

都市の人工排熱が河川水温に及ぼす影響

WASTEWATER IMPACT ON STREAM TEMPERATURE IN URBAN RIVERS

宮本守¹・木内豪²・八木宏³・中山有⁴・神田学⁵

Mamoru MIYAMOTO, Tsuyoshi KINOCHI, Hiroshi YAGI, Yu NAKAYAMA and Manabu KANDA

¹正会員 工修 福島大学共生システム理工学類(JST/CREST) (〒960-1296 福島市金谷川1番地)

²正会員 博士(工学) 福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島市金谷川1番地)

³正会員 博士(工学) 東京工業大学情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁵正会員 博士(工学) 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

Thermal environmental in urban river system can be significantly changed due to urbanization. In statistic respect, the long-term change in the stream temperature of an urban river system and its relevant factors are reported by Kinouchi (2005). In this paper, concentrated observation and dynamic simulation about heat transport were approached.

Firstly, we clarified the actually state of heat transport in lower reaches of the Ara River by concentrated observation. Next, stream temperature was reproduced using one-dimensional model integrated water and heat transport process. Each parameter was defined by result of field observation. Finally, wastewater impact on stream temperature in lower reaches of the Ara River was quantitatively evaluated using a dynamic simulation model. Consequently, it was found that wastewater increase stream temperature 3 in the maximum in winter.

Key Words : wastewater, stream temperature, one-dimensional model, heat transport, urban rivers

1. はじめに

人間の生活における利便性の追求や生活水準の高度化による都市成長は20世紀に急速に進み、ヒートアイランド現象などの環境変化を齎している。また大都市は水利用の容易さや交通利便性などから大規模河川付近や河口、沿岸域に位置することが多い。よって都市化による影響は大気圏のみならず、水圏への影響も当然懸念される。特に日本においては東京に代表されるように、急速な都市化が水・熱環境に及ぼす影響は数多く考えられる。都市化による影響とは具体的に、地球温暖化による気温、海水温の上昇やダム・貯水池からの放流による水温変化、地下水流動の変化、そして下水処理水温、水量の上昇などである。

これらの河川の熱環境変化において重大な指標に成り得る河川水温に関する研究は数多く取り組まれている。池田ら(1994)は東京近郊を流れる荒川感潮域において熱環境に関する観測を行った結果、河川水温は放射熱収支

のみならず、河川水の移流による熱輸送が重要な役割を果たしていると報告している¹⁾。またStefanら(1999)は気温からの河川水温の推定を物理的に説明している²⁾。さらに非定常熱移流拡散方程式の有限差分解に基づく数値モデルから1時間ごとの水温を予測した上で、気象及び河床パラメータの感度分析を行い湖沼における気候変動の影響による水温変化を分析している(1999)^{3),4)}。一方、統計的アプローチではWebbら(1996)が世界各地の水温の過去及び将来の傾向に関する情報を照合した結果、20世紀のヨーロッパでは平均約1 上昇したとし、極端な水文事象を除外した予測研究では次世紀において加速的に上昇すると指摘している⁵⁾。日本では木内ら(2005)が東京における約20年間の河川水温の統計的解析により冬期に最大で4 以上の昇温が確認されたと報告している⁶⁾。さらに、荒川などにおける河川水温の高温化は東京湾に対する熱負荷にも成り得る。東京湾及び周辺水域における長期的な水温変化は八木ら(2004)によって明らかにされており、冬期に上昇傾向が確認されている⁷⁾。

そしてこの河川の高温化問題は次に示すように発展し

ていくことが予想される．エネルギーの有効利用の観点においては，国内外における河川や下水の有する水熱エネルギーの利用事例や環境負荷削減効果が報告されている⁸⁾．逆に，中川ら(2004)は都市化が急速に進行した河川における生態調査の結果，種の多様性の低さに加え，温排水により厳冬期でも河川が結氷しないためコイ科魚類の生殖腺が早期成熟している可能性があるとしている⁹⁾．また磯野ら(1998)は東京湾においてアサリによる窒素摂取量の季節変動要因は塩分よりも水温及び懸濁態窒素濃度の影響が大きいと報告している¹⁰⁾．

このように，河川の高水温化はエネルギーとしての有効利用の可能性を持つ一方で生態系に甚大な被害をもたらす危険性も有しており善悪の二面性を持った重要な課題であると言える．しかしながら，この熱汚染の原因の一つに考えられている都市の人工排熱に関して，河川水温の変動にどの程度寄与しているのかは明らかにされていない．そこで著者らは，都市の人工排熱である下水処理水の流入に着目し，東京近郊を流れる荒川下流部を対象として下水処理水が河川の熱環境に及ぼす影響を現地観測と長期解析から定量的に明らかにした．

2．現地観測

(1) 観測概要

各水文観測地点 から 気象観測地点を 図 - 1 に示す．荒川下流部を流れる荒川，新河岸川，隅田川の3河川における から 地点では水位，流速，水温，塩分濃度の船上集中観測を行った．用いた観測機器はADCP (RD Instrument社製600kHz及び1200kHz)と水温塩分計(アレック社製アレック・メモリーSTD)である．対象区間のほぼ中央に位置する岩淵水門(地点)では，水位とプライス式流速計による流速測定，水温の定点観測を行い，付近の高水敷において風向，風速，気温，湿度，日射量，超短波放射の気象観測を行った．気象観測機器は精密全天日射計，超短波放射計(共に英弘精機)，風向風速計(小笠原計器)，温湿度計を用いた．上流端は荒川の秋ヶ瀬取水堰及び新河岸川の朝霞調節池横(地点)に設定し，秋ヶ瀬取水堰においては水温の定点観測を行った．下流端は荒川0 KP(地点)と隅田川0 KP(地点)とした．観測期間は大潮である2004年12月27日11:00から12月28日11:00までの24時間とし，測定間隔は1時間で毎正時に測定した．本観測区間内には7つの下水処理施設が存在し，各放流量は観測終了後に東京都下水道局から時間データを提供して頂いた．放流水温は，埼玉県に位置する2処理場(荒川右岸下水処理場と荒川左岸下水処理場)以外の5処理場では予め設置された水温計によって観測された．埼玉県に位置する処理場からの放流水温は東京における下水処理場からの放流水温の平均値を用いて解析を行った．

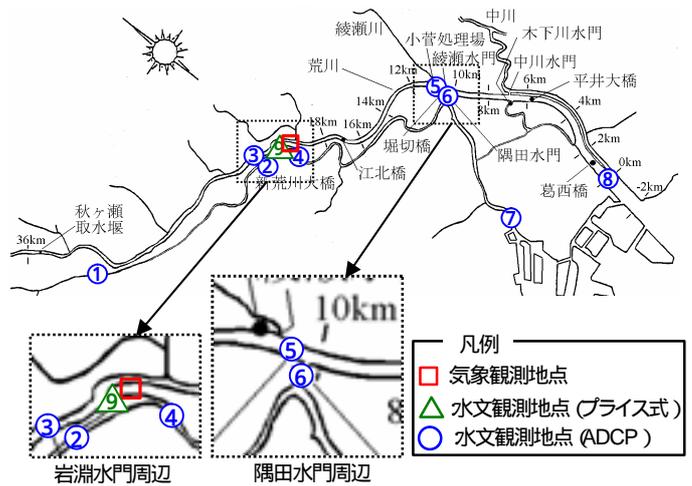


図-1 荒川下流部における水文・気象観測地点

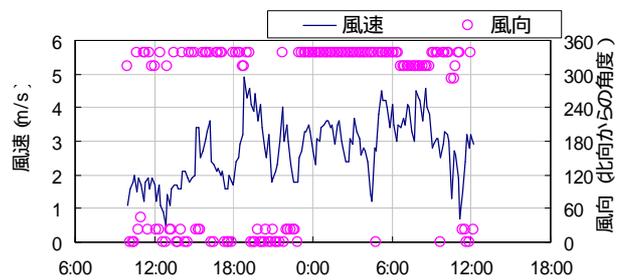


図-2 観測時における風向風速

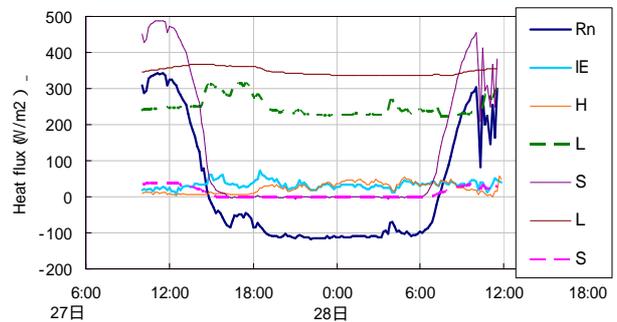


図-3 観測時における熱収支

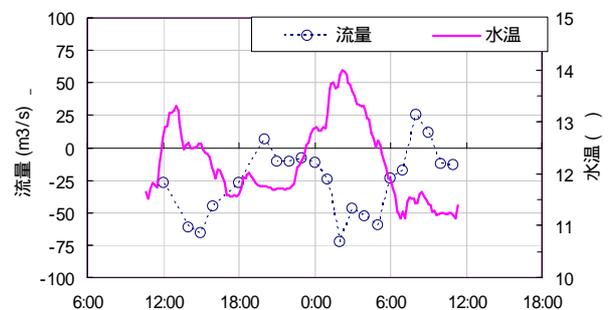


図-4 地点 (岩淵水門)における流量と水温の実測値

(2) 観測結果

気象観測により得られた観測時の風向風速を 図 - 2 に示す．観測時の風向はほぼ一定で上流から下流へと吹く

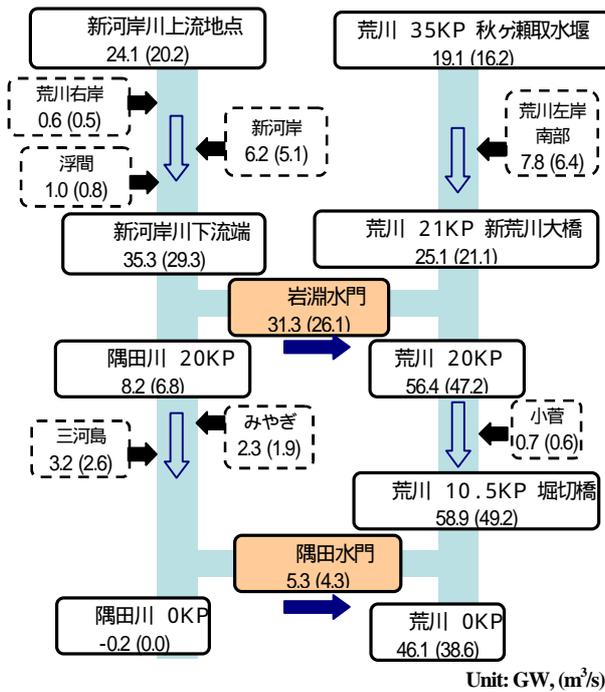


図-5 観測期間の荒川下流部における河川固有の流量と熱輸送量

北風であった。風速は時間によって大きく変化したが、最大で5m/s程度まで強くなった。観測時の熱収支を図-3に示す。アルベドは0.08とした。日射は冬期にしては強く、最大で500W/m²程度であった。

図-4は岩淵水門(地点)における流量と水温の実測値である。岩淵水門における流量は観測期間を通じてほぼ逆流で隅田川から荒川へと流れていた。さらに水温の時系列と比較すると流量と水温は凡そ逆相関になっていることがわかった。このことから隅田川から荒川へと熱が供給されている可能性が伺える。

図-5は観測期間の荒川下流部における河川固有の熱輸送量と流量である。河川固有の流量とは観測期間である大潮1周期の平均であり、潮汐の影響を除外したものである。輸送熱量は式(1)により算出し基準温度 T_R は0とした。下水処理場からの熱供給は河川における熱輸送量と比較しても無視できない程度である。新河岸川、隅田川の流量、熱量は岩淵水門を通過して荒川に流れ込んでいる。また国土交通省荒川下流河川事務所の調査結果によると荒川本川における2000年のBOD濃度分布は岩淵水門付近が最も高かった。このことから水質汚染物質に関しても水温と同様の挙動が推察される。

$$H = r C_p Q (T - T_R) \quad (1)$$

ここに、 H : 熱量(GW), r : 密度(kg/m³), C_p : 比熱(J/kg/K), Q : 流量(m³/s), T : 水温(K), T_R : 基準温度(K)である。

上流部に位置し分合流が少なく比較的潮汐の影響も受けにくい区間で、下水処理場の上下流地点の水温を比較した。荒川では荒川左岸南部下流処理場を挟む秋ヶ瀬取水

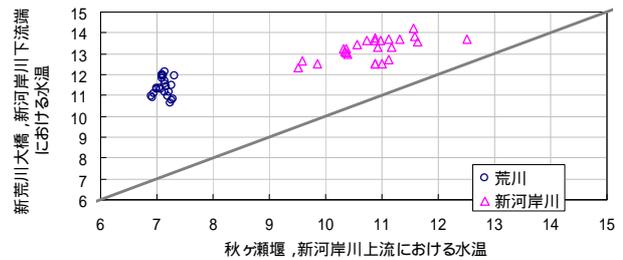


図-6 下水処理場を挟む2地点の水温比較

水堰と地点、新河岸川では荒川右岸、新河岸、浮間の3下水処理場を挟む地点と地点における同時刻の水温を図-6に示す。荒川と新河岸川共に下流地点の水温は顕著に上昇していることがわかる。水温上昇要因としては都市排熱である下水処理水による熱供給以外に大気との熱交換なども考えられるが、下流地点の水温は観測期間を通じて同様に上昇していることから下水処理水による熱供給が主要因になっていると考えられる。

3. モデルの概要

都市河川における水温変動要因は幾つか考えられる。幾つかの要因の中で特に下水処理水の影響を定量評価するために1次元モデルを荒川下流部に適用した。本解析に用いたモデルはDHI(Danish Hydraulic Institute)が開発したMIKE11であり、鉛直2層で水理計算と熱輸送計算を同時に行った。なお、長期解析における本計算は平水時を対象としており、対象区間に流入する降雨の影響は考慮していない。ただし、荒川と新河岸川の上流端には観測値を与えており、上流域における降雨流入の影響を間接的に考慮していると言える。解析対象期間は現地観測を行った2004年12月27日から28日にかけて24時間と1998年から2000年までの3年間とした。各種パラメータは24時間観測の結果と整合する値を採用した。

(1) 基礎式

水理解析及び熱輸送解析における上下層の基礎式は次に示す通りである。水理解析においては式(2), (3)に示した連続式とサン・ヴナン式を用いた。熱輸送解析においては式(4)に示す移流拡散方程式を用いた。

$$\text{上層} \quad \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{\partial Q_1}{\partial x} - e_0 + e_1 = q_1(\text{lat}) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{\partial \left(a_1 \frac{Q_1^2}{A_1} \right)}{\partial x} + g A_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + \quad (3a)$$

$$\frac{1}{2} g A_1 y_1 \frac{1}{r_1} \frac{\partial r_1}{\partial x} - f_w + f_i + f_{ib} = 0$$

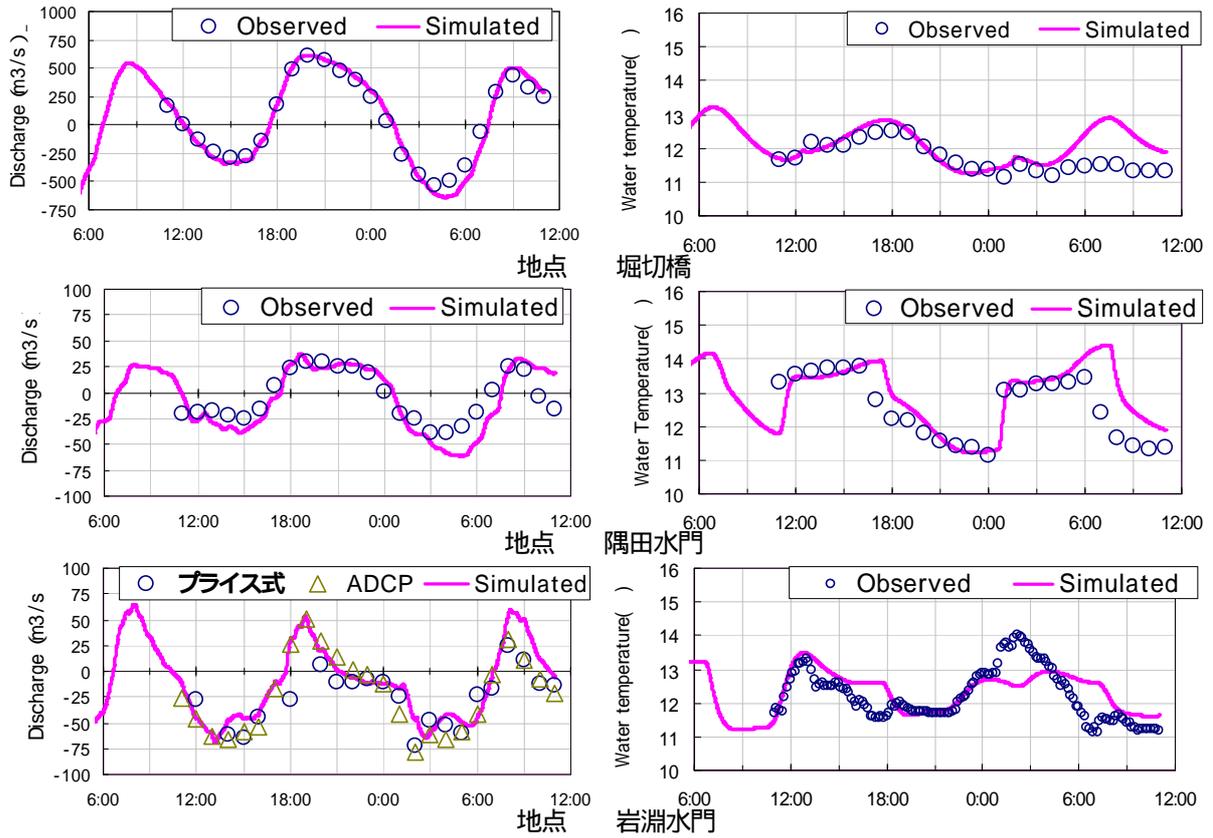


図-7 地点 , , における流量、水温の実測値と計算値

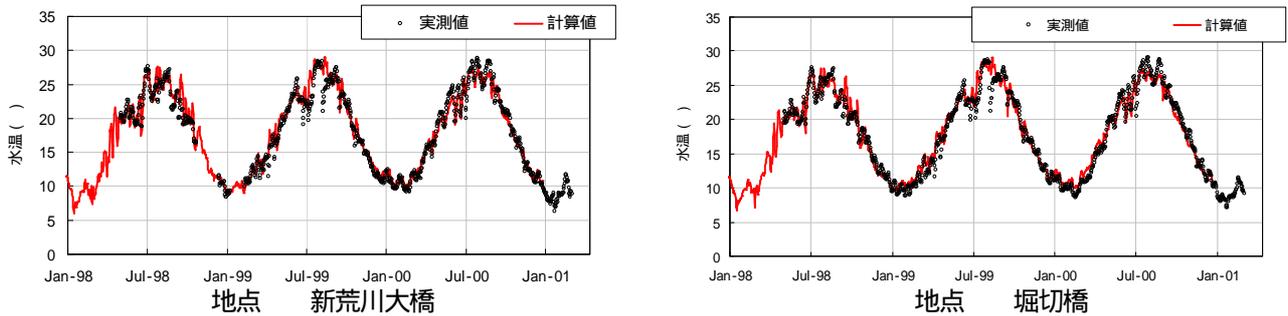


図-8 地点 と における3年間の水温再現結果

$$\frac{\partial(A_1 T_1)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_1 T_1)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_1 D_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = e_0 T_0 - e_1 T_1 + q_1 T_{s1} + \Delta q \quad (4a)$$

下層

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} + \frac{\partial Q_0}{\partial x} + e_0 - e_1 = q_0 (lat) \quad (2b)$$

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{\partial \left(a_0 \frac{Q_0^2}{A_0} \right)}{\partial x} + \frac{r_1}{r_0} A_0 \frac{\partial h_1}{\partial x} + \Delta g A_0 \frac{\partial h_0}{\partial x} + g y_1 A_0 \frac{\partial r_1}{\partial x} + \quad (3b)$$

$$\frac{1}{2} g y_0 A_0 \frac{1}{r_0} \frac{\partial r_0}{\partial x} - f_i - f_{ob} = 0$$

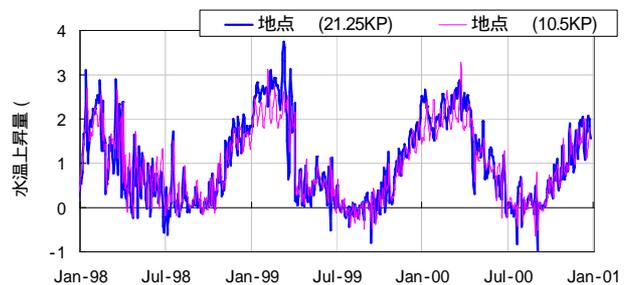
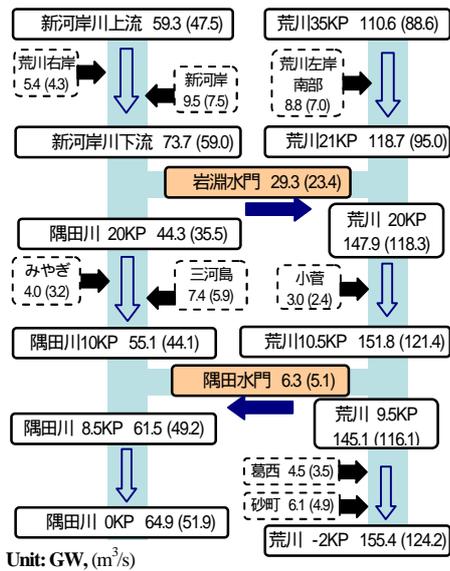


図-9 地点 と における下水による水温上昇量

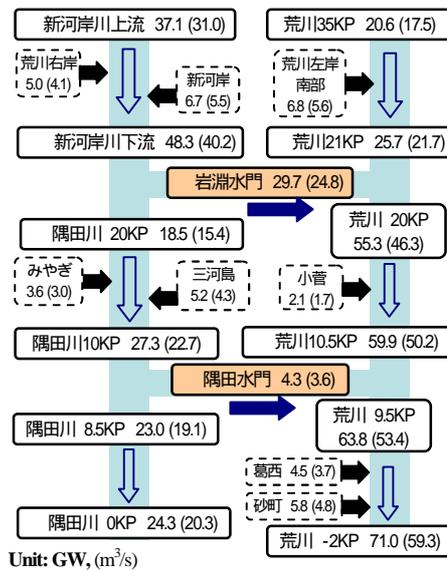
$$\frac{\partial(A_0 T_0)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_0 T_0)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_0 D_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) = -e_0 T_0 + e_1 T_1 + q_0 T_{s0} \quad (4b)$$

ここに、 A : 通水面積(m^2), Q : 流量(m^3/s), T : 温度(K),

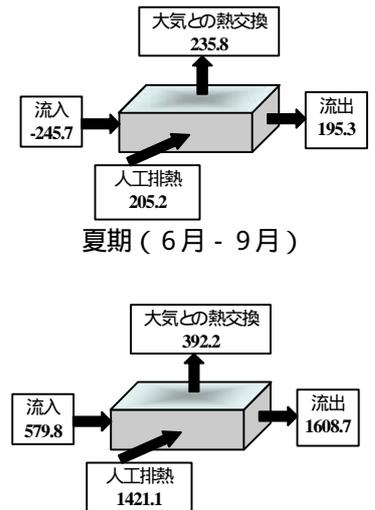


夏期 (6月 - 9月)

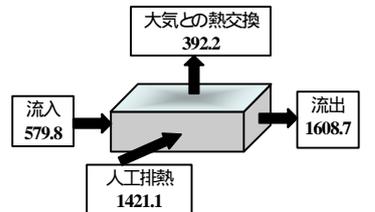
図-10 荒川下流部における夏期と冬期の
河川固有流量と輸送熱量 (計算値)



冬期 (12月 - 3月)



夏期 (6月 - 9月)



冬期 (12月 - 3月)

図-11 荒川下流部における熱収支

e : 混合流, $q(lat)$: 横流入量(m^3/s), α : 補正係数, g : 重力加速度(m/s^2), h : 水位(m), M : マンニング数, R : 径深, D : 分散係数(m^2/s), f : 摩擦項である. 添字は上層を 1, 下層を 0 としている. 水面における熱収支は式(5)で考慮した.

$$\Delta q = q_{trib} - q_c + q_s - q_{sr} + q_l - q_{lu} - q_e \quad (5)$$

ここに, q : 水面における流入熱量, q_{trib} : 支川からの流入熱量, q_c : 対流熱伝達, q_s : 短波放射, q_{sr} : 反射した短波放射, q_l : 長波放射, q_{lu} : 水面からの長波エネルギー, q_e : 蒸発によるエネルギー損失である. 各熱量は次式で算出した.

$$q_c = r_{air} C_p C_c |W_{10} - U| (T_w - T_{air}) \quad (6)$$

$$q_s = \frac{H}{H_0} q_0 (a_1 + b_1 \cos w_i) \quad (7)$$

$$q_{sr} = ref q_s \quad (8)$$

$$q_{lu} - q_l = sT^4 n (0.56 - 0.77 \sqrt{e_d}) \quad (9)$$

$$q_e = LC_e (a_2 + b_2 W_{10}) (Q_w - Q_a) \quad (10)$$

r_{air} : 空気密度(kg/m^3), C_c : 顕熱輸送係数, W_{10} : 水面から 10m 上空の風速(m/s), U : 表面流速(m/s), T_w : 水温(K), T_{air} : 気温(K), N_d : 日照時間, H : 全天日射量(W/m^2), H_0 : 大気上端における日射量(W/m^2), w_i : 時角, ref : アルベド, s : ステファンボルツマン係数(W/m^2), n : 日照時間, e_d : 露点温度の水蒸気圧(hPa), L : 水の気化潜熱(J/kg), Q : 水蒸気密度(kg/m^3)である.

(2) 境界条件

24時間観測を行った期間を対象とした解析では荒川及

び新河岸川の上流端に実測流量と水温を与えた. 下流端には実測水位と水温を与えた. 下水処理施設からの横流入に関しては実測の流量及び水温を与えた. 気象条件に関しては岩淵水門付近の高水敷で行った観測により得られた. 日照時間, 相対湿度, 気温, 風向, 風速を与えた.

3年間の長期解析では荒川と新河岸川の上流端に実測流量と過去データによる気温との相関式から算出した水温を与えた. 荒川と隅田川の下流端においても同様に実測水位と過去データによる気温との相関式から算出した水温を与えた. 下水処理施設からの横流入に関しては 1995年と2001年の実測流量から線形補間して算出した値を与えた. 気象条件はアメダスデータの日照時間, 相対湿度, 気温, 風向, 風速を与えた.

(3) 計算条件

解析に用いた各種パラメータは24時間観測の再現計算によって決定した. 不定流計算におけるマンニングの粗度係数 n は0.02から0.04の範囲で設定した. 移流拡散計算における分散係数 D は断面平均流速の関数である式(11)により算出した. なお本計算においては実測値と整合し下流側では比較的大きな値をとるように $a=1\sim 500$, $b=1$ とし, 分散係数 D は0~700 m^2/s であった.

$$D = aV^b \quad (11)$$

ここに, D : 分散係数, V : 断面平均流速である. また計算ステップは, 24時間観測を行った期間の計算では10秒, 3年間の長期計算では2分とした.

4. 解析結果

(1) 24時間観測の解析結果

現地観測により確認された水・熱輸送特性の再現を目

的として荒川下流部にける観測期間の水・熱輸送を再現した。流量、水温の再現結果を図-7に示す。流量及び水温は精度良く再現されていることが確認できる。

(2) 1998年から2000年までの3年間の再現計算

観測期間を対象にした解析により決定したパラメータを用いて1998年から2000年までの3年間の再現計算を行い、その後下水処理水の流入による熱影響を評価した。

地点とにおける1998年から2000年までの3年間の再現結果を図-8に示す。本計算では水温の挙動を精度良く再現できている。計算値が実測値より大きな値を示している場合があるが、これは豪雨による河川水温の低下が原因であると考えられる。

(2) 長期解析における都市排熱の影響

地点とにおける下水処理水の流入の有無による水温差を図-9に示す。下水による水温上昇量は冬期に顕著であり、最大で3程度であった。また逆に夏期においては若干ではあるが、下水処理水が河川水温を低下させている事も確認された。

次に、長期計算結果による夏期と冬期の河川固有流量と熱輸送量を図-10に示す。計算結果からも新河岸川及び隅田川の大量の熱が岩淵水門を通過して荒川に流れ込んでいることが確認できる。また河川における輸送熱量は夏期と冬期で大きく異なるのに対し、下水処理場からの放流熱量はほとんど変わらない。このことから下水処理水の熱影響が冬期に顕著であることが裏付けされる。

図-11は夏期と冬期における荒川下流部全体の熱収支である。秋ヶ瀬取水堰における流入水温を基準温度 T_R とし式(1)により流入の輸送熱量を算出した。横流入熱量は流入出熱量の差分から大気との熱交換量を差し引いて算出している。特に冬期において下水処理水の流入熱量は大きな値を示しており、荒川下流部における熱収支からも下水処理水の熱影響は大きいことがわかる。

6. 結論

本論文では東京近郊を流れる荒川下流部を対象として水・熱輸送の冬期現地観測を行い、その結果を受けて数値解析により水温の挙動を再現し、都市排熱の影響を分析した。それらにより得られた知見を以下に挙げる。

- 1) 岩淵水門における流量はほぼ逆流であり、隅田川及び新河岸川の熱は岩淵水門を通過して荒川に流れ込んでいることが現地観測結果と数値計算の両方から分かった。また荒川河川事務所の水質結果から荒川本川におけるBOD濃度分布は岩淵水門付近が最も高く水質汚染物質に関しても同様の挙動が推察される。

- 2) 現地観測で明らかになった水・熱輸送過程を1次元モデルにより再現することができた。
- 3) 3年間の長期解析により下水処理水による水温上昇は冬期に顕著であり、最大で3程度であることが分かった。
- 4) 夏期と冬期における荒川下流部の熱収支からも下水処理水による熱影響は大きいことが分かった。

謝辞：本研究で用いた秋ヶ瀬取水堰の流量データならびに下水処理場の放流量データは(独)水資源機構及び東京都下水道局に提供して頂いたものである。貴重なデータを快く提供して頂いた両者に対しここに深甚なる謝意を表す。さらに本研究は科学技術振興機構・戦略的基礎研究推進事業(CREST)「都市生態圏-大気圏-水圏における水・エネルギー交換過程の解明」(代表：神田学東京工業大学助教授)の成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 池田駿介, 財津知亨, 館健一郎: 感潮河川の熱特性に関する研究 - 荒川における測定 -, 土木学会論文集, No.503/ -29, pp.207-213, 1994.
- 2) Mohseni O., Stefan H. G.: Stream Temperature/ air temperature relationship-A physical interpretation-, *Journal of Hydrology*, Vol.218, No.3/4, pp.128-141, 1999.
- 3) Sinokrot B. A., Stefan H. G.: Stream Water-Temperature Sensitivity to Weather and Bed Parameters, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.120 No.6, pp.722-736, 1994.
- 4) Fang X., Stefan H. G.: Projections of Climate Change Effects on Water Temperature Characteristics, *Climate change*, Vol.42 No.2, pp.377-412, 1999.
- 5) Webb B. W.: Trends in Stream and River Temperature, *Hydrological Process*, Vol.10, No.2, pp.205-226, 1996.
- 6) T. Kinouchi, H. Yagi, M. Miyamoto: Stream Temperature modification due to increase anthropogenic heat input by urban wastewater, *IAHR congress*, 4571, 2005.
- 7) 八木宏, 石田大暁, 山口肇, 木内豪, 樋田史郎, 石井光廣: 東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.1236-1240, 2004.
- 8) 宇梶正明: “都市の水”の熱エネルギー利用の現状と課題, 雨水技術資料, 第19号, pp.27-35, 1995.
- 9) 中川雅博: 温排水が魚類生殖腺に及ぼす影響 - モンゴル・トール川水系の細流を例にして -, 用水と排水, Vol.46, No.6, pp.491-496, 2004.
- 10) 磯野良介: 東京湾盤州干潟のアサリによる窒素摂取量の推定とその季節変動に係わる要因, 水環境学会誌, Vol.21, No.11, pp.751-756, 1998.

(2005.9.30受付)