

# 北海道内の小河川における夏期最高水温の推定と河畔林の効果

長坂晶子<sup>1</sup>・杉山(杉本)幸穂<sup>2,3</sup>

## Factors affecting the summer maximum stream temperature of small streams in northern Japan

Akiko NAGASAKA<sup>1</sup> and Sachiho SUGIYAMA<sup>2,3</sup>

### 要 旨

河畔林による水温上昇抑制効果を定量的に評価するため、道内6地域(全12水系)、合計約70地点で夏期に水温観測を行い、夏期最高水温の推定モデルを作成した。実測水温を従属変数に、①観測点から上流の河畔林に覆われていない河道区間の長さ(OCL)、②標高で補正した8月の最高気温、③流域面積、④森林に覆われた支流の流入の有無(支流による冷却効果の有無)、⑤地質、をそれぞれ説明変数としてGLM(一般化線型モデル)による解析を行った。その結果①、②、④、⑤を取り入れたモデルが採択された。

推定した夏期最高水温とOCLとの関係を単回帰し、地域ごとの河畔林による水温維持効果を考察したところ、地質の違いは、OCL=0のときの切片(初期水温値)に反映され、火山岩・軽石流堆積物流域では、切片値が2℃ほど低いことが示された。一方、河畔林伐採によって河道がオープンになったときの水温上昇に対する感受性は回帰式の傾きに反映され、火山岩・軽石流堆積物流域のほうが温度上昇率が大きいことが示された。いずれのケースでも、森林に覆われた支流が流入した場合、回帰式の傾きが小さくなり、冷却効果があることが示された。今回の解析結果では、サクラマスの摂餌、成長の停滞を招く最高水温24℃に達するのは、①支流による冷却効果がない場合：OCL>4 km以上、②支流による冷却効果がある場合：OCL>6 km以上、と算出された。

キーワード：河畔林、夏期最高水温、統計モデル、水温待避場、水文地質条件

Keywords: empirical model, hydrogeological condition, riparian forest, summer maximum stream temperature, thermal refugia

### はじめに

河畔林は、河畔生態系を構成する重要な要素のひとつであり、水温の維持、有機物や倒流木の供給、細粒土砂や栄養塩捕捉などの緩衝機能、ハビタット提供等の機能を発揮しつつ、水域、陸域双方の生物群集に大きな影響を及ぼしている(Allan 1995, Naiman et al. 1998)。川幅が10m未満の小河川においては、リターや落下昆虫などのインプットによる河畔林から河川生態系へのエネルギー供給が全エネルギー供給量の90%を占めるとも言われており(Fischer and Likens 1973)、中・上流域の河川では河畔林の有無による河畔生態系への影響が殊に大きい(Cummins 1973, Vannote 1980)。なかでも樹冠による日射遮断は上流域の生息環境を規定する重要な要素

のひとつであり(Beschta et al. 1987)、特にサケ科魚類では、夏期の最高水温について摂餌停滞や生息困難などの温度範囲が明らかになっており(Barton et al. 1985, Bjornn and Reiser 1991, 真山1992, 1993)、河畔林の伐採や再生による水温の変化を予測することができれば、生息環境の保全・復元の際の有効な指標となることが期待される(Dunham et al. 2003; Veliz 2003)。

夏期最高水温の推定方法については、日射と河川水温の関係に着目し、河畔林の被覆効果を熱収支モデルにより表したBrown(1969, 1970)の研究が先駆的研究として知られており、その発展型として都市河川の水温予測モデルも提示されている(LeBlanc et al. 1997)。一方、Schloss(1985)は、標高や河川次数、河畔林の被覆など複数の変数により夏期最高

<sup>1</sup> 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198

<sup>2</sup> 北海道大学大学院農学研究科 Graduate school of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589

<sup>3</sup> 現所属：栗本技術士事務所 Kurimoto Consulting Engineer Office, Takatsuki, Osaka 569-1115

[北海道林業試験場研究報告 第47号 平成22年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No.47, March 2010]

水温を説明する統計モデル (empirical model) を提案している。両者を比較検討したMcGurk (1989) は、Brown (1970) のexposed surface model を推定値と観測値の差が少なく正確に推定できるとしながらも、モデルの構造上、予測できる場所が限定されるとも指摘し、広域・多点で水温を予測したい場合にはempirical modelが採用されている (McGurk 1989, Pollock et al. 2004)。

水温予測に関して国内で行われた研究を見ると、河畔林樹冠に水面が完全に被覆されるような山地上流域では、熱収支項目のなかで純放射量の占める割合が高いため (中村・百海 1989)、予測地点より上流の、河畔林の被覆から開放された河道区間の長さ (Open Channel Length: 以降OCL) によって夏期最高水温が精度良く推定できることが示されている (Sugimoto et al. 1997)。このことは、Schloss (1985) やMcGurk (1989) など北米を中心に行われた研究と同様、我が国においても山地溪流における水温予測の実用化に可能性があることを示唆している。国内では、Sugimoto et al. (1997) のように、問寒別川という1水系のみのデータを用いたモデルは作成されているが、例えば北海道全域といったスケールにモデルを拡張しようとした場合、夏期最高水温の予測は同様に可能か、また水温を推定する上でOCL以外にどのような要因を考慮すればよいか検討する必要がある。

山地溪流において水温形成に関与する要因には、①河畔林による被覆の有無、②河道形状、③水文条件などが考えられ (U.S. Environmental Protection Agency 2000)、①は日射量の大小、②は水表面積や流量、③も流量や地下水などを通じた冷水の供給量など、にそれぞれ反映されることにより水温形成に関わっていると考えられる。Sugimoto et al. (1997) や Pollock et al. (2004) の解析では、河畔林による被覆の有無 (前者ではOCL、後者では全流路長に占める河畔林伐採区間の割合: percent of harvested riparian forest) が最も説明力の強い要因として選択されており、前述したとおり、夏期には純放射量の寄与が支配的であることを表している。一方、広域あるいは河川の縦断方向に沿った長い区間で観測された水温は、冷たい、あるいは暖かい支流の流入や、湧水源の有無などにより細かく変動しており (Torgersen et al. 1999; U.S. Environmental

Protection Agency 2000)、③の要因についても考慮する必要があることを示唆している。これに関して杉本 (1997) は、北海道内70地点で夏期最高水温の観測を行い、水温の形成条件には地域性があることを確認し、地域性は主に観測地点の気温によるものであり、観測点ごとの水温上昇率の違いは、森林に覆われた支流の流入によって説明できる (Nakamura and Yamada 2005) とした。

一方、Tague et al. (2007) は、流域の地質特性と水温形成の関係について検討し、地下水の豊富な湧水由来の水系 (spring-fed streams) と浅層中間流由来の水系 (shallow subsurface-fed streams) とでは、水温上昇のパターンが異なると述べ、日射を通した熱収支のほか、水文地質条件について考慮すべきであると結論している。したがって、北海道内の解析においても、広域で適用できる、汎用性のある水温予測モデルを作成しようとした場合には、水文地質条件が水温予測をするうえで意味のある変数として採択されるのか検討する必要があると考えられた。

そこで本研究では、杉本 (1997) により各地域で観測された夏期最高水温のデータを用いて、水温形成に関わると予想される要因との関係を一般化線型モデル (GLM) により再解析し、杉本 (1997) およびNakamura and Yamada (2005) の解析結果を検証すると同時に、前報までに考慮されなかった水文地質特性の関与 (Tague et al. 2007) について新たに検討することを目的とした。併せて、得られたパラメータから夏期最高水温を推定するモデル式を作成し、水温の変動や上昇に関わる各要因の関与について考察した。

## 材料と方法

### 1. 調査対象地の概要

水温観測点には、北海道内の6つの地域から計12水系を選び調査地点を設定した (表-1)。このとき、水田稲作地帯は農業用水の管理により、流量の季節変動が大きく (手計・吉谷, 2006) 水温に及ぼす影響が著しいと考えられたため、調査対象地から省いた。また、各水系で観測点を設置する際、河畔林の有無による水温変化を評価しやすいよう、川幅10m以下、流域面積が50km<sup>2</sup>程度までの小河川を対象とし、河畔

表-1 各地域の気象、地理的要因

気象観測所	緯度	経度	平均標高 (m)	年平均気温 (°C)	8月平均気温 (°C)	水系名 ( ) 内の数字は観測地点数
中川	45.0	142.0	80	5.1	17.6	問寒別川(11)
佐呂間	43.9	143.7	170	4.4	17.6	佐呂間別川(12)
旭川	43.7	142.3	260	6.0	19.2	美瑛川(6)、伊野川(2)、江丹別川(3)
鶴居	43.3	144.3	180	4.4	16.6	久著呂川(1)、雪裡川(5)、幌呂川(5)
黒松内	42.7	140.3	120	6.4	18.5	朱太川(9)、長万部川(3)
新和	42.5	142.4	190	5.5	18.4	厚別川(9)、新冠川(2)

林による被覆の度合い (=OCL) が異なるように観測地点を選定した。最終的に、各地域11~12地点、全道で合計68地点の水温観測点を設置した (付表参照)。

設定した水温観測点には、夏期最高水温を計測するため1996年7月中旬から8月末まで最高最低水温計を設置し、8月初旬と末に現地にて最高最低水温を記録した。また、地域ごとに、森林地帯を流れる河川と農地内を流れる河川よりそれぞれ1観測点を選び、自記録式水温計を設置して最高水温が記録された日時を特定した。

## 2. 解析方法

本研究では、夏期最高水温に影響を与える要因として、各観測地点の①OCL、②標高で補正した8月の平均気温 (以降Temp8)、③流域面積 (Watershed Area, 以降WA)、④森林に覆われた支流の流入の有無 (支流による冷却効果の有無, 以降Tributary)、⑤流域の地質タイプ (以降Geology) を取り上げることとした。

河畔林の被覆状態を反映する指標として、Sugimoto et al. (1997) の解析では、OCL以外に河畔林の被覆率 (cover ratio) も変数として解析に供したが、結果的にOCLのみが説明力の強い変数として選択されたため、今回はOCLのみを用いることとした。また、観測期間中の気温は日射による熱量のインプットを反映する指標として非常に有効である (Stoneman and Jones 1996) と考えられるが、観測地点で気温を同時に計測出来ない場合には、気象観測所との位置関係を考慮して補正する (Tague et al. 2007) 必要がある。本研究では、各観測点と気象観測所の標高差を求め、100m上昇するごとに $-0.55^{\circ}\text{C}$ 補正した値を用いることにした。各地域の気象状況については気象庁作成の気象統計情報 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>) より1996年8月の平均気温を集計し求めた。

水温予測に地質特性を反映させるためには、地質区分をそのまま用いるのではなく、水文流出特性などとの関連を見て、水温変動に「意味のある」地質区分に再編してから変数として用いるのが有効と考えられる。特に地質との関係が指摘されているのは低水流出であるが (虫明ら1981)、高田ら (2005) は、北海道内の321河川を対象に湧水比流量と地質の関係につ

いて検討し、湧水比流量の大きい地質区分として、流域面積の50%以上を火山性岩石・火山性軽石流堆積物・変成岩類が占める水系、湧水比流量が小さい地質区分として、流域面積の50%以上を未固結堆積物・半固結-固結堆積物・深成岩類が占める水系の大きく二分できることを報告している。夏期最高水温が生じる盛夏は、大雨以外の時は基本的に流量の少ない湧水時期であり、水温の変動は熱量の受け皿である河川流量の影響を受ける (Brown 1969) を考えると、湧水比流量の大小が夏期最高水温に影響すると類推できる。そこで本研究では、高田ら (2005) のグループ分けに基づき、流域面積の50%以上を占める地質区分をその各観測点の代表的な地質とみなし、①湧水比流量が小: 未固結堆積物・半固結-固結堆積物・深成岩類、②湧水比流量が大: 軽石流堆積物・火山性岩石・変成岩類の2グループにタイプ分けした。タイプ分けにあたっては5万分の1表層地質図 (北海道地質調査所作成) および20万分の1表層地質図を参照した。

OCLは空中写真を用い、水温観測点より上流区間が河畔林に覆われているかどうかを判読し、河畔林の被覆から開放された河道区間の長さを測定して求め、平方根変換を行ってから解析に供した。Tributaryも同様に、空中写真から支流の有無を把握し、解析に際しては支流流入有り=1、無し=0のダミー変数を与えた。Geologyは先に述べた方法でタイプ分けし、グループ①=0、グループ②=1のダミー変数を与えた。また各観測点のWAは対数変換して解析に用いた。分析は一般化線形モデル (GLM) により行い、従属変数を各観測地点のSMWT (夏期最高水温)、説明変数を①OCL、②Temp8、③WA、④Tributary、⑤Geology、とし、赤池の情報量基準 (AIC) によって各説明変数の影響を評価した。解析には統計パッケージPASW statistics 17.0 (SPSS Japan Inc., 2008) を使用した。

## 結果と考察

GLMの結果、 $\log(\text{WA})$ のみを除き、 $(\text{OCL})^{1/2}$ 、Temp8、Geology、Tributaryを取り入れたモデルが最もAICが小さくなり、説明力のあるモデルであることが示された (表-2)。また各変数によって作られるすべてのモデルのAICを比較すると、 $(\text{OCL})^{1/2}$ を除いたときにAICの変化量が最も大きくなり ( $\Delta\text{AIC}=52$ )、夏期最高水温にはOCLが最も強く関与していると考えられた。

表-2 一般化線形モデルによる夏期最高水温のモデル選択

Construction of parameters in model	AIC	$\Delta\text{AIC}$
Geology (0, 1) + Tributary (0, 1) + $\sqrt{\text{OCL}}$ + Temp8 + $\log(\text{WA})$	291.6	1.9
Geology (0, 1) + Tributary (0, 1) + $\sqrt{\text{OCL}}$ + Temp8	289.7	0.0
Geology (0, 1) + Tributary (0, 1) + Temp8	341.7	52.0
Geology (0, 1) + Tributary (0, 1) + $\sqrt{\text{OCL}}$	315.7	26.0
Tributary (0, 1) + $\sqrt{\text{OCL}}$ + Temp8	292.6	2.9
Geology (0, 1) + $\sqrt{\text{OCL}}$ + Temp8	295.7	5.9

各変量のパラメーターから、Geologyはグループ①のとき、すなわち渇水比流量が小さいグループで水温が高く、またTributaryによる冷却効果がない場合、同様に水温が高くなることが示された(表-3)。解析で得られたパラメーターから、夏期最高水温SMWTの推定式を以下のとおり作成したところ、計算値は実測値との差は±5℃以内であった。

$$SMWT=3.138*(OCL)^{1/2}+1.693*(Temp\ 8) +\{Geology=0\ or\ 1;\ 1.026\ or\ 0\} +Tributary=0\ or\ 1;\ 1.6\ or\ 0\} - 14.831 \quad \dots(1)$$

SMWTを予測する上でOCLが強い要因として示されるのは、cover ratioのように比率で表される変量と異なり、長さの概念が入ることで、同じ次数(面積・川幅)程度の河川どうしでは水表面積と同じような情報量をもつためと考えられる。今回の解析では、河畔林による被覆効果を検討するため、規模が同程度(川幅10m以下、流域面積が50km<sup>2</sup>程度まで)の小河川を対象としたため、OCLの長短がより強く結果に反映されたものといえる。逆に、流域面積WAが選択されなかったのは、観測地点間のバリエーションが小さく水温の高低に影響するほどの説明力を持たなかったためと考えられた。またTemp 8がOCLに次いで強い説明力をもつことが示されたことは、OCL=0のときの水温初期値が地域の気候条件を反映することを示唆している。但しTemp 8は観測年(予測したい年)によって変動するものであり、猛暑や冷夏などに対するSMWTの上昇に対する感受性については複数年の水温観測値により検討する必要がある、今後の課題と考えられる。

今回の解析では地域特性を表す要因として、新たにGeologyも採択され、渇水比流量が大きい地質グループでSMWTが低く、小さいグループでSMWTが高くなることが示された。このことは、北海道においてもTague et al. (2007) が示したように、水文地質特性が夏期の水温形成に関与していることを表したものだといえる。解析結果ではTributaryの効果も同様に示されたため、SMWTの推定にあたっては、水系の特性を反映するGeologyや、さらに水系の中での細かな水温変動に関与するTributaryを要因に組み込むことが有効であるといえる。

Geology・Tributaryがそれぞれ意味のある変量として示されたため、次にSMWT推定値に対する河畔林被覆の影響を検討

するため、Geology 2グループに対し、それぞれTributaryの効果がある場合とない場合の合計4つのケースに分けて、SMWT推定値と(OCL)<sup>1/2</sup>との関係を単回帰し(図-1)、それぞれ以下の式を得た。すなわち、

$$Geology\ 1,\ Tributary\ なし:\ y=3.68x+17.07\ (R^2=0.9595) \quad \dots(2)$$

$$Geology\ 1,\ Tributary\ あり:\ y=2.91x+17.00\ (R^2=0.8699) \quad \dots(3)$$

$$Geology\ 2,\ Tributary\ なし:\ y=4.96x+13.93\ (R^2=0.7822) \quad \dots(4)$$

$$Geology\ 2,\ Tributary\ あり:\ y=3.51x+15.21\ (R^2=0.6576) \quad \dots(5)$$

このとき、x=(OCL)<sup>1/2</sup>を表す。

それぞれOCLと高い相関が示されたため、GeologyグループごとにOCLとSMWT推定値をプロットした(図-2)。

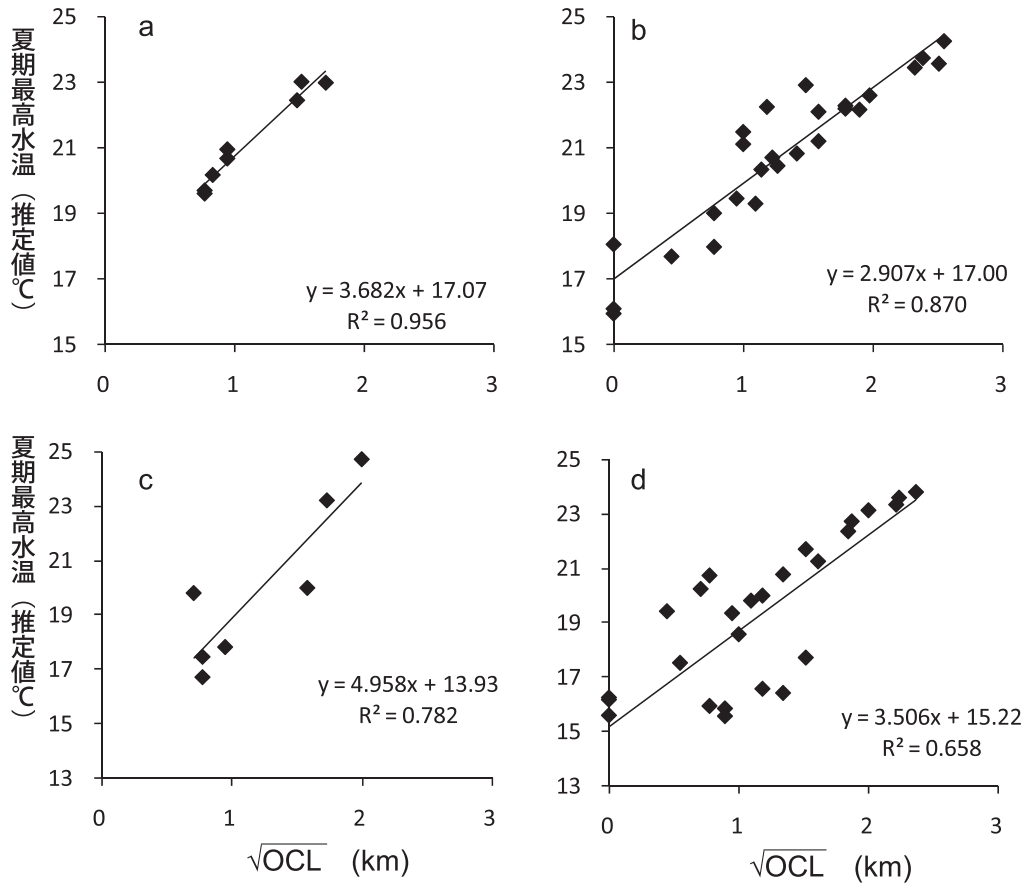
図-2Aは渇水比流量が小さい未固結堆積物・半固結-固結堆積物・深成岩類に属する水系の夏期最高水温を示している。切片の値はOCL=0すなわち河畔林によって河道が全て覆われているときの水温初期値を表し、支流の流入の有無に関わらずほぼ17℃であったのに対し、図-2Bに示した軽石流堆積物・火山性岩石・変成岩類のグループ②では、14~15℃と2℃前後低くなり、水温初期値が地質グループごとに明瞭に分かれた。今回解析対象とした地質グループ間のTemp 8には著しい差が認められないことから、北海道内というスケールにおいては、Temp 8の効果よりもGeologyの違いのほうが地域性を反映しているのではないかと考えられた。

一方、河畔林伐採によって河道が被覆から開放されたときの水温上昇に対する感受性は回帰式の傾きに反映されていると考えられる。ここでは、地質グループ①:未固結堆積物・半固結-固結堆積物・深成岩類に比べ、地質グループ②:軽石流堆積物・火山性岩石・変成岩類グループの温度上昇率が大きいことが示された。いずれの場合も森林に覆われた支流の流入により傾きが小さくなり、こうした小さな支流が水系内で冷却効果を発揮していることが示唆された。

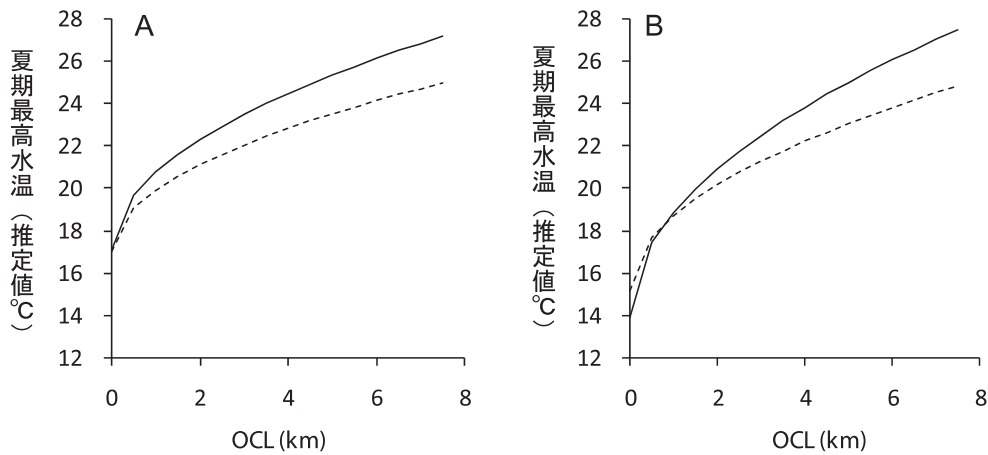
地質グループ②は、その地質特性から湧水由来の水系と位置づけられるが(Ohta and Kubota 1997)、河畔林の消失にと

表-3 パラメーター推定値とモデル効果の検定

	parameter	SE	Wald $\chi^2$	df	P
intercept	-14.831	5.16	8.27	1	0.004
geology =0	1.026	0.46	5.05	1	0.025
geology =1	0				
tributary =0	1.6	0.55	8.41	1	0.004
tributary =1	0				
$\sqrt{OCL}$	3.138	0.35	82.48	1	<0.0001
Temp8	1.693	0.29	34.65	1	<0.0001



図一 夏期最高水温の推定値と河畔林に覆われていない区間の長さ ( $\sqrt{OCL}$ ) との単回帰。  
 a: Geology グループ①, Tributaryなし, b: Geology グループ①, Tributaryあり,  
 c: Geology グループ②, Tributaryなし, d: Geology グループ②, Tributaryあり。



図二 地質グループごとに推定した夏期最高水温とOCLの関係。点線は森林に覆われた支流の流入による冷却効果があった場合を、実線は冷却効果がなかった場合をそれぞれ表す。  
 A: Geologyグループ① (湧水比流量が小: 未固結堆積物・半固結-固結堆積物・深成岩類)  
 B: Geologyグループ② (湧水比流量が大: 軽石流堆積物・火山性岩石・変成岩類)

もない温度上昇率が大きくなるメカニズムについては、現段階では考えうる要因を挙げるに留める。すなわち、周辺土地利用の拡大と河畔林の消失との関連および湧水環境への影響波及である。北海道では、河畔林の消失は多くの場合、土地

利用の拡大に付随して行われる河川整備事業と密接に関連しており、河畔林の連続性が途切れる地点は、森林域と農地域の境界であることが多い (Nagasaka and Nakamura 1999)。農地開発に伴う明・暗渠排水の整備により地下水位の低下が起

こることはよく知られているが (Burke 1975, Nicholson et al. 1989), 北海道では、排水促進のためこうした農地整備に附帯して河川改修も実施されることが多く、多くの場合河床低下が促進されるため、さらに地下水の水文環境に大きな影響が生じることが報告されている (山田ほか2004)。水文環境の激変により湧水源が減少あるいは消失しているとすれば、水温上昇に対する感受性が高くなっていることが予想される。また平地域での地下水湧出の形態によっても、河川水温への寄与が異なる (土原ほか2005) ようなので、土地利用・河道改修などの影響がどのように現れるか、水系によっても異なる可能性があり、いずれにせよ河畔林被覆がなくなることが、温度上昇にどのように現れるのか、そのメカニズムについてもう少し詳細に検討する必要がある。

以上のように水温上昇のメカニズムについて推論の域を出ていない要素もあるが、小河川を対象とした夏期最高水温形成に関わる要因解析をGLMによって行った結果、従来からよく指摘されてきたOCL (→河畔林の被覆状況)、気温 (→熱量のインプット) に加え、Geology (→水温初期値への反映) やTributary (→冷却効果の有無) の関与についても示すことができた。今回の解析では、地質グループ①の場合、OCL = 1 kmのときに水温初期値からの差が3.7℃、地質グループ②の場合に4.9℃となり、Barton et al. (1985)が示した値 (河畔林のgapが1 kmで+ 2℃) より若干大きい推定となったが、これにTributaryの冷却効果があった場合はそれぞれ、2.9℃、3.5℃と1℃前後低くなり、概ね妥当な値を示していると考えられた。1 kmという短いgapであっても最大で5℃近く水温が上昇してしまうことから考えても、河川水温の維持には河畔林の連続性が不可欠 (Barton et al. 1985; Sugimoto et al. 1997; Naiman et al. 2005) であることを改めて示している。推定水温の絶対値は、年ごとのTemp 8によって異なることが予想されるが、今回のデータからは、サクラマスの摂餌停滞を招く水温24℃ (佐藤ほか2001) に達するのは、いずれの地質グループでも、Tributary効果がない場合 : OCL > 4 km, Tributary効果がある場合 : OCL > 6 kmと算出された。

前述したように北海道では、河畔林の伐採は多くの場合土地利用の拡大に伴って実施される治水事業と密接に関連しており (Nagasaka and Nakamura 1999; Nakamura et al. 2002)、現状では河川改修された河道内で河畔林が再生回復することは難しい。河積を確保しやすい中規模・大規模河川では、支障にならない限り河畔林を残す事例が増えているが、今回解析対象とした小規模河川ではむしろ、洪水の疎通障害となるため安易に伐採・除去される場面が多い。小規模河川は河畔林の被覆効果が発揮されやすいだけでなく、今回の解析結果からは、流域レベルで見たときに冷水避難域 (thermal refugia) としても機能することが示された。こうした河川において河畔林の保全に対する配慮が欠けていることは、水生生物の生息環境保全上は好ましくないことといえ、河畔林伐採による

生息環境への影響を評価していく際に、今回示したような水温推定などもツールの一つとして有効に活用できるものと考ええる。

## 引用文献

- Allan, J.D. (1995) Stream Ecology: structure and function of running waters. Chapman & Hall, London.
- Barton, D. R., Taylor, W. D. and Biette, R. M. (1985) Dimensions of riparian buffer strips required to maintain trout habitat in southern Ontario streams. *North American Journal of Fisheries Management* 5 : 364-378.
- Beschta, R.L., Bilby, R.E., Brown, G.W., Holtby, L.B. and Hofsta, T.D. (1987) Stream temperature and aquatic habitat: fisheries and forestry interactions. (Salo, E.O. and Cundy, T.W. eds.) pp191-232. *In Streamside Management: forestry and fishery interactions*. Contribution 57. Institute of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Washington, USA.
- Bisson, P. A., Quinn, T. P., Reeves, H. and Gregory, S. V. (1992) Best management practices, cumulative effects, and long-term trends in fish abundance in Pacific Northwest river systems. (Naiman, R.J.eds.) pp.189-232. *In Watershed Management-Balancing Sustainability and Environmental Change*. Springer-Verlag, New York.
- Bjornn, T. C. and Reiser, D. W. (1991) Habitat requirements of salmonids in streams. (Meehan, W. R. eds.) pp.83-138. *In Influences of Forest and Rangeland Management on Salmonid Fishes and their Habitats*. American Fisheries Society Special Publication 19.
- Brown, G. W. (1969) Predicting temperature of small streams. *Water Resources Research* 5 : 68-75.
- Brown, G. W. (1970) Predicting the effect of clearcutting on stream temperature. *Journal of Soil and water Conservation* 25(1) : 11-13.
- Burke, W. (1975) Effects of drainage on the hydrology of blanket bog. *Irish Journal of Agricultural Research* 14: 145-162.
- Cummins, K.W. (1973) Trophic relations of aquatic insects. *Annual Review of Entomology* 18:183-206.
- Dunham, J., Schroeter, R. and Reiman, B. (2003) Influence of maxim water temperature on occurrence of Lahontan cutthroat trout within streams. *North American Journal of Fisheries Management* 23: 1042-1049.
- Fischer, S.G. and Likens, G. E. (1973) Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: and integrate approach to stream ecosystem metabolism. *Ecological Monograph* 43:421-439.
- LeBlanc, R.T., Brown, R. D. and FitzGibbon, J. E. (1997) Modeling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban streams. *Journal of*

- Environmental Management 49: 445-469.
- McGurk, B. J. (1989) Predicting stream temperature after riparian vegetation removal. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-110: 157-164.
- 真山紘 (1992) サクラマス *Oncorhynchus masou* (Brevoort) の淡水域の生活および資源培養に関する研究. 北海道さけ・ます孵化場研究報告46: 156p.
- 真山紘 (1993) サケ・マスの生態特性と河川. (玉井信行・水野信彦・中村俊六 編) pp.111-121. 河川生態環境工学—魚類生態と河川計画—. 東京大学出版会.
- 虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981) 日本の山地河川に及ぼす流域の地質の効果. 土木学会論文報告集309.
- Nagasaka, A. and Nakamura, F. (1999) The influences of land-use changes on hydrology and riparian environment in a northern Japanese landscape. *Landscape Ecology* 14(6): 543-556.
- Naiman, R. J., Bisson, P. A., Lee, R. G. and Turner, M. G. (1998 b) Watershed Management. (Naiman, R. J. and Bilby, R.E. eds.) pp.642-661. *In River Ecology and Management*. Springer-verlag.
- Naiman, R.J., Decamps, H. and McClain, M.E. (2005) Disturbance and Agents of Change. (Naiman, R.J., Decamps, H. and McClain, M.E. eds.) pp. -232. *In Riparia. Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press.
- 中村太士・百海琢司 (1989) 河畔林の河川水温への影響に関する熱収支的考察. 日本林学会誌 71: 387-394.
- Nakamura, F., Jitsu, M., Kameyama, S. and Mizugaki, S. (2002) Changes in riparian forests in the Kushiro Mire, Japan, associated with stream channelization. *River research and Applications* 18: 65-79.
- Nakamura, F. and Yamada, H. (2005) Effects of pasture development on the ecological functions of riparian forests in Hokkaido in northern Japan. *Ecological Engineering* 24: 539-550.
- Nicholson, I.A., Robertson, R.A., and Robinson, M. (1989) Effects of drainage on the hydrology of a peat bog. *International Peat Journal* 3: 59-83.
- Ohta, T. and Kubota, J. (1997) Annual water balance and its seasonal variation at the southern slope of the Bandai Volcano. (Research group for the origin of debris avalanche eds.) pp.239-247. *In Bandai Volcano, Science and Technology Agency, Japan*.
- Pollock, M. M., Baker, S., Bigley, R. and Scarlett, W. (2004) Summer stream temperature in the Olympic Experimental State Forest, Washington. Department of Natural Resources Habitat Conservation Plan Stream and Riparian Monitoring Program. 2004 Report. 17pp.
- 佐藤弘和・永田光博・鷹見達也・柳井清治 (2001) 河畔林の被陰がサクラマスの成長に及ぼす影響—夏期河川水温を指標とした解析—. 日本林学会誌83: 22-29.
- Schloss, A. J. (1985) A predictive model for estimating maximum summer stream temperature in western Oregon. Tech. Note 370, Denver, CO: Bureau of Land Management Service Center, USDI; BLM/4 A/PT/85-006-4341: 8 pp.
- Stoneman, C.L. and Jones, M.L. (1996) A simple method to classify stream thermal stability with single observations of daily maximum water and air temperatures. *North American Journal of Fisheries Management* 16: 728-737.
- 杉本幸穂 (1997) 統計的手法を用いた北海道内小河川における夏期水温の推定. 平成8年度北海道大学農学部修士論文.
- Sugimoto, S., Nakamura, F. and Ito, A. (1997) Heat budget and statistical analysis of the relationship between stream temperature and riparian forest in the Toikanbetsu river basin, Northern Japan. *Journal of Forest Research* 2: 103-107.
- Tague, C., Farrell, M., Grant, G., Lewis, S. and Rey, S. (2007) Hydrogeologic controls on summer stream temperatures in the McKenzie River Basin, Oregon. *Hydrological Processes* 21: 3288-3300.
- 高田賢一・中津川誠・村上泰啓 (2005) 積雪寒冷地の流域条件と水文・水質との関係. 水工学論文集49, 6p.
- 手計太一・吉谷純一 (2006) 社会変動を考慮した河川流量予測モデルの構築. 水文・水資源学会誌19(3): 171-182.
- Torgersen, C.E., Price, D.M., Li, H.W. and McIntosh, B. A. (1999) Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of Chinook salmon in northeastern Oregon. *Ecological Applications* 9(1): 301-319.
- 土原健雄・中矢哲郎・石田聡・今泉眞之 (2005) 釧路湿原チルワツナイ川水文環境に河床湧水が及ぼす影響解明. 農工研技報203: 121-137.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000) Upper Grande Ronde Subbasin Total maximum Daily Loads (TMDLs) Program Appendix A: Temperature Analysis. 94p.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R. and Cushing, C. E. (1980) The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 37:130-137.
- Veliz, M (2003) Cold water fish habitat management in the Nairn Creek syb-basin. Ausable Bayfield Conservation Authority. 19p.
- 山田浩之・中村隆俊・仲川泰則・神谷雄一郎・中村太士・渡辺綱男 (2004) 自然再生事業区域釧路湿原広里地区における湿原環境の実態—酪農草造化および河川改修が湿原地下水環境に及ぼす影響—. 応用生態工学 7: 37-51.

## Summary

Riparian forests influence aquatic ecosystems. Maintaining cool water by shading, in particular, is a key role for conserving habitat for juvenile masu salmon (*Oncorhynchus masou*). Empirical models were developed from using water temperature data obtained at 68 points of 12 watersheds in Hokkaido, for estimating summer maximum water temperature (SMTP). Generalized linear model (GLM) chose the following four variables to explain the variation in SMTP: open channel length (OCL), altitude-adjusted August maximum air temperature, presence or absence of forested tributary, and watershed geology.

We examined the relationship between estimated SMTP and OCL by a simple regression model. Difference in geology was reflected in the intercept (SMTP in OCL= 0); the value of volcanic rock watersheds showed 2°C lower than that of sedimentary rock watersheds. On the other hand, sensitivity of fluctuation in SMTP by removal of riparian forests was reflected in the coefficient of regression; the value of volcanic rock watersheds showed larger than that of sedimentary rock watersheds. In both geological types, the coefficients of regression became smaller when forested tributaries join at the upstream of a given observed point. In this model, when OCL reaches 4km (without forested tributary) or 6km (with forested tributary), SMTP is estimated to be 24°C, which is the upper limit of thermal tolerance for active feeding and growth of juvenile masu salmon.



付表 GLM解析に用いた変数および各観測点の位置情報

地域	観測点	地質 <sup>1</sup>	支流の有無 <sup>2</sup>	実測水温 (°C)	OCL (km)	$\sqrt{OCL}$	Temp8 (°C)	流域面積 (km <sup>2</sup> )	log(WA)	標高 (m)	気象観測所 8月平均気温
中川	JYb	0	0	18	0.6	0.78	17.4	10.5	2.35	110	17.9
中川	KNa	0	0	17	0.7	0.84	17.6	10.2	2.32	80	17.9
中川	NPa	0	0	19	0.6	0.78	17.4	7.7	2.04	120	17.9
中川	NPb	0	0	22	2.9	1.70	17.6	9.2	2.22	70	17.9
佐呂間	ORa	0	0	28	2.2	1.48	17.7	12.9	2.56	140	18.3
佐呂間	WKb	0	0	21	0.9	0.95	17.8	19.6	2.98	210	17.9
佐呂間	SRa	0	0	26	2.3	1.52	18.0	32.1	3.47	180	17.9
新和	RBa	0	0	18	0.9	0.95	17.7	17.0	2.83	320	19.1
新和	RBb	0	0	19	1.6	1.27	17.9	19.2	2.96	280	19.1
中川	JRb	0	1	17	0	0.00	17.6	10.8	2.38	80	17.9
中川	JRc	0	1	20	2.5	1.58	17.7	53.8	3.99	50	17.9
中川	TKa	0	1	16	1.2	1.10	17.5	12.1	2.49	90	17.9
中川	TKb	0	1	21	5.7	2.39	17.7	37.5	3.62	50	17.9
中川	JYc	0	1	25	5.4	2.32	17.7	20.1	3.00	60	17.9
中川	KNb	0	1	24	6.5	2.55	17.7	32.6	3.48	50	17.9
中川	PRb	0	1	24	6.3	2.51	17.4	15.2	2.72	110	17.9
佐呂間	ORb	0	1	27	3.9	1.98	17.8	22.0	3.09	120	18.3
佐呂間	BSa	0	1	19	0.6	0.78	17.3	15.4	2.73	210	18.3
佐呂間	BSb	0	1	24	3.6	1.90	17.7	31.7	3.46	140	18.3
佐呂間	WKA	0	1	17	0.2	0.45	17.8	18.0	2.89	220	17.9
佐呂間	SK	0	1	17	0	0.00	17.7	12.2	2.50	240	17.9
佐呂間	SRb	0	1	23	3.2	1.79	18.0	54.4	4.00	180	17.9
佐呂間	PI	0	1	21	0.9	0.95	17.9	18.4	2.91	200	17.9
佐呂間	NRa	0	1	19	0.6	0.78	17.9	15.2	2.72	100	18.3
佐呂間	NRb	0	1	23	1.5	1.23	18.1	29.7	3.39	70	18.3
新和	UG	0	1	25	1.4	1.18	19.1	9.0	2.20	60	19.1
新和	MKa	0	1	18	0	0.00	18.8	8.1	2.09	110	19.1
新和	MKb	0	1	20	1	1.00	19.0	15.6	2.75	80	19.1
新和	ATa	0	1	21	1.3	1.14	18.1	15.4	2.73	250	19.1
新和	ATb	0	1	22	2.5	1.58	18.3	23.7	3.17	210	19.1
新和	RBc	0	1	23	3.2	1.79	17.9	31.9	3.46	270	19.1
新和	BU	0	1	19	2	1.41	17.8	22.4	3.11	290	19.1
新和	AM	0	1	26	2.2	1.48	18.9	16.2	2.78	90	19.1
新和	SB	0	1	21	1	1.00	18.8	9.9	2.29	120	19.1
鶴居	MHb	1	0	23	2.5	1.58	16.7	20.5	3.02	170	17.4
鶴居	KS	1	0	20	0.9	0.95	16.6	8.4	2.13	190	17.4
鶴居	HN	1	0	17	0.6	0.78	16.3	9.5	2.25	250	17.4
鶴居	SSt	1	0	17	0.6	0.78	16.7	10.8	2.38	170	17.4
黒松内	SB	1	0	25	4	2.00	18.7	15.8	2.76	80	19
旭川	FM	1	0	24	3	1.73	18.3	15.0	2.70	320	18.7
旭川	KZb	1	0	20	0.5	0.71	18.2	18.7	2.93	340	18.7
鶴居	MHa	1	1	16	0.8	0.89	16.5	15.6	2.74	210	17.4
鶴居	NB	1	1	14	0	0.00	16.2	16.6	2.81	260	17.4
鶴居	HR	1	1	17	1.4	1.18	16.4	40.3	3.70	230	17.4
鶴居	OS	1	1	16	0.6	0.78	16.8	11.7	2.46	160	17.4
鶴居	MS	1	1	15	0.8	0.89	16.3	20.7	3.03	240	17.4
鶴居	SSa	1	1	20	2.3	1.52	16.4	33.8	3.52	220	17.4
鶴居	KT	1	1	16	1.8	1.34	16.0	29.4	3.38	300	17.4
黒松内	KJ	1	1	18	0.3	0.55	18.1	8.0	2.08	190	19
黒松内	SR	1	1	19	0.9	0.95	18.4	12.0	2.49	130	19
黒松内	HS	1	1	22	3.4	1.84	18.5	13.7	2.62	110	19
黒松内	TRa	1	1	21	3.5	1.87	18.7	18.9	2.94	80	19
黒松内	TRb	1	1	18	4	2.00	18.7	28.0	3.33	80	19
黒松内	TB	1	1	16	0	0.00	18.3	3.6	1.29	150	19
黒松内	KMa	1	1	20	1.2	1.10	18.4	14.2	2.65	130	19
黒松内	KMb	1	1	22	5	2.24	18.5	22.0	3.09	110	19
黒松内	NG	1	1	21	2.3	1.52	18.8	26.2	3.26	70	19
黒松内	SZ	1	1	17	1	1.00	17.9	6.6	1.89	230	19
黒松内	CP	1	1	19	1.8	1.34	18.5	7.7	2.04	110	19
旭川	NZa	1	1	24	2.6	1.61	18.3	10.5	2.35	190	18.6
旭川	NZb	1	1	27	4.9	2.21	18.4	27.0	3.30	170	18.6
旭川	TH	1	1	21	1.4	1.18	18.4	13.5	2.60	180	18.6
旭川	KZa	1	1	16	0	0.00	18.0	15.6	2.75	380	18.7
旭川	RS	1	1	22	5.6	2.37	18.4	40.0	3.69	300	18.7
旭川	OM	1	1	17	0	0.00	18.4	15.9	2.77	310	18.7
旭川	AK	1	1	22	0.5	0.71	19.4	27.8	3.33	220	20
旭川	INa	1	1	20	0.2	0.45	19.4	10.7	2.37	220	20
旭川	INb	1	1	22	0.6	0.78	19.6	21.9	3.09	190	20

1: 0 = 未固結堆積物, 半固結-固結堆積物, 深成岩類→濁水比流量が小

1 = 軽石流堆積物, 火山性岩石, 変成岩類→濁水比流量が大

2: 0 = 森林に覆われた支流の流入がない

1 = 森林に覆われた支流の流入あり