

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

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
 リモートセンシング技術センター 正員 田中 総太郎

1. はじめに

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価するに当り、現状段階では不完全さを避けることができない。本研究は昨年に引続き、従来の手法では得ることが難しかった河川水質あるいは河川水理学に関する情報を、リモートセンシング技術を活用して短期間のうちに空間的な拡がりを持って得ることを試みたものである。昨年度の報告は冬期の資料に関するものであり、今回の解析は新しく得られた夏期の資料に関して行なわれた。

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、あるいは生物学的・化学的な変化を受けるものと考えられる。そうして意味は、静的・固定した「水質」という概念はあり得ず、その水域の流動形態の中での把握が重要であると考えられる。環境計画の観点から考えれば、第1段階としてはマクロな表現が重要であろう。ここでは水質の特性を河川の流動の水理の中から捉えることを目標に、2地点における流動特性を解析した。その1は処理場からの排水の挙動であり、その2は支川の合流点における混合形態である。これらは密度噴流あるいは流れの中への噴流として解釈でき、布設率の変化などを推定できることが判った。

2. データ収集

マルチスペクトラルスキャナースMSについて前報¹⁾に述べたので省略する。撮影高度は1000m、飛行速度は237~248 km/hrであった。撮影は1977年7月24日~27日の4日間にわたって行われ、この期間快晴に恵まれた。表-1の走査線数は飛行方向のデータ数を示し、今回の飛行ではほぼ1/2.2 m毎にデータを取ったことになる。

すなわち衛星データ上のデータの1単位は1/2.2 m平方からの情報を代表していることになる。地上のデータ収集については羽村堰から調布堰に至る本川の41km区間について、本川15地点、支川・排水口27(右岸12, 左岸15)箇所について表流水を採取し、その水質分析を行なった。代表的な地点における調査期間に先行する約

表-1 データ収集記録 1977年7月

コース	撮影日	区間	距離	走査線数
1	25	河口 - 蒲田	5 km	4241
2	25, 27	羽田 - 矢向	7	3387, 3381
3	24	川崎 - 池上	3	1844
4	27	六郎 - 中丸子	4	2083
5	27	矢向 - 馬込	4	3845
6	27	尾山台 - 狛江	6	4669
7	27	尾山台 - 稲田	7	4048
8	24	溝口 - 是政	7	5378
9	24	調布 - 日野	6	4710
10	24	連光寺 - 立川	6	4084
11	24	谷保 - 高月	8	5171
12	24	石川 - 青梅	7	5024
13	24	昭島 - 青梅	7	4351
14	24	青梅 - 梅郷	7	3097
15	24	国立 - 宇賀	5.5	3978
16	24	堀之内 - 犬目	5	3375

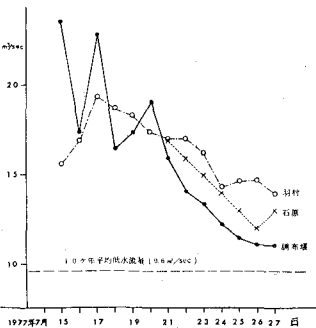


図-1 調査日の流量

2週間の流量の変化を図-1に示す。これを見ると調査日は安定した低水流況を示していることがわかる。調布堰の流量 $11 \text{ m}^3/\text{sec}$ は過去10年間の平均低水量 $9.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ を上回っているが、流量が安定していることから考えてこの期間の代表的な流況であると考えられる。前年度に行なった冬期の撮影時の流量が $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ であることから、冬期の資料より若干流量が多いことがわかる。

3. 画像処理

画像処理のフローを図-2に示す。撮影された High Density Digital Tape に記録された情報を CCT (Computer Computable Tape) に転写し、それに基づいて MDAS 解読装置を用いて TV 上に擬似カラー図、温度図を出力させることができる。この段階では河道に沿う撮影範囲の全域を対象とするため、水域の温度差のみを多段階に分類して水塊の挙動を見ることは十分に行なうことができない。そこでこの CCT を転換複写して IMAGE 100 に画像提示した。

IMAGE 100 上ではカーソルの指示により指定した領域内の最高・最低温度を8等分した表示が可能である。この8等分した温度スライスについてどのような組み合わせについても出力できるので、等温線図を描き易いように出力させ

35 mm カラーズライドに撮影し解析した。このようにして得られる温度の指標は相対的なものであり、絶対値を知るには他の情報源が必要である。カーソルの位置を変えるとその領域に含まれる最高・最低温度が異なり、1つの色調が示す温度範囲は異なってくる。夏期場合には本川の排水との温度差は $2 \sim 3^\circ\text{C}$ であり、陸地の最高温度は 40°C を越えるのでカーソルの位置の選定は非常に難しい。カーソル内に陸地(例えば砂洲)の高温部が入ると1つの色調の温度差が 2.5°C 程度となり、河川水はすべて一律の温度指標となり能性がある。ここでは1つの色調の温度範囲を $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}$ としたが、多摩川本川水との差異という観点からは出力した8段階すべての変化を利用できず、3~4段階の遷移過程を追跡できるに止まっている。

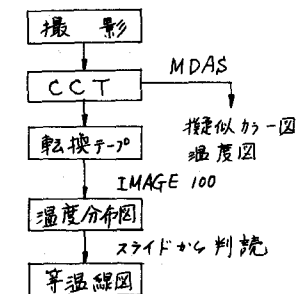


図-2 画像処理のフロー

4. 立川処理場からの排水の挙動について

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 ha となっているが現在は 96 ha で、処理区域内人口約 90 万人、水洗化人口約 50 万人である。処理方式は合流式で、活性汚泥法のステップアエアレーションである。処理水の水質の例としては、 BOD は 5.6 mg/l であった。この処理水と本川との混合過程を定量的に評価するために、この付近の温度分布を IMAGE 100 による資料を検討する。

IMAGE 100 による資料を検討する。IMAGE 100 によって得られた色調のパターンから等温線図を描いたのが図-3である。これを概観すると、残堀川からの水塊の水温は本川とほぼ同一であり、処理場からの排水は外縁の形状は複雑であるがほぼ塊状に本川水の中へ拡がっていることがわかる。本川水は流下しているため処理水の混合は上下流方向へ対称とはなっていないが、大略の様子は

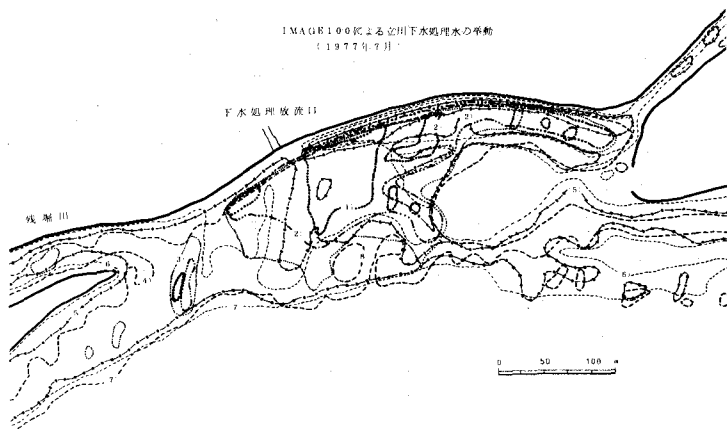


図-3 IMAGE 100による立川下水処理水の挙動

静止流体中へ放出された表面密度噴流との類似性が高いので、それらに関する従来の成果との比較を中心に考察する。

4.1 観測された水量

排水量 $Q = 0.30 \text{ m}^3/\text{sec}$, 排出速度 $U = 0.52 \text{ m/sec}$, 排水水温 22.3°C ($\rho_0 = 0.9977308$) , 環境水温(本川水温) 23.9°C ($\rho = 0.9973502$) , 排水口 円形・最大水深 0.6 m ・水面幅 1.6 m
等温線に囲まれる面積(図-3 参照)

- | | |
|---------|---------------------|
| 1. | 11 cm^2 |
| 2. | 41 cm^2 |
| 3. | 51.5 cm^2 |

図-3にはさらにラング4, 5, 6の等温線が記入されているが、ラング4の等温線は摩川本川の水域を広く覆っており、この温度を本川の温度すなわち環境水温と判定した。この水温は直接測定されていないが、次のようにして算出された。日野橋における水温は 25.4°C であり、排水との温度差は $+3.1^\circ\text{C}$ である。これが IMAGE 100 の上で8ラングに分割されたので、等温線の1ラング差は水温差 0.4°C と考え、環境水温は排水水温より 16.0°C 高い温度とした。なお、上記の面積は図上における面積で、縮尺は $1/2500$ とある。

4.2 排水の影響面積について

パルプ工場からの着色した排水の拡がり面積 $Y(\text{m}^2)$ と排水量 $X(\text{m}^3/\text{day})$ の間には次式が提案されている²⁾。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。

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

処理場からの排出量は $0.30 \text{ m}^3/\text{sec}$ であるからこれを日単位に換算すると $X = 2.59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ であり、式(1)により予測される拡がり面積は

$$Y = 3.14 \times 10^5 \text{ m}^2 \quad (2)$$

となる。観測値は

$$Y_{ob} = 51.5 \times 25^2 = 3.22 \times 10^4 \text{ m}^2 \quad (3)$$

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の第3ラングの等温線は希釈率²⁾と言えは4倍程度に相当しており、予測値が対象としたような大きな希釈率²⁾での面積は式(3)よりは増大すると思われる。因みに立川処理場付近で第4ラングの等温線(環境水温と一致、希釈率 ∞)に囲まれる面積は 120 cm^2 であり、式(3)の観測値は約2倍となる。

式(1)は海面におけるパルプ排水の拡がりから経験的に得られた式である。今回は処理場からの排水の方が水温が低く密度が大であるので、傾向としては排水は周囲水の中へ花みだんをゆく形態をとることも、影響水域が式(1)による予測値より小くなる原因と思われる。従って希釈率による補正を考慮にしても、式(1)による予測は温度影響面積の観測値より2~3倍大きな結果を与えるものと思われる。

4.3 密度噴流と考える場合の解析³⁾

4.1の観測結果・項で述べたように、排水と環境水との間には $3.878 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 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は密度フルード数であり、放出口における値は

$$F_{d0} = \frac{U}{\sqrt{(29/9)gR}} = 10.9 \quad (4)$$

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程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

議論を進める。結果を一覧表にしたのが表-2である。ここに ΔT_0 は放出口における環境水との温度差、 ΔT は各等温線上での環境水との温度差、 A は各等温線が囲む円上の面積、 r_0 は等面半径、 B は放水口の水面幅で 1.6 m である。

この関係を示したのが図-4である。図中の実線は密度フルード数が 18~180 の範囲で行われた実験の中央値を示し、この結果は一樣流体中の噴流の速度の減衰関係と類似である。また一点鎖線は空気中への放熱のみを考えた場合の理論解で、周囲水の混合が生ずるから実際に生ずる噴流中心軸上の温度変化はこの割合よりも速くなる。これらの理論および実験は静水を対象として考察されており、この点も河川水への放流という実際の条件と異なっているが、対象とした水域は流れの停滞する部分であり、等面内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-4に見られる実験値の特徴は、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での熱交換が主であり、それを越えると急激な温度変化を生じている。これ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。

表-2 水温の変化特性

$\Delta T/\Delta T_0$	A (cm ²)	r_0 (cm)	実距離(m)	$2r_0/B$
0.75	17	1.87	46.8	58
0.50	41	3.61	90.3	112
0.25	51.5	4.05	101.3	126

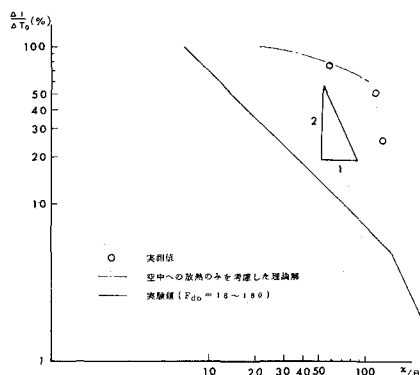


図-4 水温の変化(立川処理場)

4.4 日野橋の水質について

立川処理場のすぐ上流からは図-3にも示される通り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、水質は 77 年 7 月の今回の測定例で BOD が 12 mg/l と汚染されている。また立川処理場から下流 220 m 地点に日野橋があり、こ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表-3 の通りである。前述の如く、立川処理場の前面水域では流水中の混合の強度が小さく、残堀川および処理場からの排水は左岸に沿って流下すると考えられる。その結果、日野橋においては左右岸における水質がかなり異なり、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。

表-3 日野橋の水質(左・右岸の比較)

		1976 年 12 月		1977 年 7 月 25 日	
		左岸	右岸	左岸	右岸
水	温 °C	12.8	8.3	25.4	27.1
	PH	7.50	7.72	7.58	7.65
	電気伝導度 μS/cm	392	249	305	197
	DO mg/l	8.23	12.49	8.87	8.75
	BOD mg/l	20.7	3.8	7.1	2.9
	COD (Mn) mg/l	16.8	4.5	6.3	2.7
	浮遊物質 mg/l	32.9	—	7.3	6.5
	ケルゲル窒素 mg/l	4.2	3.6	2.2	3.0
	アンモニア性窒素 mg/l	3.4	3.3	1.1	0.5
	亜硝酸性窒素 mg/l	0.2	0.2	0.3	0.2
	硝酸性窒素 mg/l	4.1	3.3	2.7	2.0
	全窒素 mg/l	8.5	7.2	5.2	5.3

5 平瀬川合流点付近の混合形態

5.1 観測された水理量

平瀬川流速 $U = 0.31$ m/sec, 合流点での平瀬川の川幅 15 m, 合流点での平瀬川最大水深 0.82 m, 平瀬川の水温 26.4°C ($\rho = 0.9967057$), 多摩川の水温 27.7°C ($\rho = 0.9963472$), 本川の流量 (= 子橋) 11.9 m³/sec, 合流角度 約 35°
等温線に囲まれる面積(図-5 参照)

5.
 4.2 cm²
 6. ---
 15 cm²
 7. ---
 28 cm²
 8. ---
 44 cm²

0 50 100 m

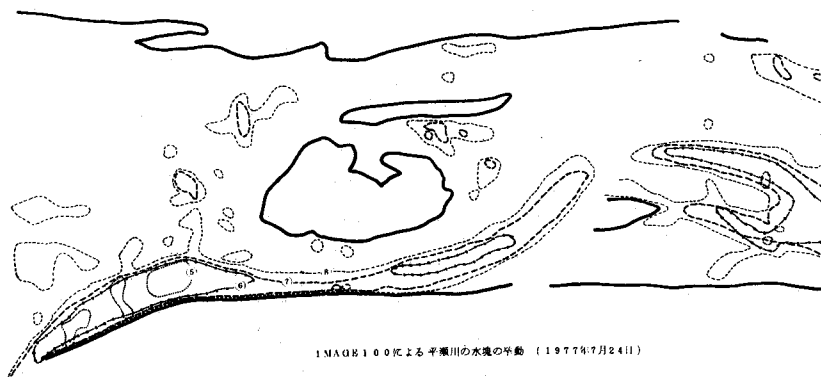


図-5 IMAGE 100 による平瀬川水塊の挙動

5.2 支流中心線の軌跡
 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、流れが右岸側に寄る。本川の流速も合流点付近をかなり小さくしているためと考えられる。密度差を全く無視しては、流れの中へ放出される密度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用して観測値との比較を行なう。今回の資料は夏の浮力を有する流体が合流しているが、模擬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）と変化が小さいので、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。

合流角度 θ で支流が合流するとき、支流中心線の軌跡については次式が提案されている。⁴⁾

$$\left(\frac{x - y \cot \theta}{x_{\max} - y_{\max} \cot \theta} - 1 \right)^2 + \left(\frac{y}{y_{\max}} \right)^2 = 1 \quad (5)$$

ここに x, y は合流部中央点から主流の方向及びそれに直角方向に取った座標であり、 $y_{\max}$ は最大貫入点における座標値を示す。なお式(5)は最大貫入点までの軌跡を対象としており、これを過ぎると支流中心線は右岸寄りに近づくように主流方向へ一致すると考えられる。また $y_{\max}, x_{\max}$ は次のように与えられる。

$$\frac{1}{2} \frac{Q_0}{Q_M} + 1 = \left(1 - \frac{y_{\max}}{B_M} \right) \left(1 + \frac{Q_0}{Q_M} \right)^2, \quad \frac{x_{\max}}{B_M} = \frac{y_{\max}}{B_M} \cot \theta + 0.04 \theta \left[\frac{Q_0}{Q_M} \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^{0.7} \quad (6)$$

ここに B_M は主流の水面幅、 B_0 は支流の水面幅、 Q_M は主流流量、 Q_0 は支流の流量である。合流点付近の平瀬川の水深を 0.8 m とすれば $Q_0 = 3.72 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、 $Q_0/Q_M = 0.3/3$ である。また $B_M/B_0 \approx 3$ であるから次式を得る。

$$\frac{y_{\max}}{B_0} = 0.99, \quad \frac{x_{\max}}{B_0} = 5.85 \quad (7)$$

式(7)の指標を用いて式(5)から中心線の軌跡を描いたのが図-6における曲線①である。これによれば支流中心線の軌跡はおおむね式(5)による予測に一致している。しかし x/B_0 が 3 程度を超えると砂

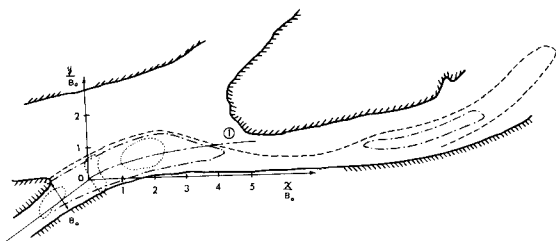


図-6 支流中心線の軌跡

洲により流路が分れ、流入の主流が加速され、平瀬川からの合流水は強い剪断により大きく引伸ばされるので、細部の状況は変化して行くことがわかる。

5.3 温度差の逆減特性

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われている。⁵⁾ 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と確認され、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逆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る方向の直線距離とは等しいと見做す。図-5より $\Delta T / \Delta T_0 = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ の4ラングに対して $x/B_0 = 2, 4, 8, 9$ と判定する。類の部分で長く伸びている部分は折返し、噴流中心軸の周りに集約して考えている。この結果を示したのが図-7であり、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。

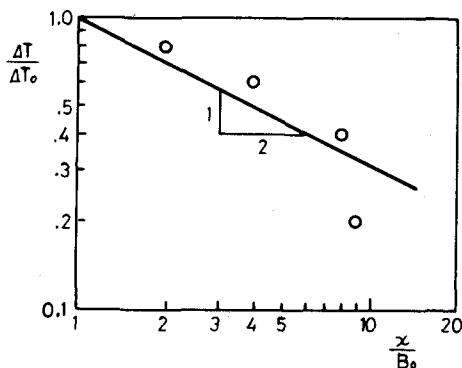


図-7 温度差の逆減(平瀬川合流点)

距離とは等しいと見做す。図-5より $\Delta T / \Delta T_0 = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ の4ラングに対して $x/B_0 = 2, 4, 8, 9$ と判定する。類の部分で長く伸びている部分は折返し、噴流中心軸の周りに集約して考えている。この結果を示したのが図-7であり、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。

6. まとめ

- 1) 処理場からの排水および支川の合流点付近の流れの場を水温のリモートセンシングデータを用いて解析した。その結果、従来の定常噴流あるいは物質流体の噴流理論の適用により混合形態の推測が可能であることがわかった。
- 2) 放出口付近の水理に関しては従来の成果の拡張が可能であるが、これを離れると対象地点の河床(例えば、瀬、洲、砂筋の形態)が現象を支配する重要な因子となってくる。
- 3) 河川における横断方向の拡散は非常に小さい。従って、従来の場合と同様に、例えば左岸から排出された物質はかなり下流まで主に左岸に影響を与えると言えてよい。
- 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、今後モダラウントラックスを充実させる必要がある。

謝辞: 本論文に用いたリモートセンシングデータは建設省京浜工事事務所が撮影したものであり、リモートセンシング技術センターにおいて画像処理が行われた。記して関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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, 74, 1977.
- 2) 新田忠雄: 海洋域における工場排水の布状と拡散について, 用水と廃水, 5, 416, 1962.
- 3) 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), 水利科学, No.106, 1, 1975.
- 4) 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, II-125, 1970.
- 5) 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, II-89, 1971.