

河川水温の形成過程における光の水中吸収率の影響

Effect of Absorption of Light on River Water Temperature

小葉竹重機*, 塩田孝久**, 河内信二郎***

By Shigeki KCBATAKE, Takahisa SHIODA and Shinjiro KAWAUCHI

Cold water release from a dam is a problem awaiting solution: specially for river fisheries, this is an urgent problem. Some facilities capable of effective use of sunshine to warm up water may be one of the solutions. From this standpoint, this paper aims at making clear the formation process of river water temperature laying emphasis on the effect of day-light. We carried out simulations together with observations of river water temperature and related weather conditions. As a results, we concluded that the absorption ratio of day-light within a water column is nearly 1.0, even if water depth is less than 30cm.

Keywords : Water temperature, Absorption of day-light, Cool water, Discharge from dam

1. まえがき

ダムに選択取水施設が設けられるようになり、以前ほど冷水の放流問題は大きくは取り上げられなくなったが、放流した稚鮎の成長不足などの問題が依然として問題となっている箇所もある。このような冷水対策としてはやはり選択取水施設が抜本的な対策であろうが、放流後の対策として日光による昇温効果をできるだけ利用するような下流側施設を考えることも有効であろう。また、放流後どの程度の流下距離があれば所用の水温まで上昇するのか、などの見積もりも必要であろう。こうした観点から山地河川の水温の形成過程を正確に把握することは重要な課題である。

我々はこうした観点から渡良瀬川支川の桐生川において水温と日射などの観測を行ってきおり¹⁾、これまでの成果として、水塊における日射の吸収率を考慮する必要のあることを指摘した。²⁾ この指摘は、河床

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

** 学生会員 群馬大学工学研究科博士前期課程
(同上)

*** 群馬大学工学部学生
(同上)

伝熱を未知量として逆算し、その性情の説明がつかない部分は供給源にあるとして結論したものである。本報告は、その後実河川における日射の水深方向到達率の計測と、河床面における日射到達を含む熱収支式を取り込んだシミュレーションを行い、この指摘の妥当性について検討した結果について述べたものである。結論から言えば、日射はたとえ水深が小さくても100%吸収されるとして計算を行っても結果にはあまり影響なく（少なくとも本研究で対象とした計算領域の大きさでは）、これまで収支先不明と考えてきた熱量は、山地斜面などによる日射の遮蔽効果が十分な精度で把握されていなかったことによるものと考えられる。

2. 観測流域と観測方法

図-1は桐生川における観測位置を示したものである。桐生川ダム（流域面積42km²、有効貯水量1,130万m³）直下を始点として下流広見橋までの10カ所で水温の測定を行った。10カ所のうち2カ所は桐生川に流入する支川上で、本川合流点直上である。この10カ所を順次上流から下流に巡回して計測した。中里橋観測点では常駐して経時的な水温、放射収支の測定を行った。ダム直下では1日を通じて水温の変化はほとんどなく一定とみなせることから、この水温をシミュレーションの初期条件及び境界条件として用い、経時的な水温変化を計測している中里橋地点の実測値を対象にシミュレーション結果と比較した。

また、日射が水深方向にどの程度到達するかの計測は、通常の熱流板を用いて行った。熱流板をこのような目的で使うことの妥当性は明確ではないが、設置した位置での熱流板の表裏で水温差はないものと考え、現れる熱流は表で受ける日射のみで決まると考えた。このようにした上で、水面上の空気中での熱流板の計測値を放射収支計の値でキャリブレーションし、水中での計測値を日射量に換算した。

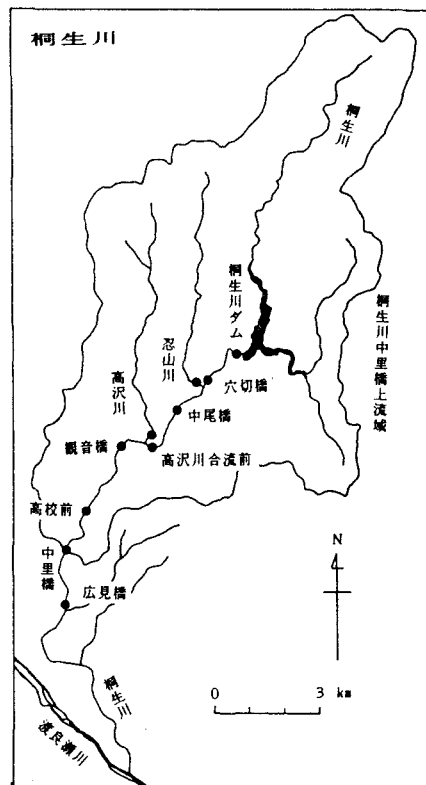


図-1 対象流域観測位置図

3. これまでの検討経過と光の到達率の計測結果

検討に用いる基礎式は次の通りである。これは佐渡らが誘導した熱収支式³⁾を拡散係数Dを一定として簡略化した式である。

$$\partial T / \partial t + U \partial T / \partial x = D \partial^2 T / \partial x^2 + H_t / (C_w \cdot \rho_w \cdot h) \quad (1)$$

$$H_t = R_n + Q_h + Q_e + H_b \quad (2)$$

ここに、T：断面平均水温、U：断面平均流速、h：断面平均水深、R_n：正味放射、Q_h：顕熱、Q_e：潜熱、H_b：河床伝熱、である。いずれも水を温める方向を正としている。

さて、R_nとして観測した放射収支計の値、他に実測の気温、水温を用いて、式(1)、(2)から河床伝熱を逆算し、これを平滑化して示したものが図-2の実線（記号なしの実線のみ）である。これは平成6年8月9日の観測結果を用いたもので、この結果を見ると、午前10時頃から-180W/m²程度の値となり、大きな熱量が水塊から河

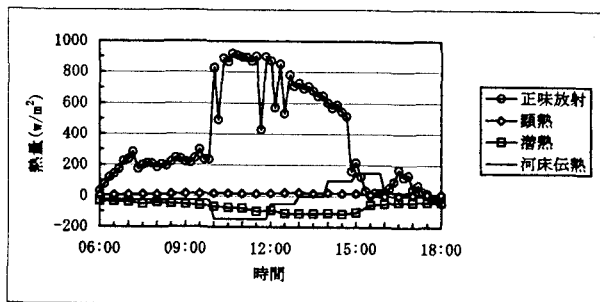


図-2 逆算した河床伝熱量（記号なし実線）

床に向かっていることになる。まだ、水温のあまり高くない時間からこのような大きな熱量が河床に向かうのは不自然であり、これは光が100%水塊に吸収されるとした仮定が誤りであると考えた。

一般に水中において光が吸収される率は、波長 $0.45 \sim 0.52 \mu\text{m}$ 付近では $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ であり、水深100mまで届くが、 $3 \mu\text{m}$ 以上の長波長では 10^5m^{-1} 程度であり実質上無限小の厚さの水面で吸収される。⁴⁾ 和田ら^{5), 6)}は内湾や干潟における熱収支を検討するに当たって、指数減衰型の到達日射量式を与えている。本研究では対象とする河川水は清浄で水深も30~50cmと浅いことから、水中での分布は考えないで、一括して吸収率というものを考えることとした。これを模式的に示したものが図-3である。

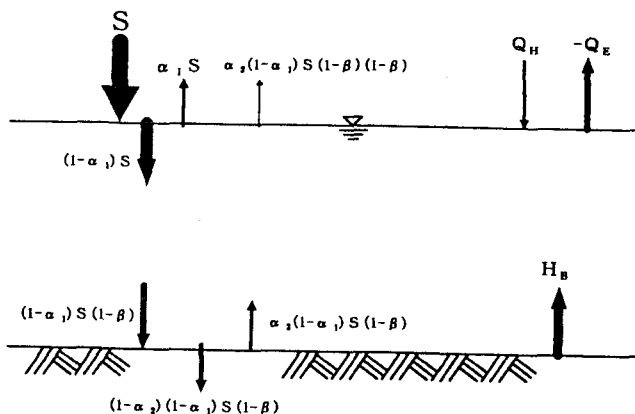


図-3 光の吸収率 β を考慮した熱収支模式図

入射量 S は水面で反射率 α_1 で反射され残りの $(1-\alpha_1)S$ が水中に入り、このうち $(1-\alpha_1)S \cdot \beta$ が水中で吸収され、残りの $(1-\alpha_1)S \cdot (1-\beta)$ が河床に到達する。河床面において反射率 α_2 で反射した $\alpha_2 \cdot (1-\alpha_1)S \cdot (1-\beta)$ が再び水中を上方に透過していき、その際に β を乗じたものが再び吸収される。以下、同様の反射・吸収を繰り返すがここではこれ以上は無視することにする。

以上のように吸収率 β を定義した上で、この値を推定してみる。式(1)において拡散項は移流項に比べて十分無視できるとすれば、特性曲線理論により次式の常微分方程式系が得られる。

$$dt/1 = dx/U = dT / \{ Ht / (Cw \cdot \rho w \cdot h) \} \quad (3)$$

すなわち、 $dx/dt = U$ 上で、 $dT/dt = Ht / (Cw \cdot \rho w \cdot h)$ または、 $dT/dx = Ht / (Cw \cdot \rho w \cdot h) \cdot U = Ht / (Cw \cdot \rho w \cdot q)$ 、が成り立つ。ここに、 q は単位幅当たりの流量である。これらの式に実測の水温等を用いて β を逆算したところ約0.8程度の値が得られた。²⁾

こうした検討を基に、前述の熱流板を用いた日射到達率の計測を行った。その結果の一例を示したものが、図-4である。図-4は平成8年9月2日に水深50cmの箇所で行った午後2時の観測結果である。水面上10cmの位置で計測した熱流板の値で無次元化して示している。(ちなみに水面上10cmの位置での放射収支計の値は約700 W/m^2 であり、この値に図中の比を乗ずれば水中のその位置での日射量の推定値となる。) このように熱流板を日射の計測に用いることの妥当性は明らかでないが、熱流板の上面、下面で水温差あ

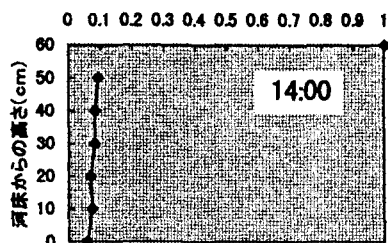


図-4 水面上に対する水中での比

るいは気温差がなく、熱流板に日射の全てが吸収されるとすれば、熱流板の示す値は日射の指標となる(線形かどうかは不明であるが)はずである。計測値は水面直下(河床からの高さ50cm)で急激に小さくなり、以後河床(0cm)にかけて徐々に低下しているが、平均的には水面上の10%程度の値であることが分かる。すなわち日射の90%がごく水面に近いところで吸収されていることになる。図-5は平成8年10月22日における水深30cmの箇所での計測値を経時的に示したものである。ただし、この図の横軸は熱流板の値そのままを示したもので日射量の単位ではない。この図において、午前中から午後2時頃まで河床近傍で再び大きくなっているのは、河床面に近づくと熱流板の表裏で温度差が生じ(つまり河床の温度が低い)、その差をカウントしているためと考えられる。この差は午後2時以降では河床の温度が上昇するために小さくなっている。図-6は水温と河床面の温度を経時的に示したもので、この図から河床の温度が水温よりも高くなるのは午後2時半以降であることが分かる。

4. 光の吸収率の影響

以上の経緯、実河川での観測結果をふまえた上で、河床面での日射を含む熱収支を取り込んだシミュレーションを行った。まず、河床面での熱収支式は以下のようになる。

$$S_g + H_g + G = 0 \quad (4)$$

ここに、 S_g ：河床面への入力放射量、 H_g ：水体と河床面の伝達熱量（河床伝熱量 H_b の符号を変えたものに一致）、 G ：地中貯熱量であり、正負は河床を温める方向を正とする。

さらに、式（4）における各項は以下のように表される。

$$S_g = (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) (1 - \beta) \cdot S \quad (5)$$

$$H_g = a_w (T - T_g(0)) \quad (6)$$

ここに、 a_w ：水の熱伝達率（乱流の水で290～930程度、単位 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ 、計算では600という値を用いたが、水温、河床面温度に対する感度は鈍い）、 T ：水温、 $T_g(0)$ ：河床面温度である。

また、 G は単位時間における河床面から熱伝導がほぼ0になる深さ D_m までの間の熱量変化であり、
$$G = - \int_0^{D_m} \{ d(C_g \cdot \rho_g \cdot T_g(z)) / dt \} dz \quad (7)$$

で与えられる。ここに、 C_g ：河床地盤の比熱、 ρ_g ：河床地盤の密度、 $T_g(z)$ ：河床面から深さ z における温度、である。

一方、式（7）より G を求めるには、地中温度分布が必要となる。地中温度分布は次の熱伝導方程式を解くことにより得られる。

$$\partial T_g / \partial t = a \cdot \partial^2 T_g / \partial z^2 \quad (8)$$

ここに、 a ：地中温度拡散係数、 $= \lambda_g / (C_g \cdot \rho_g)$ 、 λ_g ：熱伝導率（湿った砂地、粘土で2.0程度⁴⁾、単位 $W/m \cdot K$ ）、 $C_g \cdot \rho_g$ ：熱容量（湿った砂地、粘土で 3.0×10^6 程度⁴⁾、単位 $W \cdot s / m \cdot K$ ）である。

結局、式（4）は、

$$S_g + a_w (T - T_g(0)) - \int \{ d(C_g \cdot \rho_g \cdot T_g(z)) / dt \} \cdot dz = 0 \quad (9)$$

となる。

ここでは、この式を Δt 前の河床面温度を与えてニュートン法を用い、逐次計算によって解を求めていった。ただし、式（8）は通常の時間的に前進差分、空間的に中心差分で解いた。

以上の計算を図-2 に対応する平成6年8月9日の観測結果を対象に、まず、光の吸収率 β を1.0あるいは0.8として解いた結果を示したものが図-7である。この図には、 β を1とし河床伝熱も考慮しないで解いた結果（実線）も示している。河床伝熱を考慮し β が1.0の場合は一点鎖線、0.8の場合は点線で描いているが、その差はほとんどなく図上では全く重なって見える。 β が1.0と0.8とで結果に相違が生じない原因は実は河

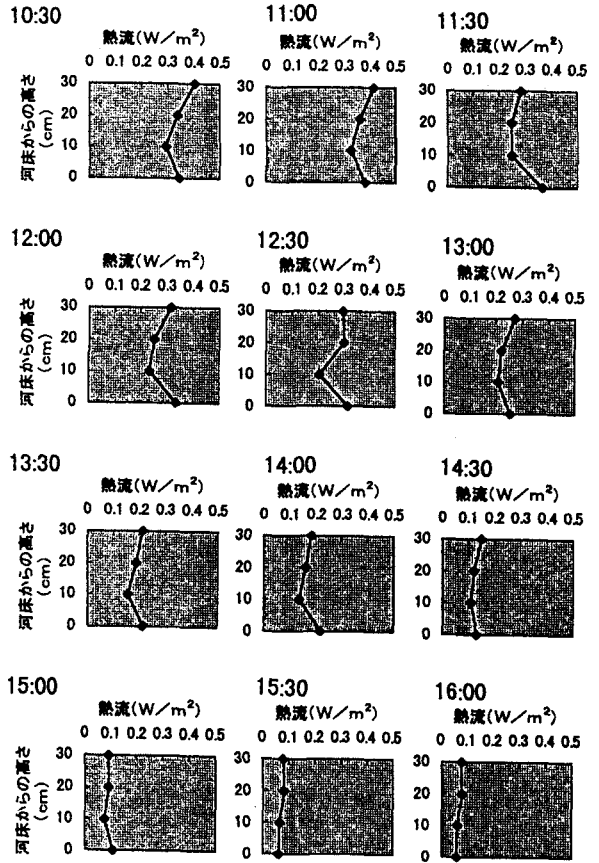


図-5 熱流板の値の経時変化

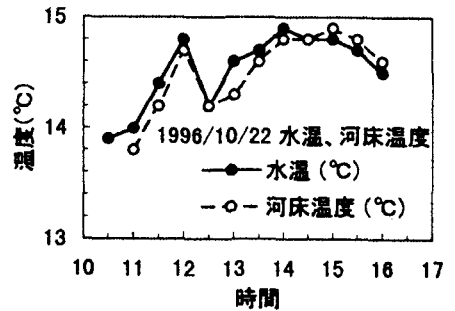


図-6 実測の水温と河床温度

床伝熱量にある。図-8 は β が 1.0 と 0.8 の場合の河床伝熱量を描いたものである。実線が 0.8 の場合、破線が 1.0 の場合である。1.0 の場合には水体が日射の全てを吸収して水温が上昇し、河床に向かう熱流が生じるのに対して、0.8 の場合は河床に到達した日射が河床を早く温めて河床面温度が上がり、河床から水体に向かう熱流が生じて結局は水体を温める、という関係が生じていることが分かる。結局、水温そのものの変化に対しては β の変化はあまり影響を与えない、という結果が得られた。また、図-7 の実線との比較から、河床伝熱そのものの影響もそれほど大きくはないという結果が得られている。

一方、図-7 において実測水温と計算水温の差は歴然としており、この差は日射の吸収率の問題ではなかったことが明らかとなった。これは桐生川本川の上流部は溪谷となっており日射の開始時刻を正確に取り扱うべきであることを意味している。従来は観音橋上流は午前10時から日射が始まり、12時にかけて比例的に増大し、12時からは大学構内で観測している日射計の値そのものになるとしていたが、これをさらに細分し、図-1 に示す桐生川ダムでは日射開始時刻が11時で大学構内の値になるのが13時、穴切橋から高校前上流300mまでは従来通り、桐生川ダム～穴切橋間は開始時刻を距離で比例配分した。得られた結果が図-9、図-10である。図-9 は β を 1.0、図-10 は 0.8 とした場合であるが、前述同様に両者の計算水温に差はほとんどない。この図からこれまで問題としていた実測値と計算値の差は、実は、日射の場所的变化を正確に取り込んで 込んでいなかったためであることが判明した。

図-9、図-10には計算から得られる河床面温度も描いており（点線）、水温との差が小さく図からは明瞭には読みとれないが、 $\beta = 0.8$ の場合には午前中から、 $\beta = 1.0$ の場合には午後3 時頃からは河床面の温度の方が高くなっていることが分かる。これをさらに明確に示したものが図-11の河床伝熱の図であり、前出の図-6 に示した実測の河床面温度が水温より高くなる時刻を再現しているのは、 $\beta = 1.0$ の場合の破線である。このことから、光の吸収率についてはたとえ水深が小さくても、水温自身に対してはとくに考慮しなくてもよいという結果が得られた。なお、図-12は $\beta = 1.0$ の場合の全体の熱収支を示したもの

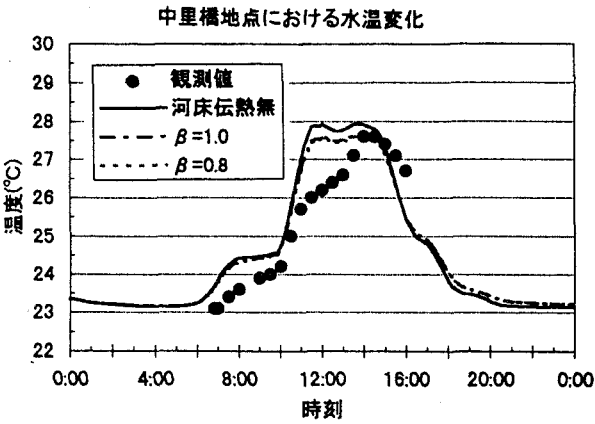


図-7 計算水温と実測水温の比較（平成6 年8 月9 日）

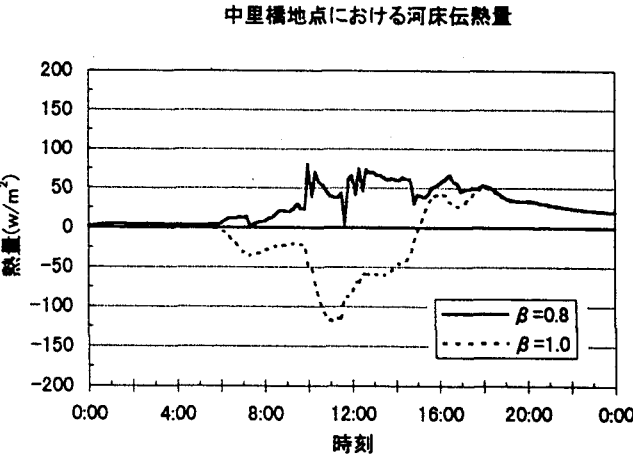


図-8 河床伝熱量の比較（図-7 に対応）

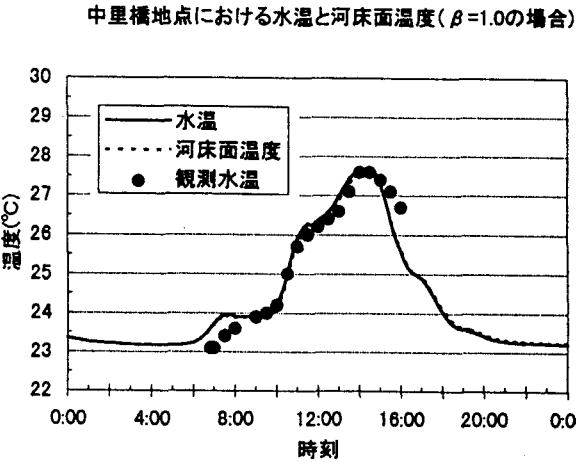


図-9 日射を正確に取り込んだ計算結果（図-7に相当）

の破線である。このことから、光の吸収率についてはたとえ水深が小さくても、水温自身に対してはとくに考慮しなくてもよいという結果が得られた。なお、図-12は $\beta = 1.0$ の場合の全体の熱収支を示したもの

中里橋地点における水温と河床面温度($\beta=0.8$ の場合)

である。

以上の結果は、光の吸収率が水温そのものに与える影響は、河床伝熱の向きによって相殺されることを示しているが、光の吸収率が水温形成の中で果たす役割そのものを否定するものではない。すなわち、吸収率の相違によって河床伝熱の向きが異なるなど、現象を支配する要素としては重要な要素である。なお、ここでは観測結果から得られた吸収率約0.9という値については検討を行わなかったが、これは1.0と0.8の結果から十分類推できると考えたからである。いずれにしても、実際の現象ではたとえ清水で水深が小さくても吸収率は0.9～1.0の間にありと考えるとよさそうである。

5. あとがき

以上、光の吸収率が水温形成に与える影響を検討してきたが、光の吸収率は現象としては、河床伝熱量の正負を決める重要な要素ではあるが、水温に対してはこれが相殺する結果となっており、結局水温形成そのものへの影響は小さいということが分かった。この結果は限られた条件での結果ではあるが、用いたパラメータ等は式中の括弧内にも示した通り一般的な値を用いているので、桐生川に特定された結果ではないと考えられる。なお、感度分析の結果では拡散係数の大きさの影響は極めて小さい。これは温度勾配、そのものが小さい現象であるから当然のことである。また、同様に感度分析からは、断面平均水深の効果が大きく、この算定にも注意を払うべきことが分かる。

<参考文献>

- 1) 小葉竹、他3名：河川水温の形成過程、水工学論文集、第39巻、1995年
- 2) 塩田、他2名：光の吸収率を考慮した河川水温の形成過程、第51回土木学会年次講演会概要集、平成8年
- 3) 佐渡公明：河川水の熱収支に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第330号、1983年2月
- 4) 近藤純正：水環境の気象学、朝倉書店、1994年
- 5) 和田、宮池：熱収支から見た内湾の水環境変化、第24回水理講演会論文集、1980年
- 6) 水鳥、他3名：干潟域における水温変動に関する検討、第27回水理講演会論文集、1983年、

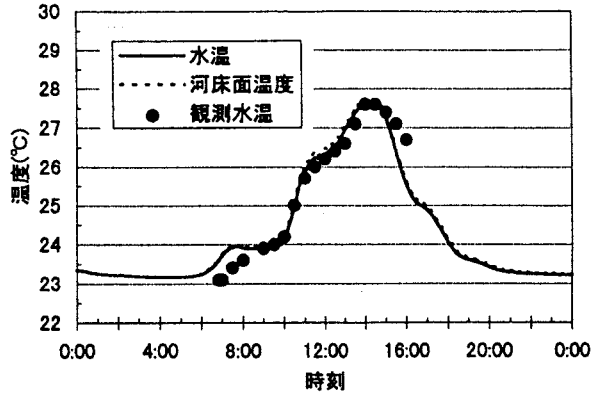


図-10 日射を正確に取り込んだ計算結果(図-7に相当)

中里橋地点における河床伝熱量

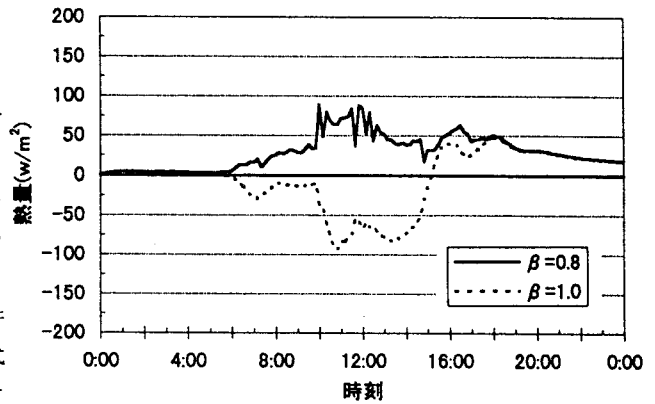


図-11 河床伝熱量の比較(図-9、図-10の場合)

中里橋地点における熱収支($\beta=1.0$ の場合)

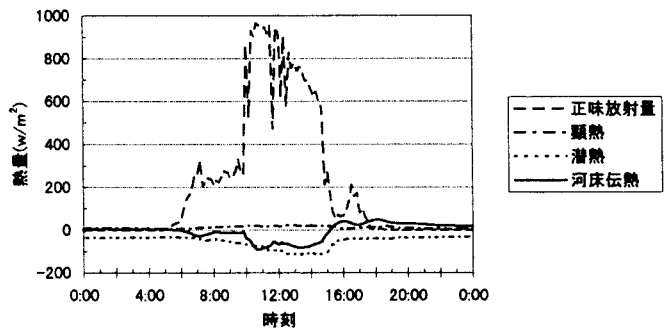


図-12 $\beta=1.0$ の場合の全体の熱収支(図-9に対応)