

2008.03.26.

寄り回り波

富山商船高等専門学校
河合雅司

1. 寄り回り波の定義

富山湾沿岸に災害を及ぼす恐れのあるうねり性の大波

☆発生時期 12月～4月

有義周期：10～12秒程度、有義波高：3～5m程度（資料2参照）

（「寄り回り波と海難」、吉田・石森・加藤（河合）、日本航海学会誌航海第87号、1986年）

波の周期・波高については、田中海岸沖水深15mの地点に設置された超音波式波高計による観測値に基づいている。

波高計の設置場所（設置水深）により有義波高等の値は相当変化するので注意が必要である。

☆資料1（必読 北陸の海難に学ぶ）の寄り回り波発生一覧（1885年～1996年）により、寄り回り波が発生した日の波浪観測データを集めて、寄り回り波を定量的に定義する必要がある。又、1997年以降については、波浪観測データから、有義周期10秒以上、有義波高3m以上になった日を調べて、その日の気象データや新聞記事から寄り回り波であるかどうかや被災状況について調査する必要がある。

2. 寄り回り波のメカニズム

一般に、北海道西側海域で発生したうねりが、2方向（約10°と約40°）から富山湾に侵入していると思われる。又、約40°方向からのうねりの方が約10°方向からのうねりよりも波長が長い。

< 38°方向からのうねり:267m, 15°方向からのうねり:229m（資料3参照）>

富山湾から40°の方向へ真っ直ぐ進むと秋田湾に行き着き、40°方向からのうねりは秋田湾からきているということになってしまうが、秋田湾から大きなうねりがくることはあり得ないので、北海道西側海域で発生したうねりは、対馬暖流を横断するとき右へ屈折（カーブ）して富山湾に侵入してくると考える必要がある。

北海道から富山湾までのうねり性波浪伝搬経路を図1に示す。

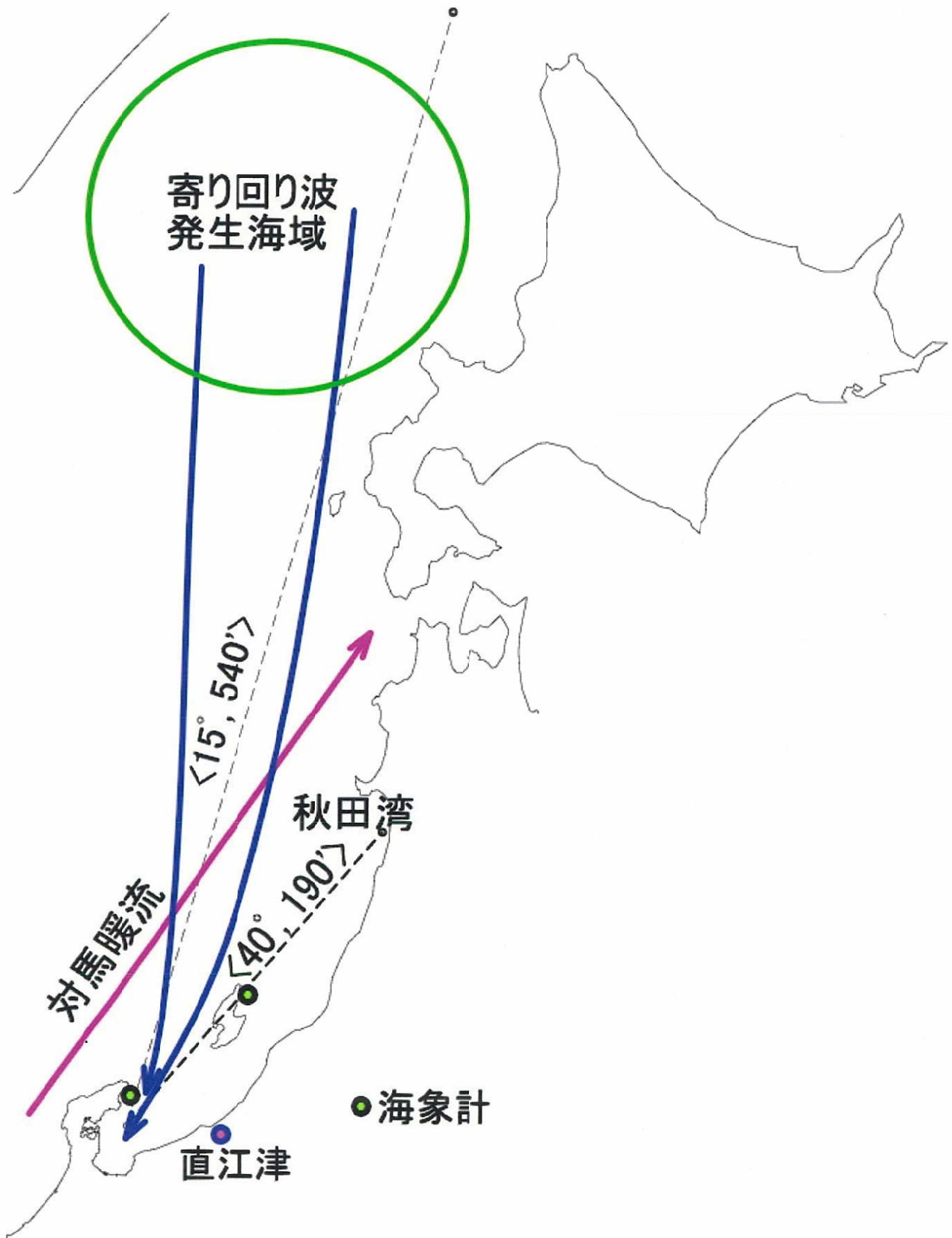


図1 北海道から富山湾までのうねり性波浪伝搬経路

3. 寄り回り波の予報

能登半島先端や佐渡島に波浪計を設置し、波浪の観測態勢を強化し、潮位計データや波浪の数値予報データ等を用いて総合的に判断することにより、寄り回り波の富山湾への来襲を数時間前に予知することは可能である。

富山商船高等専門学校臨海実習場に設置された潮位計に寄り回り波の前兆現象が記録されているので紹介する。図2～図4は、2008年2月23日から24日にかけての富山新港内の臨海実習場における潮位データである。

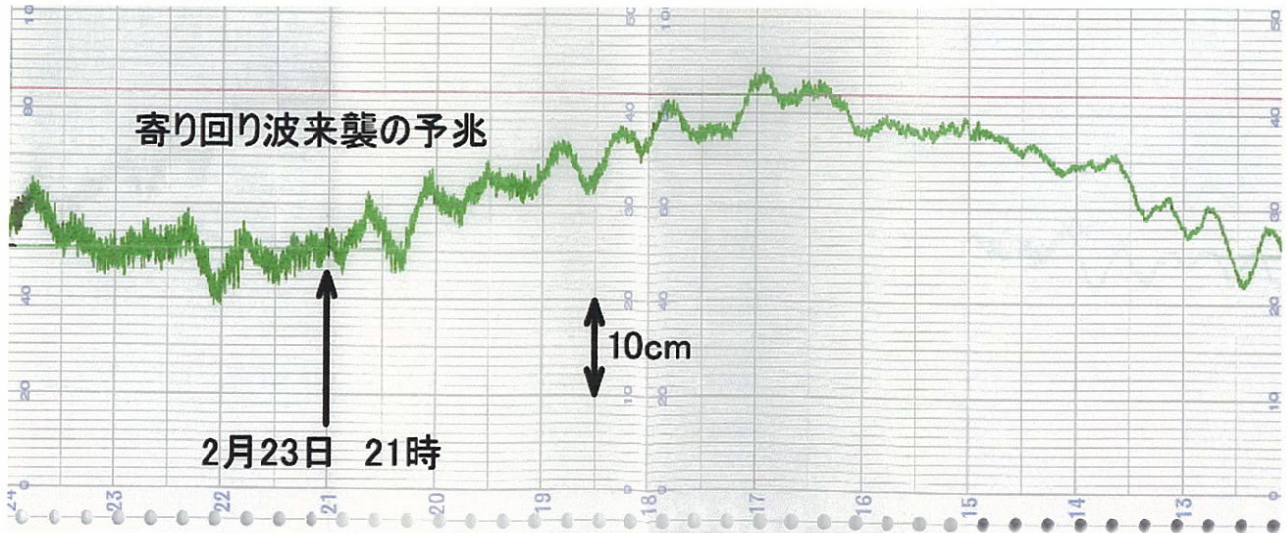


図2 富山商船高等専門学校臨海実習場の潮位計データ (23日12時～24日0時)

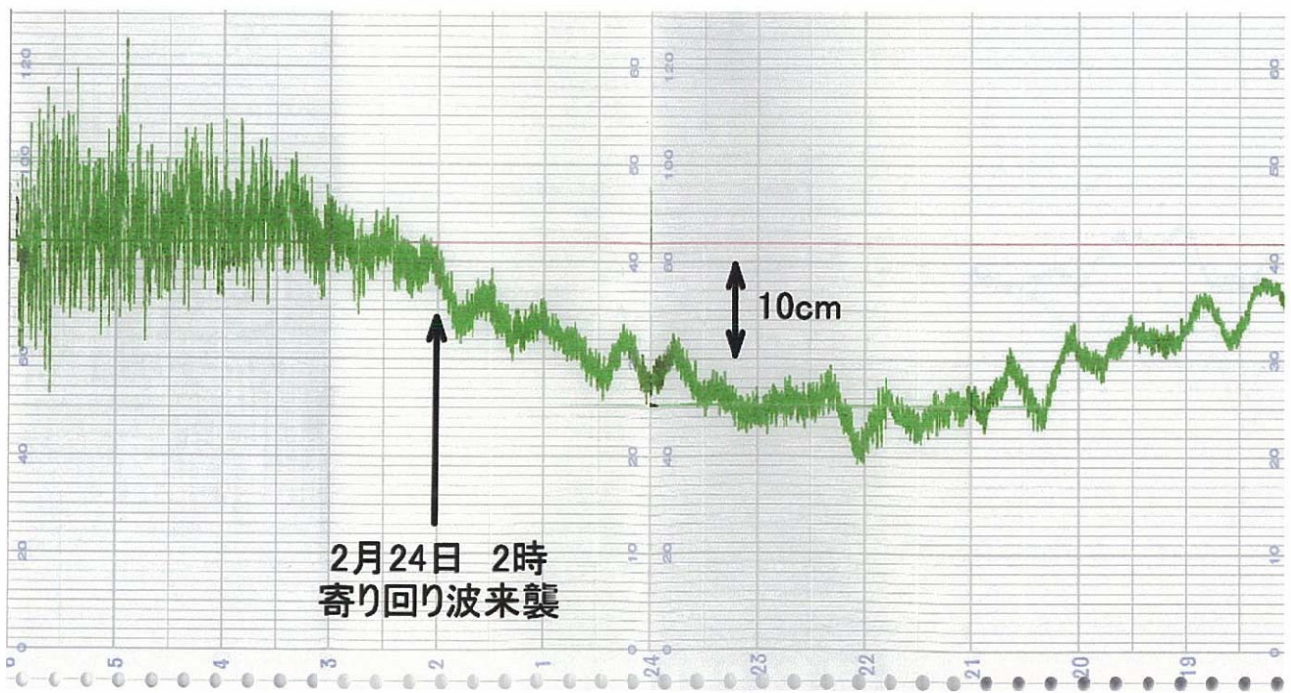


図3 富山商船高等専門学校臨海実習場の潮位計データ (23日18時～24日6時)

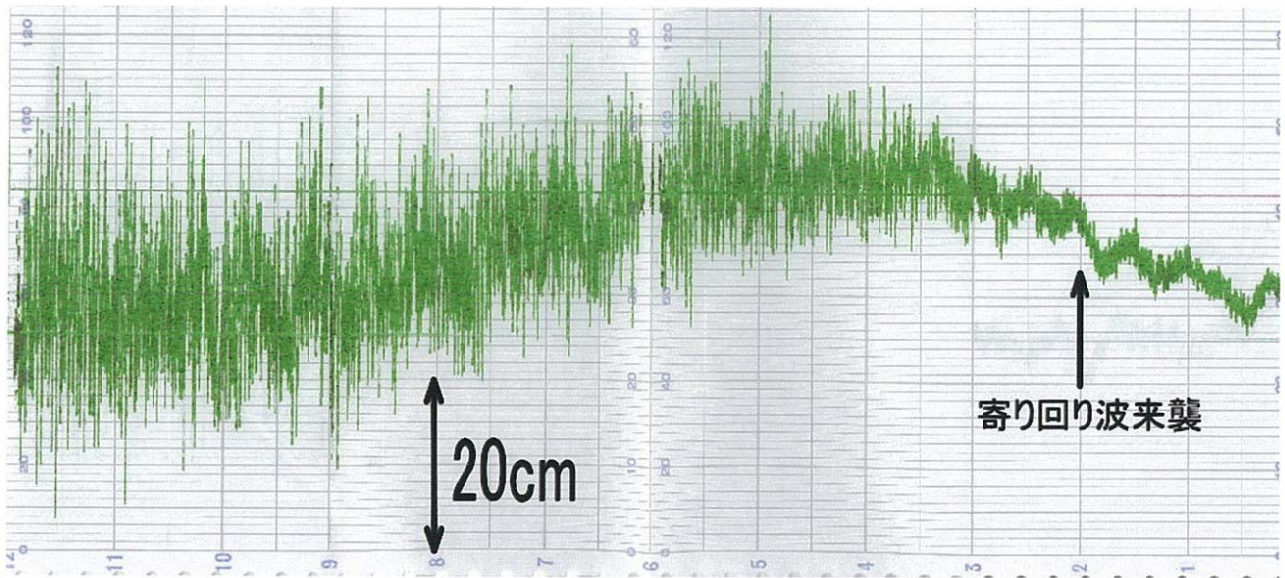


図4 富山商船高等専門学校臨海実習場の潮位計データ(24日 0時～24日12時)

4. まとめ

- ・ 寄り回り波の定量的定義の確立
- ・ 寄り回り波予報通報システムの確立
 - 波浪計(海象計)・潮位計等を新たに設置し、複数の観測機器の観測データをリアルタイムで収集して監視する体制を構築
 - 最新の情報伝送手段を用いて、寄り回り波情報を提供する
 - 例：ワンセグリアルタイムデータ放送による緊急寄り回り波情報の提供
- ・ 寄り回り波との共存

必読 北陸の海難に学ぶ, 吉田清三著, 平成11年(1999年)5月

「寄り回り波」発生状況一覧表 (1885~1996)

発生年(西暦) 月日	記事	発生年(西暦) 月日	記事	発生年(西暦) 月日	記事
明治18年(1885) 11月25日	被災	大正 6年(1917) 1月 9日		昭和 3年(1928) 3月 4日	
" 20年(1887) 11月18日	"	20日		8日	
" 23年(1890) 11月14日		25日	被災	4月24日	
12月25日		26日	"	" 4年(1929) 1月 2日	被災
26日		11月28日	"	3日	
" 24年(1891) 1月 3日		12月19日		17日	
27日		20日		3月15日	
2月11日		21日		4月23日	
" 24年(1892) 2月29日		" 7年(1918) 1月 4日		" 5年(1930) 2月13日	被災
3月15日		5日	被災	14日	"
4月11日		9日		" 6年(1931) 3月25日	
" 26年(1893) 12月26日		10日		11月12日	
" 28年(1895) 2月 4日		11日		" 7年(1932) 2月25日	
" 29年(1896) 1月12日		3月23日		28日	
2月12日		24日		3月 2日	
12月 2日		" 8年(1919) 4月13日		" 8年(1933) 11月17日	被災
" 31年(1898) 1月20日		11月26日		" 9年(1934) 1月13日	
" 32年(1899) 11月14日		12月11日	被災	14日	
23日		" 9年(1920) 1月23日	"	15日	
" 33年(1900) 1月22日		24日	"	3月23日	
3月13日		2月 4日		11月29日	
" 34年(1901) 2月10日		3月18日		" 10年(1935) 2月 8日	
3月 2日		12月30日		3月27日	
11月26日	被災	" 10年(1921) 1月22日		11月12日	
" 35年(1902) 1月10日		" 11年(1922) 2月 5日		13日	
" 41年(1908) 11月28日	被災	12月 7日		" 11年(1936) 1月28日	
" 42年(1909) 1月31日		" 12年(1923) 1月 2日	被災	2月 1日	被災
" 43年(1910) 2月12日		17日		4月 5日	"
28日		4月14日	被災	10月 5日	"
" 44年(1911) 1月 7日		" 13年(1924) 2月 4日		24日	
" 45年(1912) 1月 8日		12月 1日	被災	28日	
9日		13日	"	" 12年(1937) 1月14日	
2月19日		14日		2月 4日	
3月19日	被災	" 14年(1925) 1月14日		3月 6日	
20日		15日		" 13年(1938) 1月27日	
大正 2年(1913) 1月31日		19日		" 14年(1939) 1月10日	
12月15日	被災	3月19日		28日	
" 4年(1915) 1月15日	"	12月 1日	被災	2月27日	
2月25日	"	12日		28日	
" 5年(1916) 1月 6日		23日	被災	" 15年(1940) 3月18日	
2月13日		" 15年(1926) 1月22日		" 19年(1944) 2月26日	
3月25日		3月28日		" 20年(1945) 2月 4日	
12月28日		11月29日		5日	
29日	被災	12月20日		11日	
30日		昭和 2年(1927) 12月25日	被災	12日	
31日		" 3年(1928) 1月31日		12月19日	被災

判定基準 ①Tm=13sec以上 ②Tm=12sec以上の場合 Vmax 25m/s以上

発生年 (西暦) 月日	記事	発生年 (西暦) 月日	記事	発生年 (西暦) 月日	記事
昭和20年 (1945) 12月20日		昭和35年 (1960) 1月17日	被災	昭和56年 (1981) 3月16日	被災
" 21年 (1946) 3月 8日	被災	18日		27日	"
9日		25日		12月16日	"
" 22年 (1947) 4月23日		12月19日		" 57年 (1982) 10月25日	
" 23年 (1948) 1月 9日	被災	27日		" 58年 (1983) 12月13日	
3月 9日		" 37年 (1962) 1月 3日	被災	平成 3年 (1991) 2月17日	
12月 8日		4日		12月30日	
" 24年 (1949) 2月15日	被災	21日		" 5年 (1993) 1月30日	
16日	"	22日	被災	10月26日	
17日		2月12日		" 6年 (1994) 2月23日	
3月 1日		" 38年 (1963) 1月 7日	被災	" 7年 (1995) 2月 1日	
20日		8日	"	11月 9日	
10月31日		9日		12月25日	
" 25年 (1950) 1月16日		" 40年 (1965) 1月 3日	被災	" 8年 (1996) 1月11日	
2月 1日		5日		12月 7日	
28日		10日			
" 26年 (1951) 1月 1日		11日	被災		
2日		12月16日			
2月 4日		17日	被災		
5日		18日			
11月27日	被災	" 41年 (1966) 1月16日			
28日	"	3月 6日			
" 27年 (1952) 11月 2日		" 44年 (1969) 2月 6日			
13日		7日			
" 28年 (1953) 1月 7日		11月26日			
3月28日		" 45年 (1970) 2月 1日	被災		
11月24日		2日	"		
" 29年 (1954) 1月31日		3日			
12月23日	被災	3月18日			
24日	"	" 47年 (1972) 12月 2日	被災		
25日		3日	"		
" 30年 (1955) 1月 7日		" 48年 (1973) 3月26日	"		
8日		" 49年 (1974) 1月10日	"		
11日	被災	15日			
12日		26日			
2月22日		" 50年 (1975) 11月 8日	被災		
" 31年 (1956) 1月16日		9日			
2月11日	被災	" 51年 (1976) 10月12日	被災		
12日	"	12月28日	"		
" 32年 (1957) 3月13日		" 53年 (1978) 1月23日	"		
11月 9日		3月 2日	"		
12月10日		" 54年 (1979) 2月 2日	"		
" 33年 (1958) 1月 4日		3月12日			
19日		31日	被災	平成17年(2005) 11月30日	
2月15日		4月 1日	"	平成20年(2008) 2月25日	
" 34年 (1959) 2月 1日		" 55年 (1980) 1月18日			

③ 以上によらない場合天気図や被災状況より

寄り回り波と海難

吉田清三*・石森繁樹*・加藤雅司*

On the Study of "Yorimawari Nami" and Disasters at Sea

Seizo YOSHIDA, Shigeki ISHIMORI and Masashi KATO

1. 緒言

富山湾は、西方に能登半島を控えた袋状の湾になっており、この地形が、冬季季節風による北西からの波浪を遮断しているために、他の日本海沿岸に比べて、波も少なく概して平穏な海域になっている。ところが、北～北東の方向から侵入してくる波浪に対しては、逆に地形的条件が悪く高波が発生する原因となっている。

富山湾では、毎年12月～4月頃に、低気圧が通過して風や風浪が治まり、海面も静かになった頃に突如として周期10～12秒、波高3～5m程度のうねり性の大きな波が沿岸を襲い、海難や海岸侵食のみならず海岸災害の主要因になっている。そして、富山湾におけるこのうねり性の大きな波を寄り回り波と呼んでいる。

寄り回り波は、時間遅れの異常波浪として考えられる。富山湾以外の日本海沿岸でも時間遅れの波は存在するが、一般に冬季は常に海が荒れている、大きな波浪が沿岸に押し寄せているために、富山湾のように、静かな沿岸に急に大きなうねりが押し寄せると言った顕著な現象はあまり見られないようである。その意味において、寄り回り波は富山湾固有の波とも考えられる。

2. 寄り回り波発生状況

富山湾では、入善と新湊で、それぞれ超音波式波高計により、2時間毎に波浪観測を行っている。本来ならばこれらの観測データに基づいて、寄り回り波発生状況を調査すべきであるが、寄り回り波の定量的定義は、未だ為されていない。そこで、天気図、波浪観測データ、文献¹⁾等により調査し

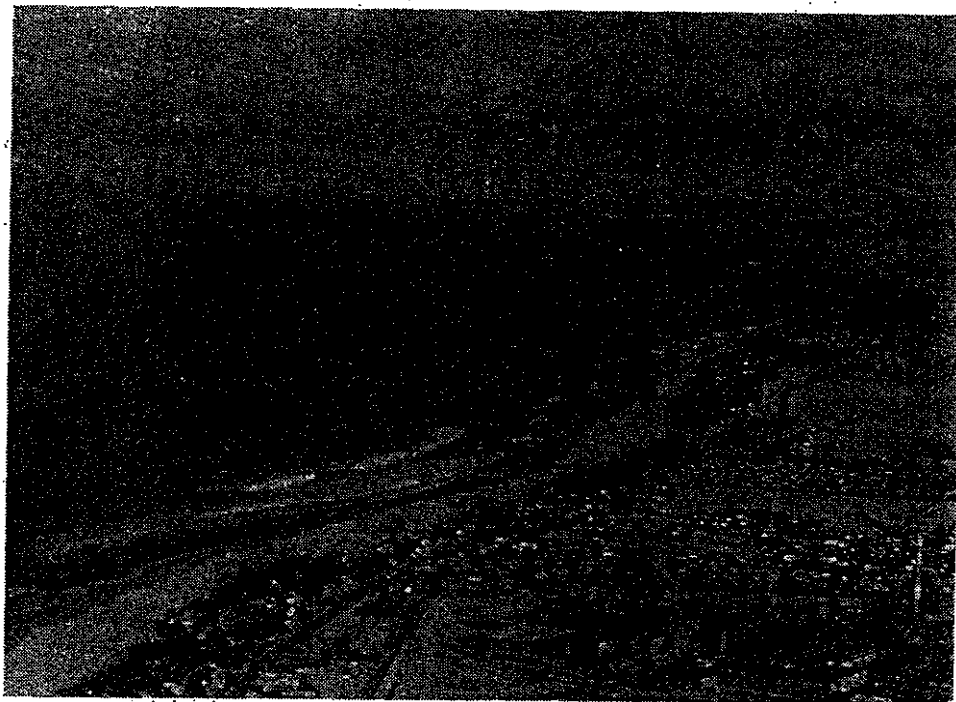


図1 寄り回り波 撮影 1981年12月16日富山上空高度300M

* 正会員 富山商船高等専門学校 (富山県新湊市海老江練合 1の2)

表1 最近10年間に於ける寄り回り波発生一覧表

発生年月日	主な被災地域	主な被災状況
1974年 1月24日	新湊・氷見	漁船 5隻破損
2月 9日～2月11日	黒部・氷見	漁船 4隻破損
10月23日～10月25日	氷見	漁船 1隻破損
11月18日～11月19日	黒部	
1975年12月17日～12月18日	氷見	漁船 1隻破損
1976年11月15日～11月16日	氷見	漁船 1隻破損
12月27日～12月30日	氷見・宮崎	漁船 2隻破損
1977年12月21日～12月23日	氷見	漁船 1隻破損
1978年 1月22日～1月24日	入善・新湊	漁船 2隻破損
3月 1日～3月 2日	宮崎・吉原・境	漁船13隻破損
1979年 2月 1日～2月 3日	入善・滑川	
3月31日～4月 1日	黒部・滑川・富山	漁船24隻破損
10月19日～10月21日	芦崎・泊・新湊	漁船 4隻破損
1980年 1月16日～1月19日	氷見	漁船 2隻破損
1月21日～1月22日	氷見	漁船 3隻破損
3月12日～3月13日	宮崎	漁船 1隻破損
12月29日～12月31日	氷見	漁船 1隻破損
1981年 3月16日～3月18日	氷見・富山	漁船 4隻破損
12月 2日～12月 3日	魚津・滑川	漁船 3隻破損
12月14日～12月16日	氷見	漁船 3隻破損
1982年 1月29日～1月30日		
3月24日～3月26日	氷見	漁船 1隻破損
4月10日～4月11日	泊・境	漁船 3隻破損
9月22日～9月24日	泊・境	漁船 4隻破損
10月25日～10月26日	泊	漁船 1隻破損
1983年 3月18日～3月19日		
12月12日～12月13日	新湊	漁船 1隻破損

表2 寄り回り波月別発生状況

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
発生回数	5	2	6	1	0	0	0	0	1	3	2	7
発生率(%)	18.5	7.4	22.2	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	11.1	7.4	25.9

た昭和49年以後における寄り回り波発生一覧表を表1に示す。寄り回り波は、過去10年間に於いて、年に約3回の割合で発生しており、その度に、富山湾沿岸で、漁船の転覆、沿岸構造物の破壊等の災害をもたらしている。又、月別にみると表2に示すように9月から4月にかけて発生しており、特に12月、1月、3月に多く発生している。12月、1月に多いのは、西高東低型の気圧配置によるものと考えられる。又、3月に多いのは台湾坊主等の発達した低気圧が日本海を通過し、北海道の東側付近で停滞することによるものと考えられる。そして、主たる海難発生地区が、富山湾沿岸の中

でも、氷見、新湊、入善、宮崎、滑川等に集中していることから、寄り回り波が富山湾沿岸に一様に来襲するのではなく、限定された沿岸に大きな波が押し寄せると言う性質があることが分かる。

最近の寄り回り波による災害例を次に上げる。

(1) 昭和54年3月31日：滑川市で離岸堤に取残された釣り人を救助しようとした警察官が殉職。経田、滑川、富山で漁船24隻が破損。

(2) 昭和56年12月14日～16日：氷見市で漁船3隻が破損。青海町において線路が高波をかぶり、15日～16日にかけて北陸本線が上下線共不通となる。

このように寄り回り波は、海難のみならず色々な被害を引き起こしているのである。寄り回り波が多く被害を引き起こす理由は、寄り回り波が、風や風浪が治まり海面が穏やかになった時に突如として来襲する性格をもっている点にある。特に、漁船等は全く無警戒の状態で大波に襲われ、転覆、破損等の海難に結び付いていると考えられる。

最近、消波ブロック等による護岸対策が行き届いてきたために寄り回り波による海岸災害は減少しつつあるが、釣り人や漁船等に

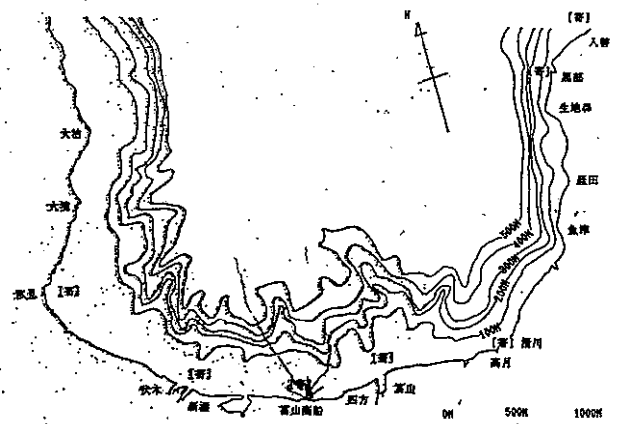


図2 寄り回り波の地域特性

[寄]：顕著な寄り回り波が来襲する地域

としては、今後とも大きな脅威である。被害をより少なくするためには、その発生機構を解明し、予報を行い、特に漁船や釣り人等は、寄り回り波に対して十分に注意することが重要である。

3. 寄り回り波発生機構

寄り回り波の発生機構に関しては、次のような考え方がある。

(1) 初冬から春先にかけて、日本付近は西高東低型の気圧配置となる。そして、低気圧が日本海を通過して、北海道東方海上で発達停滞した時、間宮海峡から北海道西方海上にかけて気圧傾度が異常に強まり、北ないし北東の強風が吹続する。この強風により発生した風浪がうねりとなって日本海を南下し、富山湾に入って寄り回り波となる。

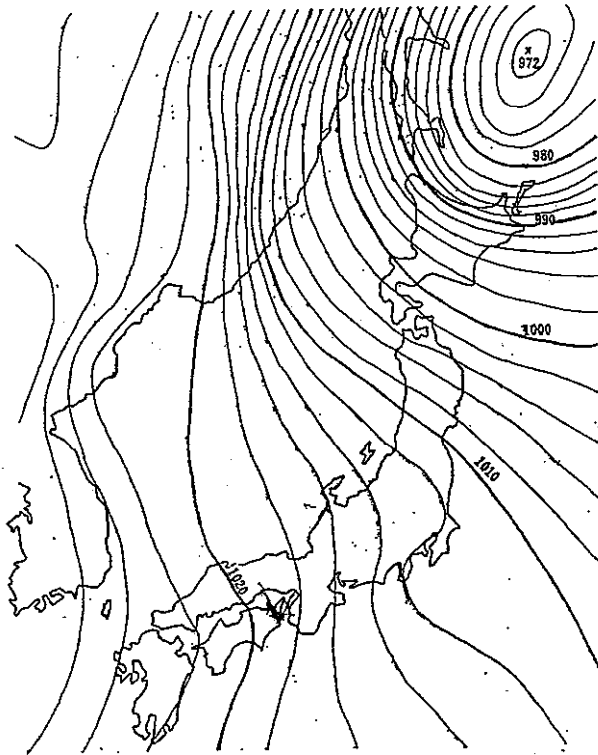


図3 寄り回り波発生時の天気図
昭和59年1月16日21時

- (2) 冬期卓越する北西の季節風で生成された風浪が、能登半島で回折して湾内に入り、これが(1)の北～北東のうねりと干渉して高波となる。
- (3) 低気圧性気象擾乱の通過に伴う広範囲の海面隆起により、日本海規模の海面振動が生じ、この影響で富山湾に高波が発生する。
- (4) 富山湾に入るうねりは、湾が深いためエネルギーを失うことなく海岸に到達する。深水域から急に浅水域に入ると、波は変形して波高を増す(Shoaring 効果)が、これが局地的な高波である

寄り回り波の原因である。

(5) 海岸付近の海底地形は大陸棚の発達が貧弱で、特に富山湾の東側においては大陸棚が狭い。この狭い大陸棚を縁取る大陸斜面には、大小多数の海底谷が発達し、深い湾床まで急傾斜となっている場合が多い。富山湾に侵入する波がこのような海岸に近づくと屈折、回折、反射、干渉、砕波等種々の変形を受ける。発現場所に強い地域性を持つ寄り回り波は、この海岸過程による高波である。

(図2参照)

以上のような種々の要因により、寄り回り波が発生すると考えられるが、寄り回り波は年に数回程度しか発生せず、観測データも少ないことから、その発生機構については、十分に解明されていない点も多い。次に、(1)の考え方に着目し、天気図から風向、風速を計算し、波浪モデルにより寄り回り波の数値シミュレーションを行った結果^②を紹介する。

4. 波浪モデル

本研究で用いた波浪モデルを次に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} S(f, \theta, \vec{x}, t) + \vec{C}_g \cdot \Delta S(f, \theta, \vec{x}, t) \\ = (A(f, u) \cdot G(\theta') + B(f, u_*) \cdot S) \\ \cdot \{1 - [S / (S_* \cdot G(\theta'))]^2\} \quad \dots\dots(1) \\ \text{at } \theta' \leq 90^\circ \text{ and } S \leq S_* \cdot G(\theta') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} S(f, \theta, \vec{x}, t) + \vec{C}_g \cdot \Delta S(f, \theta, \vec{x}, t) \\ = -D \cdot f^4 [S - S_* \cdot G(\theta')] \quad \dots\dots(2) \\ \text{at } \theta' \leq 90^\circ \text{ and } S > S_* \cdot G(\theta') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} S(f, \theta, \vec{x}, t) + \vec{C}_g \cdot \Delta S(f, \theta, \vec{x}, t) \\ = -(B + D \cdot f^4) \cdot S \quad \dots\dots(3) \\ \text{at } \theta' > 90^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_*(f, u) = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot g^2 / (2 \cdot \pi \cdot f)^5 \\ \cdot \exp\{-\beta \cdot [g / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot u)]^4\} \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$u_* = 0.041 \cdot u \cdot \cos \theta' \quad \dots\dots(5)$$

ここで、

- $S(f, \theta, \vec{x}, t)$ or S : 時間 t に位置 \vec{x} に存在する周波数 f 、波向 θ の成分波スペクトル
- \vec{C}_g : 周波数 f 、波向 θ の成分波の群速度ベクトル
- f : 成分波の周波数
- θ : 成分波の波向
- θ' : 波向と風向のなす角
- S_* or $S_*(f, u)$: Pierson & Moskowitz 型の成熟波スペクトル

g : 重力加速度 (9.8m/s)

$\alpha = 0.0081$

$\beta = 0.74$

D : 内部摩擦による減衰率 ($D=100$)

$A(f, u)$: Phillips の共振理論による項

$B(f, u_*)$: Miles の不安定理論による項

$G(\theta')$: 方向分布関数

u : 風速 (海上19.5mにおける値) [m/s]

(1)式のA項については、原式を直接計算せず、
次のような略算式を使用した。

$$A(f, u) = C_1 \cdot \left\{ \frac{1}{[2 \cdot C_2 \cdot (C_3 + (K - \omega/u)^2)]} \right. \\ \left. + \frac{1}{[2 \cdot (C_2 + K^2) \cdot (C_3 + (\omega/u)^2)]} \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{[C_2 + (K \cdot \sin(\pi/6))^2]} \right. \\ \left. \frac{1}{[C_2 + (K \cdot \cos(\pi/6 \cdot i) - \omega/u)^2]} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$K = \omega^2 / 9.8$$

$$C_1 = 2.2 \cdot 10^{-11} \cdot \omega^{5.25} \cdot u^{2.25} \cdot \pi / 3$$

$$C_2 = 0.25 \cdot (\omega/u)^2$$

$$C_3 = (\omega/u)^{2.5} / 9$$

又、B項は次式で表現される。

$$B(f, u_*) = \{ 5 \cdot \exp[-7000 \cdot (C_w - 0.031)^2] \\ + 2612 \cdot C_w^2 \cdot \exp(-0.0004/C_w^2) \} \cdot f \quad \dots\dots(7)$$

ここで、

$$C_w = u_*/C$$

$$C = 9.8 / (2 \cdot \pi \cdot f)$$

方向分布関数 $G(\theta')$ は、次式を使用した。

$$G(\theta') = 1/\pi \cdot (\Delta\theta' + \cos 2\theta' \cdot \sin 2\theta') \quad \dots\dots(8) \\ -\pi/2 \leq \theta' \leq \pi/2$$

本研究では $\Delta\theta' = 10^\circ$ とした。

5. 風向・風速計算

風のデータを得る方法は色々あるが、ここでは、
風を地衡風で近似して次式で求める。

$$u_x = -0.7(\rho \cdot f) \cdot p/y \quad \dots\dots(9)$$

$$u_y = 0.7/(\rho \cdot f) \cdot p/x \quad \dots\dots(10)$$

$$u = (u_x^2 + u_y^2)^{1/2}$$

$$\theta_u = 90^\circ - \tan^{-1}(u_y/u_x) \quad u_x < 0$$

$$\theta_u = 270^\circ - \tan^{-1}(u_y/u_x) \quad u_x > 0$$

$$\theta_u = 0^\circ \quad u_x = 0 \text{ and } u_y < 0$$

$$\theta_u = 180^\circ \quad u_x = 0 \text{ and } u_y > 0$$

ここで、

u_x : 風速の x 成分

u_y : 風速の y 成分

f : コリオリの係数 ($14.54 \times 10^{-5} \cdot \sin\phi$)

ϕ : 緯度

p : 気圧 [mb]

ρ : 空気密度 [1.25kg/m^3]

u : 風速 [m/sec]

θ_u : 風向 [deg]

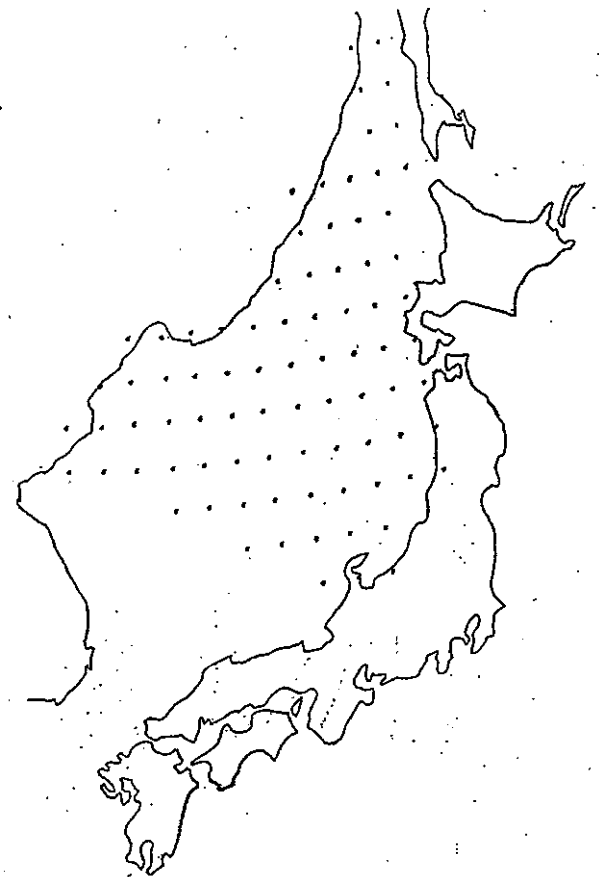


図4 風場計算の格子点

図4に示すように、日本海に格子点を設定して、
天気図より各格子点における気圧を読み取り、各
領域における風向、風速を計算した。なお、図4
の格子点は 1° 毎の緯度線と経度線の交点として
設定されている。

6. 波浪モデルの計算法

図5に示すように、富山湾沖 ($37^\circ 30' \text{N}$, 137°
 $30' \text{E}$) を中心に、 $300^\circ \sim 30^\circ$ まで 10° 毎に、合
計100個の格子点を放射状に設定する。ただし、
格子点間隔は40海里である。(1)~(3)式を計算する
ことにより各格子点における波のスペクトルを求
めるのであるが、具体的には、まず次式を数値積
分する。

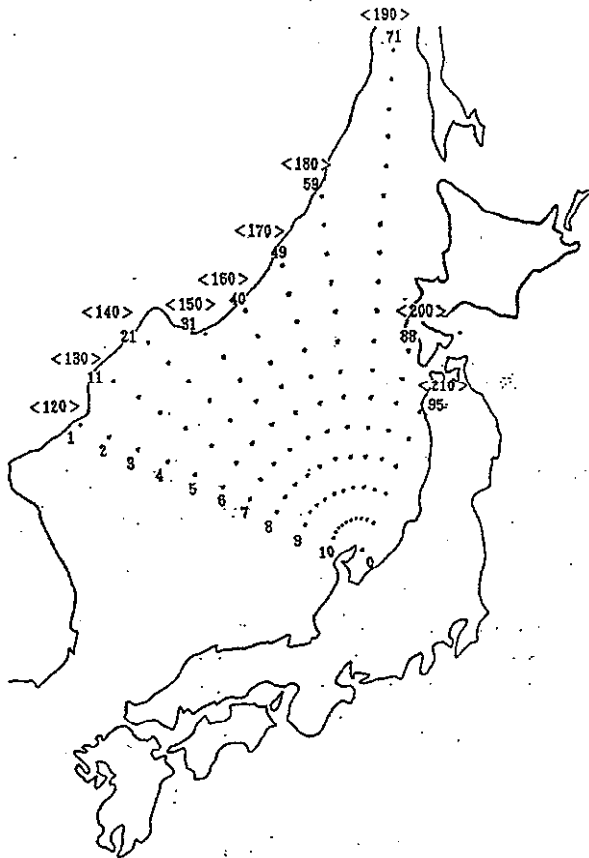


図5 波浪のスペクトル計算のための格子点
0番の格子点の緯度、経度 (37°30' N, 137°30' E)
格子点間隔 40哩

$$dS/dt = (A(f, u) \cdot G(\theta') + B(f, u_*) \cdot S) \cdot \{1 - [S/(S_* \cdot G(\theta'))]^2\} \dots\dots(11)$$

at $\theta' \leq 90^\circ$ and $S \leq S_* \cdot G(\theta')$

$$dS/dt = -D \cdot f^4 [S - S_* \cdot G(\theta')] \dots\dots(12)$$

at $\theta' \leq 90^\circ$ and $S > S_* \cdot G(\theta')$

$$dS/dt = -(B + D \cdot f^4) \cdot S \dots\dots(13)$$

at $\theta' > 90^\circ$

本研究では、各格子点におけるスペクトルの初期

表3 周波数の離散化 f_i (Hz)

NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
f_i	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.20
Δf_i	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.03	0.045
NO	12	13									
f_i	0.25	0.3									
Δf_i	0.05	0.05									

表4 波向 θ (DEG.)

NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_i	300	310	320	330	340	350	000	010	020	030

値は0とし、境界値として、1, 11, 21, 31, 40, 49, 59, 71, 88, 95番の各格子点で、 $S_*/8$ を与えた。この条件のもとに、(11)~(13)式をルンゲ・クッタ・ギル法により、数値積分し、各格子点において、1時間後のスペクトルを計算する。実際の波のスペクトルは、成長又は減衰しながら移動しているので、今求めたスペクトルを、波向と群速度で伝播させてやり1ステップの計算を終了する。

ここでは、ジャンプ法によりスペクトルの伝播を行った。この場合に、格子点間隔 d は、非常に重要であり、次の関係を満足する必要がある。

$$d > C_{gmax} \cdot \Delta t \dots\dots(14)$$

ここで、

C_{gmax} : 最も速く伝播する成分波の群速度

Δt : 1ステップの時間 [hour]

本研究では、 $C_{gmax} = 37.898$ [knots], $\Delta t = 1$ [hour], $d = 40$ [Miles] とした。

次に、(11)~(13)式の波浪スペクトル S は、波の周波数 f と波向 θ の関数である。これを数値積分するために、 f, θ を表3, 表4のように離散化した。 f については、0.04Hz~0.3Hz までの13成分を考えた。

θ については、 θ_i を中心とし、 $\theta_i - 5^\circ \sim \theta_i + 5^\circ$ の方向帯を持つ10成分を考えた。(実際に波が進む方向は θ_i の反方位方向である。) 従って0番以外の格子点では、波向は1つに限定されるので、13個の成分波について、スペクトルを計算し、0番の格子点では、130個の成分波についてスペクトルを計算することになる。

7. 有義波高・有義周期の計算

0番の格子点では、方向スペクトルが得られるので、次式を用いて、有義波高 $H_{1/3}$, 有義周期 $T_{1/3}$ を計算する。

$$H_{1/3} = 2.83 \cdot [2 \cdot \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{10} S(f_i, \theta_j) \cdot \Delta f_i]^{1/2} \dots\dots(15)$$

$$T_{1/3} = 1.22 \cdot \{ [\sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{10} S(f_i, \theta_j) \cdot \Delta f_i] / [\sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{10} f_i^2 \cdot S(f_i, \theta_j) \cdot \Delta f_i] \}^{1/2} \dots\dots(16)$$

8. 計算結果

昭和59年1月1日0時~1月18日21時までの3時間毎(0時, 3

時、6時、9時、12時、15時、18時、21時)の日本海天気図を用い、富山湾沖(37°30'N, 137°30'E)の波浪(有義波高, 有義周期)を昭和59年1月1日0時~1月18日22時まで1時間毎に計算した。又風は、3時間毎の天気図しかないので、天気図から得られる風のデータも3時間毎であるが、単に比例配分することにより、1時間毎の風のデータを作った。その計算結果を図6, 図7に示す。破線は、富山県下新川郡入善町の田中海岸沖500m, 水深15mの所に設置された超音波式波高計による観測値であり、実線は波浪モデルによる富山湾沖での計算値である。波浪モデルにより

得られる有義波高、有義周期は、水深による影響等は全く考慮されていない。そして、波浪の観測値は、水深15mの所のものであり、水深の影響を受けて、富山湾沖の波よりも波高は増大し、周期は短くなっていると考えられる。そこで、計算値を観測値に合わせるために、有義波高には1.5、有義周期には1/1.5を乗じた。

図6において、10日から12日において、観測値と計算値との差が大きくなっている。これは、天気図から地衡風近似して求めた風と実際の風(船舶から報告された風)とが相当異なっているためである。著者らは、海老江海岸(富山商船高等専

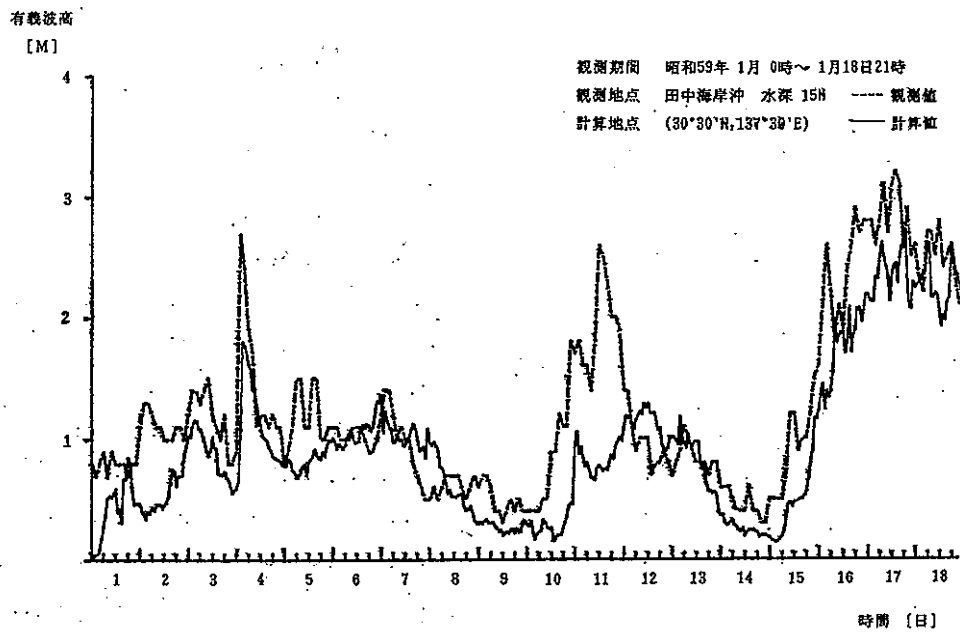


図6 観測値と計算値の比較(有義波高)

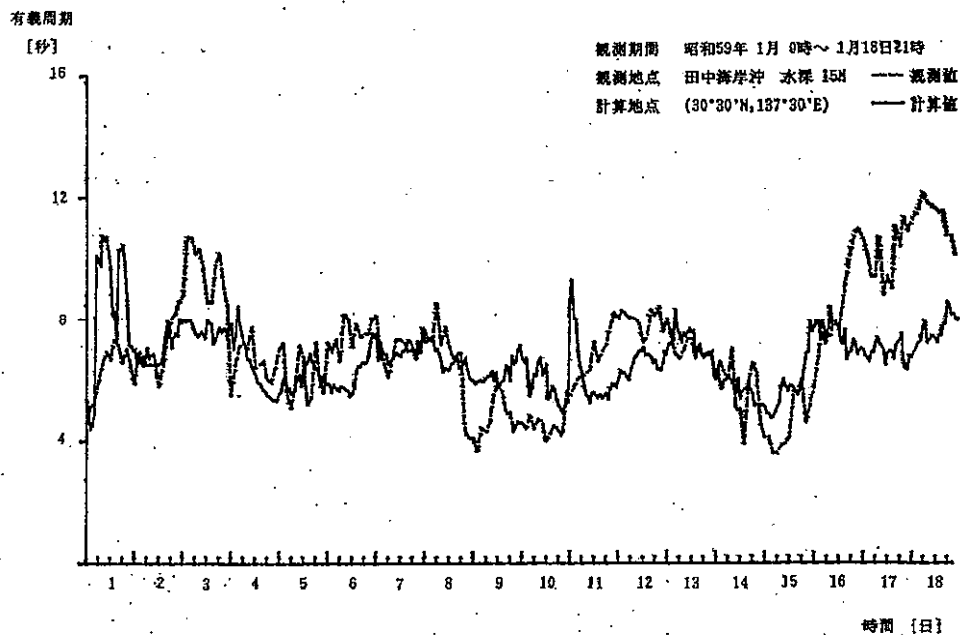


図7 観測値と計算値の比較(有義周期)

門学校)において、寄り回り波の観測を続けている。この時、海老江海岸に周期10秒以上の大きなうねりが押し寄せたのは17, 18日であり、又計算結果もこの日に有義波高が大きくなっている。このように、日本海に放射状に格子点を設定した簡単なシミュレーションである程度の寄り回り波の予知は可能であると思われる。次に図7の有義周期であるが、寄り回り波が来襲した16日以降、計算値が観測値に追従しておらず、不本意な結果に終わっている。この点に関する原因説明は今後の課題である。

9. 結言

寄り回り波の特徴を整理すると次のようになる。

- (1) 低気圧が通過し、風や風浪が治まった頃に突如として来襲する。
- (2) 富山湾沿岸に一様に来襲するのではなく、地域性がある。(限定された海岸に大きな波が押し寄せる。)

本論文は、このような特徴を持ち富山湾沿岸で色々な被害を引き起こしている異常波浪“寄り回り波”について、文献等による過去の発生状況の調査、計算機による数値シミュレーションの結果等を報告したものである。

寄り回り波発生一覧表については、他にも幾つか発表されている³⁾が、寄り回り波の定義が異なる、調査が十分でない等の理由によりそれぞれ若干異なっている。そこで、より信頼のおける一覧表を作るために著者らは調査を続けている。

寄り回り波の数値シミュレーションについては、気象庁の磯崎⁴⁾(1972年)、京都大学の土屋⁵⁾(1983年)が行い、寄り回り波の数値予知は可能であるとしている。著者らは、日本海に放射状に格子点を設定することにより数値シミュレーションを行った。図7の有義周期の計算値が観測値に十分追従していない点に問題はあるが、全体とし

ては良好な結果を得た。そして、このような簡単な方法でも寄り回り波の数値予知は可能であることを確認した。有義周期について、計算値が観測値に十分追従していない点の原因説明は、今後の研究課題である。

次に、寄り回り波の地域性を解明するためには、波浪モデルによる数値シミュレーション以外に、海底地形等を考慮した寄り回り波の沿岸過程に関する研究を行う必要がある。これについては1971年に気象庁の磯崎⁶⁾が、富山湾沿岸の波の屈折図を作ることにより行っているが、現在のところこの種の研究に関する論文は少ない。寄り回り波の沿岸過程の解明は今後の研究課題である。

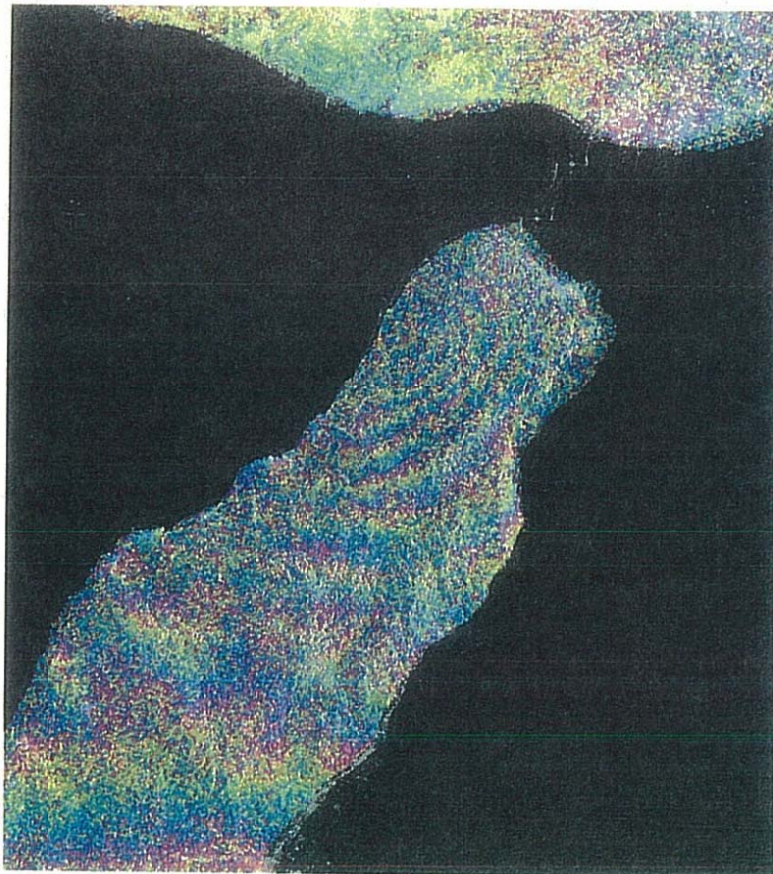
最後に、本研究は、著者らが神戸商船大学の井上・石田・久保と共に行っている科学研究費自然災害特別研究(No. 60020034)の成果の一部であることを明記する。又、寄り回り波発生一覧表を作成するにあたり、貴重な海難資料を提供して頂いた海上保安庁伏木海上保安部に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 伏木海上保安部：過去10年間の要救助海難の統計、1982年
- (2) 吉田清三・石森繁樹・加藤雅司：波浪モデルによる寄り回り波の研究、富山商船高等専門学校研究集録、第18号、1985年
- (3) 第一港湾建設局伏木富山港工事事務所：富山湾の波について(寄り回り波)、1983年
- (4) 磯崎一郎・太田芳夫：富山湾の沿岸波浪の特性(第2報)、防災科学技術総合研究報告、第28号、1972年
- (5) 土屋義人・山口正隆・平口博丸：日本海沿岸における異常波浪の数値予知、第29回海岸工学講演会論文集、1982年
- (6) 磯崎一郎：富山湾の沿岸波浪の特性(第1報)、防災科学技術総合研究報告、第25号、1971年

FINAL REPORT OF
JERS-1/ERS-1 SYSTEM VERIFICATION
PROGRAM

VOLUME II



March 1995

Ministry of International Trade and Industry
National Space Development Agency of Japan

合成開口レーダ画像による〈寄り回り波〉

石森繁樹¹、河合雅司¹、上林徳久²、近藤昭彦³、土井捷三郎⁴、
若林洋⁴、岡田敏美⁵、藤井昭二⁶、井上篤次郎⁷、町村尚⁸

- | | |
|--------------|-------------------|
| 1 富山商船高等専門学校 | 2 リモートセンシング技術センター |
| 3 筑波大学 | 4 富山県水産試験場 |
| 5 富山県立大学 | 6 藤井地質環境研究所 |
| 7 神戸商船大学 | 8 北海道大学 |

要旨

ERS-1応用検証実験の一環として合成開口レーダ(SAR)による富山湾の特異波浪〈寄り回り波〉観測を実施した。1993年3月18日にERS-1と同期させ二隻の船を動員して海上照合調査(Sea Truth)を行った。〈寄り回り波〉は日本海北部で冬季の季節風により発生した風浪がうねりとして南下し富山湾で高波となるものと考えられている。発達した低気圧が通過して天気が回復したあと、風がなく凪いだ海に突然来襲するという特徴があり、海岸浸食や海難を引き起こし昔から沿岸住民に恐れられている異常波浪である。湾内には実験前日から周期約11秒のうねりが長期にわたり来襲していた。衛星通過時は風は無いが、あっても非常に弱く観測船周辺の海面にはさざなみがある程度で、ところによっては鏡のような海面が散見された。神通川河口3海里の船上から見ると砕波域が東部から西部へ移動するのが認められた。

この海面模様を捉えたSAR画像には〈寄り回り波〉に関するいくつかの特徴がみられる。

- (1) 富山湾に向かって10度と45度の二方向からうねりが進入している。うねりはさざ波により可視化されたと考えられ、整然とした波の峰線で識別できる。60km×60km程度の海面を有する富山湾を大泊と生地鼻を結ぶ線で二分した湾奥には無風のためか海面散乱が小さく暗い部分が存在し、波の映像はない。外海ではつねにある程度の風が存在するため、短重力波によりうねりが判読できる可能性は高い。
- (2) 北から進入してくるうねりは東部の黒部海岸をまっすぐ南下している。海岸から200mの深さまで1/3～1/6の急勾配の海岸では波が海底摩擦の影響を受けにくいことを示している。この結果うねりは滑川の海岸に到達し漸次西へまわる。
- (3) 大陸棚の発達がみられる西部海岸では浅海効果が認められる。
- (4) 入り江の七尾湾にはうねりが進入していない。明るい画面は風力階級3の海面を示す。
- (5) 富山湾の複雑な海底地形により特定の海岸で高波高になることが知られている。新湊海老江沖はそのひとつであり、うねりが四方海谷で屈折するためと考えられていた。画像解析の結果はこれが事実であることを示している。

1 まえがき

富山湾は能登半島に抱かれた静穏な海である。湾奥部の伏木港沖に設置された波浪計の測得波浪12974件(1990~1992)のうち有義波高1.51メートル、有義周期10.1秒以上の波浪は25件であり、大きな波が全体にしめる割合は0.19%である(日本海海難防止協会、1994)。富山湾の高波は北よりの強風による風浪と外海から進入してくる北からのうねりに分類できる。日本海で強い冬の季節風が連吹するとフェッチの制限内で風浪は十分に発達する。富山湾は北ないし北北東に開口した深い湾で、深海波の波長と同程度の水深において海底地形が複雑である。分散性の風浪がうねりとして長距離を伝搬してくるとき富山湾ではしばしば異常な高波が継続する。これにはいくつかの特徴がある。風が凪いだ海に突然来襲する、特定の海岸で顕著な高波となる、高波の終期である砕波が東から西へ漸次時間差をもって生起する、10分のオーダーで到来波の強さが変動するなどである。沿岸の住民は海岸浸食、海難や人命の喪失などを引き起こす恐ろしい異常波浪を<寄り回り波>と呼んでいる。本波浪については多くの研究がなされてきた。<寄り回り波>の発生地は北海道西方海上であり、冬型の急峻な西高東低の気圧配置のときに発生し、富山湾には30時間ないし36時間で到達する。したがって北海道西方海上で20メートル以上の北風を確認して半日以上前に予知が可能であるとされた(北出、1952)。特定の海岸で高波になることに関しては富山湾の形と特異な海底地形が沖合いから進入してくる波を変形させる結果であることが示され(磯崎、1971)、<寄り回り波>の発生メカニズムについては低気圧の極度の発達に伴う発生可能性が指摘された(土屋、山口、平口、1983)。また、うねりが佐渡島西方海上を南下する現場が航空機で観測された(吉田、1982)。北出論文に準拠した予報法に限界があるように本波浪の実体その他についてはなお検討を要する問題が残されている(石森、1983)。

ERS-1搭載の合成開口レーダ(SAR)は30メートルの高分解能で100キロ四方の海面波浪状況を瞬時に観測する。今回の検証実験で取得されたSAR画像から一般的な波浪情報のほかに<寄り回り波>の特徴を示すいくつかの情報が得られた。

2 観測と資料

1992年に打ち上げられた極軌道衛星ERS-1は高度785kmから映像レーダ(SAR)による地球観測を実施している。SARは能動型マイクロ波センサーで全天候型観測が可能である。レーダ送信周波数5.3GHz(Cバンド)、入射角23度、走査幅100kmで地上解像度30mの地表面画像を取得する。SARの海面波浪画像からは波長、波向きに関する2次元スペクトル情報が得られる。その原理はマイクロ波が海面のさざなみにより共鳴散乱(Bragg散乱)をうけることである。

1993年3月18日にERS-1のSARによる富山湾の特異波浪<寄り回り波>観測を実施した。衛星観測と同期させ二隻の船を動員して得た実験海面のデータを表1に示す。

衛星通過時刻(地方時10時30分)の天候は穏やかであった(図1)が、神通川河口3海里沖の実験海面には北から中位のやや高いうねりがあり、ゆったりと間断なく上下する海面にはさざなみのできた部分と鏡のように滑らかな部分が見られた。3月15日、発達した低気圧が本州南岸を通過し冬型の気圧配置となったため、日本海には15日から17日にかけて北よりの強風が吹いた。

日本海沿岸各地で観測された波浪の時系列（図2）が示すように高波が山形、新潟、富山の順序で生起している。波浪図（図3）では富山湾に進入したうねりが周期7～8秒の波として解析されているが、湾内で実測された波浪は伏木において周期10.9秒、波高1.44メートル（運輸省富山伏木港工事事務所波浪計）、入善において周期11.1秒、波高1.86メートル（建設省黒部工事事務所波浪計）と周期の長い波であった。

表1 ERS-1観測時の観測海域海面状況

観測船	期日	場所	天気	気温	水温	風速	風向	うねり	風浪	流向
はやつき	1993年 3月 18日	36°50' N 137°14' E	晴れ	11.0°	9.9°	2m/s	NW	4	1	-
若潮丸		36°49' N 137°14' E	晴れ	5.3°	9.6°	Calm	-	4	なし	260° -20m



図1 海上照合調査を行う「若潮丸」
(神通川河口沖3海里、Mar. 18, 1993)

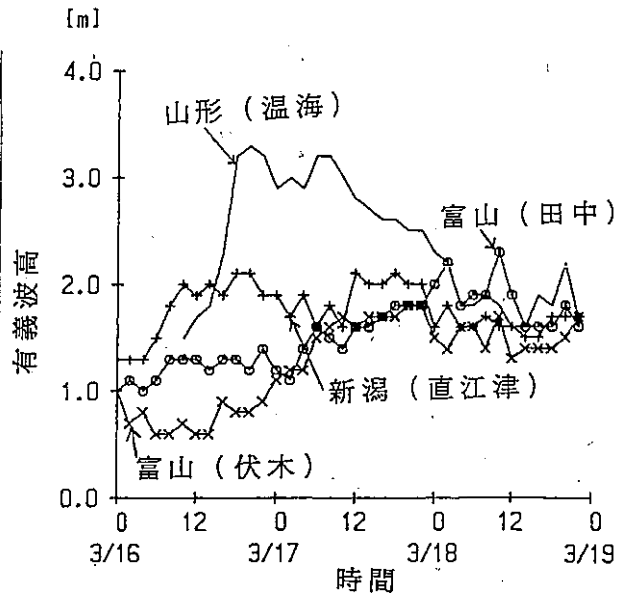


図2 日本海沿岸波浪観測所における波高経時変化
(Mar. 16-19, 1993)

3 画像処理

3.1 波の方向スペクトル

SAR映像データ（処理レベル2.1、ピクセルスペーシング12.5m）の2次元フーリエ変換により波浪の方向スペクトル $G(l, m)$ を求め、テスト領域（128×128画素）の代表的な波向きと波長を定めた。波向きは2次元スペクトル上の波数ベクトルの方向から求め、波長は次式から計算した。

$$L = \frac{2\pi}{\sqrt{l^2 + m^2}}$$

3.2 画像と海底数値情報の重ね合わせ

浅海域における波浪の変形過程を検討するためにSAR画像の上に沿岸海域地形図(国土地理院魚津、1:25,000)の等深線を重ね合わせた。図4に四方海底谷付近のオーバーレイ画像を掲げる。画像には数値的な処理で50m毎の等深線が描いてある。



図4 ERS-1のSAR画像—数値は等深線—
(新湊海岸、Mar. 18, 1993)

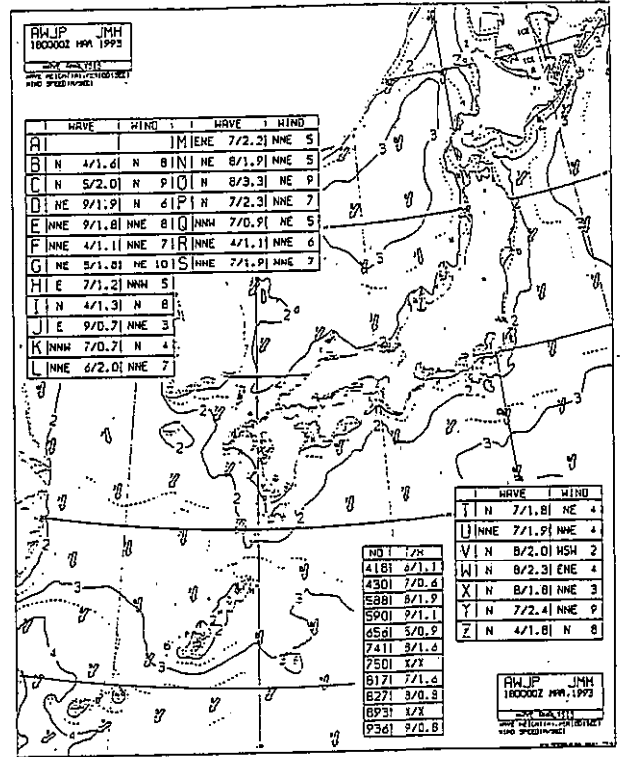


図3 沿岸波浪実況図(気象庁、1993年3月18日09時)

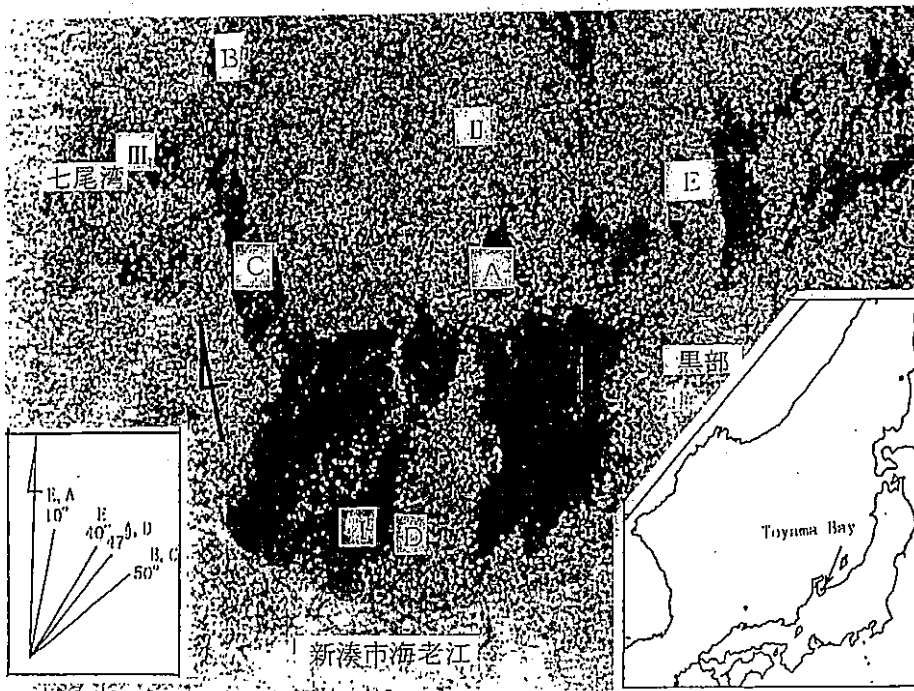


図5 ERS-1のSAR画像(富山湾、Mar. 18, 1993)

4 結果

4.1 うねりと風浪

富山湾全体のSAR画像(図5)をI、II、IIIに分割して波浪画像の特徴を述べる。

領域Iは湾を2分する大泊と生地鼻を結ぶ線の内側(20km×30km)に相当する。画像は暗い部分と明るい部分に分かれ明るいところには波の峰線がはっきり現れている。明暗は風の有無あるいは強弱を反映したものと考えられる。湾奥であるから風の非常に弱い海面が存在したのであろう。北から進入するうねりおよび波の沿岸における変形が明確に判読できる。

領域IIは湾の外側に当たる。外海の海上風により全体に散乱が強く明るい画面であるが、うねりの波列は判読できる。図中点Aと点Eでは10度と45度の2方向から来る長周期重力波が明確に読みとれるが、うねりが交差する状況は湾中央部全体でひろく認められる。

領域IIIは七尾北湾である。うねりのような大きな波が入らない湾は風力階級3の風により画面は一様に明るい。波浪の情報は得られない。

4.2 うねりの波長と波向き

沖合いの波浪を深海波と仮定すれば波長は $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ で求められる。周期 T の実測値は湾内2点で得られていて前述のように有義波の周期にして10.9秒と11.1秒であった。したがって深い富山湾には190m程度の大きなうねりが卓越していたと考えてよい。深海波が水深の浅い海域に入ると摩擦の影響で波長が縮小し波向きは変化するものがふつうである。

湾東部の黒部海岸は200m深までの海底勾配が1/3~1/6と大変急峻である。これは海岸近くでも波の進行方向が変化しにくいことを意味する。この状況を反映して、SAR画像上の波峰線も黒部の海岸線と直交して通過しているし、滑川沖の方向スペクトル(図6)も229mの大きな波が変形することなく直進できることを示している。うねりはまず滑川海岸を直撃し、高波として西へ伝播するように進む。これは実験海域からも砕波帯の移動で確認されたが、〈寄り回り波〉の言葉の由来に関係することかもしれない。

湾北西部では距岸5~9kmまで大陸棚の発達が見られる。図5左下に湾内5地点における波向きを示した。水深の浅い点Bや点Cでは波向に変化がみられるほか、波長も若干短くなっている。

スペクトル解析で求めた湾内7地点における卓越波の波長と波向を表2に掲げる。沖合いと沿岸部における波長の顕著な変化と2点で有義波を越す大きな波浪が解析されたことに注意したい。

4.3 波の屈折

深海波が水深の浅い海に入ると屈折現象がおきる。富山湾の湾奥部は、海岸線は単調でも海底地形は複雑であり、陸棚を刻む多数の海谷が波浪を変形させるとの指摘がある。新湊市海老江沖は顕著なく寄り回り波〉が発生する場所のひとつであるが、屈折図を作成して検討した結

表2 スペクトル解析による波長, 波向

海域	新湊沖		新湊沿岸				滑川沖
	1	2	3	4	5	6	
番号	1	2	3	4	5	6	7
波長	187m	267m	160m	144m	153m	187m	229m
波向	40°	38°	57°	11°	57°	38°	15°

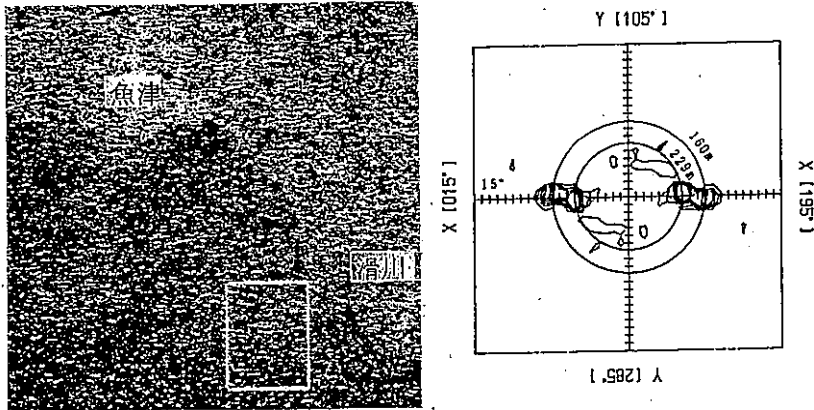


図6 ERS-1のSARスペクトル (滑川沖)

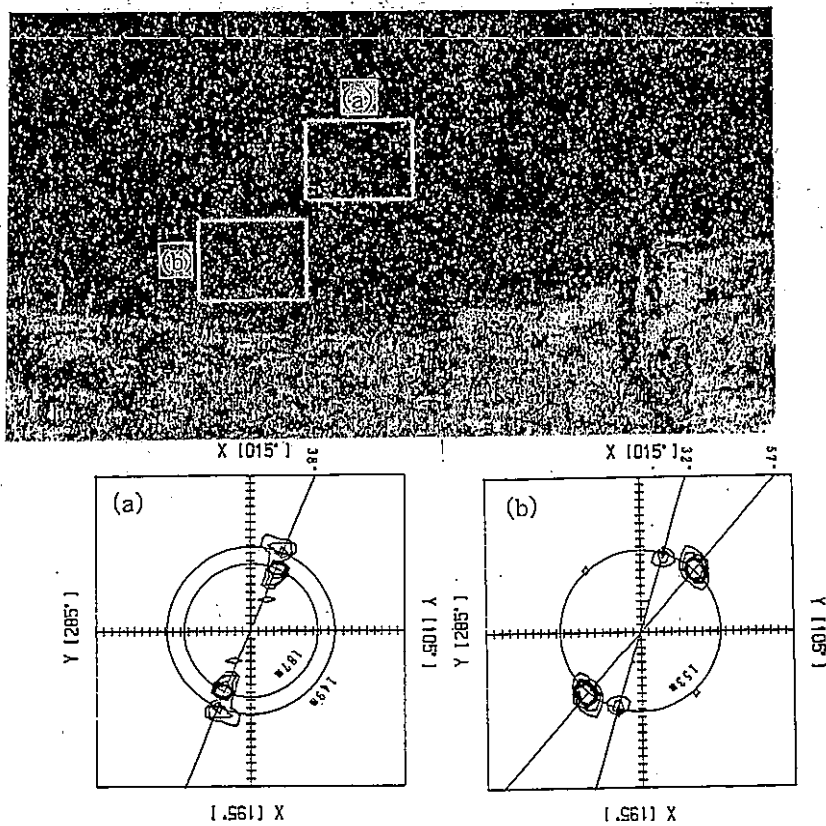


図7 ERS-1のSARスペクトル (新湊市海老江沖)

—波は(a)から(b)に進行、波線の方向19度変化—

果周期10秒の波が北北東から進入してくる場合、四方海谷南東部に波線が収束する（磯崎、1971）。海老江沖のSAR画像（図4）の上に矢印で示した海域で波峰線が方向を変えているのが認められるが、この場所が上記の波線収束域に良く対応している。図7の方向スペクトルから判断すると波向きは角度にして19度変化している。

5 おわりに

今回の検証実験では高波高出現地として知られる入善海岸、滑川海岸の波浪が把握できなかった。海上照合実験においてはさざなみあるいは短周期の重力-表面張力波の測定を実施すべきであった。

合成開口レーダの海洋波浪映像化メカニズムについては何も議論していないので画像判読について思わぬ勘違いをしているかもしれない。しかし、SAR画像が風の弱い海面のうねりについて妥当な映像を取得したことは間違いなく、したがって今度の〈寄り回り波〉SAR画像は貴重な記録となって残るだろう。

6 謝辞

海上同期実験は富山商船高等専門学校練習船「若潮丸」と富山県水産試験場調査船「はやつき」を動員して実施された。大きくうねる海域で30時間の気象・海象観測に協力された船長はじめ乗組員、富山商船高等専門学校の教官、技官および卒業研究学生の諸氏に心から感謝申し上げます。金沢工業大学川田剛之教授には穴水自然学苑の風資料を提供していただいた。厚く御礼申し上げます。

7 参考文献

- 1 日本海海難防止協会、日本海中部主要港湾における船舶交通安全対策に関する調査研究報告書（伏木港）、1993
- 2 北出正清、「寄り廻り」波の機巧と予知、中央気象台海洋報告、第2巻、第4号、419-445、1952
- 3 磯崎一郎、富山湾の沿岸波浪の特性（第1報）、防災科学技術総合研究報告、第25号、3-15、1971
- 4 土屋義人、山口正隆、平口博丸、日本海における季節風時の波浪予知(2)、京都大学防災研究所年報、第26号B-2、599-635、1983
- 5 吉田清三、上空より見た「寄り回り波」について、中部日本海海難防止協会会報、第20号、5-19、1982
- 6 石森繁樹、寄り回り波、日本気象学会中部支部だより、第16号、2-5、1983

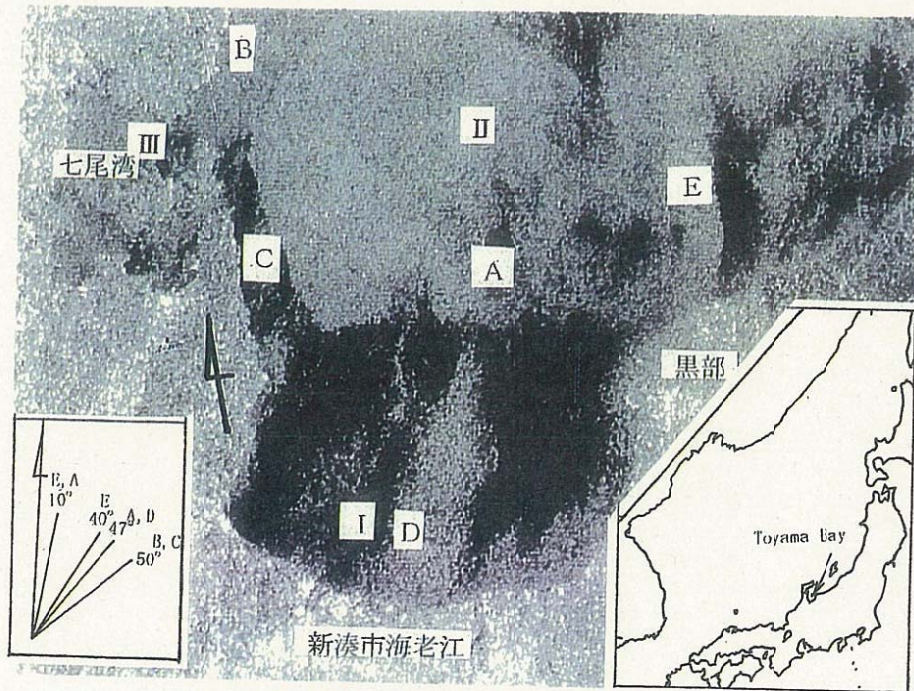


Fig.1 ERS-1 SAR image of Toyama Bay,
showing direction at points A-E
in boxed area left below.
(Mar. 18, 1993)



Fig.2 Sea state around the test site and
T/S Wakashiomaru off the mouth of
Zinzu River. Mar. 18, 1993

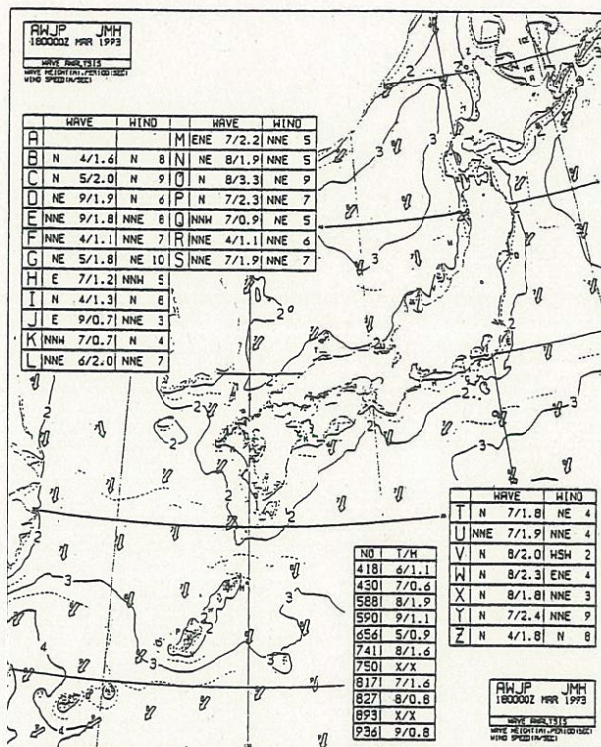


Fig.3 Ocean wave analysis chart
(JMA, 1993 3 18 09JST)

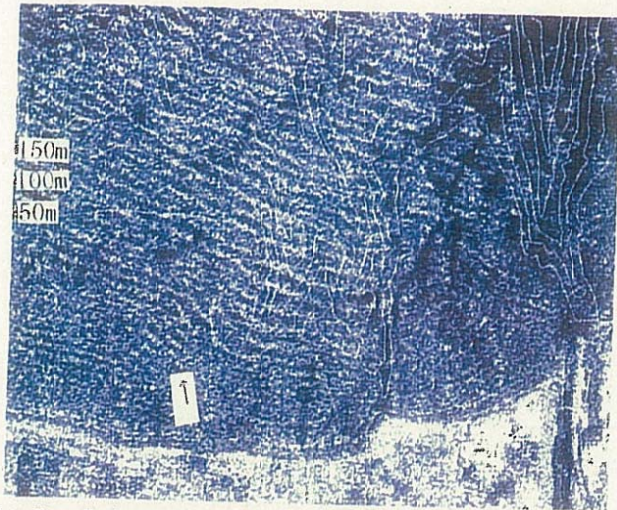


Fig.5 Enlarged section, showing wave refraction (off Ebie, Shinminato coast)

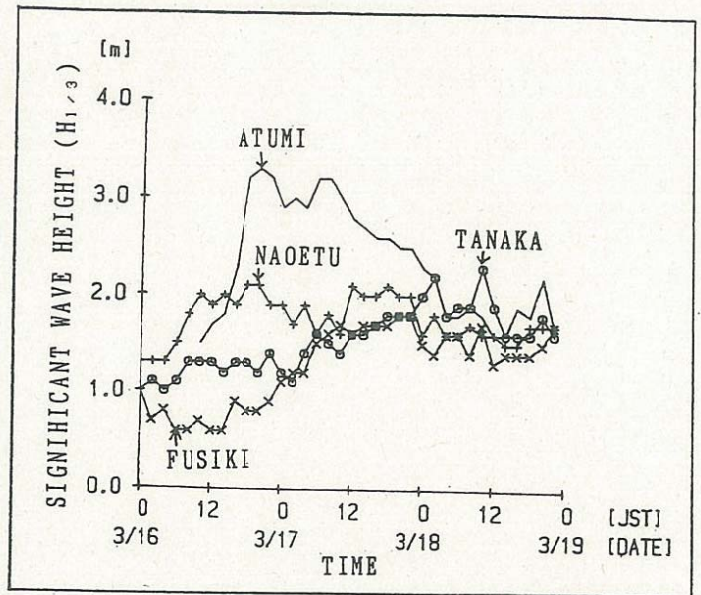


Fig.4 Time series of wave height along the Japan Sea (Mar. 16-19, 1993)

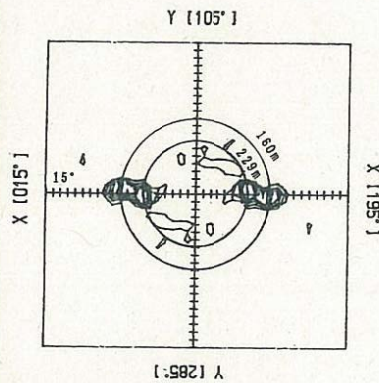
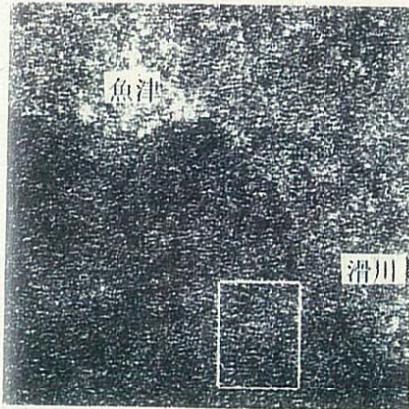


Fig.6 Wave spectra, off Namerikawa coast

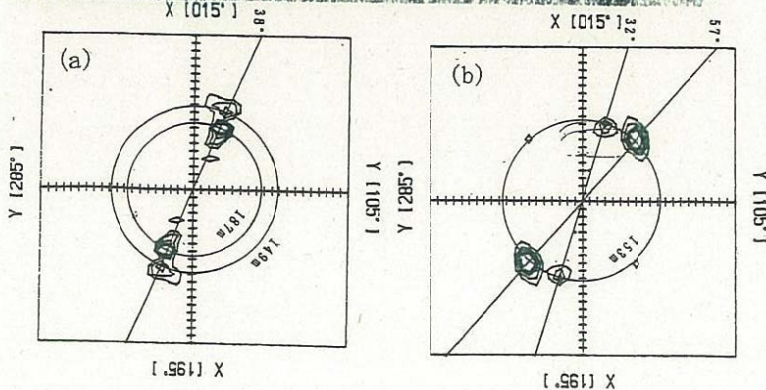
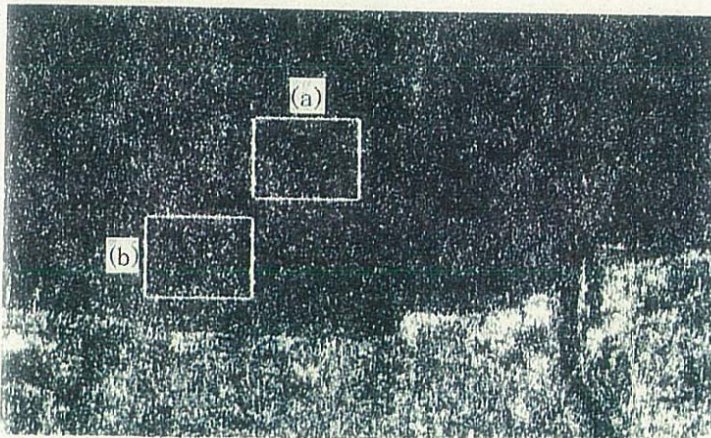


Fig.7 Wave spectra, off Ebie coast. Swells proceeding from (a) to (b)

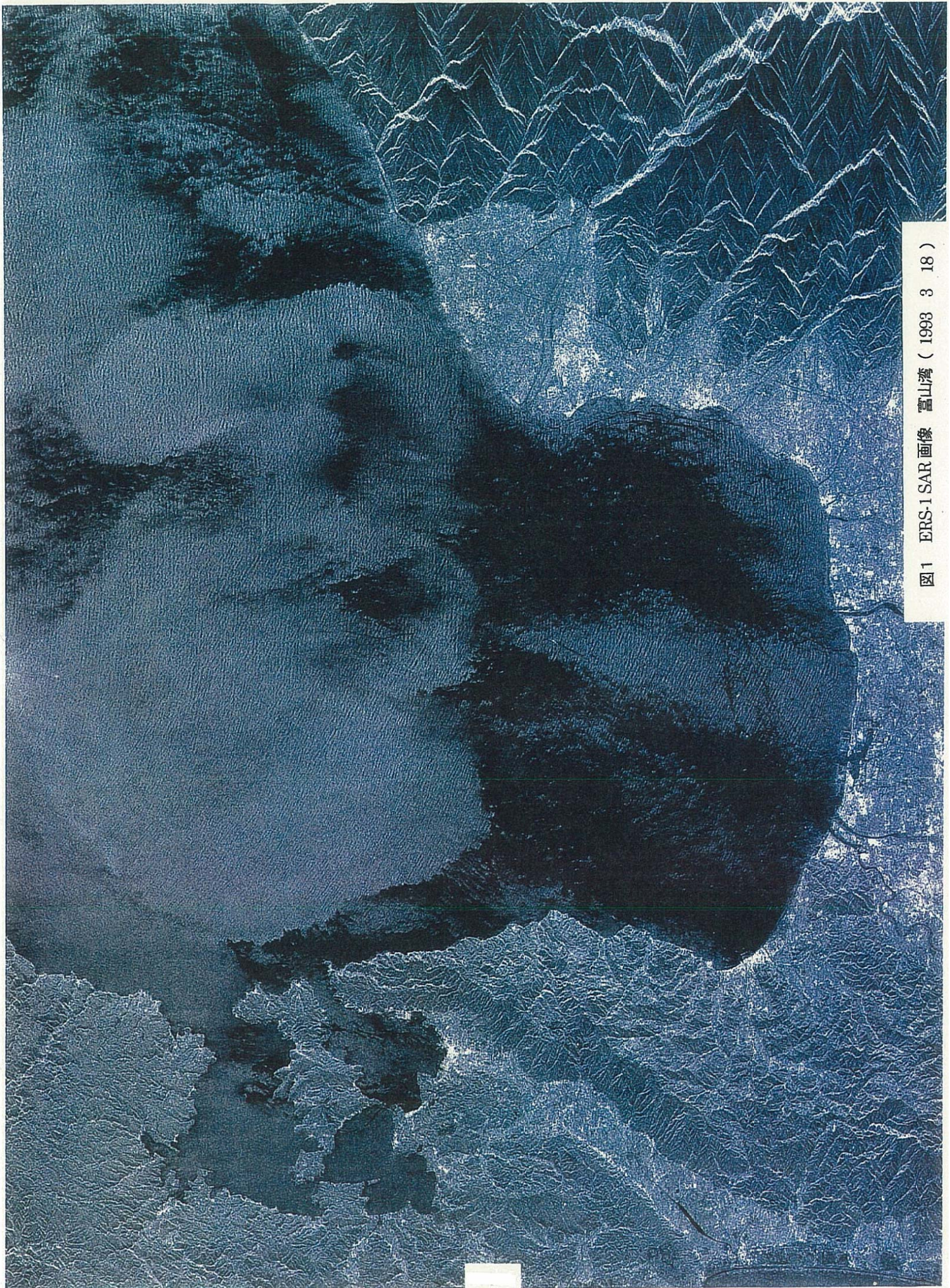


图1 ERS-1 SAR 图像 富山湾 (1993 3 18)

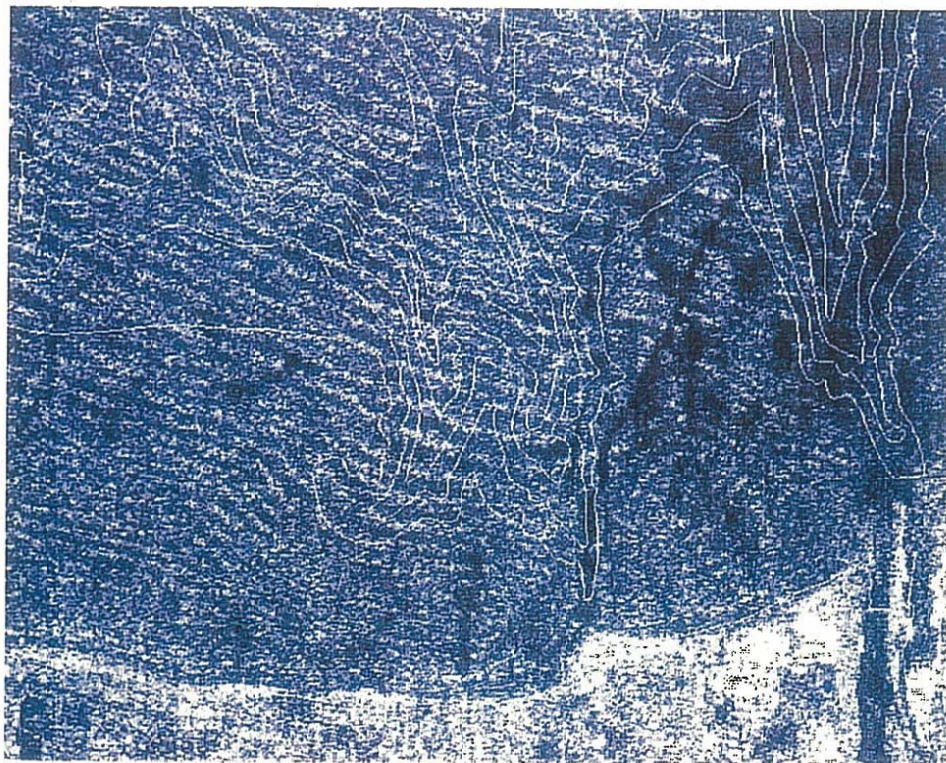


図2 ERS-1 SAR 画像 新湊沖
白線は等深線 (1993 3 18)