較を行った(図-13)。積雪深の多いところから少ないところまで一致の程度はよく、圧密の違いの補正を行わなくとも本モデルはある程度適用可能であると考えられる。そこで本モデルを用い、スキー場での積雪深を予測することとした。

(6) スキー客数の経年的な推移

積雪量と客数の経年的な推移を、八甲田、オニコウベ、猪苗代について、1 シーズン年内の積算日積雪量と総客数との関係をもとめて、両者の関係を示したのが図-14である。積雪深が多い方が客数が増える傾向があるものの、その両対数グラフでの傾きは 1 より小さい。

・A スキー場におけるスキー客数の経日的な推移

スキー客の詳細な動向を検討することを目的として、日単位で実測の積雪深とスキー客数の値が分かっている A スキー場を対象としてその推移を調べた。まずスキー客の動向は

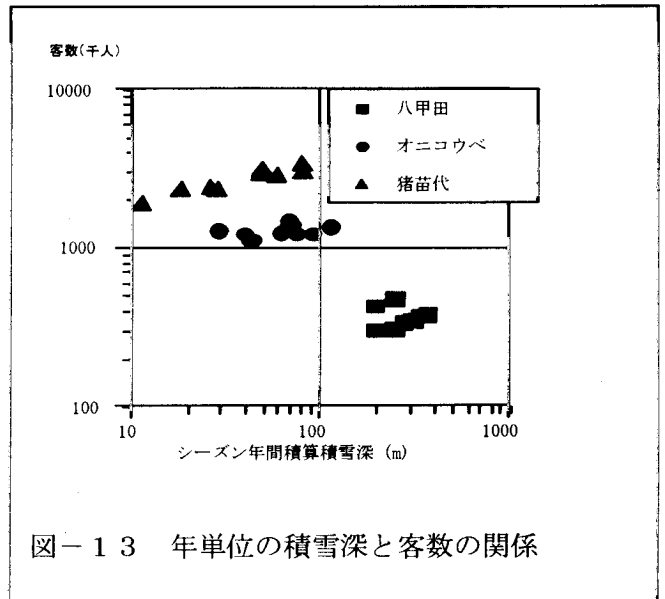


図-13 年単位の積雪深と客数の関係

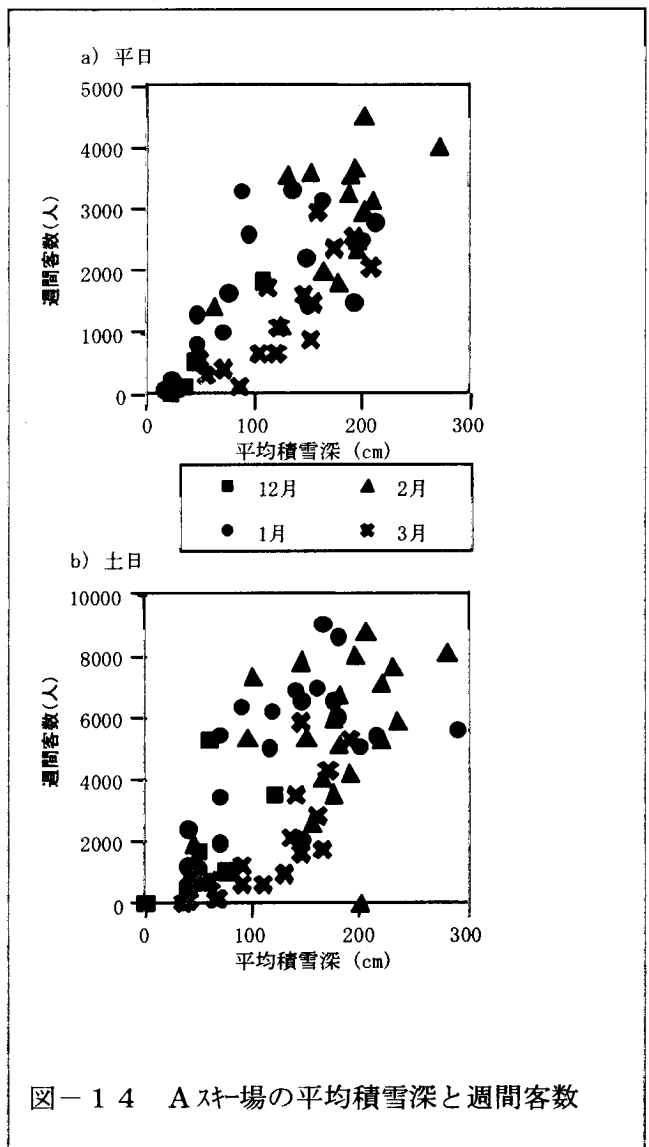


図-14 A スキー場の平均積雪深と週間客数

平日と土日は異なるとして、各一週間の月～金の合計客数と土日の合計客数を別にとった。平日の合計をとる際には祝日を含む週は対象としないこととした。1995年12月1日～1996年4月10日と、翌年の同暦日の結果を図-14に示す。平日、土日ともに積雪深とある程度歩調を合わせるように推移している。しかしシーズンの中程(12月29～2月23日あたり)では積雪深が変化しても客数はそれほど変動していないことが分かる。これはある程度以上積雪が生じている時期には、積雪深が大きいからといってスキー客がスキーに行きたくなる気持ちが強くなる訳ではないからと考えられる。

(7) 積雪深がスキー客数に及ぼす影響のモデル化

積雪深がスキー客数に及ぼす影響を以下のようにモデル化した。ある程度の積雪深まではスキー客数は積雪深に比例して増加し、ある積雪深を超えるとスキー客数は積雪深に依存しなくなる。スキー客数が積雪深に比例する上限の積雪深を「限界積雪深」とする。次に、月あたりの「スキー可能日数」を以下のように定義する。各日の積雪深の、限界積雪深に対する比を計算し、1より小さければその値を、1以上であれば1を、その日のスキー可能性とし、その一月の合計値を「スキー可能日数」とする。1ヶ月を30日とした場合そのすべての日の積雪深が限界積雪深を超えていた場合スキー可能日数は30日となる。あるいは15日が積雪深0、残りが限界積雪量以上の場合、あるいは30日すべてで限界積雪深の半分だった場合、このいずれの場合もスキー可能日数は15日となる。

以上のようにモデル化し、スキー可能日数を定義した場合、月当たりのスキー客数とスキー可能日数との関係はスキー場ごとに直線的な関係になるはずである。まずスキー場ごとの限界積雪深を求めることを目的とし、様々に設定された限界積雪深のもとで、スキー可能日数と月当たりスキー客数との間の相関を計算し相関係数が最大となる限界積雪深を求めた。Aスキー場の結果から平日と休日には一定の関係があると考えられ、また一ヶ月中に含まれる平日と休日の比はおおむね一定だとすれば、以上の仮定はある程度妥当であると考えたためである(年末年始を含む12、1月は他の月と異なる傾向を持つと考えられたが、結果として、明らかな違いは見いださなかったので相関の計算は一括して行うこととした)。結果を見ると霰石のように明確な極値を持つものがあるが、そうでないものもある。これらは月平均値を用いているために明確な傾向を見出せなかった可能性がある。或いはスキー場によっては仮定が妥当でない可能性もあり、個別のスキー場の詳細な検討は今後課題とすべき問題である。

ここで以上のモデルに基づき積雪深の変化から客数を予測し実測と比較することを試みた。得られた最適値のもと計算されたスキー可能日数と月当たりの合計客数との関係の例を図-15に示す。大まかには両者には比例関係がみられる。ここで回帰直線の傾きは積雪深によって決まるそのスキー場の最大の日当たり客数を意味している。この傾きの値を以降、「限界客数」と呼ぶ。以上の計算によって得られた予測積雪深、限界積雪深、限界客数を用い年間スキー客数を推定し、予測客数と実測客数との関係を図-16に示した。場所によってその一致の程度は異なり、例えば猪苗代などはよい傾向の一致を見いだしたが、八甲田のようにほぼ一定の予測なったものもあった。八甲田のように予測値がほぼ一定となり実測値が変動したのは、積雪以外の因子によってスキー客数が決まっているためであると考えられる。全般的には、必ずしも高い精度ではないが、ある程度は積雪に対する依存性を示せたといえる。

(8) 気温が上昇した際の客数の変動予測

本研究のモデルを用い気温が上昇した際の客数の変動を推定する。本モデルにおける1988~1997シーズンの予測客数の計算結果のセットを現状値と見なし、その年平均値(図-22における各スキー場の予測客数の平均値に相当する)を計算する。それに基づき毎日の平均気温のみが1℃上昇したとしたとして計算を行い、その計算結果を1℃上昇した際の予測客数としその年平均客数を計算する。これを各スキー場で1~5℃まで1℃刻みで変化させ計算し、現状値との比率で指数化した結果を図-17に示す。スキー場ごとに影響が大きく異なること、気温の上昇に対して直線的に客数が減少しないことなどが結果から分かる。八甲田、雫石は相対的に変動幅が少ない。これらのスキー場はもともと積雪深が大きく、ある程度気温が上昇しても限界積雪深を下回ることが少ないためであると考えられる。一方そのほかのスキー場では、1、2℃の気温上昇でも10~50%も客数が減少しておりスキー場によってその影響が大きく異なることが分かる。温暖化によって気温は長期的には1℃から3℃程度まで上昇すると言われており、スキー場によっては温暖化の影響が甚大であることが、この結果からも分かる。

(9) 得られた結果のまとめと今後の課題

温暖化によって変化する積雪量に着目すると、積雪深の変化による植生への影響、降雪が減少することによる水資源への影響、さらに積雪に依存している産業への影響が考えられる。とくに直接的な影響を及ぼすスキー場への影響について検討した。降雪変化の将来予測については本プロジェクトで共通に使用する予測値(積雪シナリオ、農業環境技術研究所作成)があるが、これをもとに水量及び熱量の収支を用いて積雪量を予測する方法を考案した。予測積雪量は実測積雪量とスキーシーズンではよく一致した。各年単位のスキーシーズン(冬季)の積算積雪量と輸送人員の関係より、規模が大きくコース数

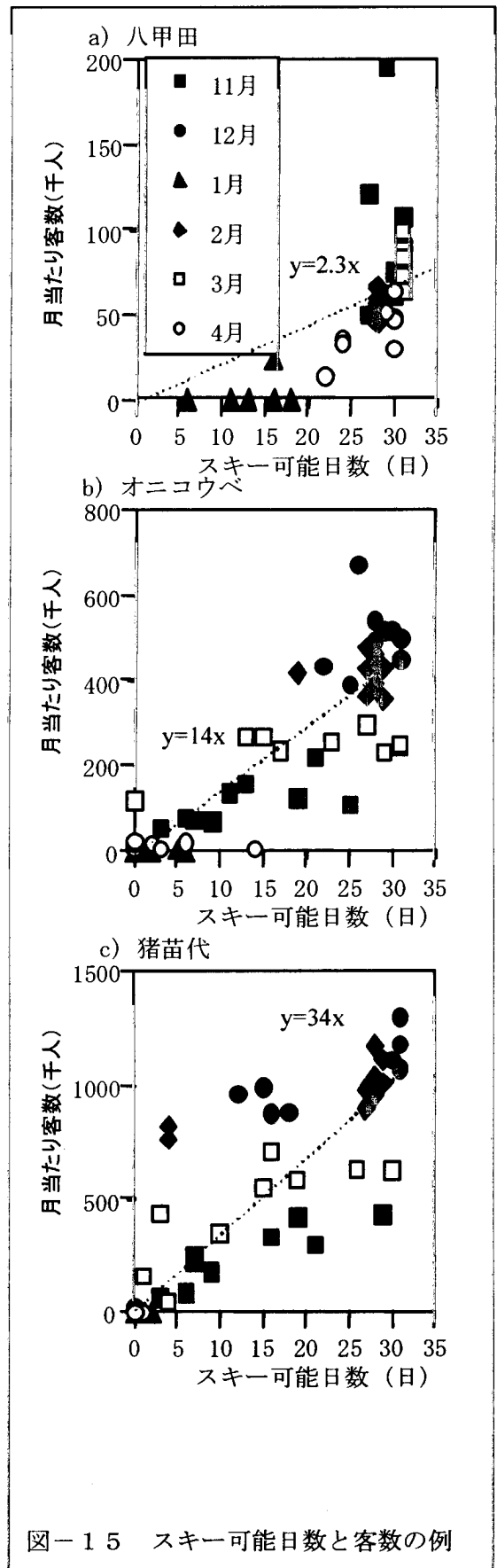


図-15 スキー可能日数と客数の例

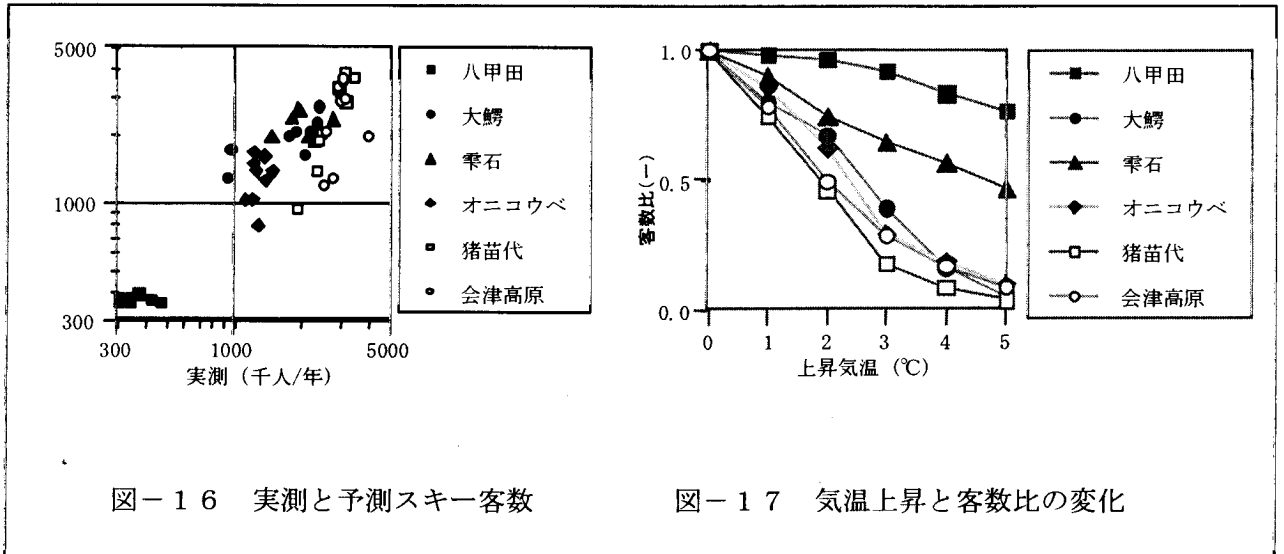


図-16 実測と予測スキー客数

図-17 気温上昇と客数比の変化

が多いスキー場では、シーズン積算積雪量と輸送人員の相関が見られることから、この関係を定式化した。この関係を用いて平均気温が3℃上昇した場合には、スキー場でスキー客数が3割程度減少すると予測された。

本研究は気象条件がスキー客数にどのような影響を及ぼすかを調べたものである。その基本的な考え方を示したものと考えているが、まだ十分考察できなかった点も多い。積雪に関しては積雪深の精度が十分とは言い難い。この点に関しては雪質を考慮することで改善を図りたいと考えている。スキー客数に関しては、月ごとの特性を十分考慮できていない、スキー場相互の関連を考慮していないという問題点がある。また、将来予測に関しては短期的な変動も考慮した客数の変動予測、また経済的な影響評価などを行う必要があろう。

[国際共同研究等の状況]

とくになし

[研究成果の発表]

(1) 誌上発表

①尾崎則篤・小野美由紀・福島武彦・原沢英夫:土木学会論文集, No. 629, 97-109 (1999)

「気象変動の河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究」

②福島武彦・尾崎則篤・河嶋克典・原沢英夫・小尻利治:京都大学防災研究所年報 (1999)

「地球温暖化等の気象変動が河川・湖沼水質に及ぼす影響の統計的解析」

③Fukushima, T., N. Ozaki, H. Kaminishi, H. Harasawa, and K. Matsushige: Hydrological Process, 14, 593-604 (2000)

"Forecasting the changes in lake water quality in response to climate changes, using past relationships between meteorological conditions and water quality"

④尾崎則篤・福島武彦・原沢英夫・小尻利治・河嶋克典:土木学会論文集, No. 678/VII-19, 93-103 (2001)

「異なる時間スケールの気温, 降水量, 及び日射量の変動が河川水質に及ぼす影響」

(2) 口頭発表

- ①尾崎則篤・福島武彦・原沢英夫・小尻利治：平成11年度水資源セミナー講演集，46-66（1999）
「地球温暖化等の気象変動が河川・湖沼水質に及ぼす影響」
- ②福島武彦・尾崎則篤・河嶋克典・原沢英夫・小尻利治9：平成11年度京都大学防災研究所研究発表講演会（1999）
「地球温暖化等の気象変動が河川・湖沼水質に及ぼす影響の統計的解析」
- ③藤森裕介・尾崎則篤・福島武彦・原沢英夫：第29回環境システム研究論文発表会講演論文集，323-330（2001）
「気温・降水量変化がレジャー産業に及ぼす影響—スキー場への影響予測事例—」
- ④原沢英夫：気候影響利用研究会ワークショップ予稿集，国立環境研究所，20-23（2001）
「地球温暖化の日本への影響 全体像」

とくになし。

（3）出願特許、受賞等

とくになし。

（4）受賞等

とくになし。

（5）一般への公表・報道等

とくになし。