

地球温暖化による流域水資源・生態への影響評価

小尻利治・浜口俊雄・大出真理子*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、GCMデータを使用し、気象・水文学的側面、水資源工学的側面に関して、分布型流出モデルを用いて流域内の各項目を評価することで、流域での温暖化影響評価を行った。結果として、対象流域においては、降水量、河川流量は、夏期において著しく増加し全体的に増加、気温、水温、蒸発散量は、年中通して上昇、増加、積雪、融雪は減少、消雪時期の早期化(約1ヶ月)、生態系(魚類)は適性度変化、農作物、植生は適性度変化(作物種の変更や品種改良の必要性)、ということが示唆された。

キーワード：地球温暖化、分布型モデル、GCM

1. はじめに

近年、異常気象等とともに、地球温暖化の進行やその影響、対策が大きく取り上げられるようになってきている。また、温暖化の研究に関して、GCMを用いた研究が増えてきている。これから GCM がより詳細になっていくことや、水資源評価の視点を流域単位で考えるようになってきていることを考えても、GCM 出力を流域単位で用いて温暖化評価をすることは重要であるといえる。

そこで本研究では、入手可能な GCM 出力を利用して、時の水量解析を中心とし、洪水発生特性や水質悪化については検討しない。

ここで、地球温暖化に関する研究項目をまとめると、以下ようになる。

【気象・水文学的側面】：

- ・地球温暖化の実態把握とその将来予測(GCM 等の情報を利用して)
- ・気象、水文情報(気温、気圧、降水量等)の時空間的予測
- ・積雪・融雪を含む流出量の時空間的把握
- ・蒸発散量の時空間的予測
- ・河川水の量的、質的予測(水量、水温、水質等)
- ・土壌特性(保水・浸透能力、土壌生態等)の変化予測
- ・地下水分布の予測

- ・植生、生態系の変動(種の適性度の変化、最適種の変動)把握
- ・生物季節、花粉飛散等気象関連性の大きい要素の変化予測

【河川、水資源工学的側面】：

- ・洪水頻度、規模、計画降雨の推定
- ・渇水頻度、利水安全度の推定
- ・融雪洪水の予測
- ・ダム貯水池の貯留特性(流入量、貯留可能量、放流量等)の変化
- ・取水地点での水量、水質変化、需要量変化
- ・都市用水など水利用・配水形態の変化
- ・作付け時期、品種などの農業形態の変化
- ・親水効果などの水利用方法、水辺環境の変化
- ・地球全体での水動態予測
- ・水資源システムの運用形態の改善

本研究では、上記のような気象・水文学的側面、水資源工学的側面に関して、分布型流出モデルを用いた流域での変化特性を把握しようとするものである。

2. 地球温暖化による流域環境への影響評価手順

解析手順としては、Fig.1 に示すように、多層メッ

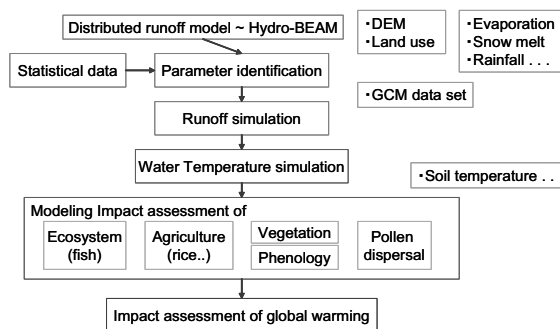


Fig. 1 Analysis method

シユ分布型の流出モデルを作成する。次に過去のデータを用いて、透水係数などのパラメータ同定を行う。部分流域ごとに分割同定が望ましいが、入手し得る観測データに応じて決める。水田での水消費、取水・放水操作方法をモデル化し、流域全体の水利用モデルを作成する。一方、GCMデータについては、温暖化前後の降水量、気温分布を整理する。ここでは、CGCM2の結果(気象庁, 2003)を利用して、時空間的な配分方法を検討(ダウンスケール)した後に入力データとして扱うこととする。モデルによって得られた結果に関しては、流量・水温等の時空間分布を基に、農業や都市用水に関する利水安全度の変化や生態系等の変動について検討を加える。

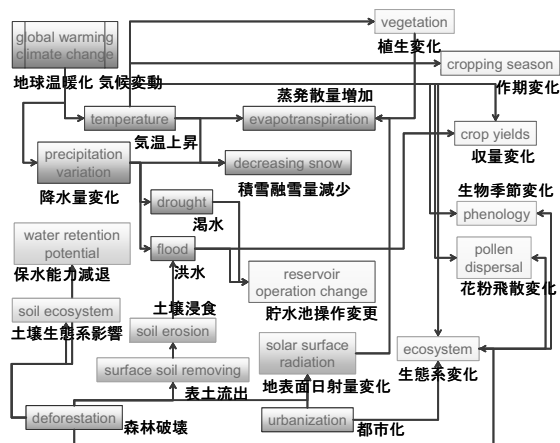


Fig. 2 Interrelation of global warming impacts

ここで、Fig.2 は地球温暖化による影響、都市化や森林破壊による影響について、水文・気象関連性の高いものから関係性を示したものである。地球温暖化の直接的影響として、まず気象要素(気温、気圧、降水量等)が時空間的に変化する。そして、積雪・融雪や、蒸発散量の増減、降水量変化により、流出量や、水資源分布が時空間的に変化する。それに伴い、洪水、渇水対策や、貯水池操作変更の必要性が生じてくる。このとき、河川水は量的変化だけでなく、水

温、水質等、質的变化をする。また、気象要素の変化は植生、生態系の変動(種の適性度の変化、最適種の変動)、生物季節、花粉飛散等気象関連性の大きい要素の変化にも関連し、河川水の量的・質的变化もまた、生態系へ影響を及ぼす。その他にも、温暖化と並行して起こり得る、都市化や森林破壊により、土壌系の状態悪化や、それに伴う洪水等の危険性増大、生態系影響もまた、今後考慮すべき点である。

Fig.3 は、各項目をグループ化した後、関連性を示したものであり、グループ内外の相互関係を簡単に捕らえることができるようにまとめたものである。

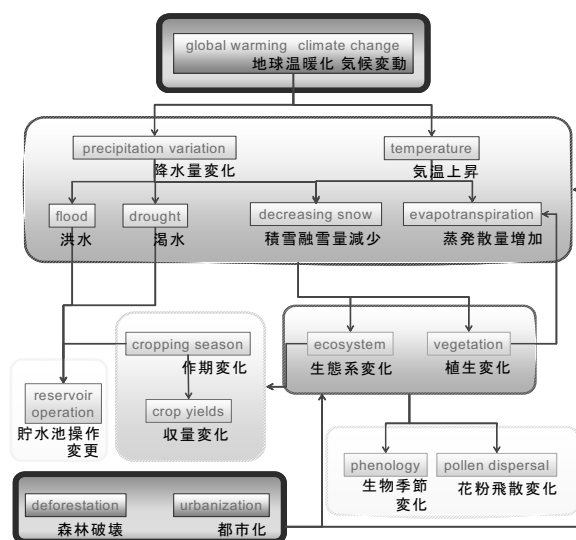


Fig. 3 Structure of global warming impacts

3. 分布型流出モデルの構成

3.1 Hydro-BEAMの基本構成

本研究では、平面構造としてメッシュ型モデルを、鉛直構造として多層型モデルを用いて、流域特性を3次元的に表現したメッシュ型多層流出モデルを適用する(Fig.4)。鉛直構造はA～Dの4層を設定しており、A～C層の水平流出量は河川に流入し、D層は河川流量には影響を及ぼさない地下水層とする。また、湛水深を満たすように行われるという農業従事者の

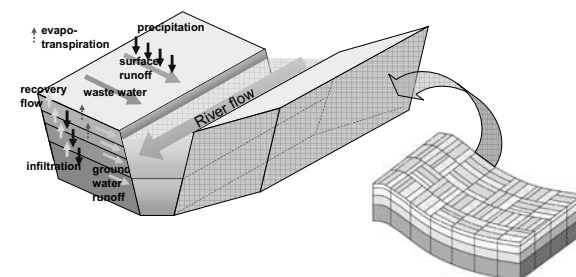


Fig. 4 Pattern diagram of Hydro-BEAM

水田では河川からの灌漑用水の取水が、必要な維持操作方策を組み込み、地下浸透、用水路流出、畦畔越流として流出する。さらに、大気-土壌間の水移動として蒸発散を考慮し、積雪・融雪についても考慮する。河川では、下水処理場からの放水や、上水道用水のための取水が行われている。

以上で記した分布型流出モデルは、Hydro-BEAM (Hydrological River Basin Environment Assessment Model)(小尻ら, 1998)と称されており、改良・改変が加えられてきている。以下では、本研究で用いるモデル構成の詳細について説明する。

3.2 蒸発散過程

本研究では、入手した GCM データについては、風速、大気圧、水蒸気圧、日照時間が与えられておらず、平均気温と日照時間から蒸発散能すなわち、可能最大蒸発散量(potential evapotranspiration)を与える Thornthwaite 式を用いることとする(土木学会, 1985)。これは、時間変化や種々の土地利用下における詳細な蒸発散量の算定には地表面まわりの熱収支で求めているため不向きであるが、限られた気象項目資料からその量を求めることができるので、データの不十分な広い地域からの長期的推定にはよく用いられている。なお Hydro-BEAM ではその熱収支から蒸発散量を定めて算出する機構も有しているので、場合によって算出方法を使い分けることができる。

ところで可能最大蒸発散量は実蒸発散量と異なる値を示す。実際の蒸発散量を推定するためには経験的に求められている月別、もしくは、季節別の補正係数、つまり蒸発散比(蒸発係数)がある。ただし、ここでは月、年単位での水収支がバランスするような係数を使用する。以下、Thornthwaite 法の条件、仮定、計算手法を示す。

(1) 条件・仮定

入力データとして、各月の月平均気温を与え、蒸発散量はメッシュ毎に月単位で計算する。

(2) 計算手法

Thornthwaite 式を用いて可能蒸発散量を算出した後に、水蒸気有効パラメータ M を乗じて、実蒸発散量に換算するものとする。

$$E_p = 0.553D_0(10T_i/J)^a \quad (1)$$

$$a = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.049293 \quad (2)$$

$$J = \sum_{i=1}^{12} (T_i/5)^{1.514} \quad (3)$$

$$E_a = M \cdot E_p \quad (4)$$

ここに、 E_p : i 月の日平均蒸発散能 mmd^{-1} 、 D_0 : 可照時間-(h/12h)、 J : 熱指数、 T_i : i 月の月平均気温 $^{\circ}\text{C}$ 、 E_a : i 月の日平均実蒸発散量 mmd^{-1} 、 M : 水蒸気有効パラメータ である。

可照時間については北緯 36° の値を参照する。また、水蒸気有効パラメータ M は、解析期間の水収支のバランスを見て決定する。

なお、各観測エリアにおける月別平均気温のうち氷点下を記録した場合の扱いについては、当該月の蒸発散量は無視し得るものと見なして計算を行う。

3.3 積雪・融雪過程

従来の積雪・融雪モデルは、熱収支法によるものと、回帰式や Degree-Day 法など経験式を用いるものに大別できる。

本研究では、降雨から融雪までを連続的に捉えるような積雪・融雪モデル(小笠原, 2001; 近藤・沼田, 1988)を展開し、融雪量計算において Degree-Day 法を使用する。ここでは、Degree-Day 法を時間単位で適用することによって、時間融雪量を推定する。

(1) 条件・仮定

メッシュごとに時間単位で積雪量・融雪量を求める。各メッシュの気温は、観測地点と各メッシュの標高差と高度補正係数、気温減率を用いて算定する。また、各メッシュの降水量は、降雨量、降雪量別の高度補正係数を用いて算定する。また、積雪層は単層とする。

(2) 計算手法

(a) 積雪パラメータの算定

時間内に降った降水が雪であるか雨であるかは気温 2°C を基準として判別する。

(b) 積雪の圧密過程

積雪の圧密過程は、圧縮粘性係数を用いて次式で表される。

$$\tilde{\rho}_s = \rho_s + \frac{\sigma}{\eta} \rho_s \Delta t \quad (5)$$

$$\eta = 3.44 \times 10^6 \cdot \exp(0.0253\rho_s - 0.0958T_s) \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(W_{EQ} + W_C)g \quad (7)$$

ここに、 g : 重力加速度 9.8066ms^{-2} 、 σ : 積雪層への荷重 Pa、 η : 圧縮粘性係数 Pas、 Δt : 単位時間 s である。これより、積雪深は、次式で表される。

$$H_{ss} = \frac{W_{EQ}}{\rho_s} \quad (8)$$

ここに H_{ss} : 積雪深 mm である。

(c) 融雪過程

融雪量の計算には Degree-Day 法を時間単位で用い、

次式で表される。

$$M = M_f \sum_{T_s > 0} T_s \quad (9)$$

ここに、 M_f : 融雪係数 $0.25 \text{ mmh}^{-1}\text{C}^{-1}$ 、 M : 融雪量 mmh^{-1} である。融雪過程において可能保水量を超えた融雪水は地中へと浸透する。

3.4 水田流出過程

水田域について、地表面およびA層は水田タンクモデルとして扱う。上段タンクは水田の地表部と考え、上方流出孔は畦畔越流を、下方流出孔は落水口からの流出および畦畔浸透を、さらに浸透孔は水田からの鉛直浸透を表すものとみなす。

タンク構造は、維持湛水深(DPD, Desired Ponding depth)という考え方を採用し、表面タンクを実際の水田と見立て、水田の管理状況から決定される必要水深を維持湛水深とする。水田における用水量はこの維持湛水深を満足するための補給量として考える。

3.5 表面流・土層内浸透・河川流下過程

地表面およびA層については畑地、山林、市街地の土地利用別に集中化し、水域は流域面積から除外する。水田からの流出は、3.4節で求めたものとする。地表面およびA層はkinematic wave法で、B～D層は、線形貯留法で水量を追跡し、各層の貯留水量が層厚に達し飽和状態になると、溢水量は上層に復帰流として流入する。河川流は下水道や用水路と同様にkinematic wave法を用いる。3.2節で求めた蒸発散量は、A層から差し引き、A層の水量がゼロのときはB層から、さらにB層の水量がゼロのときはC層から差し引くこととする。基礎式に関しては小尻他(1998)を参照されたい。

3.6 水温移流過程

(1) 地中水温度推定過程

各層から流出する地下水温は、地中温度に等しいとする。このとき、深さ $z(\text{m})$ 地点での地中水温は、次式で表される。

$$\theta_g = \bar{\theta}_0 + D e^{-z\sqrt{\pi/\chi T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - z\sqrt{\frac{\pi}{\chi T}}\right) \quad (10)$$

ここに、 θ_g : 地中水温 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\bar{\theta}_0$: 年平衡水温 $^{\circ}\text{C}$ 、 D : 地表面温度 T_s の時系列変化を正弦関数に近似したときの振幅、 T : 周期 365 日、 χ : 地中での熱の拡散率 $0.04\text{m}^2\text{d}^{-1}$ である。

(2) 都市水温度推定過程

都市から流出し下水道(雨水管)に流入する水は非常に流出速度が速く、あまり外界からの影響を受け

ないため、降雨温度と等しいとする。また降雨温度は一般的に湿球温度にほぼ等しいと言える。湿球温度は、既知の乾球温度(気温)と水蒸気圧を用いて、次式で表される乾湿計公式と、式(12)を連立して求める。

$$e_{sat}(T_w) - e = B(T - T_w) \quad (11)$$

ここに、 T_w : 湿球温度 $^{\circ}\text{C}$ 、 T : 乾球温度(気温) $^{\circ}\text{C}$ 、 e : 水蒸気圧 hPa 、 B : 乾湿計定数 0.667hPaK^{-1} 、 e_{sat} : 湿球温度に対する飽和水蒸気圧 hPa である。

$$e_{sat}(T_w) = 6.1078 \times 10^{aT_w/(b+T_w)} \quad (12)$$

$$a = 7.5, \quad b = 273.3$$

ここで得られた温度をもつ降水と汚水が下水道流として河川へと流入する。一方、汚水のうち、下水処理場を経て、河川に流入するものは、それぞれの下水処理場の実測放流水温を用いる。

(3) 水田水温度推定過程

水田における熱収支の要素として、降雨、大気、河川からの灌漑用水がある。水面での大気との熱収支は、蒸発散過程で述べた熱収支法を応用して次式で算定する。

$$H_0 = R\downarrow - H - iE$$

$$= (1 - r_{ef})S\downarrow + L\downarrow - H - iE - \sigma\theta_s^4 \quad (13)$$

ここに、 H_0 : 単位面積あたりの水面熱収支量 Wm^{-2} 、 $R\downarrow$: 正味放射量、 H : 顕熱輸送量 Wm^{-2} 、 iE : 潜熱輸送量 Wm^{-2} 、 r_{ef} : アルベド、 $S\downarrow$: 全日射量、 $L\downarrow$: 長波放射量 Wm^{-2} 、 σ : ステファン・ボルツマン定数 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ 、 θ_s : 水田水温 K である。また、河川からの灌漑用水温度は、取水地点の河川温度を用いる。つまり、灌漑用水が取水地点から水田に至る間の熱収支は無視できると見なす。

(4) 河川水温度推定過程

河川水温に影響を及ぼす要素として、水面熱収支、表面流、A～C層流、用水路流、下水道流、下水処理場からの放水を考えるものとする。

まず、基礎式を次式で与える(新井・西沢, 1974)。

$$c\rho D\left(\frac{\partial\theta_{riv}}{\partial t}\right) = H_0 + \frac{c\rho}{A} \sum_i q_i(\theta_i - \theta_{riv}) \quad (14)$$

ここに、 c : 比熱 $1.0\text{cal g}^{-1}\text{C}^{-1}$ 、 ρ : 水の密度 $1.0 \times 10^6\text{gm}^{-3}$ 、 D : 平均水深 m 、 θ_{riv} : 河川水温 $^{\circ}\text{C}$ 、 H_0 : 単位面積あたりの水面熱収支量 $\text{cal m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 A : 水面積 m^2 、 q_i : 流入流量 m^3s^{-1} 、 θ_i : 流入水温 $^{\circ}\text{C}$ である。右辺第1項は、水田水温度推定過程で述べた手法で求めるものとし、右辺第2項の流入要素としては、地表面下(A～C層)からの浸出水、表面流、下水道、用水路、下水処理場が挙げられる。A～C層の層別水温については、その位置から流入する地中水について地中水温度推定過程で求めた水温を層ごとに平均したものを流入水温とする。

4. 評価項目の設定

温暖化の評価項目には水量・水文的要素のほかに、関連要素として生態系要素、農業等生活関連要素が考えられる。生態系評価項目としては、動物、植物が考えられる。ここでは動物系項目として魚類生態と生物季節を、植物系項目として植生、生物季節ならびに花粉飛散を取り上げる。また、農業系項目として水稻とその他農作物(野菜類)を取り上げる。

4.1 生態(魚類)評価過程

水辺動物の代表格である魚類は、その生息域が水温、水質、地形等の様々な要素によって評価可能である。本研究では、瀬、淵等の微地形は考慮せず、水温と標高によって生息域評価を行うものとする。また、水質は将来の予測に不確定要素が多いことから取り扱わないこととする。

評価方法は、ファジイ理論を用いて種類毎に生息適性を評価する(黒田, 1998)というものであり、これを次式に示す。

$$\ln_{fi} = T_i(x)G_i(x) \quad (15)$$

ここに、 $\ln_{fi}$: サンプル i の生息適性度、 $T_i(x)$: サンプル i の水温に関する生息適性度、 $G_i(x)$: サンプル i の標高(地形)に関する生息適性度である。

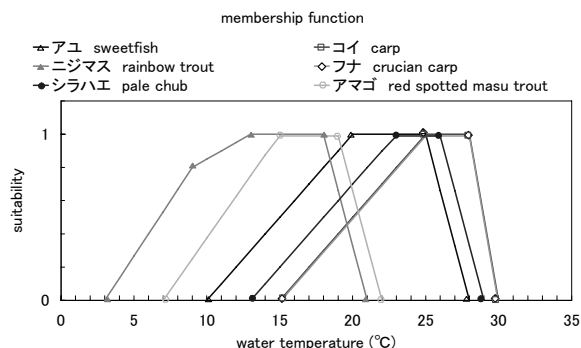


Fig. 5 Membership function (water temp.)

4.2 生物季節評価過程

気象要素と密接に関係しているとされる生物現象を、一般的に生物季節と呼び、これは全国の気象台等で観測されている。気象と関係性が高いということで、温暖化とも関係性が高い項目といえる。ここでは、桜の開花をはじめとする生物季節について、評価方法があるもの(桜開花時期)についてはその方法も使用し、その他については気温との相関が高いものについて統計的処理を行うこととする。以下にその方法を示す。

(1) 統計的推定方法

まず、データの存在する 1953 年～2004 年の全国データについて、120 項目ある各現象に対して気温要素とその現象が起こった日(現象発生日)との相関係数、二乗平均平方根誤差を調べ、相関性の高い現象 30 項目(相関係数の絶対値 0.7 以上)について、線形近似式、または累乗近似式を導出する。続いて、導出された近似式に従って、流域内における各現象発生日を推定する。

(2) 桜開花時期推定方法

桜開花時期には、一般的に 1 月からの積算(日平均)気温 600℃という目安があり、これも推定方法の一つとして利用する。また、前述の統計的推定方法も使用する。その他にも、温度変換日数法(DTS)などの方法があるが、ここでは全国的に地点間で異なるパラメータやデータ量の関係から取り扱わないこととする。

4.3 植生評価過程

日本における植生は、暖かさ指数(warmth index, WI)と、寒さ指数(coldness index, CI)を用いて、5 タイプに大別される。WI, CI は、それぞれ月平均気温が 5℃以上、5℃以下となる月の年間合計値(積算月平均気温)である。沖縄等最も温暖な地域には亜熱帯林が分布し、亜熱帯常緑樹林帯に区分される。西日本から東海・関東までの温暖な地域は、照葉樹林帯に区分され、湿潤を好むものから乾燥を好むものまで様々な樹種によって構成される。また、中部地方の内陸山間部では、WI だけ見ると照葉樹が生える条件を満たしているのに、落葉広葉樹や針葉樹が広がる地域があり、暖帯落葉樹林帯または中間体と呼ばれる。さらに、西日本から東北にかけての山地ならびに北海道南部には温帯落葉樹林帯が、北海道東部や北部には常緑針葉樹林帯(亜寒帯)が広がっている。

本研究では、植生が WI, CI によって評価できるとし、メッシュ毎に WI, CI を用いて植生帯を推定することとする。このとき適性度を用い、これを次式で表す。

$$\ln_{fi} = W_i(x) \cdot C_i(x) \quad (16)$$

ここに、 $\ln_{fi}$: 植生帯 i の生産適性度、 $W_i(x)$: サンプル i の WI に関する適性度(0-1)、 $C_i(x)$: サンプル i の CI に関する適性度(0-1)である。

4.4 生態(花粉飛散)評価過程

近年、花粉症患者は全国で約 2000 万人とも推定されて折り、年々増加傾向にあるという現状がある。花粉症の原因となるのはスギをはじめ、ヒノキやマツ、イネ科など様々な種の花粉であるが、最も患者数が多く、関心が高いのがスギ花粉である。したが

って、本研究では、スギ花粉を取り上げることとする。スギ花粉飛散予測には、総飛散量予測、飛散開始日予測、日花粉飛散量などがあるが、飛散量に関しては、スギの雄花数が非常に強く関係しており、年度によっても大きく異なる現状があることから、ここでは取り扱わない。飛散開始日の予測手法は、従来から1月1日を起因日とする積算気温が用いられているが、地域によってその差は大きく、雄花の休眠打破を考慮する必要性(平, 1993)や、高度分布を考慮する必要性があるといわれている。ここに休眠とは、水分・温度等の環境条件が発育に好適でも生理的要因により発育できない状態のことをいう。金指他(2002)によれば、スギでは休眠打破に必要な温度範囲は 0℃～8℃(または、～10℃、～12℃)であり、この温度条件が5週間続くと休眠の完全打破に至る。また、開花に至るのに要する有効積算温度は 200～240℃d(または、140～260℃d)とされ、その幅は広いのが現状である。

本研究ではデータが少ないこともあり、従来からの方法と、休眠打破を考慮する方法の両方を検討することとする。

4.5 農業・農作物評価過程

農業は気候の影響を最も受けやすい産業の一つである。適切な場所に適切な農作物を、適切な方法で栽培することは、品種改良や農薬問題等と共に重要な事柄である。本研究では流域内での農作物の適性の推移等を推定するため、温度要求度や作期などを用いて評価することとする。

(1) 温度要求度

農作物の気候適性判断材料として、温度要求度というものがある。これは、日平均気温 10℃以上の年積算値(積算日平均気温) $\Sigma T_{10℃}$ によって表され、農作物の種によって異なる値を示すものである。

農作物の適性の評価方法は、上記の温度要求度を用いて種類毎に生産適性を評価するというものであり、これを次式に示す。

$$\ln_{ci} = T_i(x)D_i(x) \quad (17)$$

ここに、 $\ln_{ci}$ ：農作物 i の生産適性度、 $T_i(x)$ ：サンプル i の $\Sigma T_{10℃}$ に関する適性度(0-1)、 $D_i(x)$ ：サンプル i の $\Sigma T_{10℃}$ 日数に関する適性度(0-1)である。

(2) 水稲作期と活着水温

日本における農業の中心に、稲作がある。稲作の作付品種や栽培形態、作期などは、全国各地様々であるが、稲作の最適な作期や温度との関連を管理することは、収量や、品質の問題、水管理に対しても重要である。本研究では、東北地方の安全多収作期(農

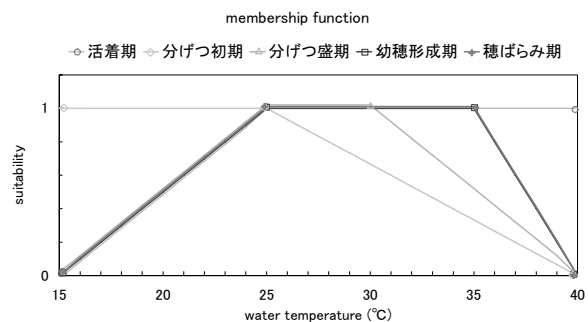


Fig. 6 Membership function (water temp.)

林水産技術会議事務局編, 1984)を作期基本形とし、流域の地域性考慮のため岐阜県の統計資料等を利用して作期基本形における気温情報の変更を行うこととする。また、出穂最盛期を安全出穂期早限と晩限の中間日と設定し、刈取最盛期を出穂最盛期からの積算気温により設定する。

水温との関連については、生育や収量に対する影響が考えられるが、水温管理の目標というものは実験によって明らかにされているものの、自然状態の管理について明確な指標は得られていない。現状では現場で経験的に採用されてきた水温上昇法や水温低下法を採用している。本研究では農業従事者の管理を把握することは難しいと判断し、水温が自然状態でどれだけ適当かを評価するものとする。また、評価はファジ理論を用い、これを次式に示す。また、使用するメンバーシップ関数の1つを Fig.6 に示す。なお、これは活着期から穂ばらみ期までの安定収量に対する適性度である。

$$\ln_r = T(x) \quad (18)$$

ここに、 $\ln_r$ ：自然状態水温での米作適性度、 $T(x)$ ：水温に関する米作適性度である。

5. 実流域への適用と考察

本研究では、長良川流域(忠節地点上流域)を対象とし、解析期間は現在を表す 1979～2000 年と温暖化後を意味する 2079～2100 年とする。

本研究対象領域である長良川流域の面積を考え、メッシュサイズは 1km メッシュを採用した。Fig.7 において左方に標高図、右方に落水線図を示す。

5.1 流域内のGCMの特性とバイアス補正の適用

バイアス補正の適用結果として作成された、再現期間、将来予測期間における全観測地点平均の月降水量、月平均気温の補正値をFig.8, Fig.9に示す。月平均降水量は夏期(6～9月)において大幅に増加して

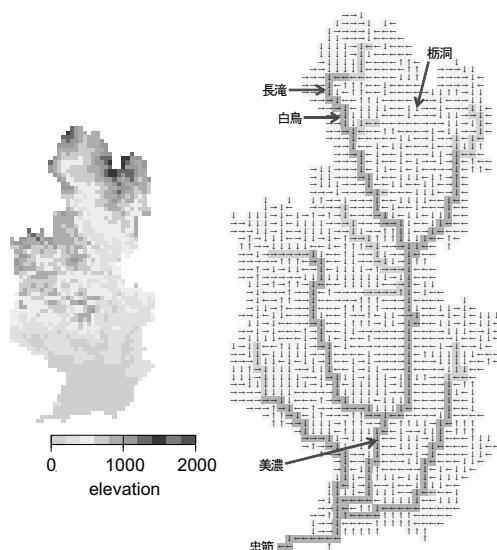


Fig. 7 Elevation and channel flow

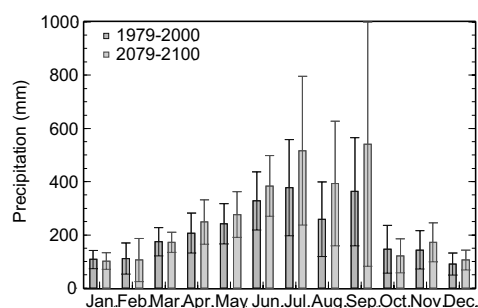


Fig. 8 modified precipitation

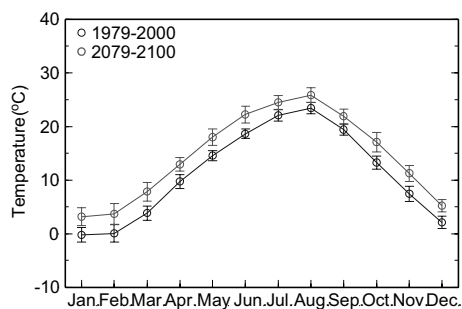


Fig. 9 modified temp.

おり、9月では200mm程度も増加している。ちなみに、年平均では600mmほどの増加である。月平均気温は全期間で2.5℃から5℃近くまで上昇している。

5.2 シミュレーション結果とその考察

(1) 蒸発散過程

蒸発散量の推定値に関して、時系列結果(Fig.10)は、蒸発散量が気温変化と相関関係にあるため、8月をピークとし、山なりのグラフを描いている。蒸発散量の空間分布は、ティーセン分割の影響を受けており、夏季においては差が認められる。しかし、全体

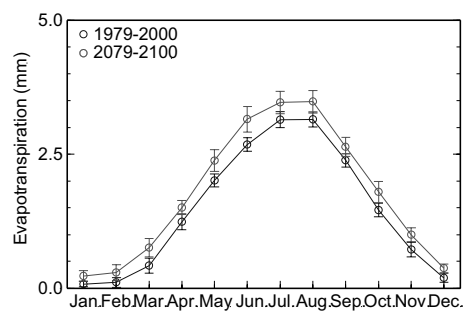


Fig. 10 Monthly evapotranspiration

的に見れば、その影響を受けていることはそれほど大きな問題ではないだろう。再現期間と将来予測期間の蒸発散量を比較すると、最高でも月平均日蒸発散量0.5mm程度、年間蒸発散量100mm程度とはいえ、全体的に増加していることがわかる。このことは、将来において、確保される水資源量だけでなく、生態系の構造、生活などの水利用形態に影響を及ぼしうる要素の一つであるといえる。

(2) 積雪・融雪過程

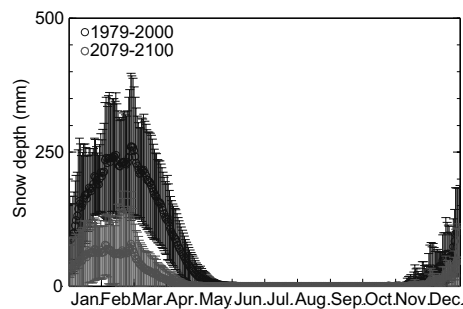


Fig. 11 Monthly snow depth

積雪深の推定値に関して、Fig.11 に時系列の解析結果(流域平均)を示す。再現期間では、11月から本格的に積雪が生じ始める。1月に積雪は流域の山岳域ほぼ全域に広がり、3月、4月からは積雪は減少に転じてくる。しかし、上流の山岳地帯では標高が高く、低温なため融雪が起こりにくく、積雪深は相変わらず上昇傾向にある。気温が上昇し、5月末から6月になるとほぼ完全に流域内は消雪する。将来予測期間では、11月末から本格的に積雪が生じ始める。再現期間よりも範囲は狭くなるが、1月に積雪は流域の山岳域に広がり、2月、3月からは積雪は減少に転じてくる。気温が上昇し、4月末から5月になるとほぼ完全に流域内は消雪する。つまり、再現期間と将来予測期間を比較すると、積雪のある期間が約1ヶ月以上も短縮されており、積雪深も半分近く減少している。

温暖化による気温上昇により、積雪深は全期間において減少する結果となっている。特に3月の減少

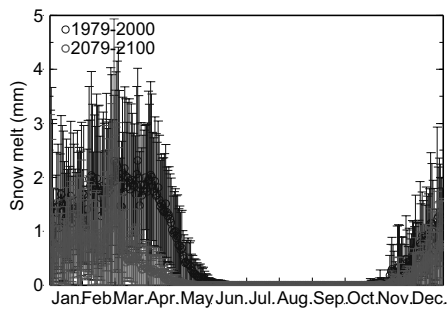


Fig. 12 Monthly snowmelt

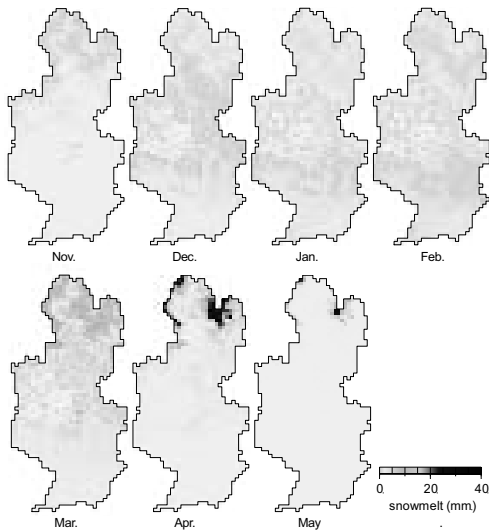


Fig. 13 Monthly snowmelt (1979-2000)

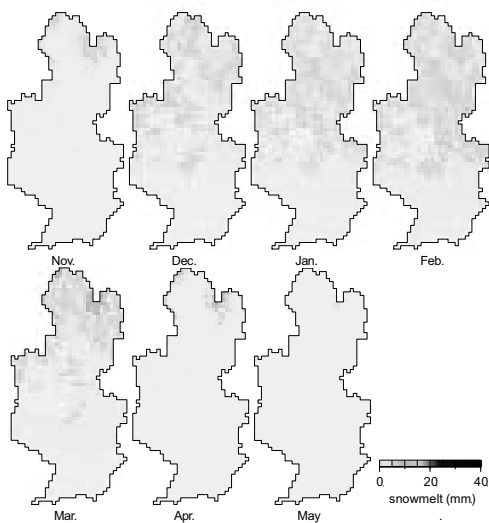


Fig. 14 Monthly snowmelt (1979-2000)

量は、2000mm を越える地点もあり、消雪に転じる時期が早まることが顕著に現れている。融雪量の推定値に関して、Fig.12 に時系列の解析結果(流域平均)を、Fig.13 , Fig.14 に再現期間、将来予測期間における各月の日平均融雪量空間分布を、Fig.15 に再現期間、将来予測期間の平均融雪量差の空間分布を示

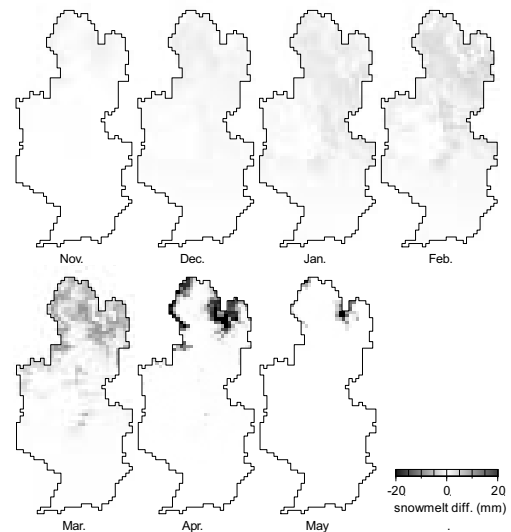


Fig. 15 Monthly snowmelt difference

す。積雪が生じ始める 11 月から少しずつ融雪も始まり、標高や地点にもよるが、消雪する数日前でピークを迎えたあと急激に減少し、消雪とほぼ同時にゼロになる。

温暖化による気温上昇により、積雪量は全期間において減少する結果となっていたが、融雪量は融雪期の早期化とともに、1 月から 3 月では、積雪の多い地域、標高の高い地点において、増加している。しかし、その後の期間における減少量は増加量をはるかに超える値となっている。その結果、全体量としては流域平均で年間 150mm 程度減少しており、融雪水による冬期の水資源量は大幅に減少する。GCM 補正值の結果から、降水量が増加しているのが夏期である事を考慮すれば、冬期の水資源量は、全体的にも減少するといえる。

(3) 表面流・土壌内浸透・河川流下過程

再現期間のうち、2000 年における、AMeDAS 観測値、GCM 補正值を用いた忠節地点での河川流量の解析結果を Fig.16 に示す。これを見ると、洪水ピーク流量に関しては観測流量(obs)との間に少し誤差が認められるが、AMeDAS 観測値を用いた解析結果(cal_obs)は日単位でも良好であることが分かる。なお、GCM 補正值(cal_gcm)は、直接 2000 年の降水や流出を再現しているわけではないが、これを用いた場合の解析結果も、梅雨時期や台風など大まかな季節変化は捉えていることが分かる。また、年総流出量も観測流量(obs)と AMeDAS 観測値を用いた解析結果(cal_obs)についてはほぼ同等となっている。

次に、再現期間と将来予測期間の GCM 補正值による解析結果を示す。まず、Fig.17 に忠節地点の期間平均月別流量を示す。これを見ると、融雪期に該当する春先の流量は、3 月において平均 20m³/s 程度

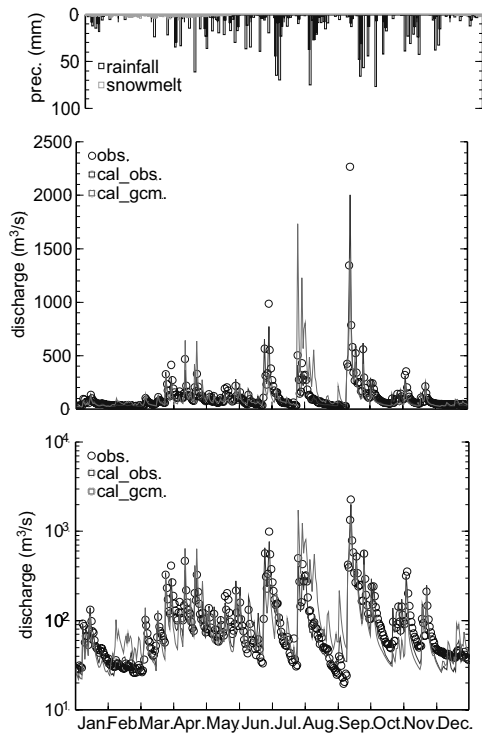


Fig. 16 Daily discharge (Chuusetsu, 2000)

減少し、4月においても減少傾向が見られる他、梅雨期から台風接近時期に当たる6月から9月にかけて、平均的に $20 \sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と大幅に増加していると共に、その標準偏差も大きくなっている。続いて、積雪、融雪量の多い地点である白鳥地点の結果をFig.18に示す。白鳥地点付近の山岳部については、再現期間には融雪のピークが4月であり、予測期間

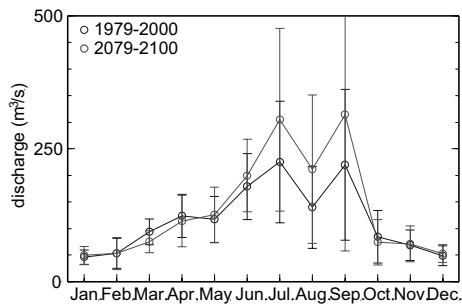


Fig. 17 Monthly discharge (Chuusetsu)

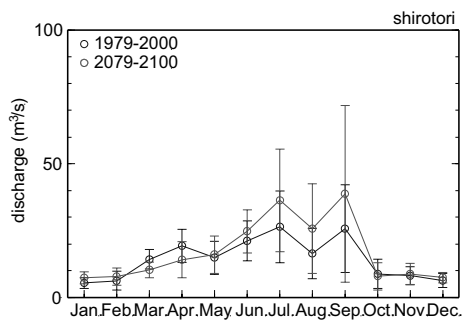


Fig. 18 Monthly discharge (Shirotori)

では3月となっている。また、3月までは融雪量が増加、4月からは大幅に減少していた。それに伴って流量も12月～2月には月平均で約 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{s}$ 増加しているが、4月に平均で約 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 減少し、3月も平均で約 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ の減少が見られた。これは、山岳部以外についての融雪量の減少による影響であると考えられる。また、その他の期間においては、季節的な特性は忠節とほぼ同じであった。

(4) 水温移流過程

河川水温の解析結果(流域平均)を月単位で Fig.19 に示し、空間分布を Fig.20, Fig.21 に示す。河川水温については、冬期の水温差は地中水温と同様であるが、夏期の水温差は $1^\circ\text{C} \sim 3^\circ\text{C}$ という結果となった。これは夏期における降水量、流量の増加が影響して

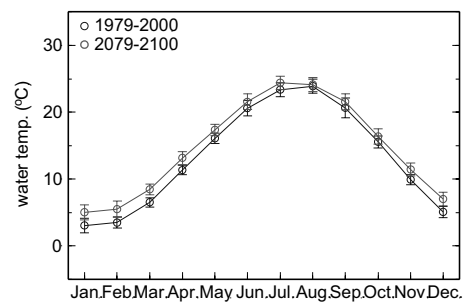


Fig. 19 Monthly water temp.

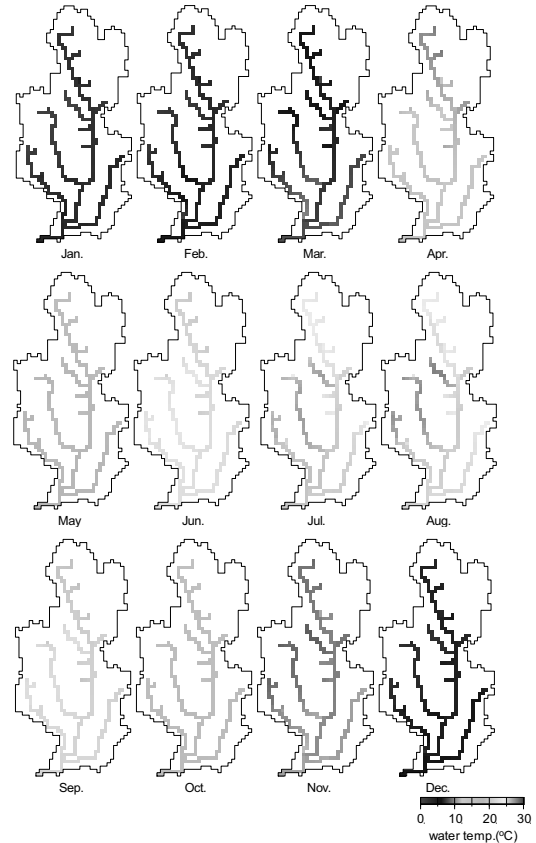


Fig. 20 Monthly water temp. (1979-2000)

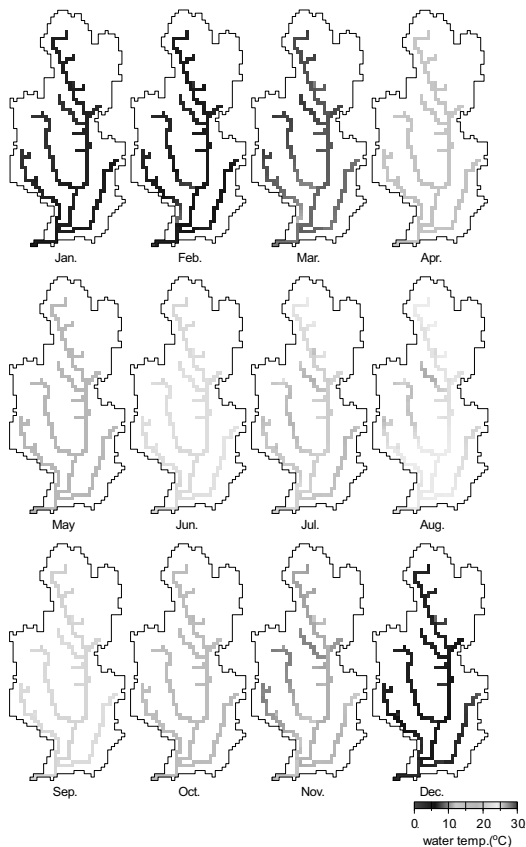


Fig. 21 Monthly water temp. (2079-2100)

いと推測される。空間分布を見ると分かるように、予測期間では再現期間と比較して、上流部(北部)の水温は上昇しているにもかかわらず、中-下流部の水温は低下しているのが、夏期の水温の特徴といえる。

(5) 生態(魚類)評価過程

各魚種の月別流域(河川域)平均適性度を Fig.22 に示す。これを見ると、低水温を好む魚種については、標高によっても高標高地域が適性度も高いとしているため、夏期における水温上昇により著しく適性度が低下し、生息可能期間が短縮される恐れがあることが示唆される。また、比較的暖かい水温で生息適性のあるアユについても、わずかではあるが、夏期における生息適性度の低下と共に、標準偏差の拡大が見られるが、これには理由が2つ考えられる。中-下流域における水温低下の影響により、高水温であった区間の適性度が上昇したことで、適性水温であった区間の適性度が低下したことである。理由は異なるが温暖化がより進行するとアユについても夏期における生息可能期間が短縮される恐れが生じる可能性があるといえる。しかしながら、それ以外、特に春期・秋期については、生息適性度が改善され、生息可能期間が増加する可能性が大きい。また、フナ、コイについては温度条件による適性度が改善するものの、標高指標で求めた生息条件により、その値は

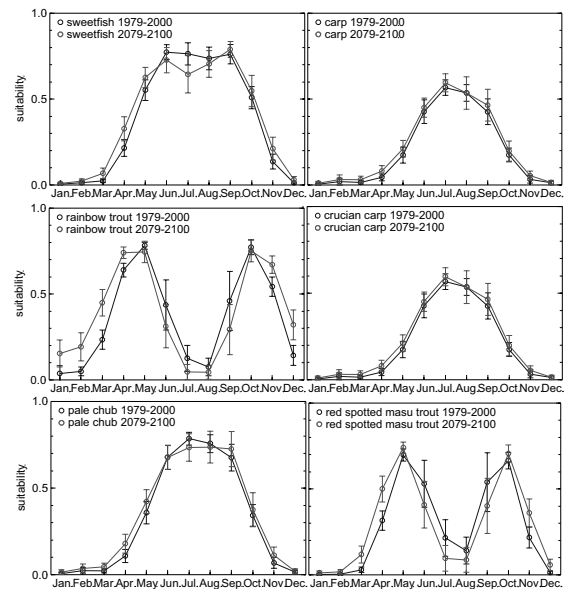


Fig. 22 Monthly habitat suitability

低いままである。

(6) 生物季節評価過程

桜開花日以外の現象については、明確な指標等得られなかったため、線形回帰式による推定のみを行った。桜開花日については、積算気温による方法も適用した。また、温度変換日数法(DTS)による方法の適用にはより多くのデータ、解析が必要であるため取り扱わなかったが、これが任意地点で利用できる形になれば、より詳細な推定が可能となるものと期待される。

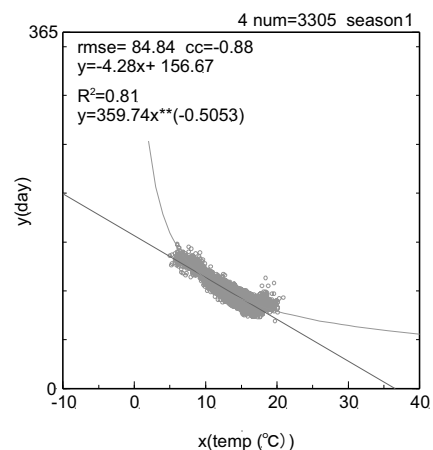


Fig. 23 Approximation and scatter plot of cherry blossom flowering date

Fig.23 に、桜開花日の気温と現象発生日(開花日)の散布図、線形近似式、及び累乗近似式を示す。これを見ると、桜開花日に関しては、線形近似式は気温が標準的な点に関してはよく近似できているが、気温が高い点、低い点に関してずれが大きくなる特徴があり、累乗近似式では全体によく近似できてい

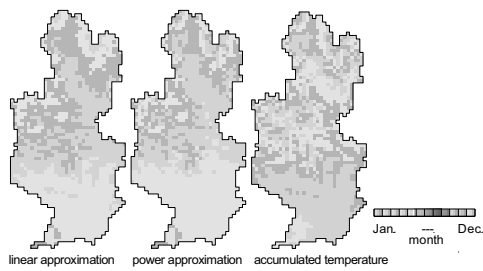


Fig. 24 Flowering date of cherry blossom (1979-2000)

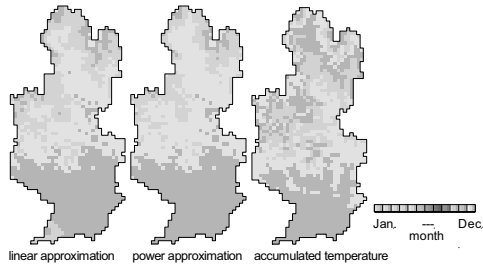


Fig. 25 Flowering date of cherry blossom (2079-2100)

る。線形近似式の場合、本州中部にあたる長良川流域では問題ないと思われるが、他の地域(九州や東北等)に関しては再現性がよくない可能性がある。また、他項目に関しては、線形近似で十分と思われる結果であった。

Fig.24, Fig.25 に示した空間図を見ると、近似式による分布はどちらも同等の結果となり、数日の差はあるが、大体の時期は捉えられていると思われる。一方、積算気温による結果は、温度の高い地域について、かなり早く推定されるという結果となった。ただし、どちらの結果でも桜開花日は約 10 日程度早まる結果が示された。

(7) 植生評価過程

植生について、一般に照葉樹林帯と暖帯落葉樹林帯は同じような分布を示すことが多いが、条件によると暖帯落葉樹林帯のほうが卓越する。各樹林帯の自然状態の適性度を求めた(Fig.26)。その空間分布の評価平均を Fig.27, Fig.28 に示す。両図(b)(c)から、再現期間と予測期間の結果で大きな差が生じているのは、暖帯落葉樹林帯の適性度が大きく低下している地域、つまり、暖帯落葉樹林帯に最も適性のあった地域が照葉樹林帯に移行すると考えられる地域が流域の 2~3 割となるところである。また、同図(a)に示すように、亜熱帯常緑樹林帯の適性度が流域の 6~7 割の地域で大幅に上昇する結果も出ている。それから、予測期間の空間分布を見ると、暖帯落葉樹林帯の適性度が 0 となっている地域と、亜熱帯常緑樹林帯の適性度が 1 となっている地域は似かよっていることから、この地域が再現期間において照葉樹林帯であり、予測期間においても照葉樹林帯である

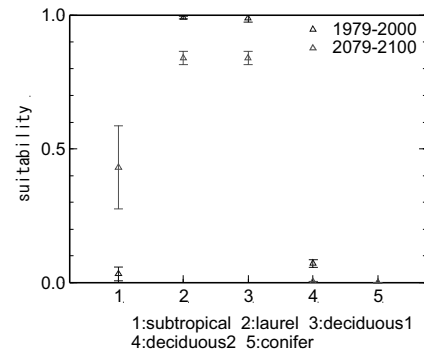


Fig. 26 Suitability of vegetation

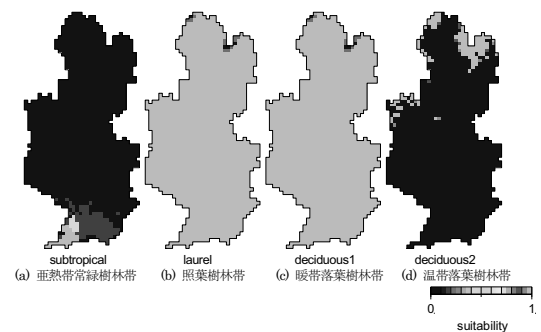


Fig. 27 Suitability of vegetation (1979-2000)

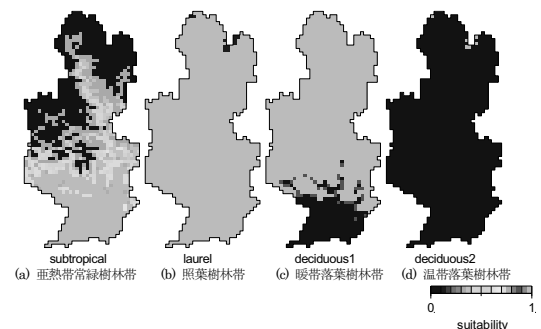


Fig. 28 Suitability of vegetation (2079-2100)

場合以外では最も植生の変化が起こり得る地域であるというふうにも考えられ、そのことは生態や土壌にも影響を及ぼす可能性があると推測される。

(8) 花粉飛散評価過程

まず、1月、2月の積算気温から推定する方法の結果は、流域平均で再現期間は2月27日、予測期間は2月16日となった。このとき使用した関数は、 $y = -0.0532x + 73$, y : 花粉飛散開始日, x : 1月、2月積算気温, 相関係数は-0.67である。次に、休眠打破を考慮する方法では、流域平均で再現期間は3月15日、予測期間は2月21日となった。また、この方法では再現期間において流域内に花粉飛散が開始できない地域が確認され、原因としては、期間的に休眠打破の条件に至らなかったことが挙げられる。その

他にも、開始されても開始日が非常に遅い地域も確認された。また、予測期間においても特に流域南部(下流部)で花粉飛散が開始できない年が多く存在し、結果的に、最南部(最下流部)よりも中部(中流部)のほうが早く飛散が開始する結果となった。ただし、図においては開始できる年のみの平均値で分布を示している。このことは、寒冷な地域、温暖な地域においての休眠打破条件をさらに検討する必要がある、DTSと共に、より多くの条件、場所での条件解明が必要であると考えられる。

(9) 農業評価過程

農業に関して、まず、自然状態の適性度を主要作物について求めた(Fig.29)。適性度については、積算気温と共に、気温 5℃以上日数も使用している。た

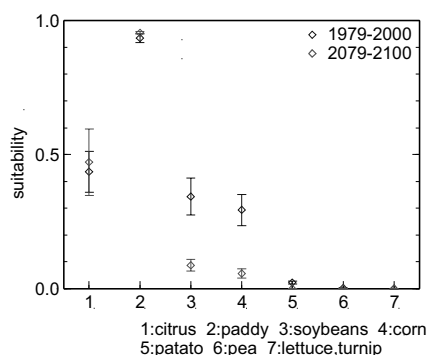


Fig. 29 Suitability of crops

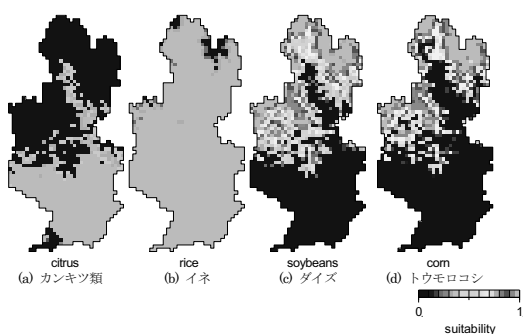


Fig. 30 Suitability of crops (1979-2000)

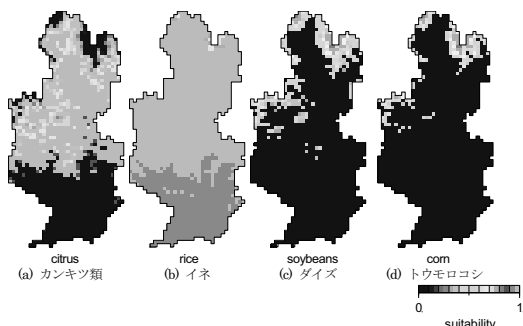


Fig. 31 Suitability of crops (2079-2100)

だし、米に関しては、積算気温のみ使用した。空間図(Fig.30, Fig.31)を見ると、積算気温によれば、カンキツ類の適性度が流域南部(下流部)に関して大幅に下がり、北部(上流部)に関して大幅に上昇するという結果となった。また、そのほかに関しても適性度の高い地域が標高の高い北部に移動しているため、流域内の適性度が高い作物が減少する恐れがあるといえる。ただし、あくまで自然状態での積算気温による評価であるため、今後より詳細に、多要素も考慮して評価する必要がある。

次に、稲作に関して、作期による評価を行った。これは、現在の基準による作期を使用すると、どれほど作期に変化があるかということと、稲作可能時期の増減の度合いを見る目的である。ただし、流域内には様々な種類の稲が混在して栽培されており、これらの分布を捉えることは不可能であったため、全体的に、岐阜地点の気温を指標として使用した。また、水温の適性度評価に関しては、各地点の水温により評価を行った。

再現期間についての水稻作期を予測期間の作期と比較すると、稲作可能期間が大幅に延びており、また、積算気温を利用して、出穂最盛期と刈取最盛期を推定すると、どちらも 10 日近く早まることや、寒冷な地方と温暖な地方を比較したとき温暖な地方では稲作期間が短いという関係から、稲作期間自体は短縮されるといえる。

水温適性度については、幼穂形成期、穂ばらみ期の生育段階において、再現期間よりも予測期間の適性度が低いという結果となっている他、活着期における適性度は 0~0.5 と、再現期間、予測期間、どちらの期間においても低い値を示した。しかしながら、活着期については、水温が 11℃程度の低水温の場合も発育することが分かる。また、この指標による評価では、適性度 0.9~1 となる期間が数日あった。

6. 結論

本研究で評価してきた地球温暖化の長良川流域を対象とした流域環境への影響を Table 1 のように簡潔にまとめた。詳細については 5.2 節で述べたとおりである。同評価結果から、地球温暖化の影響で、流域単位で注目しても様々な要素において多数の変化が起こり得るといえる。ただし、これらは本研究の方法を基に導き出された結果であり、絶対的客観性を有すとまでは言及できないことに留意されたい。

また、本研究では、GCM データを使用し、気象・水文学的側面、水資源工学的側面に関して、分布型流出モデルを用いて流域内の各項目を評価すること

で、流域での温暖化影響の評価を試みたが、今後モデルやデータを作成・改良していくことにより、流域単位での温暖化影響評価が発展していくものと考ええる。

Table 1 Hydrological and environmental impacts in Nagara River Basin

Evaluation item	Main changes	Changes & effects
Temperature	rise	○
Precipitation	increase ・ increase deviation	○
Evapotranspiration	increase	○
Snowfall & snowmelt	decrease ・ period shortening	○
Discharge, runoff	increase ・ increase deviation	○
Water temperature	rise	○
Ecosystem (fish)	suitability change /no change	○-×
Phenology	timing change	○-△
Vegetation	suitability change /no change	△
Pollen	timing change	○-△
Agriculture	suitability change -timing change	○-△

○: expansively or strongly influenced, △: partly or weekly influenced, ×: sparsely or hardly influenced

参考文献

- 新井正, 西沢利栄(1974): 水文学講座10 水温論, 共立出版.
- 小笠原伸行(2001): 水利用を考慮した広域的流域環境シミュレーションモデルの構築に関する研究, 京都大学大学院工学研究科修士論文.
- 気象庁(2003): 地球温暖化予測情報, 第5巻.
- 金指達郎・横山敏孝(2002): スギ雄花の休眠打破と開花に要する温度条件, 日本花粉学会誌, pp.95-102.
- 黒田良人(1997): 流域・都市を考慮したGISベースでの水環境シミュレーション, 岐阜大学大学院工学研究科修士論文.
- 小尻利治・東海明宏・木内陽一(1998): シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, 第41号B, pp. 119-134.
- 近藤純正・沼田洋一(1988): 積雪密度のパラメータ化, 日本雪氷学会誌 雪氷50巻2号, pp.80-86.
- 平英彰(1993): スギ品種による雄花の有効積算温度と発育限界温度の違い, 富山林技研報, 7, pp.18-21.
- 土木学会編(1985): 水理公式集 昭和60年度版, 土木学会.
- 農林水産技術会議事務局編(1984): 農林水産研究文献解題No.10, 農林統計協会.

Impact Assessment of Global Warming on River Basin Water Resources and Ecology

Toshiharu KOJIRI, Toshio HAMAGUCHI and Mariko ODE*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

We assess the impacts of global warming on water resources and ecology in river basin running the distributed hydrological and environmental model simulation using GCM outputs from 1979 to 2000 and from 2079 to 2100. The obtained results are, i) precipitation and discharge increase in summer, ii) temperature and water temperature rise through the whole years, iii) habitat suitability of fishes is improved except summer, and vi) the boundaries of several kinds of farm products and vegetations move to higher elevation area according to the suitability-related evaluation.

Keywords: global warming, distributed model, GCM