

河口フロントに関する実験的研究

An Experimental Study on the River Water Front

長岡技術科学大学大学院 学生員 香川 健一
 長岡技術科学大学工学部 正 員 中村 由行
 長岡技術科学大学工学部 正 員 早川 典生

1. はじめに

沿岸流が存在する海上に河川水が流出すると、密度フロントが形成される事が幾つかの観測等によって知られている。河川水の海上への拡がりに関する研究は、従来から多くの研究がある。例えば、柏村¹⁾をはじめとする実験的研究や、Takano²⁾、福岡・福岡ら³⁾による解析がある。しかしながら、これらの研究では沿岸流の存在が考慮されていない。沿岸流が存在する場合の河川水の拡がりについては、早川・福岡ら⁴⁾による実験的研究、Garvine and Monk⁵⁾や、柳ら⁶⁾による観測等があるが、他に研究例は少ない。

Garvine and Monk⁵⁾は、現場における詳細な観測を行ない、フロントに直交する鉛直断面で見れば、フロント近傍の流れは、鉛直二次元系でのgravity current の挙動として近似的に取り扱うことができると述べている。彼らの観測結果をふまえ、中村・早川ら⁷⁾は、現象を単純化した鉛直二次元系でのフロントの生成条件を明らかにし、漸変二層流の解析によりフロント位置を求めた。一方、早川・福岡ら⁴⁾は、沿岸流の小さい場合には、表面噴流の解析に、指数関数型の拡がり則を加えて解析できる事を示した。しかしながら、彼らの解析は、元来、フロントが発生しない場合を前提にしており、また、中村・早川ら⁷⁾の解析も、複雑な三次元形状を有する実際の河口フロントに適用するには、限界がある。従って、現段階では、フロントの三次元的流動特性を詳細に明らかにする必要があると考えられる。そこで、本研究では実験水槽において河口フロントを再現し、フロント周辺の流動を詳しく調べた。

2. 実験

実験装置は、図-1に示すように沿岸流を模倣した流れを発生し得る縦600cm、横600cm、深さ102cmのコンクリート製海部水槽と、これに流入河川水を流すための勾配1/80、幅20cm、深さ30cm、長さ1000cmの水路よりなる。河川水と海水の密度差は温度差により相似させた。海部水槽の河口部側には水平に砂利を敷いてあり、河口での河川水路床との高低差は17.85cmである。沿岸流は可変速モーターにより循環流を発生させ、水槽内ではヘッダー管を通して一様流を起こさせた。表層水は水槽の三方に設置された越流トレンチから一様に流出させた。

測定は、熱電対による表面および内部温度分

布、浮子撮影による表面流速分布、染料水による内部流速分布、河川部における水深および内部境界面形状の各項目について行なった。また、特に、フロント周辺の三次元形状を明らかにするために、スリット光源を用いた可視化による観察を行なった。

実験条件は、河川水流量、河川水（上層）温度、沿岸水（下層）温度、沿岸流流速をかねて5ケース行ない、表-1に示した。表において、相対密度差 σ は次式で表わされる。

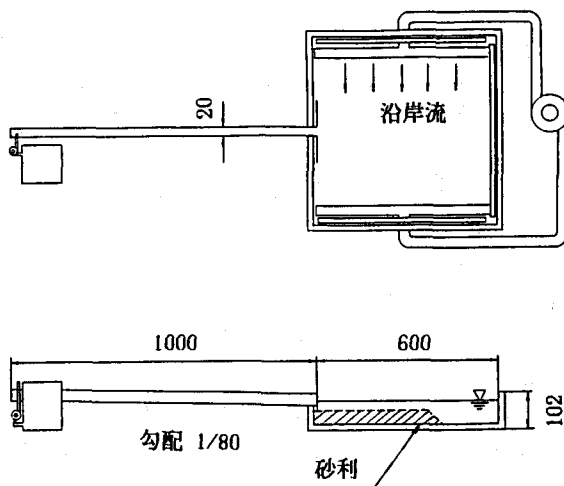


図-1 実験装置 (単位 cm)

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho}{\rho_2} = \frac{\Delta \rho}{\rho_2}$$

表-1 実験条件

Run No.		1	2	3	4	5
河川水流量	Q (ℓ/s)	0.134	0.184	0.159	0.159	0.073
上層温度	T_1 (°C)	40.3	43.9	43.0	37.4	34.2
下層温度	T_2 (°C)	17.7	16.3	14.2	12.9	13.6
相対密度差	ε	0.658	0.823	0.818	0.621	0.500
上層動粘性係数	ν (cm ² /s) $\times 10^2$	0.655	0.617	0.627	0.695	0.739
上層表面流速	u_0 (cm/s)	4.82	4.43	5.86	4.43	3.86
沿岸流流速	V (cm/s)	5.59	5.05	7.24	6.65	6.29
河口水深	h_0 (cm)	5.15	5.20	5.25	5.15	5.15
河川上層厚さ	h_1 (cm)	2.74	3.37	2.66	2.84	1.86
河川部Re数	Re	1018	1491	1268	1144	1076
河口クーリガン数 θ	θ	0.072	0.083	0.063	0.079	0.086
河口フルード数 F_{io}	F_{io}	1.147	0.850	1.259	1.066	1.279

ここで、 ρ は河口での密度、 ρ_2 は沿岸水（下層）の密度である。また、上層厚さ h_1 は、図-2に示すように、相対密度差 ε の分布より $\varepsilon_{\max}/2$ となる水深と定義する。河川部レイノルズ数は1000～1500の範囲であり、河口クーリガン数 θ は0.1よりも小さかった。このことから判断するかぎり、

実験条件は柏村¹⁾のE型の形態に属し、噴流的性格の強い流れであった。また、河口での内部フルード数 F_{io} は、ややばつきはあがるが、平均値は1.12であり、沿岸流のない場合についての F_{io} の報告値³⁾に適合している。

3. 実験結果

図-3に温度分布より得られた相対密度差 ε の分布を示す。また図中に破線で目視のフロント位置を示した。フロント位置は時間に依存しない若干の変動があり、図ではその平均的な位置を示している。図-3で、河川中心軸についてみると、河口からフロントに向けて ε は小さくなりフロントにおいて零になる。また、河川水（上層）厚さについても薄くなっていくことが認められる。河川水の流軸が沿岸流によって曲げられいく様子が ε の分布によって明白に捕えられている。また、河口（ $y=0$ cm）において、沿岸流の下流側である $x=5$ cmの ε の分布が表面から直線的な鉛直密度勾配を持っていることから、この付近では既に表面に達するまでの混合が生じていることが予想できる。

図-4に表面での流況を示す。図は、浮子の軌跡を1secごとにプロットしたものである。染料（ウラン）で着色された河川水と沿岸流の間には明瞭なフロントが観察され、それを図中に破線で示した。河川からの浮子の軌跡をみると、河口付近の沖合では、河川水は流軸を曲げられながらも、沿岸流がない場合の表層密度噴流型（柏村¹⁾

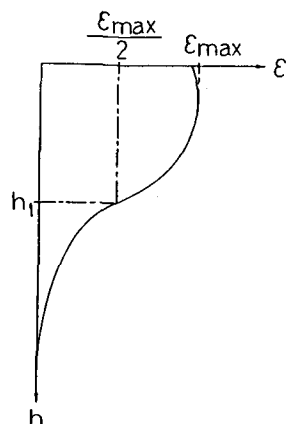


図-2 h_1 の定義

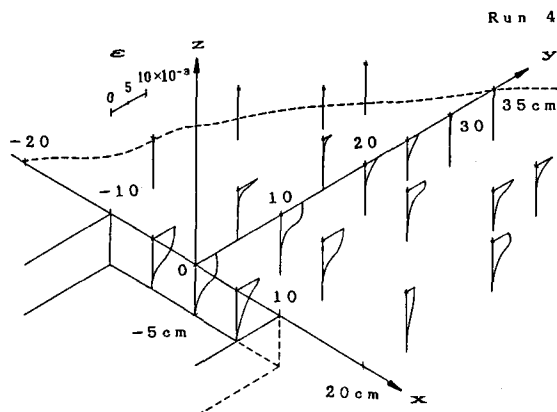


図-3 相対密度差の分布 (Run 4)

の分類によるE型)に類似した流れとなり、河川水の外縁は指数関数的に広がっている。フロントの近傍では、沿岸流のために浮子は収束し、フロントに沿った速度ベクトルを持つ。また、図より、河口よりやや沖合部分と河口両端付近において加速された領域が見られる。沿岸流のない場合の加速現象については既に報告がなされているが¹⁾、沿岸流があり、フロントが存在する場合においてもこの現象が認められた。

河川水の曲げられ方の程度を表わす指標として、河口部中央から法線を立て、フロントとの交点までの距離をYとすると(図-4のAB間の距離)、 $Y/B_0/2$ を V/u_0 についてプロットしたものが図-5である。図の白抜きのプロットは早川・福嶋ら⁴⁾の報告結果であり、黒のプロットは著者らの実験結果を示す。著者らは、 $V/u_0 < 2.0$ の範囲の実験を行っており、ややばらつきはあるものの、早川・福嶋ら⁴⁾の示した、河口レイノルズ数が $1000 < Re < 2000$ のプロットの延長上に位置している。

図-6(a)～(f)にそれぞれ、水深0cm, 0.5cm, 1cm, 2cm, 3cm, 5cmでの速度ベクトル分布および温度分布を示す。図-6(a)の破線はフロント位置を示している。図-6(a)～(f)を比較することにより、河川水の三次元的な流況がわかる。つまりフロントより河口側では、水深が深くなるにつれて沿岸流によって、速度ベクトルが時計回りに回転していき、流軸が曲げられてゆく。特に、河口断面では、水深が2cmまではほぼ河川水路軸方向の速度ベクトルを持つが、水深3cmでは速度ベクトルの方向が急激に変化している。 ϵ の分布より求めたRun 4の河口上層厚さ $h_1=2.84\text{cm}$ であることから、内部境界面を境として速度ベクトルが変化することが認められた。また、河川水は、温度勾配がほぼ最小となる向きの速度ベクト

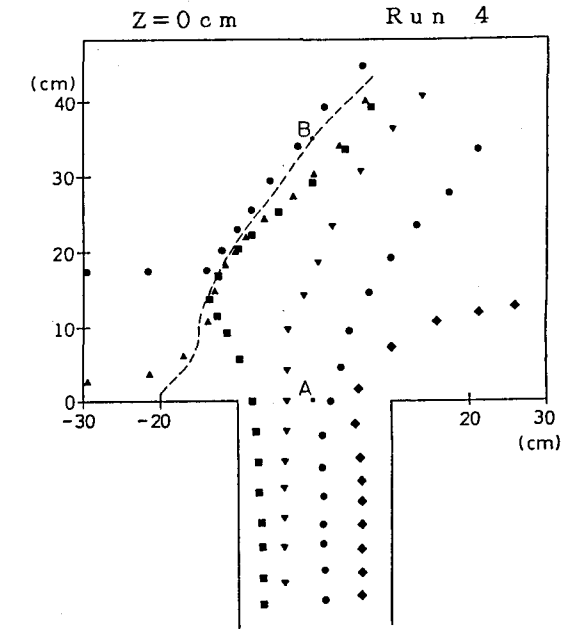


図-4 表面流況 (Run 4)

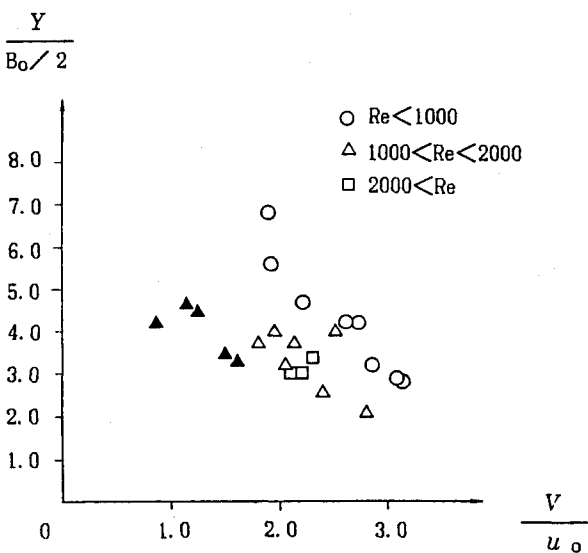


図-5 河川水流の曲げ率

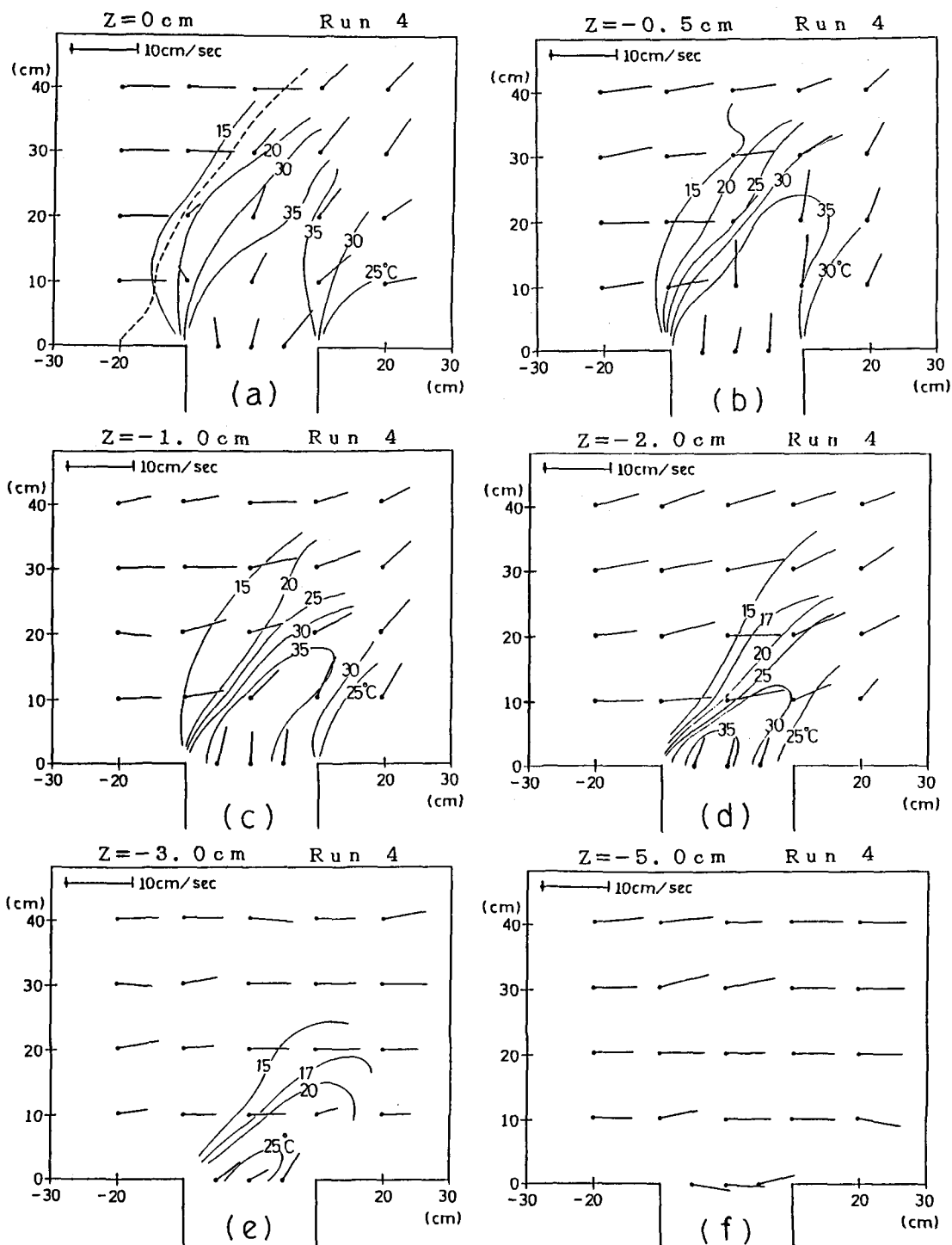


図-6 速度ベクトル分布および温度分布 (Run 4)

ルを持つ。図-6 (a) でフロントは15~20℃の間に位置しており、17℃近傍に存在している。図-6 (b) ~ (f) についても界面の位置は15~20℃と考えられ、やはり17℃あたりに存在しているように思われる。

写真-1 は予め河川水を染料（ウラン）で着色しておき、沿岸流に平行な鉛直断面にスリット光をあてて撮影したもので、 $y=0\text{cm}$ 、 5cm 、 10cm の位置における xz 断面での可視化写真である。写真の右から左向きに沿岸流が流れている。フロントの周辺では、河川水の層厚は極く薄いことが認められる。フロントから3cm 程度下流側（沿岸流から見て）から層厚が増すが、その部分から明瞭な巻き波が見られる。沿岸流のない場合には、河口上層厚さの2倍程度河口から沖合に離れた距離において、 x 軸に平行な回転軸を持つ巻き波が発生する事が報告されている³⁾。しかし、写真に見られるように、沿岸流がある場合、巻き波はほぼ y 軸に平行な回転軸を持ち、巻き波により河川水が連行され、強い混合が生じている事が認められる。 $x=B_0/2$ (B_0 は河川幅) のあたりからは、巻き波の回転軸が y 軸に平行という傾向はやや薄れ、三次元性を帯びた渦が観察された。また、写真より、河口断面においてさえ、既に y 軸にほぼ平行な回転軸を持った巻き波が存在し、界面を碎波している事が明らかになった。特に沿岸流の下流側 ($x>5\text{cm}$) においては、表面に達するまでの強い混合が見られ、これは ε の分布から予想された事を裏付けるものである。

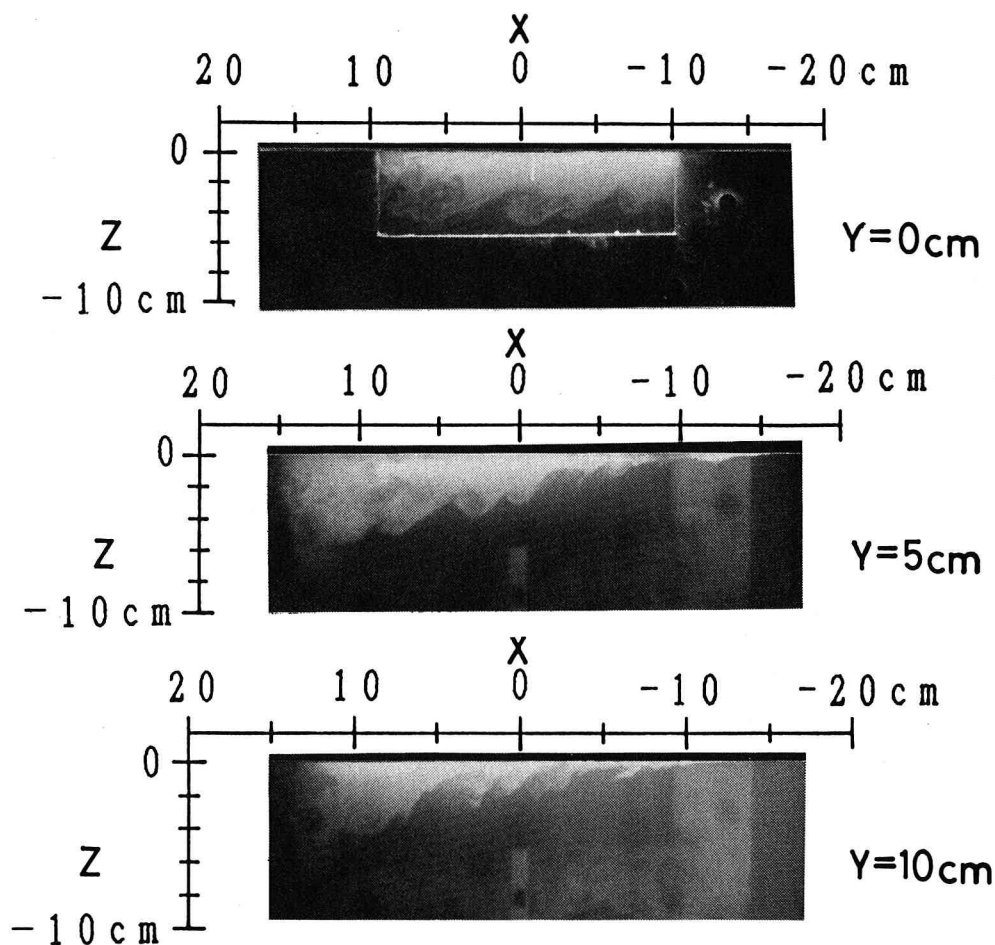


写真-1 河口を流出した河川水の可視化写真 (Run 4)

4. 結論

河口フロントを実験水槽において再現し、フロント周辺の三次元的流動特性について詳細に調べた。本研究で得た主要な結果をまとめて以下に示す。

- (1) 沿岸流がありフロントが存在している場合においても、沿岸流のない場合の流動特性との間に以下に示す共通点が見られた。
 - (i) 表面の河川水の流況は河口近傍では柏村の分類によるE型の流れの形を示し、河川水の外縁はフロント近傍にいたるまでは指数関数的に広がっている。
 - (ii) 河口からやや沖合と河口両端部において加速領域が存在している。
 - (iii) 河口内部フルード数 F_{lo} は平均して1.12であり、沿岸流のない場合の既往の多くの研究結果に適合している。
- (2) 沿岸流の存在により、沿岸流のない場合の流動特性と著しく異なる点を以下に示す。
 - (i) 沿岸流があることによりフロントが存在する。フロントにおける河川水の厚さは極く薄い。沿岸流からみた下流側で、ややフロントから離れた位置において河川水は厚さを増し、その部分よりy軸に平行な回転軸を持つ巻き波が発生し、その巻き波によって界面の混合が支配され、非常に強い混合が起きている。
 - (ii) 河口において、既に沿岸流による巻き波が存在し、 $x > B_0/4$ では、表面に達するまでの強い混合が起きている。このため、河口近傍においてさえ、界面形状は強い三次元性を有する。
 - (iii) 河川水は、温度勾配がほぼ最小となる向きの速度ベクトルを持つ。速度ベクトルの分布や温度分布から三次元性の強い流況であることがわかる。

謝辞：実験にあたって熱心に助力された、本学大学院 大嶺雅博君に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柏村正和：河川水の海上への拡がり，水工学シリーズ 75-B-7，土木学会水理委員会，1975.
- 2) Takano, k. : On the velocity distribution off the mouth of river, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 10, No. 2, 1954.
- 3) 福岡捷二・福岡祐介・守屋祥一・新庄高久：河口密度流の流動機構と塩水くさびの河口条件，土木学会論文報告集，第 327号，pp. 123-133, 1982.
- 4) 早川典生・福岡祐介・岩本逸郎：河川水の海上への拡がりに関する実験的研究，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 590-593, 1983.
- 5) Garvine, R. W. and J. D. Monk : Frontal structure of a river plume, Water Resour. Res., Vol. 79 pp. 2251-2259, 1974.
- 6) 柳 哲雄・武岡英隆・秋山秀樹：河口フロントの生成・維持機構（I）——フロントの潮時・季節変化，1984年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 110, 1984.
- 7) 中村由行・早川典生・椎名 弘・福岡祐介：密度フロントの形成・維持機構，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 611-615, 1986.