

24. 気候変動による森林流域の変化 —長良川流域を対象として—

CLIMATE CHANGE INFLUENCE ON FOREST IN THE NAGARA RIVER BASIN

篠田成郎*・守利悟朗*・和田祐典**・亀原 裕**・山川淳平**・片桐 猛***

Seirou SHINODA, Goro MOURI, Yusuke WADA, Yutaka KAMEHARA,
Junpei YAMAKAWA, Takeshi KATAGIRI

ABSTRACT; Annual changes in the temperature/precipitation and a runoff process in the forest watershed were investigated from the statistical analysis of various time series records. The climate change has not appeared in only a temperature increase but also changes in the precipitation pattern such as the extension of non-precipitation period, the shortening of precipitation duration and the cyclic interval of heavy rain, and so on. Such climate change become causes of the shortening of precipitation-runoff response, the decrease of the amount of effective precipitation, and the increase of the sediment yields through the increase of evapotranspiration and the decrease of the soil moisture.

KEYWORDS; climate change, global warming, forest ecosystem, river basin environment, environment change

1. 緒言

近年、全国各地の森林流域において、基底流量の減少やこれに伴う涸れ沢の出現、さらには降雨時の急激な水位上昇などが報告されてきている。その原因には、森林開発や森林管理低下などの人為的な影響も考えられるが、こうした森林流域での流出特性の変化は広範囲で確認されており、気候的な要素も強く影響していることも予想される。本論文では、木曽川水系長良川の森林流域を対象として、気象・水文データから降雨流出特性の経年変化を推定するとともに、流域住民を対象に実施したアンケート調査から推定された流出特性の時系列解析を援用することにより、地球温暖化などに伴う気候変動が森林流域に及ぼす影響とそのメカニズムについて検討する。

2. 解析対象流域

図-1 は、国土地理院 1/10 細分区画土地利用データに対して、Landsat/TM による人工衛星画像情報から修正を加えて得られた木曽川水系長良川流域 (1,985km²) における土地被覆分布を表す。長良川流域の上中流はほぼ全域が森林に覆われており、流域全体の森林面積割合は 75.3 % に達する。図中には、本論文で用いる気象・水文データの観測地点も示してある。○印は、気象台による気温および降水量の観測地点 (上流より、長滝、八幡、美濃および岐阜の 4 箇所) を表す。また、国土交通省による河川水位および流量の観測地点をそれぞれ□ (稲荷) および△ (忠節) で示してある。

3. 気象・水文データの経年変化特性

長良川流域内には、気象台および国土交通省による気象観測地点が多数設置されているが、ここでは、四半世紀以上の長期間にわたり継続的にデータが整備されている上記の 6 測点における観測データを用いた検討を行うことにする。

3.1 気温の上昇傾向

図-2 は、長良川上流域に位置する八幡の気象観測点における日最高気温、日最低気温および日平均気温について 1979 年～2003 年の 25 年間に及ぶ各年の平均値に関する経年変化を示したものである。日最高気温、日最低気

* 岐阜大学総合情報メディアセンター Information and Multimedia Center, Gifu University

** 岐阜大学大学院工学研究科 Graduate School of Eng., Gifu University

*** 岐阜市人・自然共生部水自然室 Clean Water Preservation Division, Gifu City Environmental Preservation Department

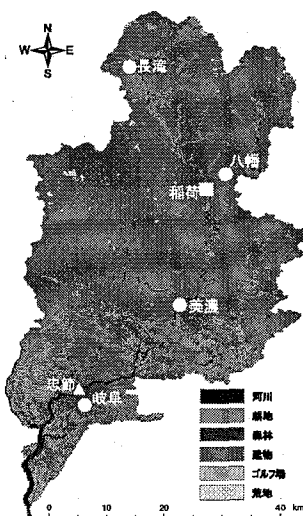


図-1 解析対象流域の概要

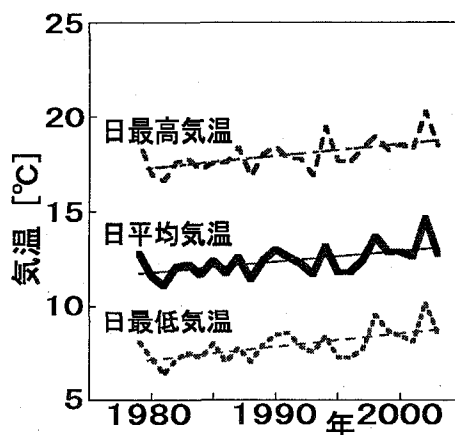


図-2 八幡における気温の経年変化

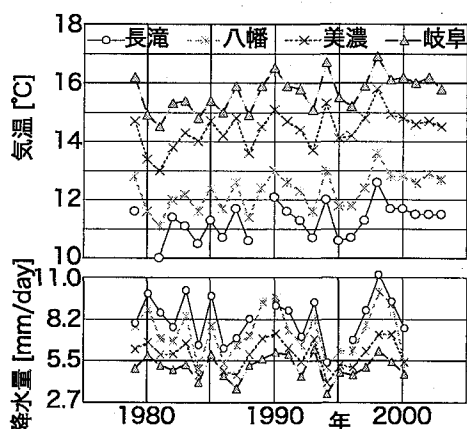


図-3 長良川流域全体での気温および降水量の経年変化

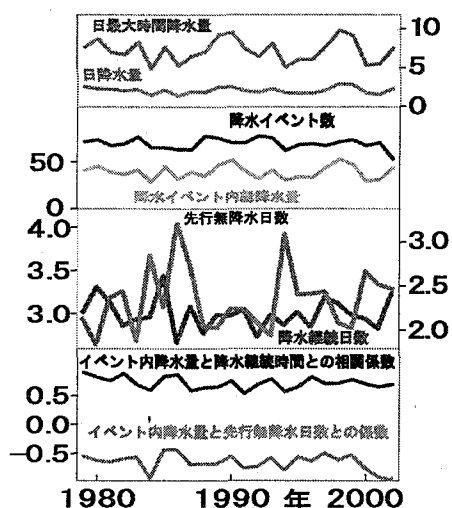


図-4 八幡における降水特性量の経年変化

温および日平均気温のいずれにも明瞭な上昇傾向が認められる。それぞれの上昇率は、日最高気温： $1.6^{\circ}\text{C}/25$ 年、日最低気温： $1.4^{\circ}\text{C}/25$ 年および日平均気温： $1.8^{\circ}\text{C}/25$ 年となっており、日最低気温の上昇率が高くなっている。

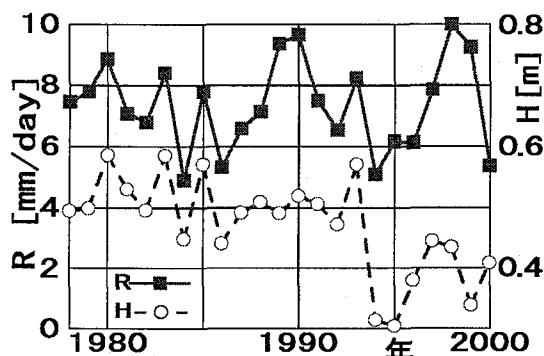
図-3 は、日平均気温および日降水量の年平均値について、長良川流域内の上流から下流における経年変化を示したものであり、全ての地点において、気温に関する明瞭な上昇傾向が確認できる。また、全地点に関する気温の平均値に関する上昇率は $1.1^{\circ}\text{C}/25$ 年となっており、極めて高い値を示している。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第3次報告¹⁾によれば、1990年から100年間で $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ の上昇が予測されていることと比較しても、長良川流域での気温上昇率はとても大きな値と言える。

3.2 降水パターンの変化

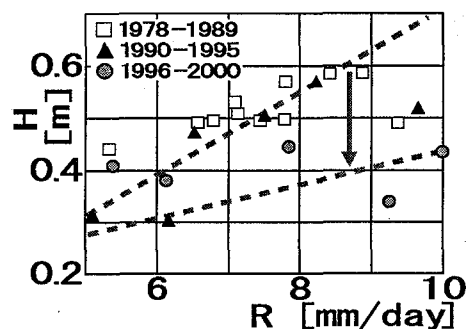
図-3 の下段に示す年平均日降水量の経年変化では、年変動は大きいものの、気温のように、明瞭な増加または減少傾向は認められない。そこで、降水のイベント生起特性に着目して、より詳細な検討を行うために、一例として、八幡における様々な降水特性量の経年変化を図-4 に示す。以下、この図を用いて考察を進める。

図中最上段の日最大時間降水量 (mm/hr) は時間降水量の日最大値を年間で平均したもの、日降水量 (mm/hr) は時間降水量の日平均値を年間で平均したものであり、それぞれ年総降水量に対応する特性量となっている。これらの値は若干減少する傾向にあるが、年変動が大きいために、明瞭な傾向としては確認できない。

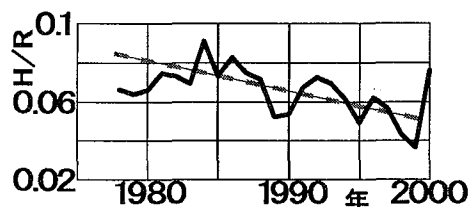
時間降水量時系列において、連続して24時間以上降水量が存在しなかった時間長さとして無降水期間を定義することができる。2つの無降水期間で挟まれる降水期間を一つの降水イベントとして扱うことにより、年間の降水イベントの総数および各降水イベント期間内での総降水量の年平均値を求め、これらの経年変化として示したも



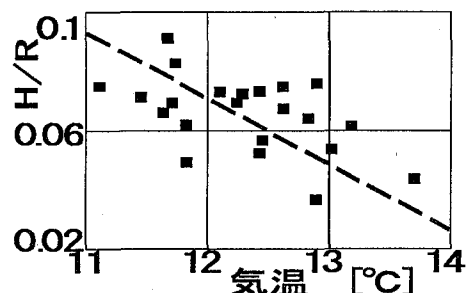
(a) 降水量と河川水位の経年変化



(b) 降水量と河川水位との関係



(c) 単位降水量当たりの河川水位の経年変化



(d) 単位降水量当たりの河川水位と年平均気温との関係

図-5 長良川上流域での降水量、河川水位および気温の関係

のが、図中の2段目の降水イベント数(回)および降水イベント内総降水量(mm)である。また、図中3段目には、無降水期間長さ(降水イベントに着目すれば、当該降水イベントに先行する無降水期間)および一つの降水イベントの継続長さに関する年平均値を日換算したもの(days)の経年変化を示してある。降水イベントに関わるこれらの特性量から、年間の降水イベント数が減少するとともに無降水期間が増大(降水継続時間が減少)していることが確認でき、この25年間で、無降水期間の長期化および降水継続時間の短期化が傾向として現れてきていることがわかる。

一方、一つの降水イベントに着目したとき、降水継続時間が長いほどイベント内の総降水量は大きくなることが多いため、イベント内総降水量と降水継続時間との相関係数は正の高い値を示すと考えられる。しかし、図中の最下段に示すこうした相関係数の値は年々減少しており、この25年間に、強い相関から弱い相関に変化していると判断できる。このことは、小雨の継続時間が長くなったり、大雨が短期集中的に発生したりしていることを示しており、年総降水量にほとんど変化が認められない割には、降水イベント内総降水量が減少したり、無降水期間が長期化したりしていることの原因と判断される。同様に、図中最下段に示すように、一つの降水イベントにおける総降水量と先行無降水期間との関係は、負の弱い相関から負の強い相関に変化してきていることも確認できる。すなわち、長期間にわたり雨が降らなかった後に生起する降水は小雨であったり、前回の降水イベントから期間を空けずに大雨が生起するケースが増えてきていることを表している。

以上のような傾向は、八幡以外の観測地点でも同様に存在しており、年総降水量そのものには顕著な変化傾向は認められないものの、降水イベントの生起パターンに大きな変化が顕れてきており、これが気候変動の一つの特徴となっていることが予想される。

4. 降雨流出特性の経年変化特性

上述のような気温上昇や降水パターンの変化は、降雨流出に大きな影響を及ぼすことが予想される。そこで、90%以上を森林が占めている長良川上流域および岐阜市より上流の長良川のほぼ全流域を対象として、降雨流出特性が経年的にどのように変化してきているのかについて検討してみる。

4.1 有効降水量の変化

図-5の(a)は、八幡での日降水量の年平均値 $R(\text{mm/day})$ および稲荷での長良川本川水位の年平均値 $H(\text{m})$ の経年変化を示したものである。当然のことながら、降水量が多い年には年平均水位が高くなるため、両者の変動は

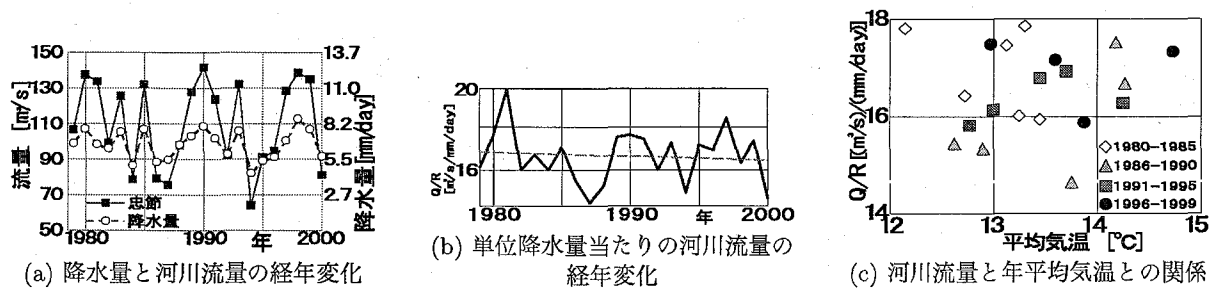


図-6 長良川のほぼ全流域を対象にした降水量、河川流量および気温の関係

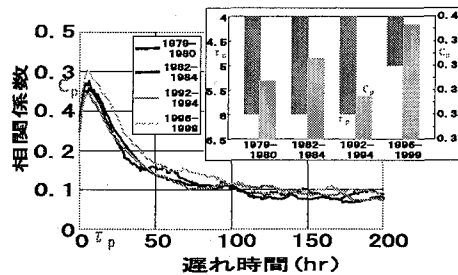


図-7 長良川上流域での降水量と河川水位とのクロスコレログラム

相対的にほぼ一致している。しかし、注意深く見ると、最近10年間ほどは、こうした相対的な対応関係が明瞭でなくなっている傾向が顕在化してきていることに気が付く。この点を明確にするために、降水量 R と水位 H との対応関係を年代別に示したものが図-5の(b)である。これより、1980年代頃までは R と H は良好な線形関係を示しているのに対し、それ以降は、 R と H の線形関係の傾きが小さくなってきていることがわかる。この傾向は、図-5の(c)でも確認できる。この図は、単位降水量当たりの河川水位 H/R について経年変化を示したものであり、有効降水量の減少として解釈される。年平均気温とこの H/R との関係を図-5の(d)に示す。これより、気温の上昇とともに有効降水量に対応した H/R が減少しており、気温上昇に伴う蒸発散量の増加によって、河川水位の低下がもたらされていると推察できる。

一方、岐阜市より上流の長良川のほぼ全流域を対象として、上記と同様な検討を行った結果を、図-6に示す。なお、これらの解析においては、図-1に示す4測点での年平均気温および年総降水量の地点平均値と忠節での年平均流量を用いている。図-5での検討が水位をベースにしたものであるのに対し、図-6では流量を用いているために、一概に比較することはできないが、長良川のほぼ全流域を対象にした場合には、年平均気温の上昇に伴う有効降水量の減少傾向は明瞭ではない。ここでは、年間の総降水量に対する流量として考察しているため、年間の水収支に対して支配要因となる気温や風速が、土地被覆状況や都市域での熱環境によって左右されることを通じて、有効降水量に影響を与えていると解釈するべきであろう。森林が大部分を占める流域での有効降水量が気温上昇とともに低下している一方で、森林以外も含む流域では有効降水量が地域全体の平均的な気温以外にも影響を受けているという事実は、森林では気温上昇の影響を直接的に受けやすい水収支構造になっているとも換言できる。そこで、以下では、図-5で取り上げた長良川上流域に焦点を絞り、気候変動に伴う流出特性の変化について検討することにする。

4.2 降雨流出応答の変化

図-7は、八幡での時間降水量と稲荷での時間水位とのクロスコレログラムを年代別に示したものである。図中の c_p および τ_p は、それぞれ時系列応答のピーク高さ(相関係数)と遅れ時間(hr)を表しており、図中の右上部には、年代別の c_p と τ_p の大まかな推移を併せて示してある。この結果から経年的な変化傾向を断定することには無理があるが、 τ_p が近年短くなってきており、降水に対する流出の遅れ時間が長期化してきていることを表す結果とも考えられる。

4.3 土砂流出の変化

気候変動に伴う気温上昇や降水パターンの変化は、水分動態のみならず、土砂動態にも影響を及ぼすと予想される。ただし、土砂流出の状況に関する長期間の変化を掴むことのできるデータは極めて乏しく、ダムの無い長

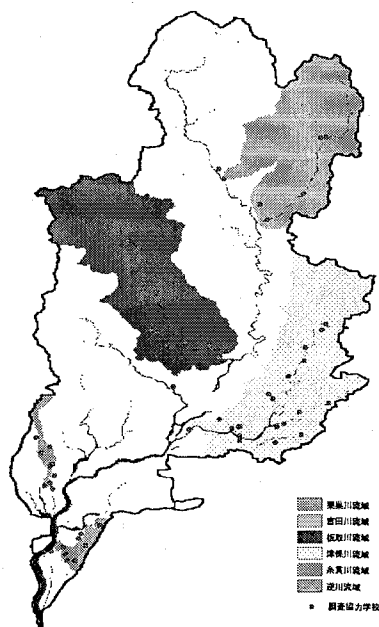


図-8 アンケート調査対象支川流域と調査協力小中学校の位置

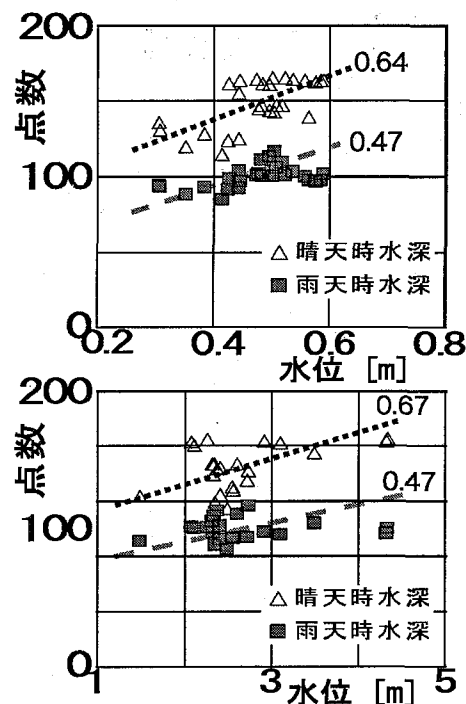


図-9 年平均水位の観測データとアンケートによる水位の相対的点数との相関関係

表-1 アンケート調査の概要

支川名	調査年	面積 [km ²]	土地利用 [%]			調査対象校数	有効回答			
			森林	耕地	建物		児童生徒	保護者	小計	率 [%]
栗巣川	2003	30	88	11	1	2	107	95	202	58
吉田川	2001	187	91	6	2	5	526	398	924	69
板取川	2003	314	93	3	1	9	677	547	1,224	79
津保川	2003	292	67	21	7	18	1,821	1,232	3,053	64
糸貫川	2003	12	19	41	40	10	2,057	1,646	3,703	72
逆川	2003	16	0	44	55	9	1,904	1,372	3,276	67
計		851	75	18	7	53	7,092	5,290	12,382	68

良川では、その変化状態を把握することは難しい。そこで、流域内の住民を対象にしたアンケート調査から、こうした変化状態を推定し、その結果と降水特性との関係を検討することにする。

ここで実施したアンケートでは、回答率を高めると同時に、大人・子どもへの水環境への関心の高揚も併せて狙い、小中学校を通じて、児童生徒および保護者を対象として実施した。調査対象とした長良川の支川流域の位置および調査概要をそれぞれ図-8 および表-1 に示す。アンケートでは、昔と現在の比較として、各自が思い浮かべる対象河川と時期を想定してもらい、水位、土砂堆積状況、降雨時濁度、河川生息生物などに関する回答結果を現在を 100 点とする相対的な点数値として時系列データ化^{2),3)}している。図-9 は、稲荷および忠節における年平均水位とアンケートによって得られた晴天時および雨天時の水深に対応した点数との関係を示したものであり、図中の数値は両者の相関係数を表す。これより、こうした住民対象のアンケート結果から、水文学的データ時系列を推定することの妥当性が検証される。

図-10 は、吉田川流域(八幡および稲荷の観測点付近)を対象としたアンケート回答結果から推定された河床での土砂堆積量および降雨出水後の濁度回復時間に関する相対的な点数値の経年変化を表す。1950 年代以前はアンケート回答者数が少ないために信頼性が乏しいが、それ以降は土砂堆積量および濁度ともに上昇する傾向が認められる。これらの時系列と八幡での年平均降水量との時系列応答関係をクロスコレログラムとして示したものが図-11 である。これより、遅れ時間 2 年の位置に明瞭なピークが認められ、降水量の変化から 2 年遅れで土砂流

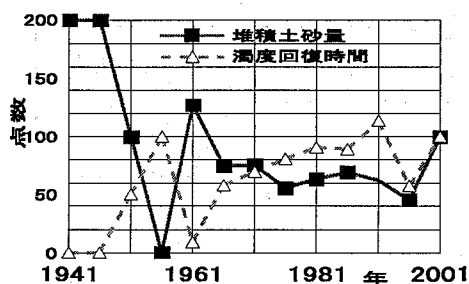


図-10 アンケート調査から推定される土砂堆積量および降水後濁度回復時間の経年変化

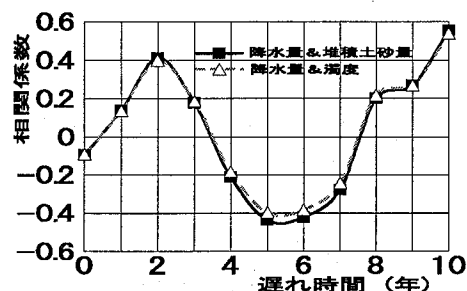


図-11 年平均降水量と土砂堆積量および降水後濁度回復時間とのクロスコレログラム

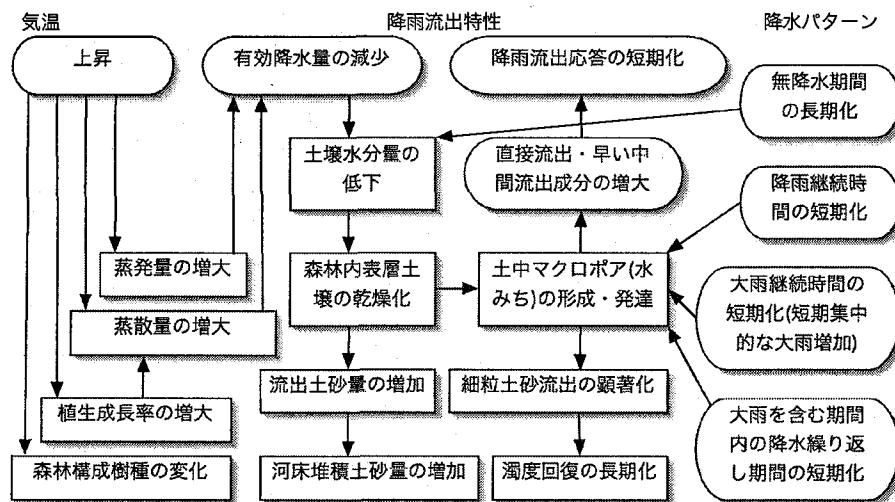


図-12 気候変動による森林変化のメカニズム

出状態に変化が発生していることがわかる。

5. 結語—気候変動と森林変化に関するまとめ

以上の検討結果より、気候変動と森林変化との関係に関するメカニズムをまとめると、図-12 のようになる。

年平均気温の上昇により、蒸発散量が増大し、その傾向は森林域において顕著となる。これにより、有効降水量が減少するとともに、無降水期間の長期化とも相まって、森林土壌の含水量低下・表層土壌の乾燥化が進行する。土壌の乾燥化は、降雨時の流出土砂量を増加させ、河床堆積土砂の増大を招くと同時に、土壌内間隙の拡大に伴う土中マクロポアの形成・発達を促し、細粒土砂の流出およびその結果としての濁度回復長期化となって顕れる。また、こうした土中水みち形成や土壌流出は、降雨継続時間短期化・短期集中降雨増加・大雨繰り返し期間短期化によっても助長され、直接流出および早い中間流出成分の増大につながり、最終的には降雨流出応答の短期化がもたらされる。

今後は、こうして状況証拠的に推察された気候変動と森林変化との関係に関するメカニズムを現地観測や数値モデル解析などから、さらに検討することにより、森林保全の方策を探ることが重要になってくると思われる。

最後に、本研究の実施に当たり、水文データをご提供くださった国土交通省中部地方整備局およびアンケート調査にご協力いただいた回答者の方々ならびに小中学校・教育委員会・関係行政機関の皆さまに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) IPCC(2001): 気候変化 2001 科学的根拠—政策決定者向けの要約, 第一作業部会報告書, IPCC 第三次評価報告書 (気象庁訳)。
- 2) 篠田成郎・福本圭子・野田幸嗣・亀原裕・湯浅晶・松井康雄 (2002): 流域環境要因の時系列解析による魚類生態系変化の検討—長良川支川吉田川流域を例として, 京都大学防災研究所年報, No. 45(B-2), pp. 113~126。
- 3) 篠田成郎・亀原裕・福本圭子・野田幸嗣・和田祐典 (2003): 住民へのアンケート調査による流域環境の時空間応答解析—長良川支川吉田川流域での検討, 河川技術論文集, Vol. 9, pp. 499~504。