

Landsat / TM による鹿児島湾中央の小河川水の水温拡散

田原義雄*¹, 菊川浩行*¹, 上田耕平*¹, 石黒悦爾*²

Analysis of River Water Diffusion into the South Basin of Kagoshima Bay Using Landsat/TM Images

Yoshio Tahara*¹, Hiroyuki Kikukawa*¹, Kohei Ueda*¹
and Etsuji Ishiguro*²

Keywords : River water diffusion, Landsat, Satellite image, Tidal current, Sea surface temperature,
Wind velocity, Kagoshima Bay

Abstract

The diffusion of river water flowing into the south basin of Kagoshima Bay was investigated using Landsat-5 / TM 6-th band images. The numbers of images used were 8 for Kohtsuki R. and Honjyo R. and 9 for Nagata R. and Okawa R. from 1984 to 1994. The main results are as follows: 1) The averaged diffusion area and diffusion distance are almost proportional to the annual flow amount. 2) As the flow amounts of Kohtsuki R. and Nagata R. are small, sea water flows up into the rivers at hightide. At lowtide, river water flows to the southern direction along the coast. The diffusion distances are shorter than 0.8 km at hightide and about 1.6 km at lowtide. 3) The flow distance of Okawa R., which has a relatively large flow amount, is about 2 km, but often runs up to 4 km. 4) The tidal flow effect on the direction of the river water diffusion is large for the long distance and small for the short distance. For the long distance, tidal flow direction within 1 hour affects the diffusion direction. 5) For Honjyo R., the river water diffusion is complex and can not be explained by the tidal flow or wind direction. Constant residual flow and/or the stratification of the sea water must be taken into account.

鹿児島湾は外洋と湾中央部、湾中央部と湾奥部を結ぶ水道部分が浅く、湾の閉鎖度として定義される（湾長 / 湾口幅）が大きい。特に湾奥部は西桜島水道を唯一の開口部としており非常に閉鎖性が強い。したがって、水質汚染や環境保全の観点から湾内の海水の流動特性を把握することが重要な課題となっている。また、鹿児島湾ではハマチやブリなどの養殖が盛んであるが、魚病の誘発や赤潮などによって漁業被害を起ささないような養殖環境、漁場環境の整備が水産振興上必要だと思われる。

湾内の環境保全を考えた場合、河川は負荷の要因として考えられる。赤潮はその発生初期には河口付近に多く出現し、河川水との関連が高いと思われる。COD（化学的酸素要求量）についてみても、人為的発生原因のCODの総量の50%以上が工場排水や生活用水などの河川系のもの¹⁻⁴⁾と言われている。これらのことより、河川水が海域に及ぼす影響を調べることは重要な課題の一つである。河川水の拡散状況を調べる目的で、河口域の塩分分布の観測や染料の拡散実験等⁵⁾がすでになされて

*¹ 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座（Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan）

*² 鹿児島大学農学部生物環境学科農林工学講座（Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 21-24 Korimoto 1, Kagoshima, 890-0065 Japan）

いる。この論文では Landsat-5/TM band 6 の11個の画像を用いて、鹿児島湾湾中に流入する小河川の水温拡散の状態を調べることを試みる。河川の水温拡散には潮流、恒流、河川の流入水量、海域の風向風速、海水と河川水の水温差、海水の成層混合状態などが複雑に影響していると思われる。そこで、河川の拡散状態を拡散の大きさ(距離、面積)と拡散の方向に分けて、それぞれに關与する物理的要因との関係を調べる。また、流入水量の大きさや海域の潮流などによって各河川の拡散状態がどう変化するかを調べることにより、水溫拡散の様子を明確にし海域の流動特性を総合的に把握することを目的とする。

解析方法

1) 使用データと各河川の概要

宇宙開発事業団より提供された Landsat-5 衛星の TM 6 band (波長 10.4~12.5 μm) の11個の熱赤外画像を用いて、湾中央部に流れ込む4つの小河川(甲突川、永田川、雄川、本城川)の水溫拡散の状態を調べる。画像は1984年~1994年のもので画像が取られた時刻はおよそ午前10時である。画像の数は甲突川と本城川が8個、永田川と雄川が9個であった。Fig. 1に各河川的位置を示し、Table 1に1974年から1984年までの11年間の年平均流入水量、河川延長および流域面積¹⁾を示す。また、Plate 1, 2には各河川水の海への水溫拡散状況を表す Landsat-5 衛星の代表的な熱赤外画像を示す。

2) 拡散距離の算出方法

拡散の距離・面積は淡水が海水に及ぼす領域を考える上でのめやすとなる。淡水流入を直接受ける海域は、密度分布がほとんど塩分分布によって決まってくる。この領域は流入水量の大きさと潮流などの流動特性⁶⁾によって決まる。拡散の距離は河口から環境海水までの距離と定義するが、これを藤野⁷⁾が作成した Visual Basic の画像解析ソフトを用いて計測する。Fig. 2に1993年3月5日の雄川の例で示すように、画像上に河口から環境海

水までの直線を引く。Fig. 3はその線上での CCT 値 (Computer Compatible Tape の略。TM センサーの場合、各バンドの反射や放射の強さを0から255までの整数で表す。)の変化を示す折れ線グラフである。横軸は距離(1画素の長さ=0.03 km)、縦軸は CCT 値である。Fig. 3から河口域の CCT 値は109、環境海水は122であることがわかる。この画像では CCT 値が109~122までの距離が拡散の距離で、折れ線グラフから計算される拡散の距離は4.29 kmとなる。Table 2に各河川の拡散の距離を示す。

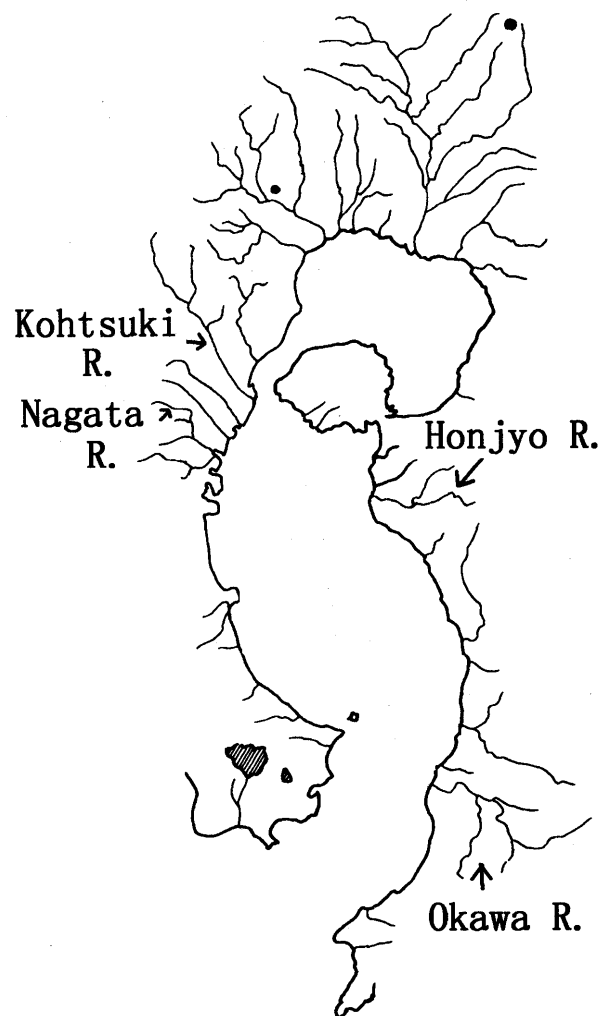


Fig. 1 Locations of four rivers flowing into Kagoshima Bay.

Table 1 Characteristics of each river¹⁾

River	Annual mean flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Length (km)	Valley area (km^2)
Kohtsuki R.	3.18	66.6	107.9
Nagata R.	0.54	23.7	38.1
Okawa R.	7.58	54.9	135.5
Honjyo R.	1.94	20.1	51.2

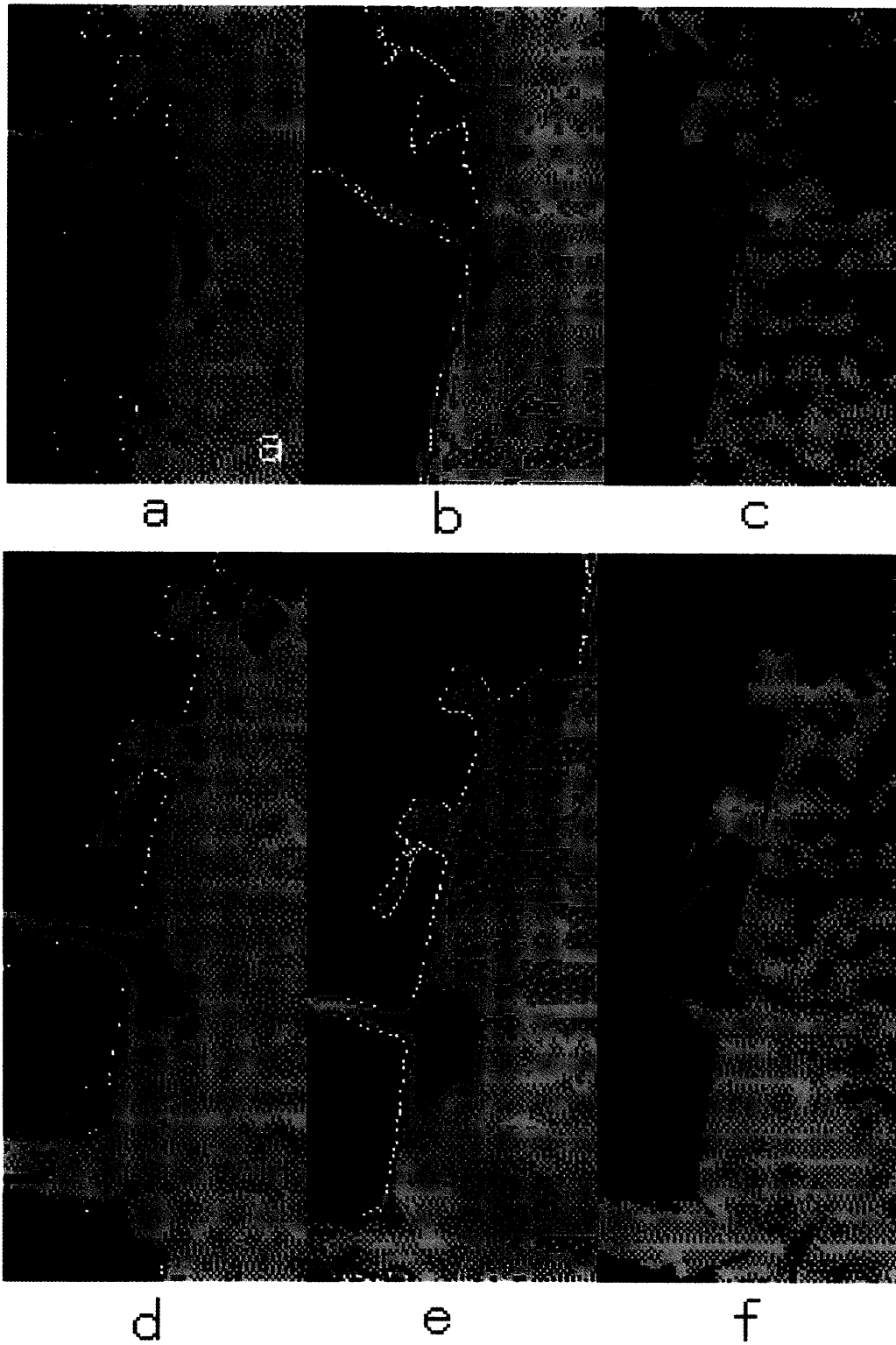


Plate 1 Landsat-5/TM 6-th band images of Kohtsuki R. (a, b, c) and Nagata R. (d, e, f): a and d on March 10, 1989; b and e on September 21, 1990; c and f on December 10, 1990

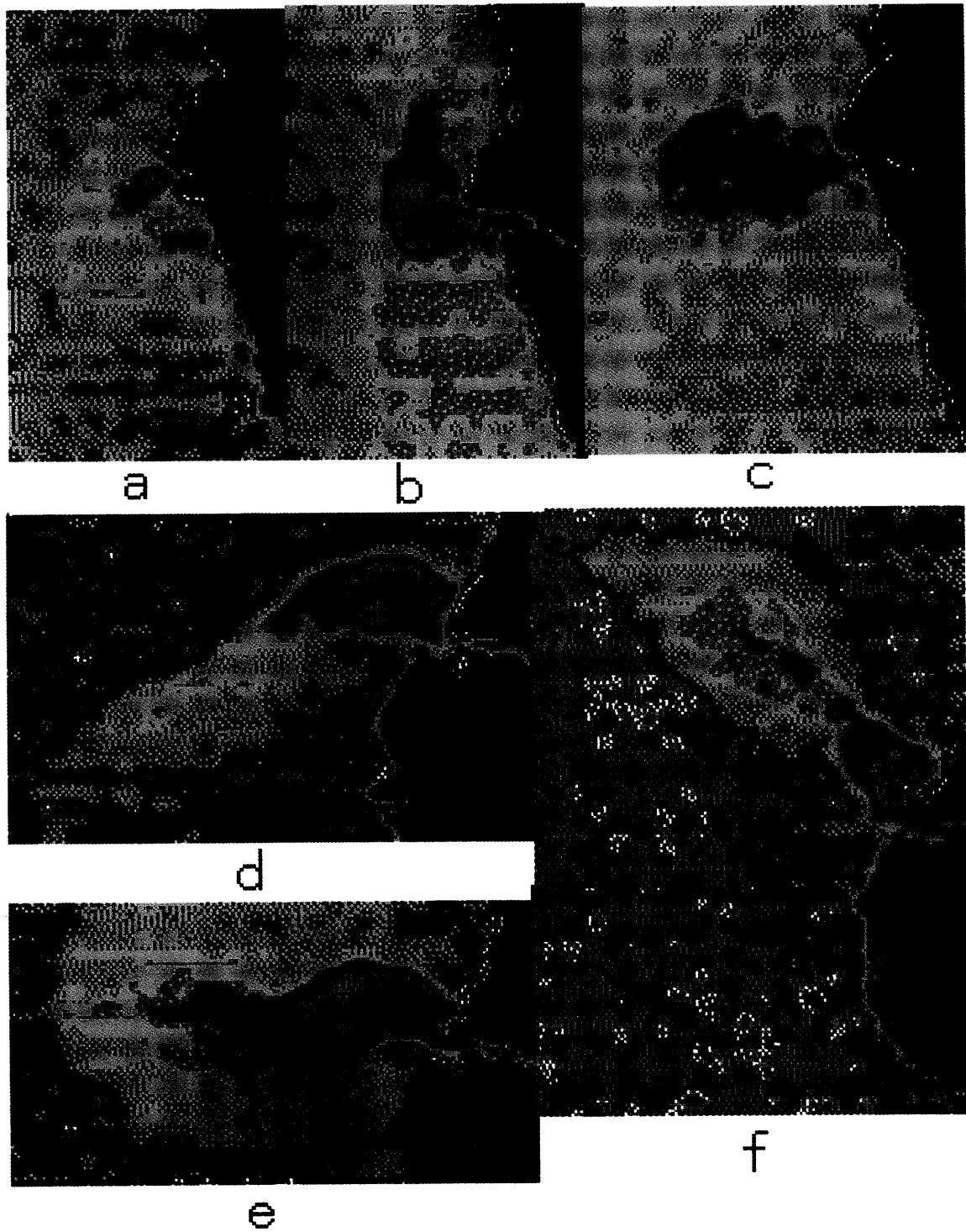


Plate 2 Landsat-5/TM 6-th band images of Honjyo R. (a, b, c) and Okawa R. (d, e, f): a and d on October 22, 1984; b and e on September 21, 1990; c and f on March 3, 1993

3) 拡散面積の算出方法

Fig. 2 に示すように、注目する河口域を長方形に囲み、その長方形内の CCT 値の画素数（ピクセル数）の合計を藤野⁷⁾が作成した Visual Basic の画像解析ソフトを用いて算出する。1993年3月5日の雄川の場合のヒストグラムを Fig. 4 に示す。各 CCT 値を持つ画素の数の合計に1画素当たりの面積 (0.03 km)² をかけることによりその CCT 値を持つ水域の面積が求まる。河川水の影響が及ぶ水域の CCT 値は環境海水の CCT 値よりも小さいので、それらの CCT 値を持つ水域面積の合計を求めることにより河川水の拡散面積を算出する。Table 2 に各河川の拡散面積を示す。

4) 拡散方向の算出方法

拡散方向については、河口に近い部分の河川水の拡散方向と遠い部分の拡散方向を分けて考える。各画像は CCT の絶対値が異なるので、異なる画像の水温拡散の様子を比較検討するための指標として、河口域で1、環境海水で0となるように規格化された CCT 値を用いる。すなわち、ある地点の規格化された CCT 値 τ は、 T をその地点の CCT 値、 T_s を環境海水の CCT 値、 T_r を河口域の CCT 値として次の式で定義される。

$$\tau = \frac{T - T_s}{T_r - T_s}$$

規格化された CCT 値 τ は淡水と海水の同化の割合の指標となる。

拡散方向を求めるために、河口において海岸に平行に線を引き、北からの角度を測る。Fig. 5 に例を示すよう

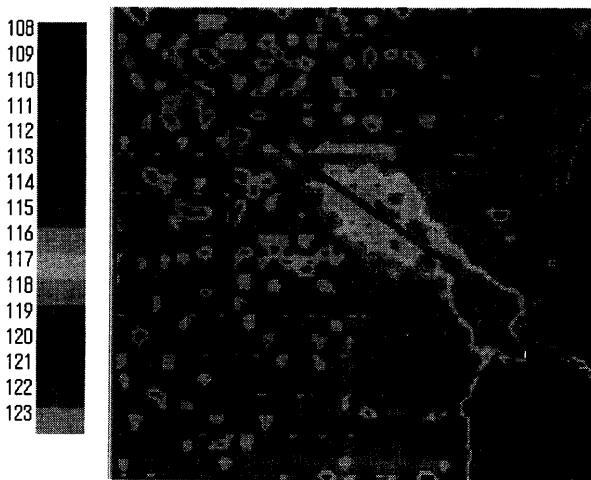


Fig. 2 Examples of partially straight line, on which the diffusion distance is estimated and a square area, where the diffusion area is estimated.

に、河口に近い（遠い）部分の拡散方向を $\tau = 0.75$ ($\tau = 0.25$) の等高線の先端と河口を結んだ線の角度で表す。 $\tau = 0.75$ ($\tau = 0.25$) は河川水が海水と25% (75%) 同化した地点を示している。Fig. 5 の例では、河口に近い（遠い）部分の拡散方向は75° (83°) である。

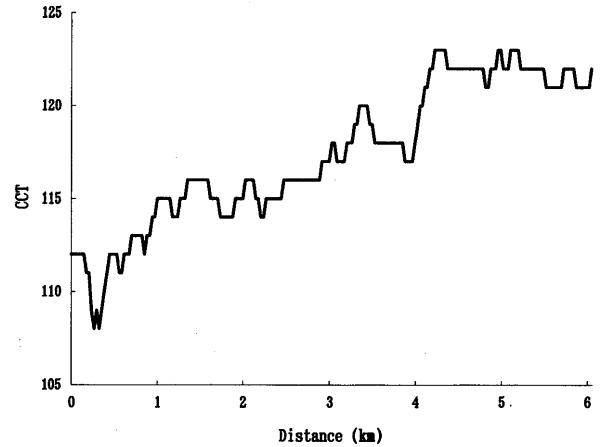


Fig. 3 CCT values on the partially straight line in Fig. 2.

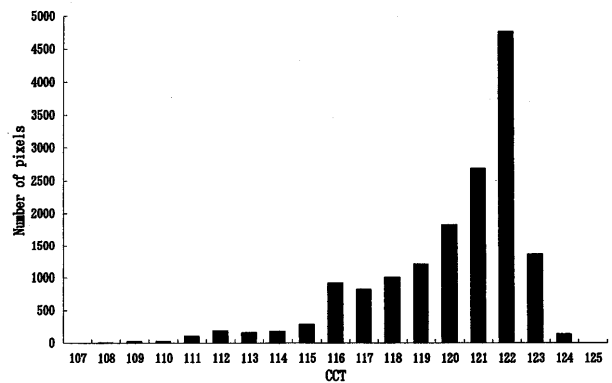


Fig. 4 Number of pixels for each CCT value in the square area in Fig. 2.

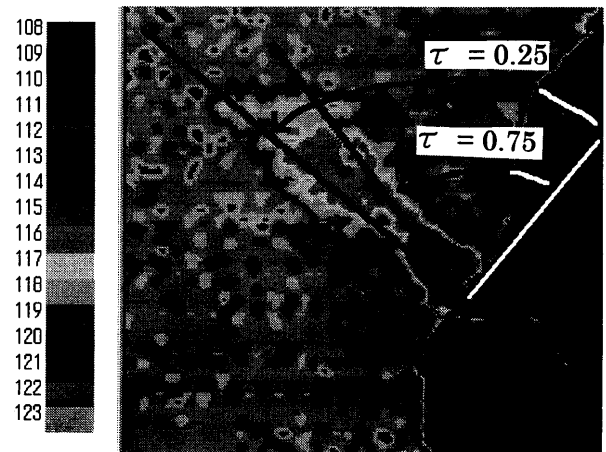


Fig. 5 Examples of diffusion directions for $\tau = 0.25$ and $\tau = 0.75$.

Table 2 Characteristics of each image

	Date	CCT (sea)	CCT (river)	T _s -T _r (degree)	Diffusion distance (km)	Diffusion area (km ²)
Kohtsuki R.	84/10/22	133	121	2.4	0.75	0.22
	87/11/16	137	128	1.8	1.89	1.36
	89/03/10	110	100	2.0	1.35	0.83
	90/09/21	155	145	2.0	1.70	0.69
	90/12/10	137	127	2.0	0.78	0.47
	92/05/21	139	135	0.8	1.47	0.26
	93/11/16	117	110	1.4	2.01	1.10
Nagata R.	94/09/16	141	137	0.8	0.69	0.25
	84/10/22	132	128	0.8	2.22	0.81
	87/11/16	137	133	0.8	0.50	0.89
	88/12/20	119	111	1.6	2.04	0.75
	89/03/10	110	103	1.4	1.35	1.33
	90/09/21	155	149	1.2	1.38	0.74
	90/12/10	135	133	0.4	0.09	0.18
Okawa R.	92/05/21	139	136	0.6	0.24	0.15
	93/11/16	117	115	0.4	0.72	0.46
	94/09/16	140	138	0.4	0.30	0.23
	84/10/22	132	116	3.2	4.53	7.49
	89/03/10	112	97	3.0	1.95	2.17
	90/09/21	156	141	3.0	3.93	9.63
	90/12/10	135	125	2.0	1.20	5.19
Honjo R.	92/05/21	143	136	1.4	0.93	0.48
	93/03/05	121	108	2.6	4.29	5.76
	93/11/16	115	107	1.6	1.89	1.15
	94/03/24	123	113	2.0	1.50	2.31
	94/09/16	142	136	1.2	1.53	1.44
	84/10/22	133	124	1.8	0.93	1.61
	89/03/10	108	100	1.6	0.24	0.51
Honjo R.	90/09/21	156	144	2.4	2.58	2.03
	90/12/10	136	127	1.8	0.87	0.65
	93/03/05	113	106	1.4	1.83	1.86
	93/10/15	120	118	0.4	1.50	0.88
	94/03/24	122	117	1.0	1.05	0.73
	94/09/16	141	139	0.4	0.20	0.19

Table 2 (continued)

	Date	Tidal time	Tidal level (cm)	Tidal velocity (ms ⁻¹)	Wind velocity averaged for 5 hours (ms ⁻¹)	Wind direction averaged for 5 hours (degree)	Diffusion direction for $\tau=0.75$ (degree)	Diffusion direction for $\tau=0.25$ (degree)
Kohtsuki R.	84/10/22	5hr. after high	73.8	-0.30	1.40	117.0	98	140
	87/11/16	high	100.2	0.08	2.20	-45.0	115	143
	89/03/10	1.5hr. after high	245.3	-0.02	2.00	18.0	140	175
	90/09/21	2.5hr. after high	245.2	-0.52	1.96	121.5	157	180
	90/12/10	2.5hr. after low	130.9	0.46	1.14	-40.5	85	44
	92/05/21	5.5hr. after low	223.3	0.10	1.92	-54.0	50	50
	93/11/16	1.5hr. after high	254.2	-0.45	1.60	13.5	140	170
Nagata R.	94/09/16	5.5hr. after high	82.2	-0.17	3.24	-67.5	170	170
	84/10/22	5hr. after high	73.8	-0.30	1.40	117.0	108	126
	87/11/16	high	100.2	0.08	2.20	-45.0	92	115
	88/12/20	5hr. after high	113.3	-0.29	1.60	58.5	119	119
	89/03/10	1.5hr. after high	245.3	-0.02	2.00	18.0	122	172
	90/09/21	2hr. after high	245.2	-0.52	1.96	121.5	92	165
	90/12/10	2.5hr. after low	130.9	0.46	1.14	-40.5	80	80
Okawa R.	92/05/21	5.5hr. after low	223.3	0.10	1.92	-54.0	81	81
	93/11/16	1.5hr. after high	254.2	-0.45	1.60	13.5	120	120
	94/09/16	5.5hr. after high	82.2	-0.17	3.24	-67.5	116	116
	84/10/22	5hr. after high	73.8	-0.23	1.36	-68.1	162	169
	89/03/10	1.5hr. after high	245.3	-0.24	1.00	-71.6	175	180
	90/09/21	2hr. after high	130.9	-0.54	0.94	44.4	137	137
	90/12/10	2.5hr. after low	223.3	0.36	0.87	-50.1	92	38
Honjo R.	92/05/21	1hr. after low	223.3	-0.23	0.57	-45.2	94	133
	93/03/05	4.5hr. after high	110.9	-0.09	0.53	-82.6	75	83
	93/11/16	1.5hr. after high	254.2	-0.37	0.64	-13.2	140	157
	94/03/24	5hr. after high	98.8	-0.12	1.45	-50.7	73	48
	94/09/16	5.5hr. after high	82.2	0.03	1.07	-56.9	75	75
	84/10/22	5hr. after high	73.8	-0.08	0.81	-52.4	100	160
	89/03/10	1.5hr. after high	245.3	-0.05	1.00	-48.0	130	165
Honjo R.	90/09/21	2hr. after high	245.2	-0.03	1.42	-120.2	82	27
	90/12/10	2.5hr. after low	130.9	0.05	0.89	-87.1	100	155
	93/03/05	4.5hr. after high	110.9	0.07	1.15	-72.1	90	100
	93/10/15	3.5hr. after high	159.9	-0.07	1.35	-91.9	92	98
	94/03/24	5hr. after high	98.8	0.05	3.03	-51.1	85	147
	94/09/16	5.5hr. after high	82.2	-0.05	2.01	-61.7	90	90

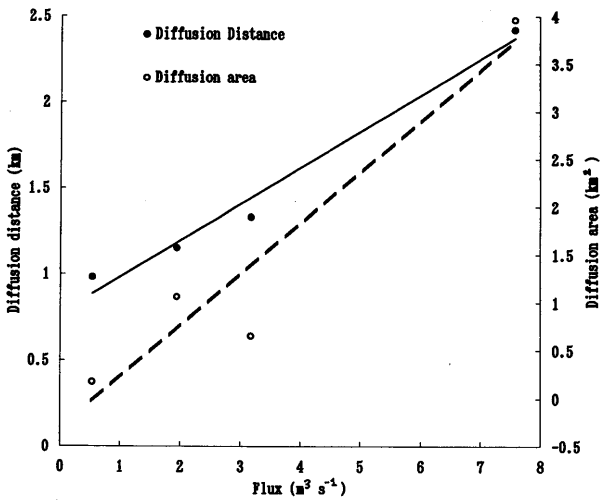


Fig. 6 Averaged diffusion distances and diffusion areas for each river versus annually averaged fluxes.

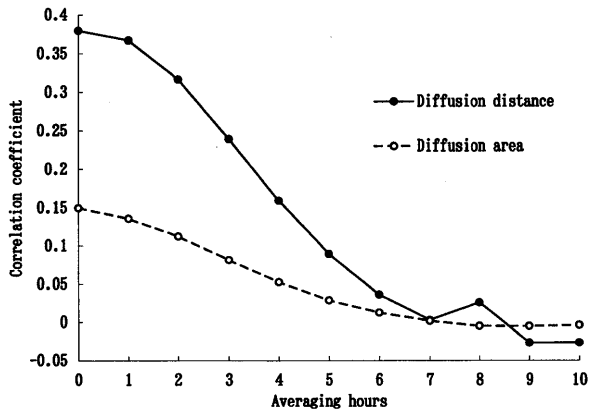


Fig. 7 Correlation coefficients between diffusion distance; diffusion area and the averaged tidal velocities. Abscissa denotes the hours, during which the tidal velocities are averaged. Correlation coefficients larger than 0.34 (0.44) are significant for 0.05 (0.01) level.

5) 拡散距離・面積に関する要因

小川から海へ流入した淡水が海水の中で拡散する過程は、河川の流量の他にその海域での潮流や密度流などの海水流動に支配されることは周知のことである。またその他に河口付近の海岸地形、河口の幅にも支配される。ここでは拡散距離・拡散面積に関する要因をあげる。

① 潮流速度：潮流の速さと拡散の大きさとの関係調べる。小川においては下げ潮時には河川水が沖に流されると考える。つまり拡散の大きさを大きくする正の要因である。上げ潮時には逆に押し戻され、海水が一部河川に入り込むために河川水は海岸域に閉じこめられてしまう。つまり拡散の距離を小さくする負の要因と考えられる。

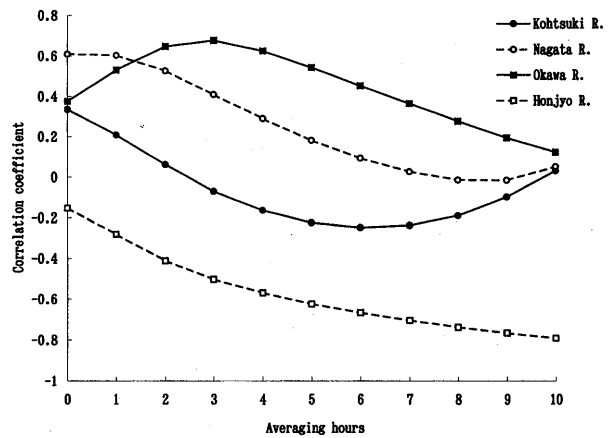


Fig. 8 Correlation coefficients between diffusion distance and the averaged tidal velocities for each river. Abscissa denotes the hours, during which the tidal velocities are averaged. In the case of Kohtsuki R. and Honjyo R., correlation coefficients larger than 0.72 (0.83) are significant for 0.05 (0.01) level. In the case of Nagata R. and Okawa R., the border value of the correlation coefficient is 0.67 (0.80) for 0.05 (0.01) significant level.

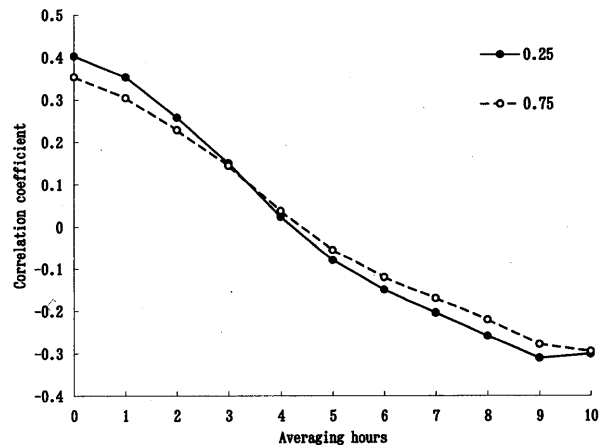


Fig. 9 Correlation coefficients between diffusion directions for $\tau = 0.25$; $\tau = 0.75$ and the averaged tidal directions. Abscissa denotes the hours, during which the tidal directions are averaged. Correlation coefficients larger than 0.34 (0.44) are significant for 0.05 (0.01) level.

② 環境海水と河川水の水温差：海水と河川水の水温差は拡散面積や拡散距離を大きくする正の要因と考えられる。

③ 河口域の風向・風速：河口域の風向・風速が拡散の方向・大きさに与える影響を調べる。風向・風速は甲突川・永田川については鹿児島地方気象台、雄川については田代と指宿の2点間で、本城川については鹿屋と鹿児島との2点間で線型内挿する。内挿された風向・風速を TM 画像が取られた時刻（午前10時）以前の

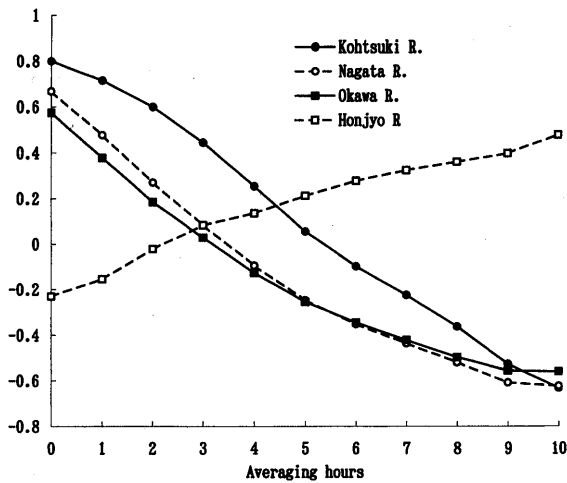


Fig.10 Correlation coefficients between diffusion directions for $\tau = 0.25$ and the averaged tidal directions for each river. Abscissa denotes the hours, during which the tidal directions are averaged. In the case of Kohtsuki R. and Honjyo R., correlation coefficients larger than 0.72 (0.83) are significant for 0.05 (0.01) level. In the case of Nagata R. and Okawa R., the border value of the correlation coefficient is 0.67 (0.80) for 0.05 (0.01) significant level.

n時間 ($n=1\sim 10$) について時間平均し, 拡散距離・面積, 拡散方向との相関関係を調べる。

- ④ 河川水の流入水量: 今回は Table 1 に示した1974年から1984年までの11年間の年平均流入水量¹⁾のみを考える。
- ⑤ 潮位: 小河川は潮位が高いと海水が河口域に入り込み河川水が海に流出するのを拒むため, 拡散の距離・面積を小さくする。逆に, 潮位が低くなると河川水が流出しやすくなり, 距離・面積が大きくなると考えられる。

6) 拡散方向に関する要因

- ① 潮流の方向: 鹿児島湾の中で最も潮流速度が大きい桜島水道のすぐ南に位置する甲突川・永田川を見ると, 満潮から干潮に向かう下げ潮時には河川水は潮流によって沖に流され, 沿岸沿いに南向きに細長く水平拡散している。干潮から満潮に向かう上げ潮の場合は, 逆に押し戻されて北向きに流れを変える。海水の一部は河川に入り込み, 淡水は海岸の狭い領域内に閉じこめられてしまう。長期的に考えると, 海に流入した淡水は潮流によって南北に移動しながら徐々に海水と同化し

Table 3 Annual mean volume flux, averaged diffusion distance, diffusion area and correlation coefficients. The mark, *, denotes the correlation coefficient that is significant for 0.05 level.

River	Number of data	Annual mean flux ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Diffusion distance (km)	Diffusion area (km^2)
Kohtsuki R.	8	3.18	1.33	0.65
Nagata R.	9	0.54	0.98	0.17
Okawa R.	9	7.58	2.42	3.96
Honjyo R.	8	1.94	1.15	1.06
Correlation coefficient			0.99*	0.92

Table 4 Correlation coefficients for diffusion distance. The marks, * and **, denote the correlation coefficients that are significant for 0.05 and 0.01 levels, respectively.

River	Number of data	$T_s - T_r$	Tidal velocity (ms^{-1})	Wind velocity (ms^{-1})	Tidal level (cm)
Kohtsuki R.	8	-0.07	0.33	-0.07	0.28
Nagata R.	9	0.73*	0.61	-0.30	0.13
Okawa R.	9	0.77*	0.67*	0.08	-0.43
Honjyo R.	8	0.43	-0.15	-0.06	0.15
Total	34	0.67**	0.38*	-0.33	0.15

Table 5 Correlation coefficients for diffusion area. The marks, * and **, denote the correlation coefficients that are significant for 0.05 and 0.01 levels, respectively.

River	Number of data	$T_s - T_r$	Tidal Velocity (ms^{-1})	Wind velocity (ms^{-1})	Tidal level (cm)
Kohtsuki R.	8	0.18	0.09	-0.05	0.63
Nagata R.	9	0.75*	0.28	-0.06	-0.11
Okawa R.	9	0.75*	0.38	0.18	-0.54
Honjyo R.	8	0.62	-0.08	-0.32	0.31
Total	34	0.64**	0.14	-0.37	-0.13

Table 6 Correlation coefficients for diffusion direction. The mark, *, denotes the correlation coefficients that are significant for 0.05 level.

River	Number of data	Tidal direction		Wind direction
		$\tau = 0.75$	$\tau = 0.25$	$\tau = 0.25$
Kohtsuki R.	8	0.60	0.80*	0.15
Nagata R.	9	0.51	0.67 *	0.23
Okawa R.	9	0.36	0.57	0.17
Honjyo R.	8	0.13	-0.23	0.41
Total	34	0.36*	0.40*	0.07

ていくと思われる。そこで、潮流の方向と河川水の拡散方向との関係を見るために潮流の方向を求める。潮流の方向を表すため、河口において海岸に平行に線を引き、その線の北方を0度、南方を180度とし、海に開けている半円について0~180度まで測ることにする。画像の取られた時刻における潮流の方向は、高潮時を0度、低潮時180度として潮時について線形内挿したものとする。

- ② 河口域の風向：前節5)の③により河口域の風向を求める。

結果および考察

1) 拡散距離・面積

Table 3に各河川の全資料の平均拡散距離と拡散面積及び年平均流入水量との相関係数を示す。Fig. 6はTable 3を図にしたものである。これより平均拡散距離と拡散面積は河川の年平均流入水量にほぼ比例していることがわかる。今回は各画像毎の拡散の距離・面積とその時の流入河川水量との関係は考察しなかった。安楽⁹⁾によると、降雨による河川水の増加は1~2日以内でおさまっており、Landsat 画像で河川水の拡散が解析できるのは晴天時に限られるので、河川水の拡散への降雨

の影響をみるのは難しい。また季節による流入水量の変化と河川水拡散との関係は考察する意味があるが、季節毎に分けて考えるには画像の数が不足している。

2) 拡散距離・面積と潮流速度との関係

潮流が画像の観測された以前のどのくらいの時間から拡散に影響を与えているかを調べるために、時間平均ごとの潮流速度と拡散距離・面積との相関係数を求めFig. 7に示す。潮流速度は1975~1976年に第十管区海上保安本部が行った観測から求められた潮流調和定数表⁹⁾より、各河川に近い地点の定数を採用して計算した。横軸は潮流速度を平均した時間であり、午前10時から10時間前までの平均まで求めた。縦軸は相関係数である。この図から、相関係数は画像の観測される午前10時がもっとも大きく平均時間が増加するとともに下降していることがわかる。t検定によると、拡散距離との相関係数は1時間平均(n=1)までの相関係数が有意であった。このことから、潮流は短期的な河川水の拡散に影響を及ぼしていることがわかり、長期的には潮流によって前後に移動して拡散しながら徐々に海水と同化していくと思われる。拡散面積との関係も拡散距離と同様な傾向を示しているが、潮流速度との相関は有為ではない。

各河川別に見た潮流速度と拡散距離との相関係数と、

潮流速度を平均した時間との関係の折れ線グラフを Fig.8 に示す。この図から、甲突川と永田川は画像の観測される午前10時が相関係数が最も大きいですが、雄川では3時間平均の潮流速度との相関係数が最も大きい。雄川のように流量が大きいと河川水の慣性も大きいため、河川水が潮流方向に流されるのに時間の遅れが生じたことも考えられる。本城川については拡散距離と潮流との相関は全く認められない。

3) 拡散方向と潮流方向との関係

画像の観測された時刻のどれくらい以前から潮流が河川水の拡散方向に影響を及ぼしているかを調べるために、拡散の方向と時間平均ごとの潮流の方向との相関係数を求めた。その相関係数と潮流の方向を平均した時間との関係を Fig. 9 に示す。 $\tau=0.75$ と $\tau=0.25$ のどちらも平均時間0の相関が最も大きく、平均時間が増すとともに下降していることがわかる。t検定では $\tau=0.25$ が平均時間1時間まで有意であったので、画像の観測される1時間前から潮流は拡散方向に影響を与えていると思われる。 $\tau=0.75$ と $\tau=0.25$ を比べると、 $\tau=0.25$ (遠距離拡散の方向)の方が潮流との関係は大きい。各河川別に調べた図を $\tau=0.25$ の場合について Fig. 10 に示す。平均時間0の相関係数は甲突川、永田川、雄川でそれぞれ0.8, 0.67, 0.57であり、潮流速度の大きい湾口部付近に位置する雄川や桜島水道の南側に位置する甲突川・永田川は潮流の影響を受けやすいことがわかる。本城川では平均時間0の相関係数は-0.23で潮流との関係は認められなかった。本城川は潮流速度が平均 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ と小さく、この海域では潮流よりも風や表層平均流を考慮する必要があると思われる。

4) 他の要因との相関関係

河川別及び全河川の拡散距離(面積)と $T_s - T_r$ 、潮流速度、風速、その日の潮位の振幅及び潮位との相関係数を Table 4 (Table 5) にまとめた。全河川については $T_s - T_r$ と拡散距離・面積との相関係数が大きく、拡散距離と潮流速度との相関も有為であった。甲突川については、潮流速度や $T_s - T_r$ よりも潮位の方が拡散面積に大きく影響していることがわかる。雄川と永田川については $T_s - T_r$ と潮流速度の影響が大きく、本城川では $T_s - T_r$ 以外の影響は小さい。風速についてはほとんど相関関係は認められなかったが、陸上での観測値から海上風を推定するには無理があるのかもしれない。河川別の拡散方向と潮流の方向及び風向との相関係数を Table 6 にまとめた。本城川を除いて拡散方向、特に遠距離拡

散のそれは潮流の方向に影響を受けていることがわかる。風向は本城川の拡散方向に影響している可能性が示唆されている。

ま と め

1) 拡散距離・面積について

- ① 河川の平均拡散距離・面積は各河川の年平均流量にほぼ比例していた。平均拡散距離は環境海水と河川水の水温差($T_s - T_r$)と非常に有為な相関を示し、潮流速度とも有為な相関があったが、平均拡散面積は $T_s - T_r$ とのみ有為な相関が認められた。
- ② 甲突川・永田川は流入水量が小さく、桜島水道による潮流の影響を大きく受ける強混合型の河川であり、下げ潮時には河川水は海岸に沿って南方向に流される。上げ潮時には海水と河川水の同化が速やかで拡散の距離は小さくなる。しかし統計的にみると、永田川の拡散距離・面積と $T_s - T_r$ との相関が有為であった以外は拡散距離・面積を支配する要因は特定できなかった。
- ③ 雄川は湾口部の潮流の影響を受けているが、比較的流入水量が大きいため拡散は半円形型をなし、その半円の先端部より徐々に海域へ拡散する。拡散距離には $T_s - T_r$ と潮流速度が、拡散面積には $T_s - T_r$ が有為に影響していることが示された。拡散の距離は、流量から考えると1.5km~2.5kmで終了すると思われるが、4 km程度にも及ぶ拡散が9個のデータの内3個存在した。
- ④ 本城川の拡散距離・面積を支配する要因は特定できなかった。

2) 拡散方向

- ① 全河川のデータを考えると、 $\tau=0.75$ (河口域)と $\tau=0.25$ (遠距離)の拡散方向はいずれも潮流方向と有為な相関を示したが、 $\tau=0.25$ の場合のほうが潮流の影響が大きい。 $\tau=0.25$ の場合には画像が観測される1時間前からの潮流方向と拡散方向との相関も有為であった。
- ② 河川別にみると、甲突川・永田川の $\tau=0.25$ (遠距離)の拡散方向の場合以外は潮流方向との相関は有為ではなかった。特に本城川の場合は拡散の様子が複雑なものが多かった。風、潮汐、恒流、成層混合状態などが複雑に影響していると思われる。
- ③ 風向については拡散方向との有為な関係は得られなかった。

謝 辞

Landsat 衛星のデータは米国政府が所有し, 宇宙開発事業団によって提供されたものを利用した。また, Landsat 画像は鹿児島リモートセンシング研究会の会員が所蔵するものを使用させていただいた。ここに感謝し御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 鹿児島県 (1986): 第2期鹿児島湾水質環境管理計画 (新・鹿児島湾ブルー計画)
- 2) 鎌田政明, 大西富雄, 米原範伸, 坂元隼雄, 河嶋拓治 (1974): 鹿児島湾への汚染物質の供給および湾内海水の現況水質について。鹿児島湾水域環境調査報告書, 85-135.
- 3) 鎌田政明 (1973): 錦江湾 (鹿児島湾) に流入する河川経由の物質移動量 (その1)。鹿児島大学理学部紀要, 6, 21-28.
- 4) 坂元隼雄, 鎌田政明 (1975): 錦江湾 (鹿児島湾) に流入する河川経由の物質移動量 (その2)。鹿児島大学理学部紀要, 8, 99-109.
- 5) 高橋淳雄 (1974): 海へ流入直後の小河川水の分散について。沿岸海洋研究ノート, 12, 12-18.
- 6) 柳哲雄 (1994): 改訂 海の科学—海洋学入門。恒星社厚生閣, 101-103.
- 7) 藤野詠光 (1997): 衛星データ解析ソフトの開発と有明海・八代海の時況。鹿児島大学水産学部 海洋環境計測講座 修士論文
- 8) 安楽 康一 (1996): 天降川河川水の拡散。鹿児島大学 水産学部 海洋環境計測講座 修士論文。
- 9) 第十管区海上保安本部 (1977): 鹿児島湾の潮流, 1-8.