

富山湾の沿岸波浪の特性

(第2報)

磯崎一郎
気象庁気象研究所

太田芳夫
富山地方気象台

On the Characteristics of Coastal Waves on the Coast of Toyama Bay (Report II)

By

Ichiro Isozaki

Meteorological Research Institute, Tokyo

and

Yoshio Ohta

Toyama Local Meteorological Observatory

Abstract

Climatological and synoptic characteristics of the coastal waves in Toyama Bay are investigated by analysing the meteorological observations and weather charts relating to the wave condition.

Dominant waves in the bay are classified into two types; waves of the first type are caused by strong winds around the bay, and those of the second type are the swells which are caused by northeasterly strong winds over the northern part of the Japan Sea and propagate southwestward to Toyama Bay. The latter is the so-called "yorimawari" waves.

These two kinds of waves have respectively distinct natures, and it may be able to forecast the generation of these waves qualitatively at least by the synoptic analysis of weather charts.

A numerical wave prediction model was applied to the waves from Feb. 22 to 24 in 1966. The computed wave heights agree fairly well with the observation.

1. はしがき

前回の報告(磯崎, 1971)では昭和41年2月22~24日の波浪の性質をスペクトル解析によって調べ, 明らかに風波と見なされるものと, うねり性のいわゆる"より回り波"といわれるものの存在を確認した。また富山湾沿岸は一見単調な海岸線を持ちながら沿岸波浪の特徴が局所的にかなり異なることが過去の波浪害の事例からうかがえる。これは富山湾の海底に数多くの洋谷が存在するため, 外海から侵入する波が複雑に屈折して波線が局所的に収れんする場所と発散する場所が

できるためであろう。このことを波浪屈折図を作成することによって明らかにした。

引き続き, 富山湾の沿岸波浪の一般的性質を明らかにすることと, さらに近年著しく進歩した波浪数値計算技術を用いて湾内波浪を数値的に再現する試みがなされた。前者は太田芳夫の指導のもとに富山地方気象台においてなされ, その成果は「富山湾の波浪の総観解析」(昭和46年3月)として刊行された。その内容は次の通りである。

第1章富山湾の波浪の統計的調査(1) 加藤進一
第2章富山湾の波浪の統計的調査(2) 加藤進一

第3章 伏木・新湊の風波について 日原達彦
 第4章 富山湾の高波に関する

Case Study 吉田忠孝

第5章 富山湾の浪害とその予想について 舟田久之
 第6章 いわゆる“より回り波”の天気図
 パターンと波高計算について 佐藤正夫

第7章 波浪と脈動の関係について 森田 茂

第8章 富山湾の波浪と脈動について 権藤光宏
 また波浪の数値計算の試行については磯崎一郎
 と宇治豪が担当したが、その詳細は別途刊行の予
 定である。この報告では以上に述べた研究を概説
 するが、詳細は原著を参照されたい。

2. 富山湾の波浪の統計的性質

富山湾の沿岸では運輸省第一港湾建設局、建設省北陸地方建設局、日本海石油株式会社などによって波浪観測が実施されており海老江、新湊、四方、北陸、田中の5ヶ所の海岸での波浪観測資料が存在する。これらのうち比較的資料が充実しているのは建設省北陸地方建設局が管理している田中海岸、および運輸省第一港湾建設局が管理している新湊海岸の波浪記録である。それで両建設局の御厚意によって資料の提供を受け、これら2地点の波浪の統計的調査を行なった。用いた資料の期間は昭和38年から昭和43年までの6年間である。なお、観測地点は図1に示すように、田中海岸は富山湾の外側の黒部川の河口付近にあり、

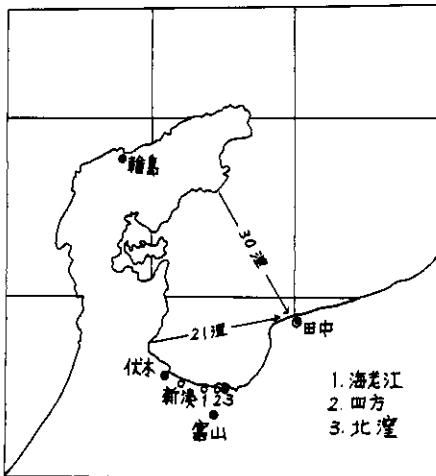


図1 富山湾の海岸線と観測所位置

新湊は湾奥に位置している。

2.1 波高の特性

表1と表2はそれぞれ田中海岸および新湊海岸における波高の頻度分布を示す。また図2には両海岸で波高が0.5 m未満、1.1 m以上および3.1 m以上になる出現度を月別に示した。ここで波高

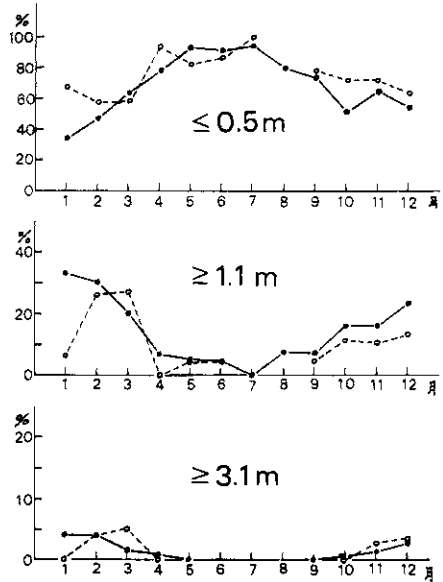


図2 各月について波高が $\leq 0.5\text{ m}$ 、 $\geq 1.1\text{ m}$ 、および $\geq 3.1\text{ m}$ になる日数の割合。
 ———は田中 ---○---は新湊である。

とは波浪記録紙上での見かけの波から読みとった有義波高のことである。これらの図と表によると、5～7月の期間では全日数のうちほぼ90%程度が波高0.5 m以下である。また12～3月の冬期間には全日数の20%以上が波高1.1 m以上となっている。

富山湾の波浪は、冬期低気圧が通過後大陸から吹き出す北西の季節風によって発達するものと、本州の南岸を通過する低気圧や台風北上などに伴う北東の強風によって発達するものとに分けられる。前者の場合は1月に最も多く、田中海岸で高波が発達するが新湊ではあまり高くない。後者の場合は2、3月に多く、田中よりも新湊の方で波が高くなる傾向がみられる。

4.1 m以上の高波はこの統計期間中に田中で6回、新湊で2回起っている。湾内の新湊よりも外

表1 田中海岸月別波高出現度数表

()内は百分率

区分	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
0.5m以下		(34.2)	(45.8)	(62.5)	(77.5)	(93.2)	(91.0)	(93.5)	(79.1)	(72.7)	(50.8)	(63.5)	(53.6)	(62.3)
		89	49	75	93	83	81	29	72	40	62	94	97	844
0.6~1.0		(32.7)	(24.3)	(17.5)	(15.8)	(2.2)	(4.5)	(6.5)	(13.2)	(20.0)	(33.6)	(20.3)	(22.7)	(20.3)
		66	26	21	19	2	4	2	12	11	41	30	41	275
1.1~1.5		(14.4)	(16.8)	(10.8)	(2.5)	(2.2)	(1.1)		(5.5)	(5.5)	(8.1)	(10.8)	(8.8)	(8.8)
		29	18	13	3	2	1		5	3	10	16	16	116
1.6~2.0		(8.9)	(4.7)	(3.3)	(2.5)	(1.1)	(1.1)		(1.1)		(4.9)	(2.7)	(5.0)	(3.9)
		18	5	4	3	1	1		1	0	6	4	9	52
2.1~2.5		(4.0)	(3.7)	(2.5)	(0.8)		(2.2)		(1.1)	(1.8)	(1.6)	(1.4)	(4.4)	(2.4)
		8	4	3	1	0	2		1	1	2	2	8	32
2.6~3.0		(2.0)	(0.9)	(1.7)		(1.1)							(2.8)	(1.0)
		4	1	2	0	1					0	0	5	18
3.1~3.5		(2.0)	(0.9)	(1.7)							(0.8)	(0.7)	(1.1)	(0.8)
		4	1	2	0						1	1	2	11
3.6~4.0		(1.0)	(1.9)									(0.7)	(0.6)	(0.4)
		2	2		0							1	1	6
4.1~4.5		(0.5)	(0.9)											(0.1)
		1	1		0								0	2
4.6~5.0		(0.5)			(0.8)								(1.1)	(0.3)
		1			1								2	4
5.1~5.5														
5.6以上														
計		(100.2)	(99.9)	(100.0)	(99.9)	(99.8)	(99.9)	(100.0)	(100.0)	(100.0)	(99.8)	(100.0)	(100.1)	(100.1)
		202	107	120	120	89	89	31	91	55	122	148	181	1355

表2 新湊港月別波高出現度数表

()内は百分率

区分	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
0.5m以下		(66.7)	(56.6)	(58.3)	(92.9)	(81.5)	(86.0)	(100.0)		(78.0)	(72.4)	(72.3)	(64.3)	(71.9)
		40	43	85	26	44	48	31		46	63	81	74	526
0.6~1.0		(26.7)	(17.1)	(15.0)	(7.1)	(14.8)	(10.0)			(16.9)	(16.1)	(17.0)	(21.7)	(16.5)
		16	13	9	2	8	5			10	14	19	25	121
1.1~1.5		(5.0)	(14.5)	(11.7)			(4.0)			(5.1)	(5.7)	(3.6)	(6.1)	(5.7)
		3	11	7		0	2			3	5	4	7	42
1.6~2.0		(1.7)	(1.3)	(3.3)		(3.7)					(3.4)	(1.8)	(1.7)	(1.8)
		1	1	2		2					3	2	2	13
2.1~2.5			(2.6)	(6.7)							(2.3)	(2.7)	(1.7)	(1.8)
			2	4							2	3	2	13
2.6~3.0			(3.9)										(0.9)	(0.5)
			3	0								0	1	4
3.1~3.5			(1.3)	(3.3)								(1.8)	(0.9)	(0.8)
			1	2								2	1	6
3.6~4.0			(2.6)									(0.9)	(1.7)	(0.7)
			2	0								1	2	5
4.1~4.5				(1.7)									(0.9)	(0.3)
				1									1	2
4.6~5.0														
5.1~5.5														
5.6以上														
計		(100.0)	(99.9)	(100.0)	(100.0)	(100.0)	(100.0)	(100.0)		(100.0)	(99.9)	(100.1)	(99.9)	(100.0)
		60	76	60	28	54	50	31		59	87	112	115	732

側の田中の方が波が高いことがうかがえる。なお両海岸とも5.1m以上の高波は起っていない。両海岸の波浪計の受感部はいずれも水深が10m前後の所に設置されているので、海底地形の効果を著しく受け、外海からやってくる大波は砕けてしまうからあまり大きな波が観測されないのである。

2.2 周期の特性

有義波高が1.1m以上、2.1m以上および3.1m以上の場合の有義周期の出現頻度を図3に示す。

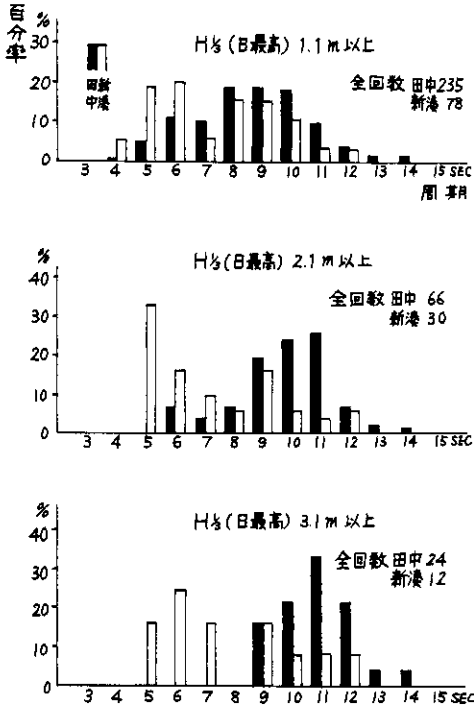


図3 波高別周期出現度

この図によると、田中海岸では出現度数分布の形が割合に単調で、最多出現度の周期のまわりでほぼ正規分布をしている。最多出現度の周期は波高が高くなるほど長くなる傾向がある。すなわち、1.1m以上の波高の波についてみると8~9秒の周期の波が最も多く、2.1m以上の波では10~11秒、3.1m以上の波では11秒の波が最も多い。

一方、新湊の場合の分布は複雑であって、最多出現度数の周期が5~6秒であるような群と、約9秒であるような群とが重なっているかのように見える。おそらく、前者は湾内の強風によって起

る高波に伴うものであり、後者は外海で発達した高波が湾内に侵入した場合に現われるものである。

なお、周期の出現範囲は田中海岸では4~15秒、新湊では4~12秒で、一般に田中の方が長い。

2.3 風向と高波の関係

観測点における風の風向別に波高の出現回数をとったものを表3に示す。また、図4には風向がWSW~NW, NNW~E, ESE~SWの家限にある場合および静穏の場合についての高波の出現回数を示してある。この図で波高区分3, 4,

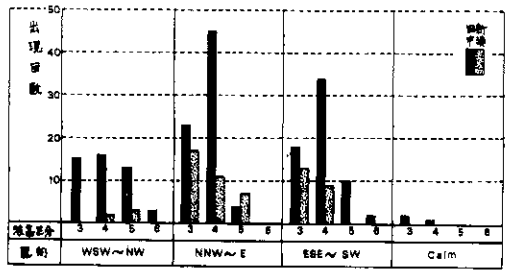


図4 風向別波高出現回数(昭和39~43年)

波高区分3: 1.00~1.25m
 4: 1.26~2.50m
 5: 2.51~4.00m
 6: 4.01m

5および6はそれぞれ波高が1.00~1.25m, 1.26~2.50m, 2.51~4.00m, および4.01m以下の範囲にあるものをあらわす。

図4の中で、WSW~NWの家限の風は冬期の季節風が卓越する場合に多い。この場合には田中では高波の発生回数はかなり多いが、新湊の場合には発生回数が非常に少ない。

風向がNNW~Eの家限にある時には田中、新湊とも高波の発生回数が最も多い。この家限の平均風向は北東ないし北北東であって富山湾の波の発達に対しては最も効果的な風向である。

風向がESE~SWの家限にある場合の高波も、両海岸ともかなり多い。これは冬期の季節風の末期に富山湾沿岸が弱い南寄りの風になった時に起る高波で、その典型的なものが“より回り波”である。静穏の場合の高波もこの部類に属すると考えられる。したがってこの部類の波は局地の風によって起るのではなくて、遠い外海で起ったも

表3 風向別波浪出現度数表

田中-田中, ()内新湊-新湊

H _{1/3} \ T _{1/3}	1.00~1.25m				1.26~2.5m				2.51~4m				4.01m _≧				Total
	<8	8.0~9.9	10.0~11.9	12.0 _≧	<8	8.0~9.9	10.0~11.9	12.0 _≧	<8	8.0~9.9	10.0~11.9	12.0 _≧	<8	8.0~9.9	10.0~11.9	12.0 _≧	
NNW	<5m	(1)	(3)			1	4	2									(5)
	5~10	1	2			4	4			(1)							(2)
	11 _≧	3				3	5										(1)
NNE	<5	(4)	(1)	(2)		3	3					1					(10)
	5~10	(2)	3	1		(1)	(2)	3		(2)							(7)
	11 _≧	(1)	1			2	(1)	1		1							(2)
NE	<5	1	2	(2)		1	1										(2)
	5~10	2	(1)			2		1		(2)	(1)						(4)
	11 _≧	1				(1)				(1)							(2)
E	<5	(3)					2	2				2					(3)
	5~10					1	1										6
	11 _≧																2
ESE	<5	2	3			(3)	3	5			1						(3)
	5~10						1	1	1	1							15
	11 _≧																4
SSE	<5	(1)	(5)	(3)		1	4	3			2	1					(15)
	5~10	1	(1)	2			3	4	2	1		1		1	1		(2)
	11 _≧		1							1							19
SW	<5						3	(1)		(1)	(2)						(4)
	5~10	2	1			1		1			3			1	1		9
	11 _≧	3		1			2	1				1			1		10
WSW	<5	1					1	(1)									(1)
	5~10		2	1		3	1			1	2						2
	11 _≧		1			1		1		1	2						10
W	<5m	1					1	(1)									(1)
	5~10		2	1		3	1			1	2						2
	11 _≧		1			1		1		1	2						10
WNW	<5																
	5~10		2	1		3	1			1	2						6
	11 _≧		1			1		1		1	2						6
Cal'm	<5	2					1										3
	5~10																
	11 _≧																
Total	<5	(12)	(13)	(5)		(8)	(10)	(4)		(5)	(8)	(2)					(62)
	5~10	26	26	6		27	39	26	4	1	8	15	3		2	3	186
	11 _≧																

注 資料 昭和39年~昭和43年の日最大有義波高1.0m以上

欠測 田中 43年1月~6月

新湊 39年3月~8月, 40年4月~41年8月, 42年8月~9月

11月~43年3月

のがうねりとして伝搬してくるのであろう。それで周期も10秒以上のことが多い。

3. 富山湾の浪害とその予想

富山湾の沿岸では高波によって海岸の浸食、護岸防波堤の欠壊、田畑・家屋の流失や浸水、船舶の遭難や破損、それらによる尊い人命の損失など毎年のように浪害が発生している。この浪害の原因である高波の一種に占くから“より回り”と名付けられている波があり、これの発生機構についてはすでに北出(1952)がSverdrup and Munk(1947)の方法によって論じている。しかし当時はまだ器械による波浪観測が行なわれていなかったので十分な検証がなされなかった。

ここでは昭和38年から昭和45年までに発生した富山湾の浪害を富山県気象月表や防災実施状況報告より抜き出し、この時の波浪と気象との関係を総論的に解析して、浪害の予想の可能性について論ずる。

3.1 富山県の浪害と気圧配置型

上記の8年間に浪害は11回発生している。地上天気図および県内の風資料を用いて波を原因別に調べると、浪害は“より回り波”によるもの、富山湾およびその近海の北東強風の風波によるもの、“より回り波”と北西強風の風波との合成によるもの、の3つに分けられる。これらの発生回数はそれぞれ7回、3回、および1回である。

次に波の種類別に浪害の発生状況と天気図の型との関係について例を示す。

(イ) より回り波(昭和38年1月7~8日)

7日夕刻から富山湾沿岸一帯に高波がおそい新湊・海老江・掘岡で家屋の倒壊19棟、浸水家屋166戸、負傷者14名、また入善地区海岸では護岸堤防が破損、その他の被害があった。図5は1月6日21時の地上天気図で、低気圧が三陸沖と能登沖にあって二つ玉型を示していた。この頃に北海道の西側海上では北東の強風が続き、そこで発生した高波がうねりとなって約24時間かかって7日に富山湾まで伝搬し沿岸に被害を与えた。高波が起っている時富山湾沿岸一帯で風が弱いのが特徴的である。

(ロ) 北東強風の風波(昭和42年10月27~28日)

27日夜から28日朝まで北東の暴風となり、海岸の魚津・滑川・岩瀬・氷見の各地で風波によ

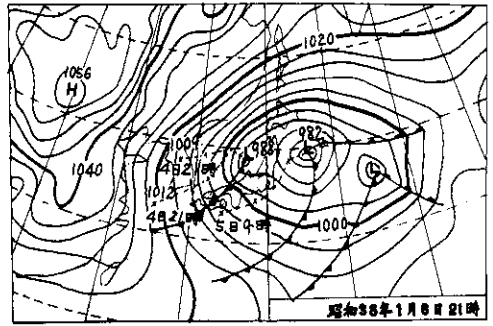


図5 昭和38年1月6日21時の天気図

る浪害や家屋の浸水が発生した。また28日2時頃東部沿岸で漁民1人が転落して行方不明、新湊でも波によって2人が行方不明となった。28日9時の天気図を図6に示す。台風34号は27日

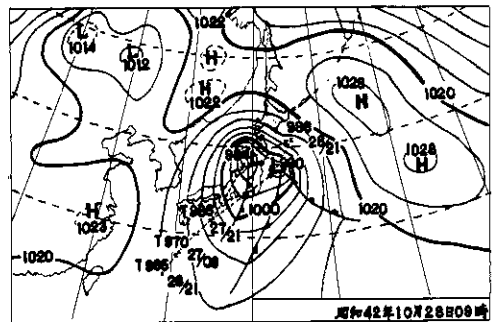


図6 昭和42年10月28日09時の天気図

夜紀伊半島に上陸、その頃から富山湾で北東風が次第に強まり台風接近とともに夜半すぎに暴風雨となった。最大風速は富山でNNE 23.7 m/s (28日3時)、伏木で17.8 m/s (28日2時40分)。この北東の暴風によって風波が高まり被害が発生した。

(ハ) より回り波と北西強風の合成(昭和45年1月31日~2月3日)

昭和45年1月低気圧により31日10時頃から東部海岸で風波が高くなり14時頃から堤防や護岸を乗り越えて被害が発生した。その最盛期は2月1日3~4時頃であった。入善町や滑川市では高波が防波堤を乗り越えて民家をおそい重傷4名、軽傷14名、全壊1戸、半壊8戸、床上浸水85、床下浸水126、非住家167その他海岸

堤防, 漁港, 船舶などに大被害があった。

1月31日21時の天気図を図7に示す。発達

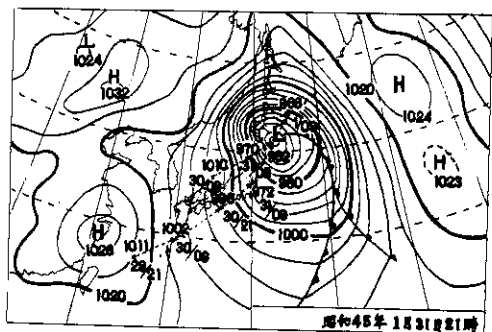


図7 昭和45年1月31日21時の天気図

した二つ玉の低気圧が本州をはさんで西日本から北東に進み, 31日には低気圧の後面で季節風が強まり, これによって湾の東部海岸で著しく風波が高まった。一方, 北海道の西側海上では北東風が強く, ここで発生したうねりが富山湾に侵入し, 前記の北西の風波に引続いて“より回り波”が起り, 長期間にわたって高波が続いた。

3.2 浪害を起す波の予想について

浪害の起った11例について有義波高のシーケンスを作り, また富山から北方で日本海側の海に近い気象官署の観測から風向・風速のシーケンスを作つて風と波を対応させた。これら11例の解析によると, 有義波高が2.5 m位になると浪害が発生しはじめ, 4.0 mを越えるようになると被害が大きくなるようである。

つぎに, これら11例の風と波のシーケンスからPNJ法によって波浪の総観解析を行なったが, その1例として昭和38年1月7日の場合を示す。図8はこの場合のシーケンスであるが, 7日17時30分に新湊で波高4.18m, 周期11.6秒の有義波を観測している。より回り波は富山湾が北東方向に開いているので日本海の北東部の海上で発生した波が伝はんしてくるものと考えられる。新湊で観測した波周期から波の伝はんを逆算すると, 図8の風のシーケンスの中で波形線で示したように6時間前には佐渡の相川付近, 12時間前には秋田沖, 18時間前には深浦の沖, 24時間前には北海道奥尻島の西側海上にあったことになる。より回り波が到達した約24時間前の1月6日21時の天気図(図5)では, 気圧配置は二つ玉

低気圧型で北海道の西側海上から間宮海峡方面にかけて強い北東風が吹いている。この北東風によって起つたうねりが約24時間かかって富山湾まで伝搬してきたものと考えられる。図8の中で留萌の風が弱いのは地形の影響によるものと思われる。おそらく海上では留萌の沖付近から北の水域で北ないし北東の強風が吹いていたのであろう。

その他の事例解析をも参照してみると, より回り波は稚内・函館・寿都・深浦などにおける北東強風の強さと吹続時間をは握ることによりほぼ予報ができそうである。しかも強風の実況を観測してから約24時間後に高波が起るのであるから予報はきわめて有効である。

富山湾およびその近海における北東強風によって起る波は強風の予報そのものがきわめて大切な要素となる。低気圧や台風の移動の予報に伴って, 定性的には強風と高波の予報は可能であるが, 信頼できる量的な予報については将来の開発にまたねばならない。

4. より回り波の代表的天気図型と波高計算について

4.1 顕著なより回り波を起す天気図型

前節でのべたようにいわゆる“より回り波”は富山湾の浪害の大きな原因の1つとなっている。その本質は北海道西側海上から間宮海峡方面にかけての海域における北ないし北東の強風によって起つた波がうねりとして伝搬するものであるらしいことはすでに示したとおりである。富山湾内でより回り波でかなりの被害が生じた際の約12時間前の天気図を検討すると, いずれも顕著な冬型気圧配置であつて北海道あるいはその東方洋上に非常に発達した低気圧が存在することである。しかも少くとも12時間以上この型が継続していなければならない。とくに間宮海峡から北海道西側海上にかけては北から北東の非常に急な気圧傾度の場が形成されている。

上にのべたような性質をもつ典型的な天気図としては昭和30年1月10日21時, 同年2月20日21時, 昭和38年1月7日9時, 昭和45年2月1日9時の4例があるが, これらを合成して平均したものを図9に示す。この図から判断すると富山湾の高波に寄与する強風海域は我々が考えていたよりかなり高緯度まで拡がっているようである。また風場は北緯42度付近を境界と

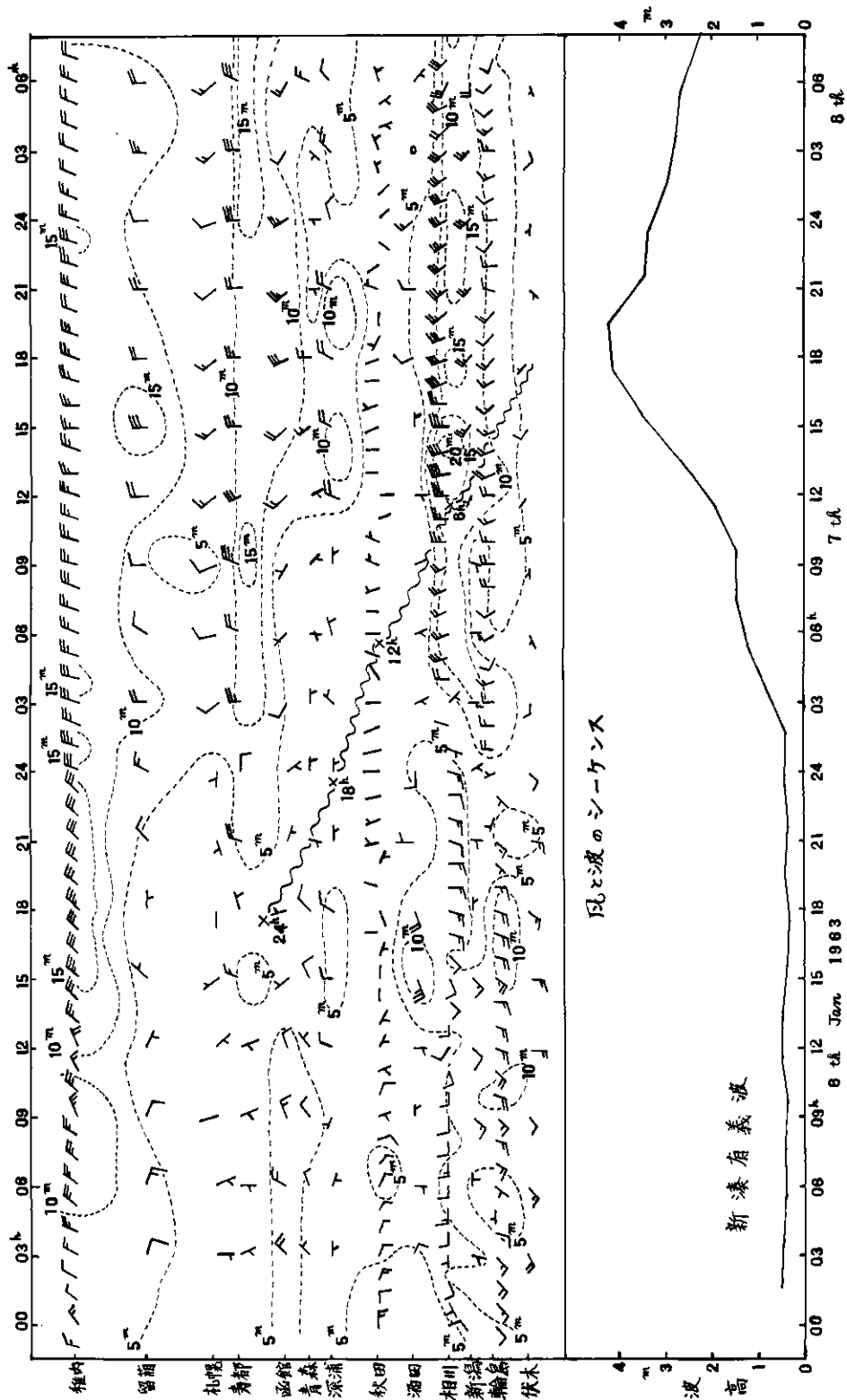


図8 風と波のシークエンス (昭和38年1月6~7日)

して風向風速ともはつきり変化するので、富山湾に侵入してくる波を考える時にはこの境界より北側に注目すればよい。

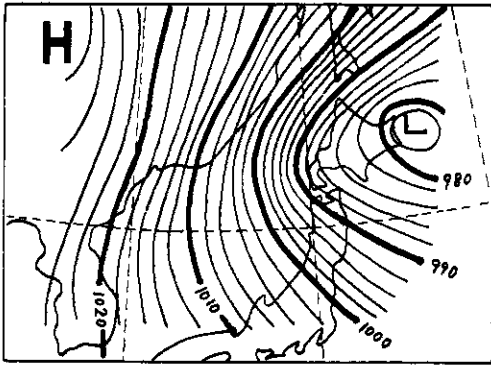


図9 より回り波が発生する代表的天気図型

4.2 富山湾の高波の周期と天気図型

富山湾で高波が発生した場合の天気図型を波周期を用いて分類すると、上にのべたより回り波が起る天気図型の場合と、本州南岸を低気圧や台風が通過することによって富山湾周辺で北東風が強まるような天気図型の場合に分けられる。

前者の天気図型の例として昭和40年12月31日の高波を示そう。図10には31日9時の天気図が示してあるが、これは図9のより回り波の代表的天気図と非常によく似ている。この時の

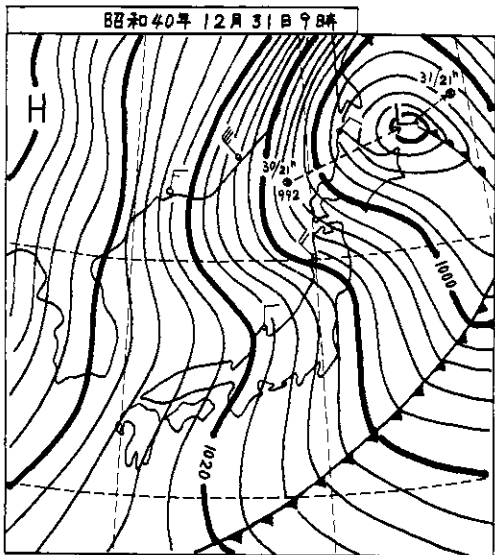


図10 昭和40年12月31日9時の天気図

有義波高および有義周期の時間変化を図11に示す。これによると波高が2 m以上の期間は約3日におよんでおり、またこの期間中波周期は12~13秒であった。

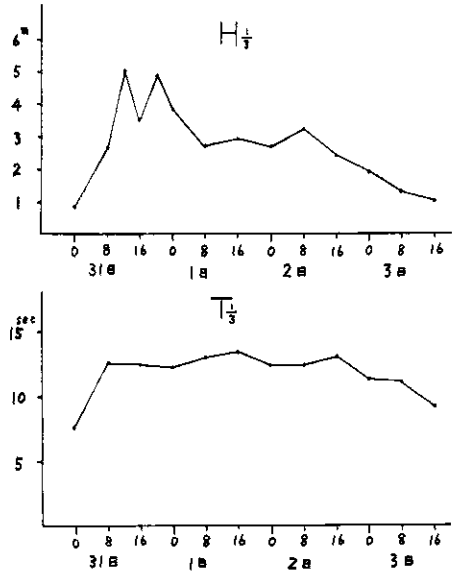


図11 昭和40年12月31日~41年1月30日の海老江の波高と周期

後者の南岸低気圧の例として昭和38年3月12日の場合を示す。12日9時の天気図が図12に示されているが、これによると日本海南部で北東風が強く北部では弱い。この時の有義波高および有義周期の時間変化を図13に示す。これによると波高2 m以上の期間は約1.5時間であり、また波周期は5~6秒で短かいフェッチで形成された風波であることを示している。このように、富山湾で発生する高波は波周期の立場からも明らかに2種類に区別できる。

4.3 簡便な波高推定法

波高を数値的に見積る方法は電子計算機の使用が比較的容易になったことから近年著しい進歩をとげつつある。その一つの試みについては後節でのべるが、ここでは現場で簡単に波高を推定することを考える。

今まで述べてきたように、富山湾の高波は特異な気圧配置のもとで起っておりまた地形的な制約

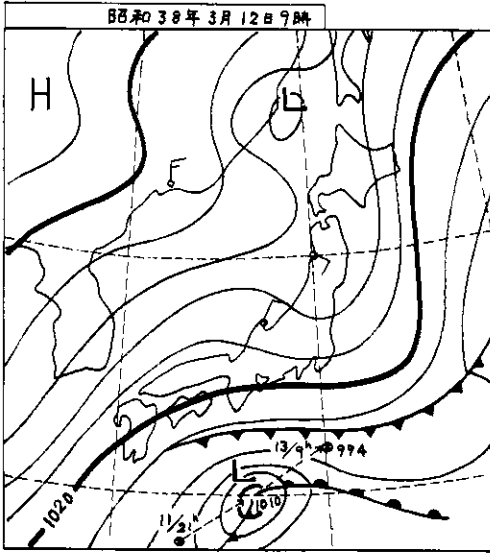


図12 昭和38年3月12日09時の天気図

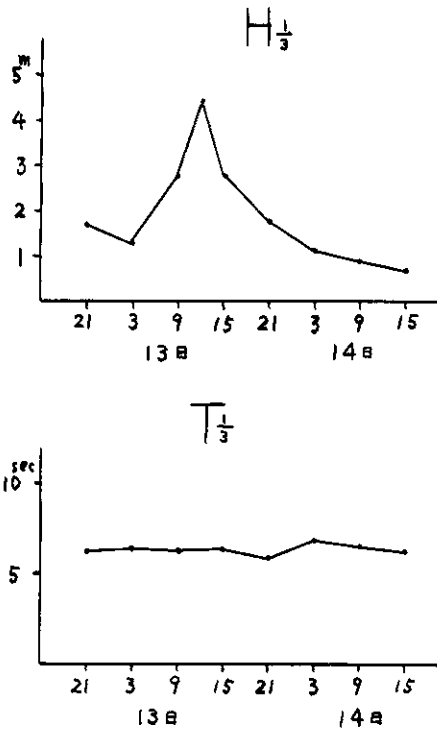


図18 昭和38年3月13日~14日の新湊の波高と周期

もはっきりしているので大雑把な波の推定のためにはかなり大胆な仮定がゆるされるであろう。ここではまづ、今までの解析にもとづいてフェッチを図14に示すようなA, B両区域に分け、それぞれの区域上で風が斉一であると仮定する。Aは

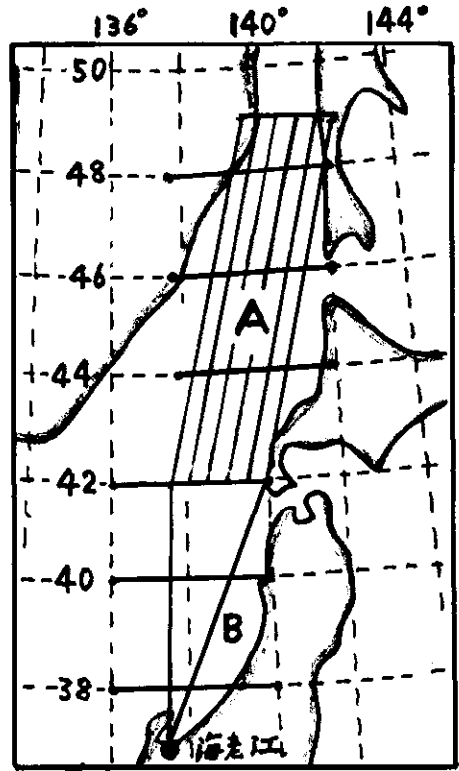


図14 A, Bフェッチの区分および各フェッチの平均気圧傾度を求めるための緯度3°幅(830km)の測定位置

より回り波を起すフェッチ、Bは北東の風波を起すフェッチである。このようにフェッチを固定して、風速別、吹続時間別に波高・周期・伝搬時間をあらかじめ求めておく。フェッチAについて計算したのが表4である。

フェッチ内の平均風は平均の気圧傾度から求める。さて富山湾の高波は北の成分の風によって起るとする。それで等圧線の走向と緯度線のなす角を α としたとき、求められた平均気圧傾度に $\cos \alpha$ を乗ずる。実際には等圧線の走向と風向とは或る角度をなしている。それでここではこれを 20° として、平均気圧傾度に $\cos(\alpha+20^\circ)$ を掛ける

表4 Aフェッチよりのうねり伝ばん計算表
 予報時間を6時間とし、その時間に存在する周期範囲T₁~T₂、T₂~T₃、T₃~T₄をそれぞれT₁、T₂、T₃であらわす。

吹続時間 平均風速	12時間			18時間			24時間			30時間		
	周期(秒)	到達時間	0.22△E	周期(秒)	到達時間	0.22△E	周期(秒)	到達時間	0.22△E	周期(秒)	到達時間	0.22△E
m ノット 15 (30)	T ₁ 8.3	24.0	1.5	T ₁ 11.2	18.0	4.0	T ₁ 16.8	12.0	5.3	T ₁ 16.8	12.0	5.3
16 (32)	T ₁ 7.7	26.0	2.2	T ₁ 10.0	19.0	4.6	T ₁ 15.1	13.0	6.4	T ₁ 17.4	11.5	7.7
17 (34)	T ₁ 8.1	24.5	2.2	T ₁ 10.0	19.6	4.8	T ₁ 13.7	15.0	9.9	T ₁ 18.2	11.0	10.6
18 (36)	T ₁ 8.2	24.0	2.6	T ₁ 9.7	20.0	5.5	T ₂ 9.6	21.0	4.2	T ₂ 11.8	17.0	8.1
19 (38)	T ₁ 8.3	23.5	2.9	T ₁ 10.3	19.8	7.0	T ₁ 12.5	16.0	11.0	T ₁ 16.8	12.0	13.2
20 (40)	T ₁ 8.5	23.3	3.3	T ₂ 8.4	25.6	2.2	T ₂ 9.0	22.0	4.2	T ₂ 11.2	18.0	7.7
21 (42)	T ₁ 8.7	23.0	4.2	T ₁ 10.5	19.0	7.5	T ₁ 12.1	16.0	11.9	T ₁ 15.1	13.0	15.4
22 (44)	T ₁ 9.1	22.0	4.4	T ₂ 8.0	25.0	2.6	T ₂ 8.9	22.0	4.2	T ₂ 10.4	19.0	7.7
23 (46)	T ₁ 10.0	20.0	6.6	T ₁ 10.5	19.0	7.7	T ₃ 7.9	25.0	2.6	T ₃ 7.9	25.0	2.6
24 (48)	T ₁ 10.3	19.3	8.8	T ₂ 8.2	24.5	2.6	T ₁ 11.9	16.5	12.5	T ₁ 13.7	14.5	17.6
25 (50)	T ₂ 8.0	25.3	2.2	T ₂ 8.3	24.0	3.3	T ₂ 8.7	22.5	3.7	T ₂ 9.6	20.5	6.6
	T ₁ 10.8	18.5	11.0	T ₁ 11.2	18.0	15.4	T ₃ 7.5	26.5	2.0	T ₃ 7.5	26.5	2.0
	T ₂ 8.2	24.5	3.3	T ₂ 8.4	24.0	4.4	T ₁ 11.6	17.0	13.2	T ₁ 13.0	15.0	19.4
				T ₂ 8.0	25.0	2.2	T ₂ 8.6	23.0	3.3	T ₂ 9.3	21.0	5.3
				T ₁ 10.8	18.5	8.5	T ₁ 12.1	16.0	15.4	T ₁ 13.2	15.0	25.3
				T ₂ 8.2	24.5	2.6	T ₂ 8.9	24.0	6.6	T ₂ 9.5	21.0	6.6
				T ₁ 11.0	18.0	9.9	T ₁ 11.9	16.6	19.8	T ₁ 13.5	14.6	27.5
				T ₂ 8.3	24.0	3.3	T ₂ 8.7	22.6	5.5	T ₂ 9.6	20.6	7.7
				T ₁ 11.2	18.0	15.4	T ₁ 11.9	16.6	19.8	T ₁ 13.7	14.5	30.8
				T ₂ 8.4	24.0	4.4	T ₂ 8.7	22.6	5.5	T ₂ 7.5	20.5	7.7

ことにした。ただし、フェッチAについては風向が北ないし北東になる場合だけを考慮して、その他の風向のときは考えないから $\cos(\alpha+20^\circ)$ を掛けることはしない。

表4をみると吹続時間が18時間位まではフェッチの平均風速の差による波高のちがいはそれ程大きくない。たとえば吹続時間が18時間の場合、平均風速15 m/sに対する有義波高は1.8 mであって、平均風速20 m/sでも2.3 mになるだけである。しかし吹続時間が24時間以上になると、とくに風速20 m/s以上で、風速による波高の増大がいちぢるしくなる。

フェッチAで起った波は富山湾に到達するのに約24時間位かかるから風の実況を知ってから波の予報をして十分に間に合う。一方フェッチBの場合には強風と高波がほぼ同時に起り、したがって精度のよい波浪予報をするにはフェッチ上の風の予報が的確になされねばならない。

5. 波浪数値計算の試行

最近の10年間にアメリカ、イギリス、フランスなどの各国で波浪数値予報モデルの開発が精力的

に行なわれ、かなりの量の成果が報告されている。このモデルにはいろいろのものがあるが、現在ではエネルギー平衡方程式を数値的に解く方法がほぼ確立されている。しかしこの方程式の中には理論的にも実際のにもまだよくわかっていない項が多く含まれているので、これらは経験的に決めざるを得ない。それにもかかわらず、実際的にはこれらのモデルが有効であることが追算によって確かめられているので、ここでは基礎的な試みとして富山湾の波を計算した結果をのべる。その結果はかなり満足できるものであって風のデータを与えることによって湾内の波が数値的に再現できることが確かめられた。なお、富山湾の高波は北東方向にのびた狭い水路状の海域での北東の強風で起るので、ここでは簡単のために一次元モデルを考えた。

5.1 基本式

風波の生長と減衰を支配するエネルギー平衡方程式は次のように表わされる、

$$\frac{\partial}{\partial t} (f, t, x) + Vg(f) \frac{\partial}{\partial x} S(f, t, x) = G - D, \quad (1)$$

ここで f は成分波の周波数, t は時間, x は一次元座標である. $S(f, t, x)$ は成分波のエネルギー密度, $Vg(f)$ は成分波の群速度, G と D はそれぞれ成分波の生長および減衰を表わす関数である.

成分波の生長を表わす関数 G は次のようにおいた,

$$G = \{A + B S(f, t, x)\} \{1 - \mu\} \quad (2)$$

ここで A と B は成分波の生長を規定する未知量であって, 前者は時間に関して線形的な生長を, 後者は指数関数的な生長を表わす. これは今のところ経験的に定めるより仕方がないので Inoue (1968) の結果に従う, すなわちスペクトル密度を ($m^2 \text{sec}$) であらわすと1時間当りのこれらの量は

$$A(f, u) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{3.54 \times 10^{-11} \times \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\omega}{u} \right)^2 + (k \sin \theta)^2 \right] \left[\frac{1}{9} \left(\frac{\omega}{u} \right)^{2.5} \omega^{5.25} \times u^{2.25} \right]}{+(k \cos \theta - \frac{\omega}{u})^2} d\theta, \quad (3)$$

$$B(f, u_*) = \left[5 e^{-7000 \left\{ \left(\frac{u_*}{c} \right) - 0.031 \right\}^2} + 2612 \left(\frac{u_*}{c} \right)^2 e^{-0.0004 \left(c/u_* \right)^2} \right] \times f, \quad (4)$$

ここで $\omega = 2\pi f$, $k = \omega^2/g$, g は重力加速度, u は風速, u_* は摩擦速度, c は波速である.

(2)式の中の μ は砕波などによってエネルギーが失われるために生長がおさえられることを表わす項で, ここでは Inoue (1968) に従って

$$\mu = \left(\frac{S}{S_\infty} \right)^2 \quad (5)$$

とおいた, ここで S_∞ はその時の風速で波が完全に発達して平衡状態になった時のスペクトル密度である. ここでは Pierson-Moskowitz (1964) のスペクトルを用いる, すなわち

$$S_\infty = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta(\omega_\sigma/\omega)^4} \quad (6)$$

ここで $\alpha = 8.10 \times 10^{-8}$, $\beta = 0.74$, $\omega_\sigma = g/u$ である.

(1)式の右辺の第2項は風が止むかあるいは弱まって, 風から波へのエネルギーの輸送が行なわれ

なくなった時に, 波が進行しながら消耗するエネルギー量を表わす. この効果についてはまだよくわかっていないので, ここでは次のように仮定した.

$$D = mf^4 S(f, t, x), \quad (7)$$

ここで m は常数であって, 約1時間程度で周期3秒以下の波が消えるように考えて $m \doteq 3$ と置いた.

5.2 プログラミング

Inoue (1968) は巧妙な方法で(1)式の近似的な解析解を求めているが, ここでは(1)式を差分方程式に直して逐次的に積分する方法をとった. 風波のスペクトルは周波数によって次のように16成分に分割した. それぞれの成分の周波数バンド幅は 0.01 sec^{-1} である.

中央周波数 (sec^{-1})	周期 (sec)	中央周波数 (sec^{-1})	周期 (sec)
0.07	14.29	0.15	6.67
0.08	12.50	0.16	6.25
0.09	11.11	0.17	5.88
0.10	10.00	0.18	5.56
0.11	9.09	0.19	5.26
0.12	8.33	0.20	5.00
0.13	7.69	0.21	4.76
0.14	7.14	0.22	4.55

なお, $A(f, u)$ は周波数と風速の関数であるから, あらかじめ計算して作表したものを用いる. $B(f, u_*)$ は周波数と摩擦速度の関数であって, これを計算するには摩擦速度を知らねばならない. 一般に得られる観測要素から摩擦速度を知ることにはむずかしいので, ここでは Кузнецов (1970) の結果を用いて摩擦速度を風速に置きかえた. この両者の関係は図15に示すとおりである. このようにすると $B(f, u_*)$ も周波数と風速の関数としてあらかじめ計算しておくことができる.

5.3 富山湾への応用

富山湾の湾奥から北北東の方向に57.5kmの地点を原点とし, これから南南西の方向に一次元座標をとり, この座標軸上で2.5km間隔の格子を設ける. (1)式の数値計算を行なうさいの計算安定の条件から積分の時間間隔は30分とした.

計算を行なったのは昭和41年2月21~24日の4日間である. 日本海の海岸線に沿って存在する富山, 輪島, 直江津, 相川, 新潟, 酒田, 秋

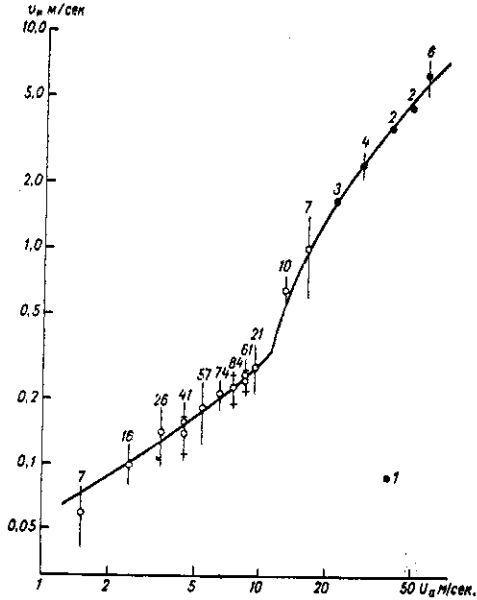


図15 風速と摩擦速度の関係(Кузнецов, 1970)

田・深浦、および江差の9ヶ所の観測所の位置を座標軸上に投影する、そしてこれらの観測所で記録された風が座標軸上の投影点における風であると仮定した。これらの風のうち風向が北東～北北西の象限にあるものはすべて座標軸に沿って波を生長させるのに寄与すると考えたが、その他の象限の風は富山湾の風波に対しては影響を及ぼさないと考えて無視した。また、観測された風は陸上の値であるから海上の風になおすために便宜的に風速に係数1.2を掛けた。図16は横軸に座標軸、縦軸に観測時間をとって座標軸上の風速分布の時間的推移を示した。この図上で陰影をほどこした部分が風向が北東～北北西の象限にある強風域であって、これだけが富山湾の波の発達に寄与していると考えた。

図17には富山湾の湾奥の海老江における有義波高の観測値と、今回の計算で得られた値とが対比して示してある。観測波高では23日10時と20時の2ヶ所にピークが現れており、前者が風波、後者がうねりであることを前の報告で述べたが、計算波高ではピークは1つで風波からうねりえの変化が連続的である。また観測値では22日22時から23日0時にかけて急速な波高の増大がみられるが、計算値では23日6時頃から波高

が増大している。これは観測波高が富山湾一帯の局所的な強風によって発達を始めたものと考えられる。

23日18時以降の波の減衰は、観測値と計算値の間で非常にいい一致がみられる。このモデルで仮定した減衰項はきわめて便宜的なものではあるが、ここでの計算結果をみると実用的にはほぼ満足できるものであるかも知れない。

図18には22日20時の波スペクトルの観測値と計算値が対比して示してある。計算スペクトルは全体的に低周波側にカタよっており、卓越周期は約1.2秒となっているが、観測スペクトルでは卓越周期は約1.05秒である。このくいちがいの一つの原因は、計算値が深海波であるのに対して、観測値は水深約10mの沿岸で得られたものであることによる。

ここでは海面上の風を、海岸の僅か9ヶ所の観測値で表現しているため風の場を十分に適切にあらわすことはできなかった。それにもかかわらず大局的に見ると波の計算値は観測値とかなりよく合っており、ここで考えた簡単な数値モデルは実際のには十分に使えると思ひ。

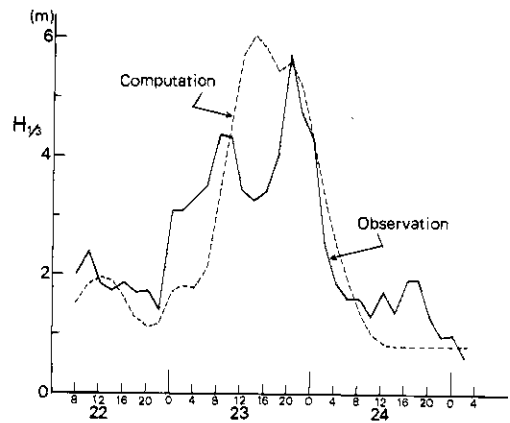


図17 昭和41年2月22～24日の海老江における波の観測値と計算値

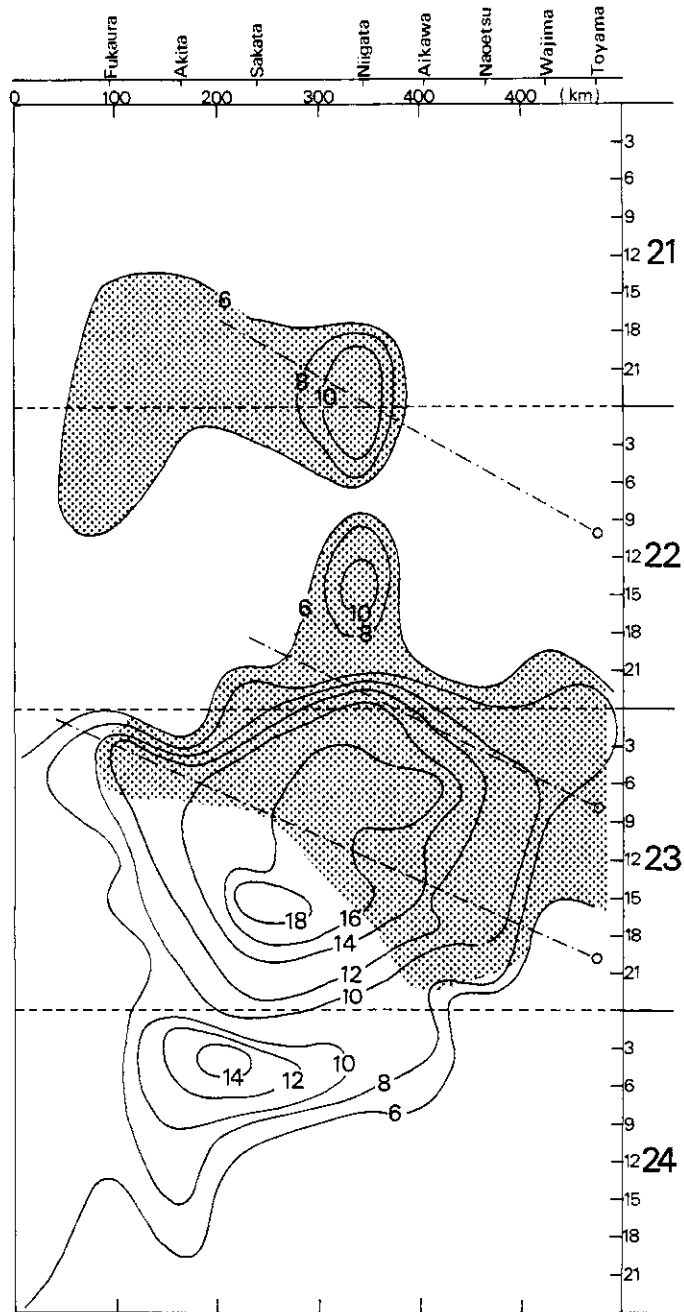


図16 計算に用いた風の場合、横軸は距離、縦軸は観測時間である。等値線は等風速線 (m/sec) であって、陰影の部分のみが富山湾の波の生長に寄与する。

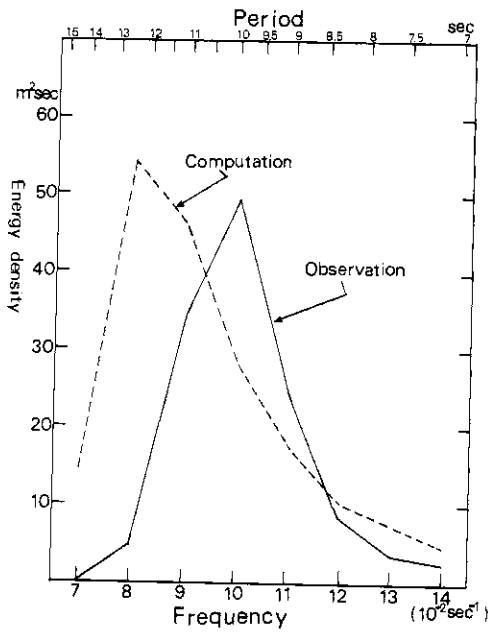


図18 昭和41年2月23日20時の海老江における波スペクトル。実線は観測値，破線は計算値

6. むすび

この報告では、既存の波浪資料を用いて富山湾の波浪の気候学のおよび総観的特性を明らかにし、また簡単な波浪数値計算モデルを用いて富山湾の波を数値的に再現することを試みた。波の性質を十分によく理解するためには更に多くの信頼できる観測資料を蓄積する必要があるし、また数値計算モデルも改善を必要とする。従って沿岸波浪のこまかい性質を知るためには将来にまたねばなら

ない点も多いが、この報告で得られた結果が間接的にも防災業務の資料として役立てば幸である。

終わりに、この調査にあたり貴重な資料を提供していただいた第一港湾建設局と北陸地方建設局の関係機関に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 磯崎一郎(1971): 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.
- 2) Inoue, T. (1967): *On the Growth of the Spectrum of a Wind-Generated Sea According to a Modified Miles-Phillips Mechanism and Its Application to Wave Forecasting*. New York University, July 1967, 74 pp.
- 3) 北出正清(1952): 「寄廻り」波の機巧と予知. 中央気象台海洋報告, 2(4), 419—445.
- 4) Kuznetsov, O. A. (1970): Results of an experimental investigation of airflow above the sea surface. *Izv. Acad. Sci. USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*, 6(8), 469—472.
- 5) Pierson, W. J., Jr. and L. Moskowitz (1964): A proposed spectral form for fully-developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69(24), 5181—5190.
- 6) Sverdrup, H. U. and W. H. Munk (1947): *Wind, Sea and Swell; Theory of Relations for Forecasting*. U. S. Navy Dept., Hydrogr. Off. Publ. No. 601.
- 7) 富山地方气象台(1971): 富山湾の波浪の総観解析. 55 pp.