

自然界の流れへの coherent 構造モデルの適用と 可視化手法としてのリモートセンシング

Remote-Sensing as a Onsite Flow Visualization Technology for Coherent Structure in the Natural Flow Field

東京理科大学理工学部土木工学科 正員 ○ 西 村 司

“ “ 大 西 外 明

リモートセンシング技術センター “ 田 中 総太郎

1. 自然界の流れへのリモートセンシングの導入

実際の流れと密接な関係を有する乱流境界層の問題に関しては、従来主として確率統計論的立場から既に多くの理論的実験的研究がなされている。しかしながら、自然界の流れ、特に近年人間活動の影響範囲にはいりつつある海洋や大気などのスケールの大きい乱流境界層を想定すれば、現象自身の持つ非等方・非均質という特性および極めて大きい空間スケールに起因する現地観測の困難性という2つの側面からの制約のために、それへの確率統計論的取り扱いの適用は自ずから限界が生じ、従って解析例も又極めて少ない。

一方、1970年代にはいり、coherent構造モデルという現象の実態により即したモデルが提案されている。例えば、winnant¹⁾(1974)は室内実験により2次元自由乱流境界層を観察し、それが渦度を殆んど有しないポテンシャル流れの部分とその中に離散して存在する局所的に渦度の集積した部分との2つによって構成される構造—coherent構造をなしていること、およびこのcoherent構造を構成する渦度の集積した部分—coherent渦—の決定論的振る舞いが乱流境界層の種々の性質を支配していることを明らかにした。このcoherent構造の研究は、現時点においては未だ細部にわたる理論展開がなされておらず、主として室内実験によって進められつつある段階であるが、確率統計論的アプローチと比較した場合、このモデルの実際問題への適用の妙味は室内実験スケールの現象よりもむしろ自然界スケールの乱流境界層への適用においてこそ見出されるべきものであろう。

さて、実際の流れにcoherent構造モデルを適用してゆく上で極めて大きい役割を果たす観測手法は、流れの可視化手法および時系列データの条件付きサンプリング・位相平均操作の2つである。そのうち、特に自然界スケールの流れへの適用に際しては、その大きい空間・時間スケールに応じた可視化手法を見出す必要があるが、これは従来の地上あるいは海上からの現地観測体制のみに頼る限り不可能である。この点に関し、本論文においては、そのもたらす情報の同時性・広域性の飛躍的大きいリモートセンシングを導入することによってこの問題を解決する可能性を得た事例を報告することとしたい。

2 coherent構造モデル適用性の指標 — coherent 渦の強さ —

Davies²⁾(1975)によれば、coherent構造は壁面境界層におけるよりも自由境界層においての方がより明瞭に形成される。自由境界層へのcoherent構造モデルの適用を模式的に示せば、図-1のようになる。即ち、境界層を挟む2つの主流流速 V_1 、 V_2 の間の速度のギャップは境界層内部のcoherent構造によって埋められている。coherent構造を構成する個々のcoherent渦は、境界層剥離点Pから流れの中に放出された渦度が集積して生じたもので、互いにamalgamation過程を繰り返すことによって徐々にスケールの大きい渦へと生長してゆく。従って、実際の自由境界層に対してcoherent構造モデルを適用できるか否かの1つの指標としては、P点から流れの中に放出される渦度のうちの何割がcoherent渦の中に集中して渦の強さのみなもととなっているかということによって表現されるであろう。この“coherent渦の強さ”は、そのまわりの循環 Γ によって定義される。即ち、

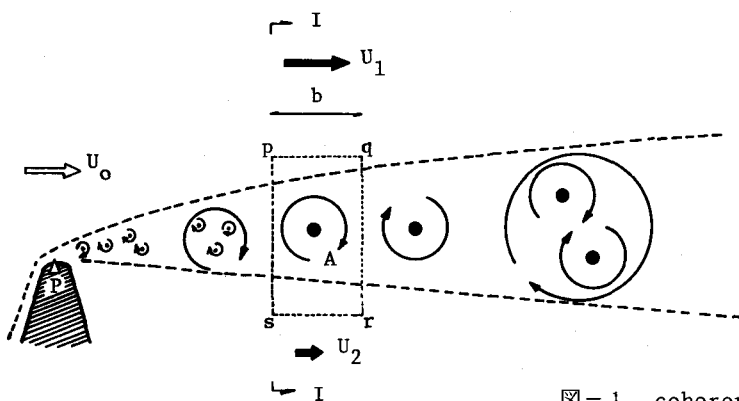


図-1 coherent 構造モデル

$$\Gamma = \oint \vec{u} \cdot d\vec{\ell} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、閉曲線 ℓ はその渦のみを囲む閉曲線である。今、図-1の渦④に着目すれば、その強さ Γ は次の2つの方法によって評価できる。1つは定義式(1)そのものより求める方法であって、

$$\Gamma = \oint \vec{u} \cdot d\vec{\ell} = \oint \vec{u} \cdot d\vec{\ell} = (V_1 - V_2) \cdot b \quad \dots\dots\dots (2)$$

$p \rightarrow q \rightarrow r \rightarrow s \rightarrow p$

ここに、 b は渦④近傍領域における渦同士の間隔である。あと1つの考え方は、流れ方向に垂直な検査面 I を設け、その面を通過して coherent 渦によって運ばれる単位時間あたりの循環 flux が境界層剥離点 P から流れの中に単位時間に供給される循環の総和に等しいとするものである。例えば、日野³⁾(2974)を参考にすれば、検査面 I を通過する単位時間あたりの循環 flux は、

$$\Gamma_{flux} = \int_s^P \frac{du}{dy} \cdot u \, dy = \frac{1}{2} u^2 \Big|_s^P = \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

によって与えられる。これは又、 P 点より放出される循環 flux Γ_{off} に等しいものとする。

即ち、

$$\Gamma_{flux} = \Gamma_{off} = \frac{1}{2} V_0^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

今、渦④の流下速度を C とすれば、検査面 I を時間間隔

$$\tau = b/C \quad \dots\dots\dots (5)$$

ごとに1個の coherent 渦が通過し、それに伴って式(3)あるいは(4)に相当する循環 flux が生ずる。従って、coherent 渦④の強さは、

$$\Gamma = \Gamma_{flux} \cdot \tau = \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \cdot \frac{b}{C} = \frac{1}{2} V_0^2 \cdot \frac{b}{C} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(2)および(6)によって求めた Γ が等しいものとするれば、

$$C = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

即ち, coherent 渦は自由境界層を挟む両側の主流流速の平均の流下速度を持つという結果を得る。これは, “ 2つの剛体の間に挟んだローラーがこれらの剛体の速度の平均値の速度で移動する ” という事実に対応する。

3. Cheju 島後流内の coherent 構造

Cheju 島は, 図-2 に示す様に朝鮮半島の南方約 100 km の海上に位置する円錐状の島であって, 冬期, 中国大陸からの季節風を受ける際に大気中の後流内に Karman 渦列を形成する。たまたま上空に雲がある場合には雲をトレーサーとして渦列が可視化され, 人工衛星からのリモートセンシング画像として観測することができる。例えば, 写真-1 は 1979 年 2 月 2 日 Cheju 島上空 920 km の Landsat から得られた MSS-5 バンドの画像であって, 右下方に Cheju 島後流内の Karman 渦列を観察することができる。

土屋⁴⁾(1974)は, 2つの異なる気象衛星によって得られた, データ収集時刻の数時間ずれた 1 組の画像を解析し, 表-1 (a) に示す結果を得ている。ここに,

- a : 渦列 l_1 と l_2 との間の距離
- b : 渦の流下方向の間隔
- C : 渦の流下速度
- V_0 : Cheju 島での風速

であり, 又, 渦の強さ Γ は Karman 渦列の流下速度を求める式

$$V_0 - C = \frac{\Gamma}{2b \tanh\left(\frac{\pi b}{a}\right)} \dots\dots\dots (8)$$

から逆算したものである。

さて, Cheju 島背部の渦列を 1 つの特殊な coherent 構造として把握することも又可能である。即ち, Cheju 島の東端 P_1 および西端 P_2 の 2 つの剥離点から延びる自由境界層 l_1, l_2 の内部に, 各々, 右旋・左旋する coherent 渦の列が存在し, これら 2 つの渦列が非対称 Karman 渦列の形成条件をたまたま満たしているものと考える。更に, Cheju 島の背部は流速が零であると仮定して渦の強さの算定式(2), (6)を適用すると表-1 (b)を得る。循環 flux の保存則から求めた式(6)は Karman 渦列の流下速度の式(8)より逆算した値と充分良く一致する

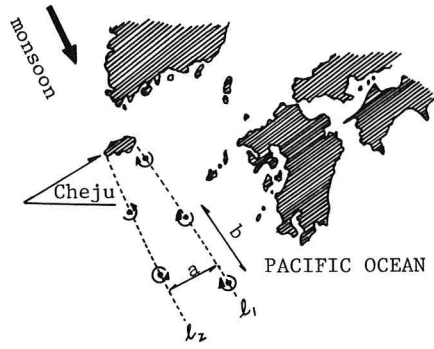


図-2 cheju 島背部の Karman 渦

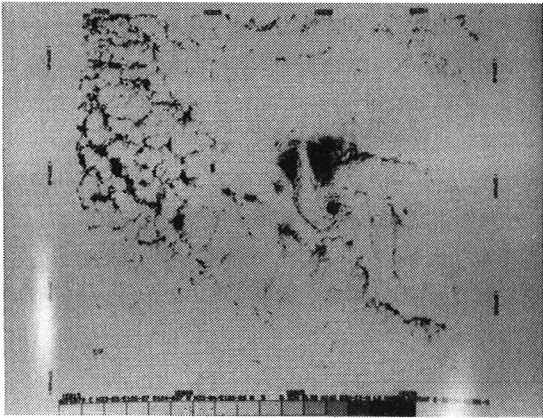


写真-1 Landsat MSS-5 画像

表-1. Cheju 島背部の渦の強さ

(a) Γ_1 : 式(8)より (土屋⁴⁾による。)

Date	1969 Mar.05	1969 Mar.17	1969 Mar.22	1971 Jan.14	1971 Mar.13
a km	36.8	44.0	61.3	48.8	35.4
b km	110.8	71.0	86.1	121.8	76.2
C m/sec	7.0	6.5	7.2	6.0	6.9
V m/sec	9.2	10.5	12.0	8.3	10.5
Γ_1 $10^5 m^2/sec$	6.3	5.9	8.4	6.6	6.1

(b) Γ_2 : 式(6)より, Γ_3 : 式(2)より

Γ_2 $10^5 m^2/sec$	6.7	6.0	8.6	7.0	6.1
Γ_3 $10^5 m^2/sec$	10.2	7.5	10.3	10.1	8 0

値を与える。一方渦の強さの定義より直接得られる式(2)は若干大きめの値を与えており、これは境界層を挟む主流流速の差を大きめに見積り過ぎている事を示している。一般にこの様にスケールの大きい渦列を時間差を持つ1組のリモートセンシング画像によって観測する場合、主流流速の場所的分布そのものを測定することは、適当なトレーサーが無いこと、例えあったとしても2つの画像の間で同じ流体粒子であることをパターン認識するための不規則モザイクが形成される場合はまれであることから式(2)の直接の適用は困難である。一方、これに対して、“同一の渦”であるというパターンの認識は容易であるから、渦の配列あるいは流下速度の判読は比較的容易である。

又、循環 flux の保存則から求めた Γ と、Karman 渦列の流下速度から求めた Γ とが極めて良く一致したという事は、Cheju 島における境界層剥離点から放出される渦度が殆んど100% coherent 渦の中に集中している事を示している。この事実は又、Cheju 島上の気流という Reynolds 数が約 $10^9 \sim 10^{10}$ という様な大スケールの自然界の自由乱流境界層に対しても又、Reynolds 数約 $10^4 \sim 10^5$ 程度の実験室スケールの境界層に対してと同様、coherent 構造モデルの適用が可能な事を示している。

4. 鳴門海峡における coherent 構造

鳴門海峡は、徳島県大毛島と兵庫県淡路島とを結ぶ海峡であって、急潮流とそれに伴う“鳴門の渦”によって周知されている。筆者らは、この鳴門の渦を海峡最狭部の陸岸突出点から剥離される自由境界層中の coherent 構造として認識し、1977 年以降、航空機および Landsat を用いたリモートセンシングを実施しつつある。^{5)~7)} その結果、図-3 に模式的に示す様に、海峡水域に、大小2種の coherent 構造が見出されている。⁵⁾

4.1 小スケールの coherent 構造

小スケールの coherent 構造は、境界層剥離点より下流数百メートルの範囲に顕在するもので、航空機からのリモートセンシングによってその詳細を観測する

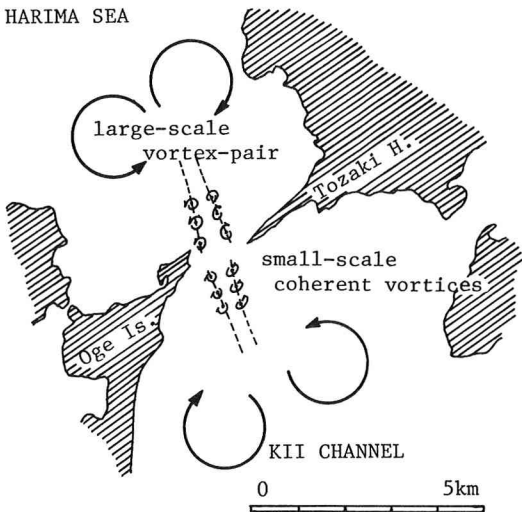


図-3 鳴門海峡における2種の coherent 構造

写真-2
小スケールの
coherent 構造
(1,200m からの
航空写真)

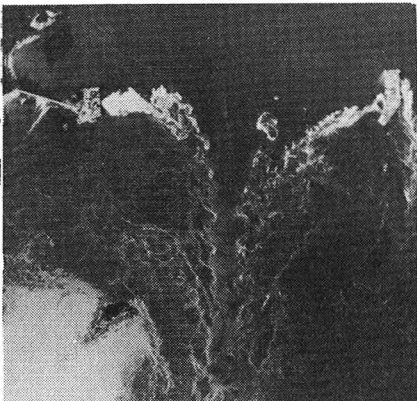


写真-3
amalgamation
過程
(300m からの
航空写真)



ことができる。写真-2は、高度1,200mから得られた航空写真であって、海峡中央部に播磨灘から紀伊水道に向かう約9ノットの潮流があり、陸岸突出部背後のよどみ域との境界即ち、自由境界層の中に coherent 構造が卓越している状況を示している。この coherent 構造を構成する個々の渦がいわゆる“鳴門の渦”であって、大潮時には直径約20m、渦中央部の海面の凹みは約1.5mにも及ぶ。写真-3は高度300mから得られた航空写真であって、図-1に示した様な coherent 渦同士の amalgamation 過程が鳴門海峡において実際に進行しつつある状況を示している。

この様な coherent 構造の運動の時間変化を把握する事を目的として、高度1,200mの航空機より撮影時間間隔3秒の一連の連続航空写真撮影が実施された。図-4はその標定図である。得られた一連の航空写真の密着ポジプリントをもとに渦の流下方向間隔 b 、流下速度 C を読みとり、更に、潮流表から求めた海峡中央部潮流流速を境界層剥離点における主流流速 V_0 とみなした。これらの値をもとに循環 flux の保存則にもとづく式(6)より渦の強さを求めた。表-2に得られた結果を示す。大潮時には $150 \sim 300 m^2/sec$ の強さに達するものと判断される。

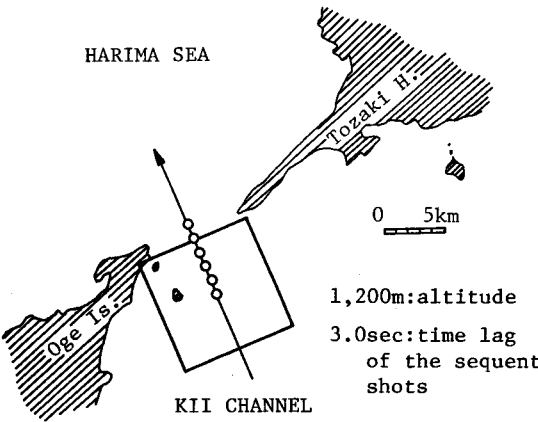


図-4 連続航空写真撮影標定図

表-2 鳴門の渦の強さ

Photo No.	Vortex No.	V m/sec	X m	b m	C m/sec	τ sec	Γ m ² /sec
11-Mar-1977	1	3.3	80	35	3.1	11	60
	2	-	120	35	2.0	18	100
	3	-	150	38	4.1	9	50
	4	-	190	54	5.4	10	50
	5	-	260	68	5.6	12	70
	6	-	330	68	5.3	13	70
	7	-	390	51	3.8	14	70
	8	-	430	35	5.6	6	30
	1'	-	180	50	3.3	15	80
	2'	-	230	36	4.4	8	50
No. 215	3'	-	250	43	3.8	11	60
	4'	-	310	78	3.1	25	130
	5'	-	400	93	5.6	16	90
01-Apr-1977	1	3.7	100	18	2.0	8	60
	2	-	120	28	3.1	9	60
	3	-	160	63	4.2	15	100
	4	-	240	90	3.8	24	160
	5	-	340	96	4.6	36	240
	6	-	440	163	4.0	41	280
	7	-	660	225	4.2	54	370
	1'	-	170	73	3.5	21	140
	2'	-	240	74	2.9	25	170
	3'	-	320	66	2.1	32	220
No. 004	4'	-	380	86	3.3	26	180
	5'	-	490	129	4.6	28	190
	6'	-	630	143	4.2	34	230
01-Apr-1977	1	3.7	50	38	4.4	8	60
	2	-	90	48	6.3	8	50
	3	-	150	49	6.3	8	50
	4	-	190	41	7.9	5	40
	5	-	230	61	6.5	9	60
	6	-	310	84	7.3	12	80
	7	-	400	69	6.3	11	80
	8	-	450	50	7.4	7	50
	1'	-	200	25	3.8	7	50
	2'	-	230	36	3.6	10	70
No. 024	3'	-	270	70	4.5	17	120
	4'	-	380	129	5.0	26	180
	5'	-	530	155	5.0	31	210
02-Jul-1977	1	4.1	100	50	8.8	6	50
	2	-	150	44	4.5	10	80
	3	-	190	65	6.3	10	90
	4	-	280	62	6.8	9	80
	5	-	310	48	6.3	8	60
	6	-	380	90	7.0	13	110
	7	-	490	116	10.0	12	110
	1'	-	260	144	7.5	19	160
	2'	-	400	126	7.8	16	140
	3'	-	510	108	8.8	12	100
No. 001							
No. 002							
02-Jul-1977	1	4.1	150	80	3.9	21	170
	2	-	230	74	4.0	19	160
	3	-	300	66	3.5	19	160
	4	-	360	80	3.3	24	200
	5	-	460	96	4.5	21	180
No. 027							
No. 029							
No. 031							
08-Mar-1977	1	4.4	100	58	2.5	23	220
	2	-	160	59	3.4	17	170
	3	-	220	64	2.8	23	220
	4	-	290	73	2.5	29	280
	5	-	360	114	4.1	28	270
	6	-	510	150	3.8	40	390
	1'	-	160	58	2.9	20	190
	2'	-	220	76	2.8	27	260
	3'	-	310	70	3.0	23	230
	4'	-	360	84	2.7	31	300
No. 028	5'	-	480	123	3.0	41	390
24-Feb-1978	1	4.55	120	44	2.8	16	160
	2	-	160	52	4.2	12	130
	3	-	220	86	4.7	18	190
	4	-	340	82	3.3	25	260
	5	-	390	66	3.5	19	190
	6	-	470	100	4.0	25	260
	7	-	590	120	3.7	32	330
	1'	-	280	56	4.0	14	140
	2'	-	340	50	3.2	16	160
	3'	-	380	48	2.8	17	180
No. 063	4'	-	430	76	3.4	23	230
	5'	-	530	100	5.3	19	200
No. 065							
No. 067							

(U : 潮流流速 X : 渦発生点からの流下距離
b : 渦間隔 C : 渦の移動速度 τ : 渦発生周期)

さて、“鳴門の渦”が coherent 渦であるならば、これは、海面に渦軸の1端、海底に他の1端を有する様な1本の line-vortex であると考えることができる。今、この line-vortex に Rankine 渦モデルを適用すれば、渦の強さ Γ は渦の部分における海面の凹みより次式によって求められる。

$$\Gamma = 2\pi R \sqrt{g \cdot \Delta h} \dots\dots\dots (9)$$

即ちここに、 Δh は渦中央部の海面の凹み、 R は渦の半径であって $\Delta h/2$ の海面凹みのなす等高線の半径である。先に示した大潮時における値 $R=10\text{ m}$ 、 $\Delta h=1.5\text{ m}$ を代入すれば、

$$\Gamma = 240\text{ m}^2/\text{sec} \dots\dots\dots (10)$$

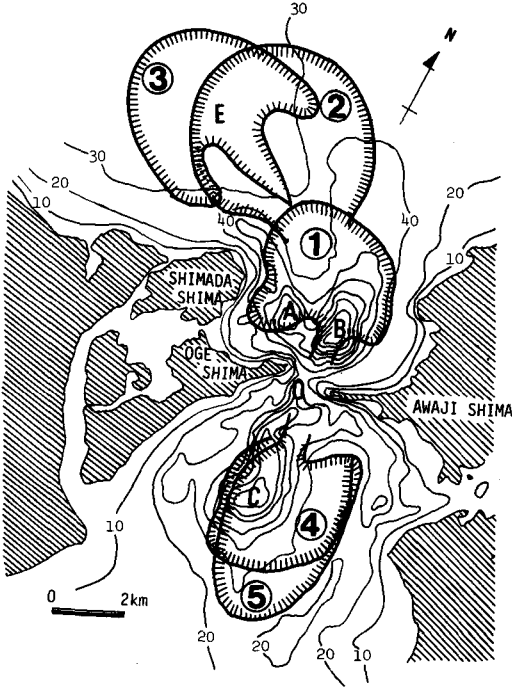
を得る。この値と、循環 flux の保存則より求めた値 $150\sim 300\text{ m}^2/\text{sec}$ とを比較することにより、“鳴門の渦”が境界層剥離点から放出される渦度の大部分を含む coherent 渦であり、しかも渦軸の1端を海面、他の1端を海底に接する様な1本の line-vortex であることの裏付けを得ることができる。

通常、coherent 構造モデルの適用に際しては、coherent 構造を2次元的な line-vortex の集合としてモデル化した上で渦同士の amalgamation 過程をもとに周囲流体の境界層内への混入機構を議論する。これに対して鳴門の渦の様な海峡水域に形成される coherent 渦は渦軸が海底あるいは海面に接するという特徴を持つために渦軸方向に海底摩擦にもとづく湧昇流を生じて強い海水鉛直混合をもたらす等の水理的効果を海峡水域に与えている⁶⁾。

4.2 大スケールの coherent 構造

大スケールの coherent 構造は、1日に4回生ずる潮流の反転に伴って形成されるもので、海峡をとおしての海水交換に大きい役割を果たしている。⁵⁾ この大スケール渦のリモートセンシングが Landsat および高々度 (3,000~4,000 m) の航空機を用いて実施された。

リモートセンシングデータ収集作業実施面からの制約より、得られたデータは日付けおよび潮流条件の異



(a) リモートセンシングにより得られた大スケール渦の位置形状

(b) リモートセンシングデータ諸元と潮流曲線上の位相

Imagery	Spectral-Band	Altitude	Data Acquisition Time	Phase of the Tidal Current at Data Acquisition Time
①	Landsat MSS 5	950 km	9:48 A.M. Aug. 1st, 1976	
②	Landsat MSS 5	950 km	10:06 A.M. Oct. 24th, 1972	
③	Landsat MSS 5	950 km	9:57 A.M. Dec. 30th, 1975	
④	thermal	4 km	11:00 A.M. Aug. 23th, 1979	
⑤	thermal	4 km	12:00 A.M. Aug. 23th, 1979	

図-5. 潮流反転時を引きがねとする大スケール coherent 渦の位相平均

なるものであり、これより一連の潮流情況の長時間にわたる連続観測を行なうことは不可能であった。そこで、各リモートセンシングデータを海峡中央部における潮流反転時を“引きがね”として“位相平均”することによって大スケール渦の振る舞いを把握した。図-5にその結果を示す。(a) はリモートセンシング画像から得られた大スケール渦の位置・形状を鳴門海峡海底地形図の上に描いたものであり、(b) は画像の諸元および画像収集時刻がサインカーブに類似した海峡中央部潮流流速曲線のどの位相に対応するかを示している。画像 ①, ②, ③ は、北向き潮流によって播磨灘水域に大スケール渦が形成され、次の南向き潮流の間においてもなお当水域に居残っている状況を示しており、④, ⑤は南向き潮流によって紀伊水道水域に大スケール渦が形成されつつある状況を示している。この様な Landsat 情報の“位相平均操作”によって海峡水域のスケールの大きい潮流現象あるいは海峡をとおしての tidal-exchange の実態を把握する作業が明石海峡あるいは友ヶ島水道に対してもなされている。⁷⁾

5. 複数水路からなる海峡における coherent 構造

鳴門海峡に限らず一般に瀬戸内海における海峡は、激しい狭窄部であると同時に急潮流が日に2往復するという特徴を備えているために、平穏な内海水理環境に対して大きい影響を与えている。海峡には鳴門海峡、明石海峡などの単一水路から構成されるものの他に、例えば図-6に示す今治・尾道を結ぶ海峡群あるいは高松・宇野を結ぶ備讃瀬戸などの複数水路によって構成されるものがある。

筆者らは1980年度よりこのような複数水路から構成される海峡の水理構造に興味を持ち、リモートセンシングを導入した現地観測を進めつつある。写真-4は国土地理院による航空写真であって、画像の範囲は図-6に示すとおりである。水道を構成する両側の陸岸の

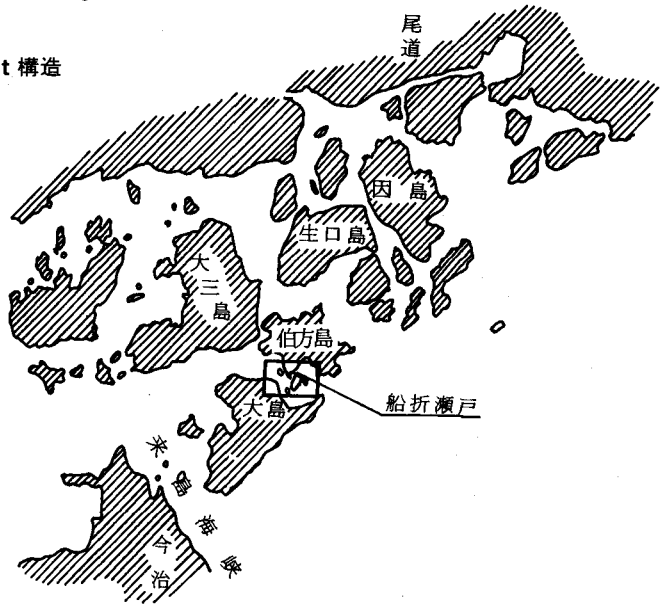


図-6 複数水路からなる海峡

突出部のいたるところから境界層が剥離して自由乱流境界層を形成し、内部に coherent 構造が存在している状況を判読する事ができる。1980年8月1日より4日にかけて実施した舟折瀬戸における現地観測によれば、8ノットの潮流における coherent 渦の発生周期は約5秒であり、従って式(6)よりその強さは約 $40 m^2/sec$ であることがわかった。類似の水理条件はこの水道群によく観察されるものであり、複数水路という地理的条件と相まって、かつてこの水域に水上水軍の活躍をもたらしている。

一方、大スケールの coherent 構造は Landsat 画像によって把握することができる。写真-5は1980年2月29日10時1分に撮像された Landsat MSS データをデジタル画像解析装置 Image-100 によって処理して得たものである。当日の潮流情況は8時00分頃東向きの潮流が最大であって、11時10分頃反転している。例えば来島海峡においては、7時59分に南流6.6ノットであって11時20分に反転している。従って、Landsat 画像収集時刻における潮流は約5時間にわたって続いた東向きの潮流が次第に弱まりあと1時間もたば反転するという状況にある。これに伴ない、海峡を構成する個々の水道がその流下方向に日スケールの coherent 構造を形成している様子が Landsat 画像によって判読される。この種の Landsat 画像を多数、収集・解析し、先に述べた潮流反転時を引きがねとする位相平均操作を施すことによって、複数水路からなる海峡をとおして灘水域間の海水交流・交換過程のメカニズムを明らかにしてゆこうとする試みが

現在なされている。

(あとがき) : 海洋における coherent 構造には以上挙げた潮流と陸岸との間のシアーに起因するものの他に, 海流と陸岸との間のシアーによって形成されるものの存在が期待され, 事実, Landsat 画像あるいは Noaa 画像の解析を行なった結果, 現在までに紀州沖, 東海沖, 銚子沖に数十 km スケールの渦を判読している。この種の問題は別の機会に取り扱うこととしたい。なお, 本研究は文部省科研費奨励研究を受けた。又, Landsat データの一部は宇宙開発事業団の提供を受けた。

(参 考 文 献)

- 1) Winnant, C.D. and Browand, F.K.: Vortex pairing, the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number, J.F.M., vol. 63, part 2, pp.237-255, 1979
- 2) Davies, P.O.A.L. and Yule, A.J.: Coherent structures in turbulence, J.F.M., vol. 69, part 3, pp.513-537, 1975
- 3) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, p 72, 1974
- 4) Tsuchiya, K.: Cloud features association with mesoscale phenomena during cold season as revealed by meteorological satellite pictures, The Geophysical Magazine, vol. 37, No.1, pp.49-94, 1974
- 5) 大西外明, 田中総太郎, 西村司: Landsat リモートセンシングを導入した海峡部海水交換現象の研究, 土木学会論文報告集, 第 298 号, pp.63-75, 1980
- 6) 大西外明, 西村司: 渦水域における上昇流の観測とその発生機構に関する考察, 第23回水理講演会論文集, pp.123-130, 1979
- 7) 大西外明, 西村司: 決定論的立場からの海峡部 tidal-exchange の観測とその制御策の検討, 第24回水理講演会論文集, pp.221-228, 1980

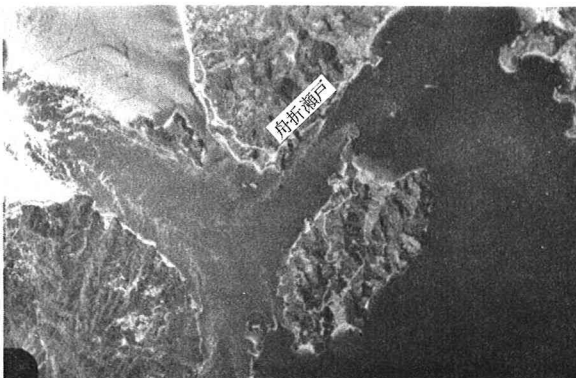


写真-4 複数水路からなる海峡における
小スケールの coherent 構造



写真-5 複数水路からなる海峡における
大スケールの coherent 構造