

リモートセンシングによる多摩川の流動解析について
Hydraulic Feature of the Tama River by Means of Remote Sensing

リモート・センシング技術センター 正員 田 中 總太郎
東京大学 工学部 土木工学科 正員 玉 井 信 行
東京大学 工学部 都市工学科 正員 市 川 新

1. はじめに

河川などの大規模な水域での水質を論ずる場合には、その水域の流動形態すなわち、物理的な営力関係が第一義的に重要である。水域における最もスケールの大きな現象は平均流であり、物質はそれによって運ばれ、移動した後の位置で小さなスケールによる拡散、あるいは生物的・化学的な変化を受けるものと考えられる。このように河川の流動の実態や水質汚濁現象は複雑で多くの因子が絡み合っており、これらを定量化あるいは評論するに当っては現段階では不完全さを避けることができない。本研究は従来の手法では得ることの難しかった河川水質あるいは河川水理学に関する面的情報の収集・解析にリモートセンシングをはじめて応用したものである。本研究の一部はすでに発表されているが、本論文は解析例を殖やし、河川の水理解析への適用性を総合的に検討したものである。本論文においては、最初にリモートセンシングデータの特徴およびデータ収集・処理の概要について述べた。次いで、排水の流入部、瀬に接続する滞水部、および支川の合流点という水理的に特徴のある流れの場についてそれぞれ一例を挙げ、現況測定と対比しながら拡散および混合に関する水理解析の結果を述べた。

2. リモートセンシングデータの特徴

空中写真の撮影もリモートセンシングの一つであるが、本研究ではマルチスペクトルスキャナーによる地表面の撮影およびそのデータの一連の解析をリモートセンシングと称している。このようなリモートセンシングによって河川の流動解析を行なったわけであり、ここではそのリモートセンシングの特徴について河川の流動解析をするという観点より述べてみる。

リモートセンシングの特徴の一つは微細構造の測定が可能にあることにある。微細構造とは対象の解析に必要な物理量を空間的にもまたその測定精度においても細かく捉えたデータストラクチャという意味である。スキャナーにより地表を走査した電磁波スペクトル強度のデータは、瞬間視野角毎に数値に置き換えられて行列として記憶媒体に貯えられる。この瞬間視野角の大きさがデータの空間的な構造の細かさを決めるわけで、M²S マルチスペクトルスキャナーでは2.5ミリラジアンである。例えば1,000mの上空より本スキャナーによって走査すれば地上2.5m平方の面積毎に平均的にどこまでも連続した情報を得られることになる。このような特徴は空中写真においても存在するが、デジタル記録式のスキャナーが登場してその利点が確実なものになったといえる。

次に測定精度であるが、M²Sにおいては温度の分解能は公称0.25℃である。¹⁾このように微細構造が測定できるというリモートセンシングの特徴は従来の測定法と組み合わせて用いることによって多大な便益を与える。表面水温の連続分布を瞬間的に0.25℃の精度で捉えることは従来の測定法ではほとんど不可能であったと思われる。しかるにリモートセンシングによればこれが可能で、その測定データはこれまで理論でしか考えられなかった水理現象の検証にも応用することができる。

スキャナーによる映像と空中写真を比べたときにもそれぞれが表わしている映像に大きな違いがある。地表面は天空光を反射したりまた自ら放射しているが、その強度は方向によって異なる。そのため空中写真の場合は撮影時の幾何学的性質からして写真上のいかなる点も異なる方向より観察されていることになるが、スキャナー映像の場合は航空機等の進行方向にある点については同一方向より観察されていることになる。

スキャナーのこの特徴は流況を解析する場合特に有効となる。水面は可視光から近赤外域にかけて強度のハレーションをおこし、空中写真では通常サンスポットが生ずる。サンスポットの中心から周辺に向かって従ってハレーションの影響は次第に減衰するが、このようなデータを使って流況を解析することには多大な困難を供なう。これに反しスキャナー映像ではこのサンスポットは言わばサンラインというべきものになり、ハレーションの影響はすべての走査ラインについてほぼ一定となる。また飛行方向を選択することによってその影響を減ずることも可能である。

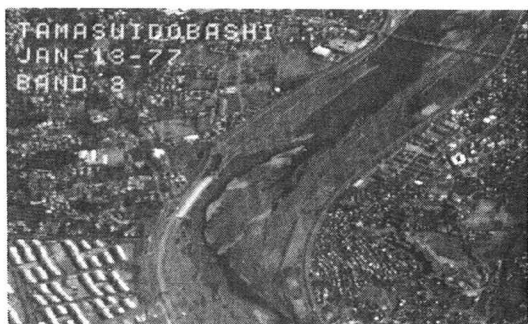
スキャナーの映像が空中写真よりも河川流況の解析に対して優れている理由はこれがどこまでも連続したデータであることが大きい。

ところで光の波長とそれがよく表わすことのできる水の性質は次のようである。²⁾ 光の波長についての消散係数は純水では 0.38μ より 0.58μ の範囲が $0.1 m^{-1}$ 以下である。不純物が多くなるに従い消散係数は増加し、しかも透明である波長の範囲は狭くなる。通常の海岸水においては 0.45μ から 0.57μ に至る波長のところで消散係数は最も小さくなりその値は $0.5 m^{-1}$ 以下となる。従って水の中の性質を測定するにはこの波長域の光を用いるのがよい。赤や赤外等長波長の光は、ほとんど水によって吸収されてしまう。したがってこの波長域の光は地表面のどこに水があるかを知ることに応用できる。熱赤外線によれば水面温度を測定できるが、この場合は熱赤外の反射波を測定しているのではなく放射エネルギーを測定している。 10μ 付近の波長は常温付近の温度分布を最もよく表わす。

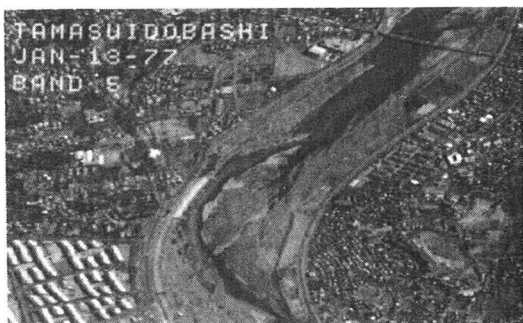
写真-1には4つの波長帯のスペクトル映像が示してある。BAND 3は $0.49-0.54 \mu$ のスペクトル映像で水面にパターンが現われているのが読みとれる。BAND 9は近赤外の映像で水は黒く映り、またBAND 11は遠赤外の映像で温度を知ることができる。

3. 多摩川データの収集と画像処理

マルチスペクトルスキャナーM^Sのデータは1977年1月13日～16日の冬期および1977年7月24日～27日の夏期に多摩川本川の河口より青梅



BAND 3 ($0.49-0.54 \mu$)



BAND 5 ($0.58-0.62 \mu$)



BAND 9 ($0.77-0.86 \mu$)



BAND 11 ($8-13 \mu$)

Photo 1. Multi-spectral Images

に至る区間および浅川支川の国立より八王子に至る区間について対地高度 1,000 m より撮影されたものである。一方これに対応するグラントルースデータはそれぞれの該当日における流況調査結果、地上における太陽光の反射スペクトル測定や温度測定結果および公共用水域水質測定結果等である。

流況を解析するための画像処理は、河川の全体像を把むための合成カラー画像の作成と温度のカラーライス画像作成および局所に限って流況を詳細に検討するための対話的な特徴抽出である。前者は MDAS システムによって行なわれ、後者は IMAGE-100 によって行なわれた。データの収集と画像処理の流れの例を示せば図-1 のようである。

対話的な特徴抽出は、濃度と温度について行なわれた。水の濃度については拡散が行なわれている所定の区間について Band 3 のデータの最大値と最小値を 7 段階に区分しそれぞれを抽出した。また水の温度についても同様に所定の区間において Band 11 のデータを 7 段階に区分し、対応する温度を抽出した。例えば冬の旧六郷用水取水口付近の水面の温度は最大値が 6.4 °C、最小値が 4.2 °C であり、約 2.2 °C の間を 7 等分していることになる。

THERMAL INFRARED PROBLEM

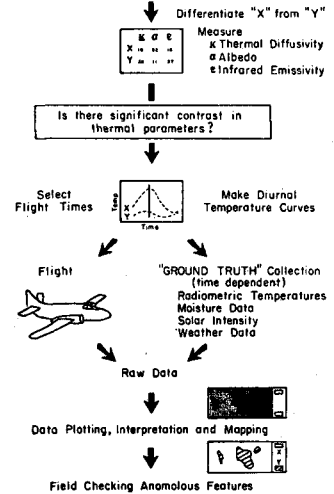


Fig. 1. A concept of mission operations

4. 解析とその結果

4-1 立川処理場からの排水の挙動

立川下水処理場は 1955 年に計画され、1967 年に運転が開始された。同処理場の計画処理面積は 112 km² となっているが現在は 96 km² で、処理区域内人口約 9.0 万人、水洗化人口約 5.0 万人である。この地点において、1977 年 7 月の撮影資料を IMAGE-100 によって処理し、等温線図を描き本川との混合過程を定量的に評価することを試みた。

バルブ工場からの着色した排水の拡がり面積 $Y(m^2)$ と排水量 $X(m^3/day)$ の間には次式が提案されている⁷⁾。またこれは大略 60 ~ 100 倍の希釈率に対応する境界と言われている。

$$\log Y = 1.2261 \log X + 0.0855 \quad (1)$$

処理場からの排水量は 0.30 m³/sec であるからこれを日単位に換算すると $X = 2.59 \times 10^4 m^3/day$ であり、式(1)によって予測される拡がり面積は、 $Y = 3.14 \times 10^5 m^2$ となる。観測値は $Y_{ob} = 3.22 \times 10^4 m^2$ であり、予測値より 1 桁小さい値を示す。しかしながら観測値は希釈率で言えば 4 倍程度に対応しており、予測値が対象としたような大きな希釈率までの面積はこれよりは増大すると思われる。

次に密度噴流と考えた場合の解析結果について述べる。排水と環境水との間には $3.878 \times 10^{-4} g/cm^3$ という微小な密度差がある。今回の場合には放出水の密度が大であるのでいわゆる負の密度噴流となる。こうした現象における支配的な無次元パラメーターは密度フルード数であり、放出口における値は $F_{d0} = 1.09$ である。従来の成果を参考にすると、放出口における密度フルード数の値が 10 以上の場合には運動量の効果が卓越する領域と考えられる。従って、浮力の効果は正であれ負であれ現象に与える影響はそれほど大きくはないと予測される。観測された等温線の形状は不規則であるが塊状を成しているので、面積の等しい等価な円に換算して解析した。

その結果は図-2 に示す通りである。図中の実線は密度フルード数が 18 ~ 180 の範囲で行なわれた実験

の中央値を示し、この結果は一様流体中の噴流の速度の減衰関係と類似である。対象とした水域は流れの停滞する部分であり、等価円に置換して密度噴流としての解析を適用すれば大略の温度変化を追跡できる。

図-2に見られる実測値の特徴は、放水口の代表長さの100倍程度までの距離では周囲水との混合が殆んど行われず、専ら空気中との熱交換が主である。これは放水口が水面より上部にあり放流水が鉛直に落下して河川に放流されるという放流の条件に関係していると思われる。無次元距離が100程度を超えると急激な温度変化を生ずるがその原因は放出水の表面積がある範囲を越えると薄層流となり、急激に周囲水との接触面積が増え、周囲水と同化するものと思われる。これは実線で示される噴流の場合も類似で、最終段階では $\Delta T/\Delta T_0$ は $(X/B)^{-2}$ に比例して減少していると思われる。

立川処理場のすぐ上流からは同じ左岸側から残堀川が流入している。残堀川の水温は 24°C で本川と殆んど差がなく、今回の測定例でBODが 12 mg/l と汚染されている。立川処理場から下流220m地点に日野橋があり、そこでの冬期および夏期のリモートセンシングデータ収集日における水質は左右岸においてかなり異なり、BOD、CODなどでは左岸における値が右岸における観測値に比べてかなり大きくなっている。

4-2 旧六郷用水取水口付近の拡散現象

調布排水は河口より25.2Km地点の左岸側に位置し、砂利洗堀排水を主体とする茶褐色の排水となっている。これが緩やかな弯曲部を経て約1.3Km下流で宿河原堰の背水末端に流入している。この地点の水理的な特徴は、河床勾配の急な瀬に幅広く広がる滞水部が接続している。

1977年1月に撮影された資料をIMAGE-100により青緑のスペクトルバンド(第3バンド)の等濃度曲線に表わすと図-3のようになる。この地点では6本の等濃度線を描くことができ、図に示す如くその概形は密度噴流の拡散過程に類似している。中心線に沿う無次元距離と希釈率との関係は図-2に示され、半無限域に放出される慣性力の卓越する型式の密度噴流の実験結果とよく似ている。

M²S撮影時には本地点の水理条件についての詳細なグランドトールズは無かったので1978年11月22日に河床勾配、水面勾配、流速分布等の観測を行った。砂洲の状況は細部については先年の形状とやや変化していることが認められたが、大勢については変化していない(図-3点線は今回の水際線を示す)。

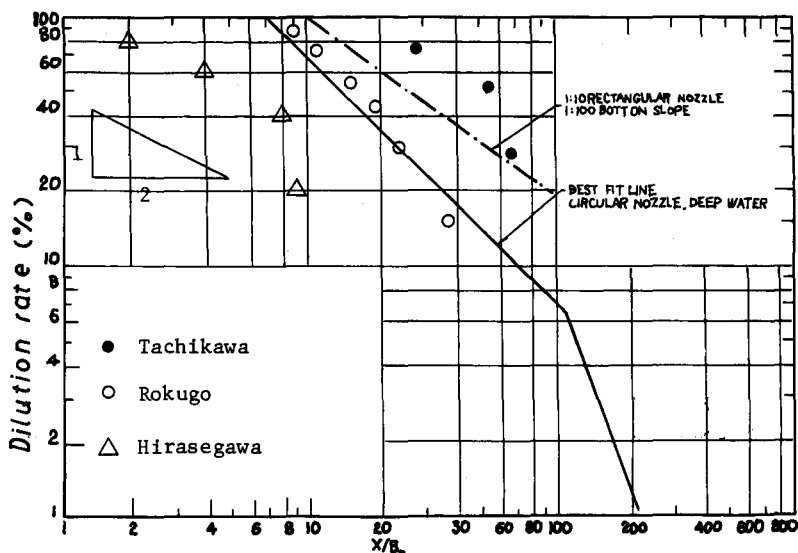


Fig.2. Variation of dilution rate with the dimensionless distance

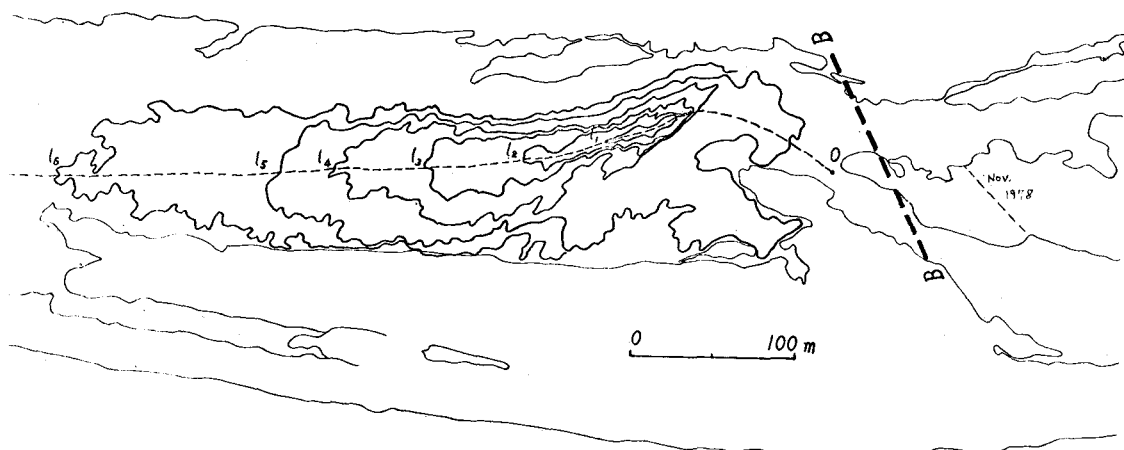


Fig.3. Iso-concentration contours near abolished-Rokugo-intake

今回の観測結果では、瀬の部分の河床勾配は $1/83$ であったが、この部分は流心にはほぼ直角方向に新しい流路が形成されており、旧来の河床勾配はこれより緩やかであったと判断される ($1/150 \sim 1/200$ 程度)。図-2には、勾配 $1/100$ の傾斜面に放出される温度密度噴流の希釈率の変化が一点鎖線で記入されているが、今回の結果はこれに比して急であり、前述の如く半無限域への放出に類似している。この理由は瀬からの排水は、上下流につながる

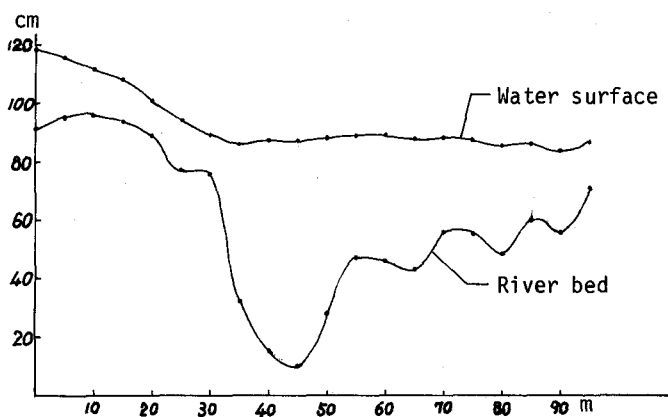


Fig.4. Profile of water surface and river bed (B-B)

る分岐している流心部に約 30° の角度で流入しており、この滞筋を通して周囲水の補給が十分にある故と考えられる。流量 $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度に対し、瀬における水深は図-4に示す如く約 0.1 m であり、流心部（現地における滞水部と分岐部の滞筋はこの図面の直角方向につながっている）の水深は約 0.7 m である（下流部の滞水部の水深はさらに増大する）。

4-3 平瀬川合流点付近の混合形態

平瀬川と多摩川との合流点付近における等温線は本川の右岸に沿って細長く伸びており、前節で取り扱ったような解析は適用できない。これは合流角度が緩やかなためと、流れが右岸側に寄って本川の流速も合流点付近でかなり大きくなっているためと考えられる。密度差を含んだ解析としては、流れの中へ放出される密度噴流の解析が行なわれているが、これらはすべて密度差のある流体の鉛直方向の混合を対象としている。今回の場合には水平面内の混合が考察の対象であるので密度効果の発現する方向が異なる。密度差はかなり小さいので、ここでは均質な流体が支流から合流する場合の速度場の解析結果を準備して観測値との比較を行った。今回の資料は負の浮力を有する流体が合流しているが、擬似カラー写真による図面から判断すると全体の流況は冬期の観測の場合（正の浮力を有する流体が合流）と変化がないので、このことから浮力の

効果が非常に卓越しているとは言えないことがわかる。支川中心線の軌跡については中洲の影響が現われるまでは板倉ら⁹⁾の実験公式で表わしうることがわかった。

支川が本川に合流した後の合流水の速度分布については実験が行なわれ¹⁰⁾その結果によれば運動量の輸送については通常の2次元噴流の解析を適用することができることが確認され、横方向の渦動拡散係数などが求められている。2次元の噴流においては噴流中心軸に沿う流速の変化は $U_{\max} \propto X^{-1/2}$ である。渦動拡散係数が渦動粘性係数に等しいと考えると、中心軸に沿う温度の逓減特性も同一となり $(\Delta T / \Delta T_0) \propto X^{-1/2}$ と考えられる。噴流中心軸の曲がり具合は小さいから、中心軸に沿う距離と流れの方向の直線距離とは等しいと見なして解析を行った結果を図-2に示す。これによれば合流点付近での変化はほぼ $X^{-1/2}$ に比例している。 X/B_0 が10程度になると減衰率が急激に増大し、周囲水との同化の過程は加速される結果となっている。

5. 結 論

以上の結果を総合すると次のようなことが言える。

- ① リモートセンシングデータにより、河川水域における等温・等濃度線を描き、水理・水質の微細構造をあきらかにすることができた。
- ② 等温・等濃度線を活用することにより、河川に特有な流れの場における混合形態を従来の密度噴流あるいは均質流体の噴流理論の適用により解析することが可能となった。
- ③ リモートセンシングデータにより得られる面的な情報および等温・等濃度線などは、流動の水理解析にとって極めて有効な手段であることが示された。
- ④ リモートセンシングデータは面的な流況の把握に有効であり、これを用いて河川における混合の機構を論ずることが可能であることがわかった。水質を直接判断するためには、今後もグラントルースおよび河川に対する理解を増進させることが重要である。

参 考 文 献

- 1) Bendix, BSR4210, MDAS Technical Description, 1974
- 2) NASA, SP-283, 1972
- 3) Joseph Lintz, Jr. and David S. Simonett, Remote Sensing of Environment, 1976
- 4) 市川新・玉井信行・田中総太郎：水質解析および河川水理学へのリモートセンシング技術の応用，第5回環境問題シンポジウム講演集，土木学会，1977
- 5) 玉井信行・市川新・田中総太郎：リモートセンシングデータによる多摩川の環境調査について，第6回環境問題シンポジウム講演集，土木学会，1978
- 6) 建設省関東地方建設局京浜工事事務所：リモートセンシング解析業務（その2）報告書，1977
- 7) 新田忠雄：海洋域における工場排水の希釈と拡散について，用水と廃水，5，416，1962
- 8) 玉井信行：水域における混合問題への水理学的アプローチ（I），水理科学，46，106，1975
- 9) 板倉忠興・須藤靖彦：河川合流点における流れの機構の研究，第25回年次学術講演会，1970
- 10) 板倉忠興・須藤靖彦：河川合流点における流れの機構の研究，第26回年次学術講演会，1971

謝 辞

本研究を遂行するにあたっては、建設省京浜工事事務所の多大な尽力を得た。ここに記して関係各位に深く感謝する次第である。