

河畔林密度の違いが河川水温環境に 与える影響について

EFFECT OF DENSITY DIFFERENCES OF RIPARIAN VEGETATION ON THE RIVER THERMAL ENVIRONMENT

吉田貢士¹・宗村広昭²・樋口克宏³・戸田修⁴・丹治肇⁵

Koshi YOSHIDA, Hiroaki SOMURA, Katsuhiro HIGUCHI, Osamu TODA and Hajime TANJI

¹正会員 農博 CREST研究員 農業工学研究所 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

²正会員 農博 特別研究員 農業工学研究所 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

³正会員 修士(農) 特別研究員 農業工学研究所 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

⁴非会員 学士(農) 東京大学大学院 農学生命科学研究科 (〒113-8657 文京区弥生1-1-1)

⁵正会員 農博 河海工水理研究室室長 農業工学研究所 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

The declines of river corridor vegetation density strongly affect to the river heat environment, and that change makes big impact to the ecological systems. In this study, stream temperature analysis model related with river corridor density was developed and applied to Nam Song River, Laos. Metrological data (air temperature, relative humidity, wind speed) were used, and sink or source terms of heat transfer equation were estimated from those data. Land cover GIS data was used for vegetation density analysis along the main river. As the result of simulation cases with several vegetation densities, river water temperature was more sensitive to river discharge change as decreasing of vegetation densities.

Key Words : River Corridor, Vegetation Density, Stream Temperature

1. 序論

近年, 河畔林の多面的機能が生態学や河川環境工学分野で注目されている。健全な河畔林を有する河川では, 木々の樹冠により日射が遮られ河川水温は低く保たれるため, 河川流量が小さい渇水期においても藻類の増殖が抑えられる¹⁾。また, 低い河川水温においては, 河川生態系を脅かす外来種の急激な増加が抑えられ, その結果として生物の多様性が維持されてきた。水温は河川水質の項目においても重要なパラメータであり, 水資源の貯留・工業利用・灌漑といった人間活動は, 河川水温を大きく変化させてきた^{2), 3)}。さらに近年は地球温暖化に伴う水温の上昇が懸念されており, 水温は他の水質項目のほぼ全てに影響を与えるために, 流量とともに最大水資源利用量を規定する重要な項目になりつつある。

本研究で対象とするメコン河は, 流域6カ国を流れる有数の国際河川であり, 20世紀においては開発から取り残されていたため比較的原始的な状態を保っていた。しかし急速な開発が進みつつある現在, 河川生物や魚類な

どは深刻な脅威にさらされている。特にメコン河中流の山岳地帯に位置するラオスでは, 人口増加に伴う農地開発や焼畑の増加により河畔林が破壊されている⁴⁾。河畔林植生密度の減少は河川水温に大きく影響し, 河川生物環境への深刻な影響が懸念されている。そこで本研究では, 従来の河川水温予測モデルに河畔林の植生高さ・密度・河川からの距離を考慮した河川水温解析モデルを構築し, ラオスの首都を流れるナムグム川の支流であるナムソン川に適用した。

2. 対象地域

ナムソン川は, 図-1に示すように集水面積1,800km²・河川長100kmを有するナムグム川の支流である。ナムグムダムにおける慢性的な水量不足を受けて, ナムソン川からナムグムダムに導水を行うナムソンダムが1996年に建設された。ナムソンダム下流には8ヶ村4,000人が暮らしており, ダムの計画段階においては住民の家庭用水・農業用水・排水稀釈水などの配慮から, 乾季放流量



図-1 対象地域

8m³/s(自然流量は約10m³/s)を保障するものとされたが、現在は2m³/sしか確保できていない。ダムの完成以後、乾季流量が減少した下流河川においては、漁獲の減少、家庭用水が取水できなくなったなど、住民の生活に直接的な被害が出ている。そのため住民は河畔林を伐採して換金し、果樹や畑作をして生活を補っているが、河畔林の減少が魚類などの河川生息動物の減少に拍車をかけている⁴⁾。本研究ではナムソングダム下流の10km区間を解析対象とした。

3. 短波放射量の推定

水温の変化を予測するためには、河川における水分子が得る又は失う熱収支を計算する必要がある。熱交換の物理過程では、熱の移流・熱伝導・蒸発の潜熱・顕熱・短波放射などがあげられる。そこでまず、基礎的な項目である地上での短波日射量を推定する。

本研究では、気温・湿度・風速などの気象データを用いてFAO³⁾が推奨している方法により短波放射量を次のように計算した。1年におけるある日付・時刻および対象とする場所の緯度における地球外放射量 R_a は次式により計算できる。

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (1)$$

$$dr = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (3)$$

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \Delta t}{24} ; \quad \omega_2 = \omega + \frac{\pi \Delta t}{24} \quad (4)$$

ここで、 R_a は時間単位の地球外放射量[MJ/m²/hour]、

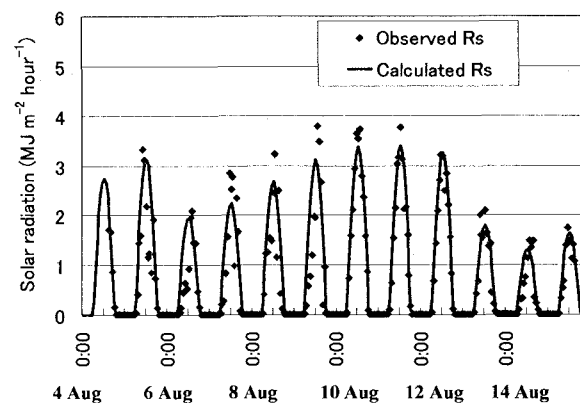


図-2 短波放射量の計算結果 (102.5E, 18N)

$G_{sc}=0.082$ [MJ/m²/min]は短波放射係数、 dr は太陽と地球の相対距離、 ϕ は対象とする場所の緯度[rad]、 δ は太陽の偏角[rad]、 J は1月1日からの積算日数、 ω_1 はある時刻始まりの太陽角度、 ω_2 はある時刻終わりの太陽角度、 ω はある時刻の中間時における太陽角度[rad]、 Δt は計算時間[hour]である。

ある時刻の中間時における太陽角度 ω は次式により計算される。

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t_s + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (6)$$

$$S_c = 0.1645 \sin(2f) - 0.1255 \cos(f) - 0.025 \sin(f) \quad (7)$$

$$f = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (8)$$

ここで、 ω_s は日没の太陽角度[rad]、 t_s はある時刻の中間時(ex. 7:00から8:00の中間時は7.5)、 L_z は対象とする場所のタイムゾーンの経度[degree west of Greenwich(ex. バンコクは255°)], L_m は対象とする場所の経度、 S_c は太陽時の季節係数[hour]。ただし $\omega < -\omega_s$ or $\omega > \omega_s$ の範囲においては太陽は地平線より下にあり R_a はゼロとなる。

短波放射 R_s は地球外放射と相対日照時間を用いてAngstrom式により計算した

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a ; \quad N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (9)$$

ここで、 R_s 時間短波放射量[MJ/m²/hour]、 n は1日における実日照時間[hour]、 N はその日における最大日照時間[hour]、 a_s および b_s はAngstrom係数である。大気の状態や対象とする時期によりAngstrom係数は変化する⁵⁾が、それを検証するための長期データが得られなかったため、ここではFAOの推奨する値を用いた($a_s=0.25$, $b_s=0.5$)。

ラオスの首都ビエンチャン(102.5° E, 18° N)における計算結果を図-2に示す。図中の実線が計算値、プロットが実測値である。全体的に短波放射の最大値が低

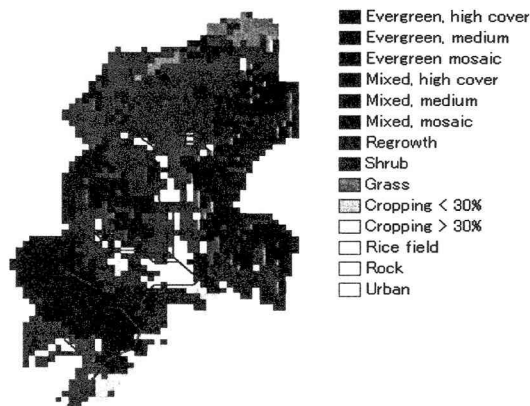


図-3 GIS植生データ

く計算されているが、これはAngstrom式において相対日照時間により補正を行ったためと思われる。今回用いたデータは日単位データであったため、日中において曇りの時間帯と晴天時を区別することができなかったが、日変動の傾向は良好に計算された。

4. 河畔林植生による遮蔽率の計算

河畔林の存在による河川水温への影響を評価するためには、各時刻における河川水面の遮蔽率 V_{shade} を計算する必要がある。まず対象とするナムソダム下流における河畔林の植生高 V_h 、植生密度 V_d 、河川中央からの植生距離 V_o をGISの土地被覆データ(図-3)およびフィールド調査により推定した。GISデータは国土地理院により公開されている地球地図データを使用した。ここでの植生密度とはGISデータの定義に基づき、地表面積における植生被覆面積率で定義する。結果を表-1に示す。現状での植生密度は右岸・左岸ともに約60%であったが、午前中に日射のあたる右岸側のほうが植生は高く、河川近くまで茂っていた。

得られた河畔植生の特徴をもとに、図-4のように植生による水面の遮蔽率を3章で計算した日の出・日の入り・太陽角度の時間変化、および河川方向の空間変化から河川グリッド毎に計算した。地形および植生による日射の遮断効果についてはChenら⁶⁾が詳細なモデル化を行っている。地形遮断は河道と標高データから計算されるが、本研究のように1kmグリッドで計算を行う際には、河畔植生による遮断効果のみ考慮するよう簡略化した。

まず植生が水面に落とす影の長さは以下で与える。

$$S_{length,L} = |V_{hL} / \tan(\omega)| \quad (-\omega_s < \omega < 0) \quad (10)$$

$$S_{length,R} = |V_{hR} / \tan(\omega)| \quad (0 \leq \omega < \omega_s) \quad (11)$$

ここで、 S_{length} は影の長さ、 V_h は植生高さ、添え字のL,Rは左岸および右岸を示す。

表-1 河畔林植生の特徴

	左岸	右岸
植生高 V_h	7 m	10 m
植生密度 V_d	60 %	60 %
河川からの植生距離 V_o	10 m	7 m

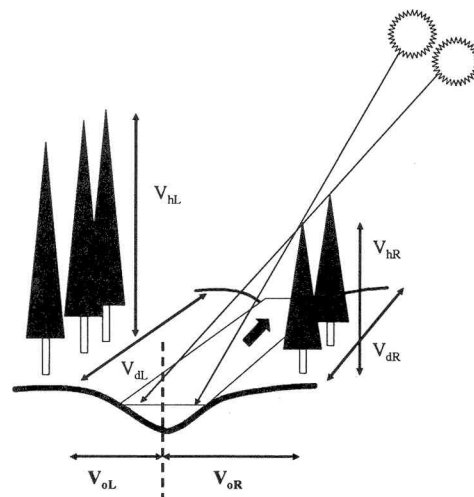


図-4 河畔林による水面遮蔽率

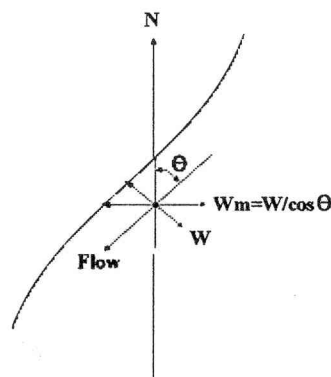


図-5 河道方向と水面幅の関係

次に、図5に示すように河道の偏角により川幅を修正した。

$$W_m = W / \cos(\theta) \quad (12)$$

ここで、 W_m は河道の偏角により修正された川幅、 θ は河道の偏角である。

日射のあたる水面幅は以下により計算した。

$$W_{shined,L} = \max(0, V_{oL} + W_m / 2 - S_{length,L}) \quad (-\omega_s < \omega < 0) \quad (13)$$

$$W_{shined,R} = \max(0, V_{oR} + W_m / 2 - S_{length,R}) \quad (0 < \omega < \omega_s) \quad (14)$$

以上の情報から、植生による遮蔽率は以下のように算出した。

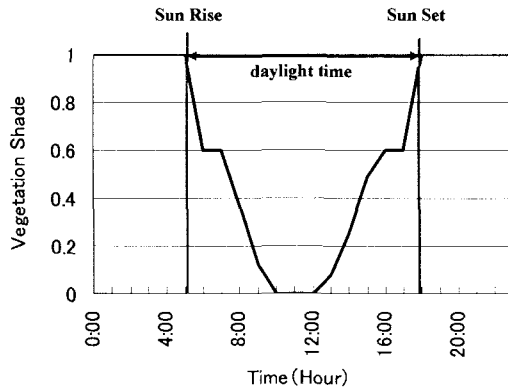


図-6 遮蔽率の変化
(上流より4km地点計算値, 3月31日)

$$V_{shade} = V_{dL} \cdot (W_m - W_{shined,L}) / W_m \quad (-\omega_s < \omega < 0) \quad (15)$$

$$= V_{dR} \cdot (W_m - W_{shined,R}) / W_m \quad (-\omega_s < \omega < 0) \quad (16)$$

遮蔽率の日変化を図-6に示す。午後の日射を遮る右岸側植生の影響で午後の水面遮蔽時間が長くなっており、また太陽が南中する正午付近においては植生の遮蔽率はゼロである。

5. 河川水温の計算

本研究では、周辺環境との熱交換を考慮した1次元の熱移流・拡散方程式を用いた。河川流量、断面積が変化する開水路における熱輸送方程式は次式で表される。

$$A \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{WS}{\rho C_p} + \frac{G}{\rho C_p} \quad (17)$$

ここで、 T は水温、 x は流下距離、 t は時間、 D_L は流下方向の熱拡散係数、 S は周辺環境との熱交換に関する項、 A は通水断面積、 W は水面幅、 Q は流量、 G は横流入による熱輸送、 ρ は水の密度、 c_p は水の比熱である。対象としたナムソン川では流速が相対的に速く、熱拡散係数を15-200m²/sの範囲で変化させたところ結果に影響がなかったため、本研究では20m²/sを用いた。式(17)はよく混合した定常流における熱方程式であり、熱輸送は横断方向にはないと仮定している(Bashar⁷⁾)。断面積 A と水面幅 W は流量 Q の関数であり、本研究ではHinheup観測所において得られた関係式 $W=10.0Q^{0.15}$ を用いた。

周辺環境との熱交換に関する S は次のように表される。

$$S = S_a + S_b \quad (18)$$

$$S_a = H_s - H_l - H_e - H_c \quad (19)$$

ここで、 S_a は水塊と空気間での熱交換量、 S_b は水塊と河床との間の伝導熱、 H_s は短波放射による熱交換項、 H_l は長波放射による熱交換項、 H_e は蒸発による熱輸送項、 H_c

は対流による熱交換項である。

短波放射量は既に3章で述べたとおり気象データから計算され、純短波放射量は入射量と反射量、さらに植生による遮断率により次のように表される。

$$H_s = (1 - \alpha) R_s (1 - V_{shade}) \quad (20)$$

ここで、 $\alpha=0.06$ は水面における反射率、 R_s は3章における短波放射量、 V_{shade} は4章における河畔林植生の遮断率である。

純長波放射量 H_l は次のように表される。

$$H_l = \sigma (\epsilon_w T_{K,s}^4 - \epsilon_a T_{K,a}^4) \quad (21)$$

ここで、 σ はステファン-ボルツマン係数、 $T_{K,s}$ は水面のケルビン温度、 $T_{K,a}$ は空気のケルビン温度、 $\epsilon_w (=0.97)$ は水面の長波放射率、 $\epsilon_a (=0.78)$ は大気の長波放射率である⁸⁾。

蒸発に伴う熱輸送項 H_e は次のように表される。

$$H_e = \rho L f(Wind) (e_w - e_a) \quad (22)$$

$$f(wind) = 0.0296 + 0.00637 Wind_z \quad (23)$$

ここで、 e_a は空気蒸気圧、 e_s は水面温度における飽和蒸気圧、 L は水の蒸発顕熱、 $f(Wind)$ [m/s/kP]は風速の関数であり、 $Wind_z$ は高さ z における風速である(Gulliver⁹⁾)。

対流項 H_c は次の式で表される。

$$H_c = 0.61 \frac{P}{1000} \rho L f(Wind) (T_s - T_a) \quad (24)$$

ここで、 T_a は気温、 P は大気圧[kP]、 $f(Wind)$ は蒸発の項と同じ関数である。

水塊と河床における伝導熱 S_b は次式により与えられる。

$$S_b = -k \frac{\partial T_b}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (25)$$

ここで、 k は河床材料の熱伝導率、 T_b は河床温度、 z は鉛直距離である。対象流域においては河床温度データが得られておらず、河床での熱伝導は水深が極端に浅い場合を除いては無視できる¹⁰⁾ため、今回は考慮していない。

横流入による熱輸送 G は以下で与えられる。

$$G = \rho C_p q_l (T_g - T_w) \quad (26)$$

ここで、 q_l は単位流下距離あたりの横流入量[m³/s/m]、 T_g は流入水の水温である。横流入は地下水供給が主であると考えられるため、基底流出の水温(27.1℃)を与えた。地下水の水温は年間を通じてほとんど変化せず、通常は年間の平均気温に近い¹¹⁾。なお、単位グリッドからの基底流出量は吉田ら¹²⁾の流出解析結果を用いた。

式(17)は陰解スキームのクランク・ニコルソン法により数値的に解いた。タイムステップは1時間、空間スケールは1,000mを用いた。上流境界条件は、温度成層のない貯留池を仮定し、Basherら⁷⁾の方法を用いて計算した水温を与え、下流端境界は温度勾配を一定とした。

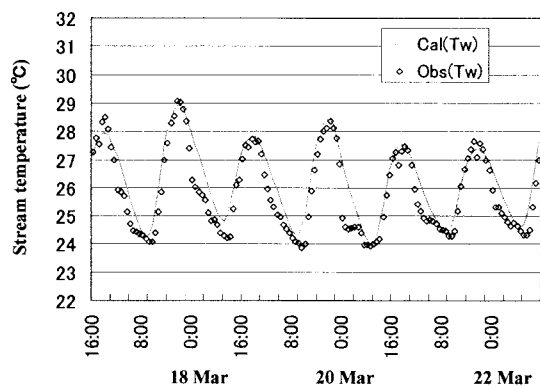


図-7 水温の計算結果

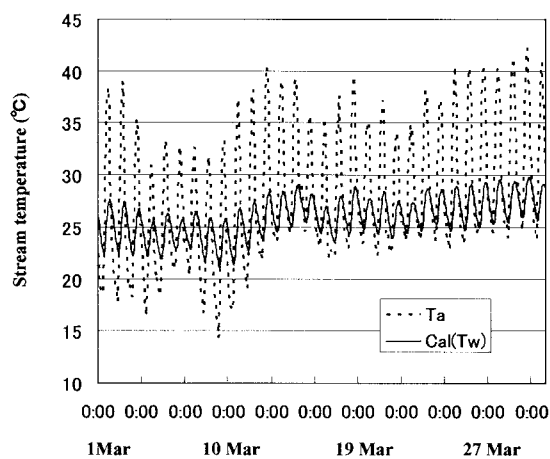


図-8 気温(観測値)と水温(計算値)の変化
(2004年3月1日～31日)

6. 結果と考察

まずモデルの検証のため、現状の河畔林植生密度60%、入力流量 $2\text{m}^3/\text{s}$ で計算を行った。図-7にダム下流4km地点における計算結果(17Mar-22Mar2004)を示す。水温の日変動において水温の最大値は時間・水温ともに良好に計算できたが、最小値には若干の誤差があった。これは日平均風速データを全時間で一定に入力したため、および基底流水温が実際はもう少し低いと思われる。3月における気温(実測値)と水温(計算値)の結果を図-8に示す。気温に追従して水温も変動するが、比熱の大きい水温の振幅は小さい。

現状の植生密度60%において、流量変化が下流の水温環境にどの程度影響を与えたかについて考察する。解析期間3月1日～31日における流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ と $2\text{m}^3/\text{s}$ の解析結果をもとに流下距離(km)と月平均水温差(°C)の関係を図-9に示す。生息生物に影響を与える水温差を約 1°C とすると、流量変化の影響は約下流2kmから5kmの範囲に及んでおり、下流3km地点において水温差は約 1.6°C で最大となった。6kmより下流では周辺からの基底流出の流入による流量の回復により影響は小さい。

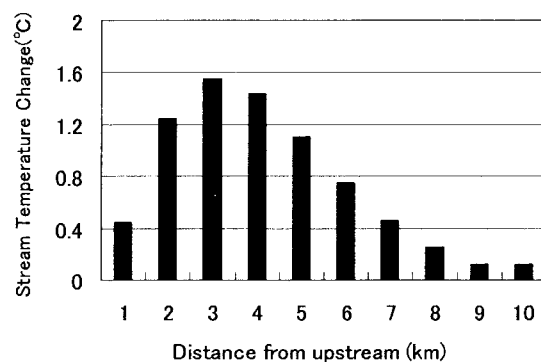
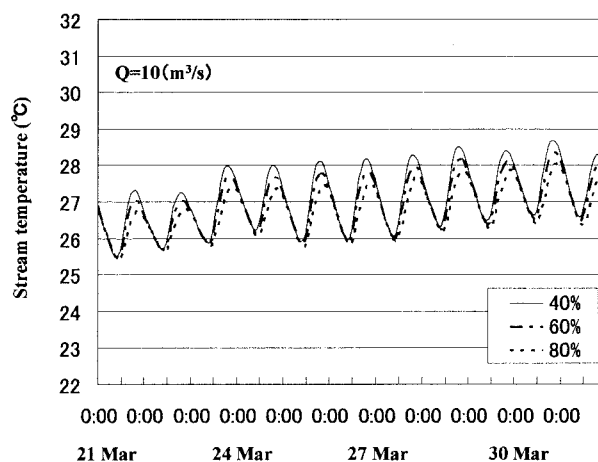


図-9 流量変化に伴う流下距離と月平均水温差
(植生密度60%における解析結果)

(a) 開発前流量 $10(\text{m}^3/\text{s})$



(b) 開発後流量 $2(\text{m}^3/\text{s})$

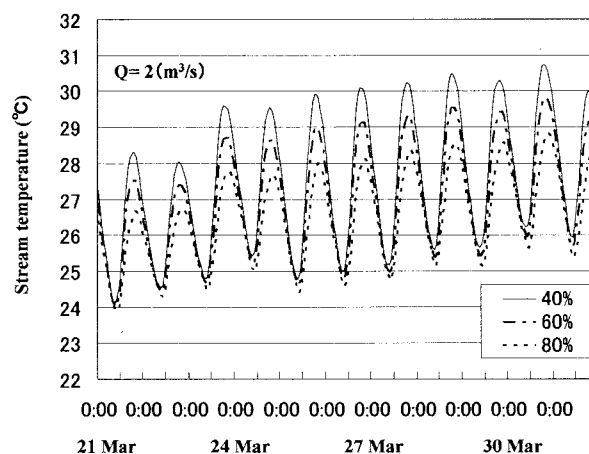


図-10 植生密度および流量の変化と水温の関係

次に、構築したモデルを用いて河畔林植生密度と河川流量の関係について解析を行った。解析には、植生密度を40%、60%、80%と変化させ、流量は乾季における自然流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ とダム建設後の $2\text{m}^3/\text{s}$ を入力とした。上流より4km地点の計算結果を図-10(a), (b)に示す(ただし、水温への影響が最も大きかった3月21日～3月31日を出力)。まず流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、いずれの植生密度に

においても水温変化は1℃未満であるのに対して、流量2m³/sでは植生密度の減少に伴い水温が約2℃も変化した。また、植生密度が高いほど流量変化に対する水温変化は小さく、逆に密度が小さいと流量変化に対して非常に敏感に反応した。つまり河川水温環境の変化を緩和するためには河畔林を健全に保つことが重要である。

7. 結論

本研究では、まず短波放射量の日変動および季節変動を計算し、それを入力とした水温解析モデルを構築した。また、河畔林の高さ・密度・河川からの距離により水面の遮蔽率を計算し、河畔林の状況が河川水温環境に与える影響について解析を行った。ナムソン川における流域変更による流量の低下は、下流水温に最大で約1.6℃の影響があり、その影響は下流約2-5kmの区間に見られた。また河畔林密度を変化させて解析を行った結果、河畔林密度の減少は水温を著しく上昇させ、さらに流量の変動に伴う水温変化も大きくなることが示された。水資源開発において下流流量が変化することはやむを得ないことであるが、まず河川環境の許容範囲内での流量変化を想定し、水温への影響をできるだけ緩和するために総合的な流域管理として河畔林を健全な状態で保存することが望まれる。

参考文献

- 1) 崎尾均, 中村太士, 大島康行: 河畔林・溪畔林研究の現状と課題, 日本生態学会誌, Vol.45, pp.291-294, 1995.
- 2) Bartholow, J. M. : Stream temperature investigation : Field and analytical methods . Instream Flow Information Paper No.13, US Fish Wildlife Service Biological Report 89(17), 1989.
- 3) LeBlanc, R. T., Brown, R. D. and FitzGibbon, J. E. : Modeling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban stream., Journal of Environmental Management, 49(4), pp.445-469, 1979.
- 4) Roel S. and Sean W.: Nam Song Diversion Project ADB TA5693 – Draft Impact Analysis Report and Action Plan, ADB, Oct., 2001.
- 5) FAO : Crop Evapotranspiration, FAO irrigation and drainage Paper No.56, 2000.
- 6) Chen, Y. D., Carsel, R. F. McCutcheon, S. C. & Nutter W. L.: Stream Temperature Simulation of Forested Riperian Areas: I. Watershed-Scale Model development, 124(4), pp.304-315, 1998.
- 7) Bashar, A. S. and Stefan, H. G. : Stream Temperature Dynamics (Measurements and Modeling), Water. Res. Res., 29(7), pp.2299-2312, 1993.
- 8) Edinger, J. E., Duttweiler, D. W. and Geyer, J. C. : The response of water temperature to meteorological conditions, Water Res. Res., Vol.4, No.5, pp.1137-1143, 1968.
- 9) Gulliver, J. S. and H. G. Stefan : Wind function for a sheltered stream, J. Environ. Eng., 112(2), pp.387-399, 1986.
- 10) 近藤純正: 河川水温の日変化(1)計算モデル, 水文水資源学会誌, Vol.8, No.2, pp.184-196, 1995.
- 11) 中村太士, 百海琢司: 河畔林の河川水温への影響に関する考察, 日本林学会誌, Vol.71, pp.387-394, 1989.
- 12) Yoshida, K., Tanji, H., Somura, H. : Stream Temperature Analysis in Nam Ngum River Basin, Mekong, 水工学論文集, 土木学会, Vol.48, pp.1531-1535, 2004.

(2004. 9. 30 受付)