

港内じょう乱調査・解析——波浪・長周期波・流れ——

渡 辺 栄 一*

1. はじめに

一般に港の外郭施設の配置については港内静穏度によってその良否が判定されることが多い。水理模型実験あるいは数値シミュレーション等から、相応の遮へい度を有すると判定されながら、高波時に港内が著しくじょう乱し、船舶の損傷事故がたびたび発生する事例がある。

このような港は、海岸工学上未知分野の多い、いわゆる砕波帯内に位置する小港湾や漁港に多く見受けられる。しかし、港内のじょう乱状況や漁船の動揺の実態を定量的に把握することは極めて難しいため、これに関する調査研究例はあまり多くなく、港の計画あるいは安全対策上一つの障壁となっている。

本文は、北海道渡島半島中央部の日本海側に面した第3種熊石漁港で行った港内じょう乱の実態調査とその解析結果について報告^{1),2)}するものである。

本漁港は、西方に奥尻島、南方に松前半島を控えているため、来襲波の波向はこの二つの陸域に囲まれた範囲に限定される。また主防波堤は海岸線にほぼ平行に西から東に延伸されており、この東端に港口がある(図-1)。

このような地形と港形及び波の来襲範囲からみると、本港は十分な静穏性を確保していると考えられ、また計算等からもこのことが裏づけられている。しかしながら荒天時における港内のじょう乱状況は極めて異常であるため、この原因を明らかにし、適切な対策を講ずる必要

が生じた。

ここでの調査では、波として風波とうねりを含めた波浪から長周期波までを検討の対象とし、かつ船舶の動揺に直接影響を与える流れについても取扱った。また共振に係る解析は、Jiin-Jen Lee の副振動計算のプログラムを一部修正して行った。

2. 現地観測について

2.1 観測の内容

現地観測の方法とそのデータ処理及び解析の全体フローは図-2のとうりである。

観測は図-1の位置に、波高計2台、水位計1台、流速計1台を夫々設置して行った。

用いた波高計は、当初応用理化学研究室で開発中の簡易型ステップ式波高計で、本体(波高桿)と変換部が一体となったものである。波高計-A(WAVE-A)は内港の水位計の側に取り付け長周期波について両者比較できるようにした。波高計-B(WAVE-B)は、南防波堤の内港側に設置し越波の観測も試みた。観測はじょう乱時に3時間間隔で55分間連続測定し、データレコーダ(共和電業)に記録した。このCMTデータをA/Dコンバータにかけ0.5秒毎に読み取った。始めの20分間のデータを用いて波浪としての解析、55分間(実際には記録始終時の確認処理のため多少短かくなっている)全長

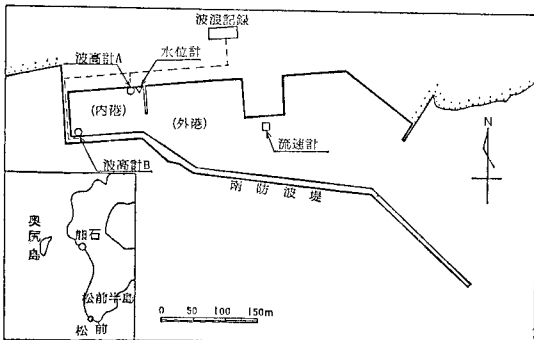


図-1 熊石漁港及び計器設置位置図

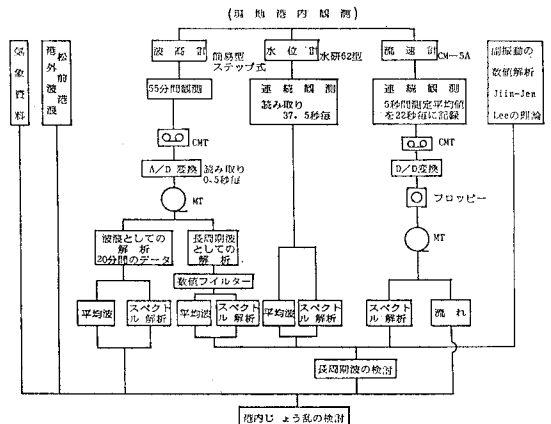


図-2 調査のフロー

* 正会員 北海道開発局土木試験所水産土木研究室副室長

のデータを用いて長周期波としての解析を行った。

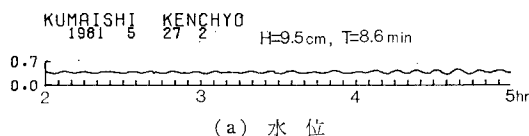
水位計は、紙送り速度を常時には 6 mm/hr, じょう乱時には 144 mm/hr に手で切り替えられるように改良したフース型(中浅測器, 水研 62 型)を用いた。じょう乱時には水位を目視により 37.5 秒毎に読み取り, 長周期波としての解析を行った。流速計は, ロータ式(鶴見精機, MTCM-5A)で, 5 秒間の平均流速, 瞬時の流向, 水温, 塩分を 22 秒毎に内蔵の CMT に記録するものである。観測地点の海底水深は -4.2 m であり, 測定は水面下約 2.0 m の位置で行った。得られたデータは長周期波と流れについて解析した。

以上の現地観測データは主として, 有義波等を求める平均波法と MEM (Maximum Entropy Method) によるスペクトル法によって解析した。

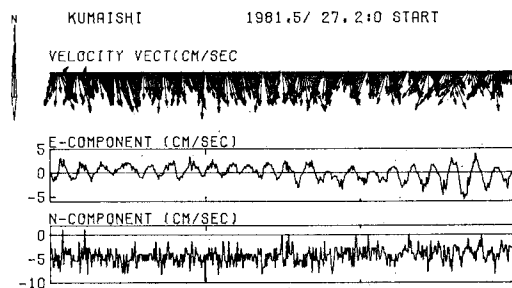
2.2 観測の結果

(1) 静穏時

静穏時における港内の長周期波及び流れの特性を明ら

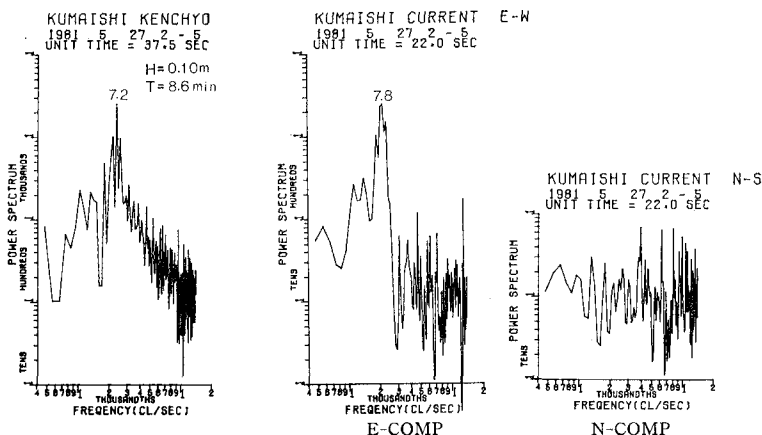


(a) 水位



(b) 流れ

図-3 水位と流れ(静穏時)



(a) 水位

(b) 流れ

図-4 スペクトル(静穏時)

かにするため, 港内波浪がほとんど無かった昭和 56 年 5 月 26 日から 27 日にかけて観測を行い, 解析は 26 日 15 時~18 時と現象が顕著な 27 日 2 時~5 時の 2 回行なった。以後に示す観測, 解析に係わる図は, 紙数の制限から 1 例だけを取り上げた。

水位(図-3(a))についてみると, 27 日 4 時から 5 時にかけて特に規則的な水位変動がみられる。平均波法による結果は $H_{1/3}=6.6$ cm, 9.5 cm, $T_{1/3}=7.9$ min, 8.6 min である。同様にスペクトル法による(図-4(a))と, 7.2 min, 9.0 min にピークが認められる。

流れについては, 流速ベクトル(図-3(b))をみると, 南方向を中心にして港の長軸である東西方向に規則的な変動がみられ, この現象は 27 日 2 時から 5 時にかけて顕著であった。観測期間中の流速は, 最大で 9.7 cm/sec で, 3 時間の平均流速は 4.6 cm/sec, 5.3 cm/sec であった。東西方向の流速成分で東を正にとった E-COMP では 27 日 2 時から 5 時の間に 8 min 程度の規則的な変動が現われている。しかし, 南北方向の流速成分で北を正にとった N-COMP ではこれが認められない(図-3(b))。方向成分のスペクトル(図-4(b))によると, E-COMP では 7.5 min~ 7.8 min にピークがあり, N-COMP ではピークは認められない。

(2) じょう乱時

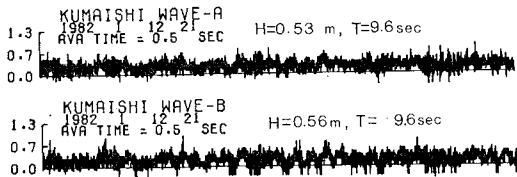
じょう乱時の観測は昭和 57 年 1 月 12 日から 13 日にかけて行った。この時の気象は, 低気圧が沿海州沿いに北上し, これに伴う深い気圧の谷が 12 日の午前北海道を横断し, 道南日本海側では大時化となった。本港の南方約 70 km の松前沖での波浪観測によると, 気圧の谷通過前の 12 日午前 10 時には $H_{1/3}=6.0$ m を観測した。この波は, 風が西向に変わってから一旦弱まったが, 再び高まり, 13 日 0 時には $H_{1/3}=7.1$ m を記録し, この期間の最大となった。

本港利用者によると観測した港内のじょう乱の程度はそれ程大きなものではないということで, 漁船の動揺も激しいものでなく, 船体の接触事故はなかった。また, 南防波堤を越える波はほとんどなかった。

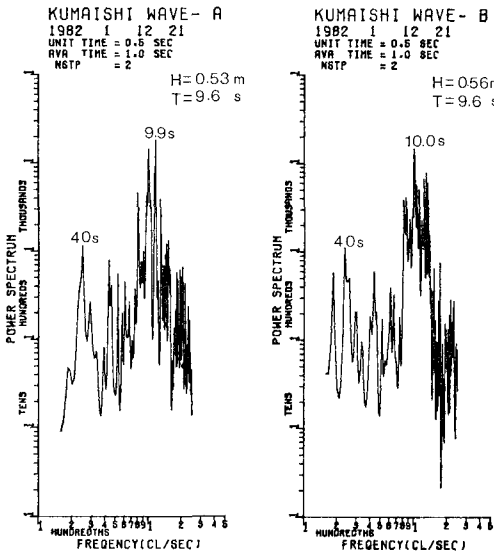
a. 港内波

1 回当たり測定時間 55 分で 3 時間毎の解析に用いた実波形を図-5(a)に示す。図中で WAVE-A は水位計の側での記録で WAVE-B は南防波堤の港内側での記録である。波形から長周期波に波浪が重なっているのがわかる。

松前港沖で最初に波高がピーク(12 月 10 時)を示してから 5 時間



(a) 波形



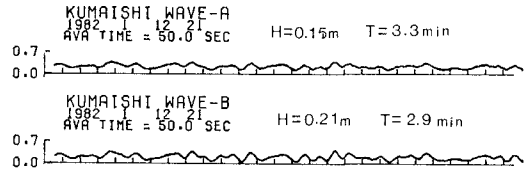
(b) スペクトル

図—5 波浪 (じょう乱時)

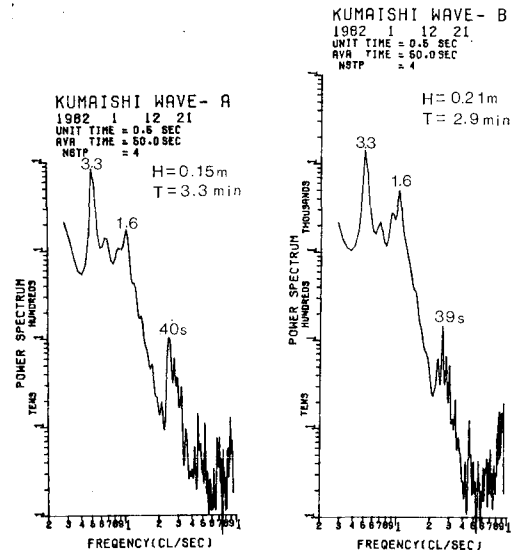
遅れた 15 時に、本港での港内有義波はピークとなり 0.62 m を示した。気圧の谷通過後、沖波は増々高まったが、風向きが西に変わったため本港での港内波浪は弱まっていった。有義波周期は、松前港沖で 7.9 sec~9.5 sec に対し、本港々内では 9.2 sec~10.8 sec であり 1 sec~2 sec 長い値である。解析に用いた 12 日 18 時、同 21 時、13 日 0 時の測定開始 20 分間の波浪の有義波は、 $H_{1/3}=0.5\text{ m}\sim 0.6\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=9.6\text{ sec}\sim 10.8\text{ sec}$ であり、波が直接侵入する位置にある WAVE-B の方が、WAVE-A よりも多少大きな波高である。周期については両者に差はみられない。この場合のスペクトルは 図—5 (b) のとおりで、スペクトルの形は時間が経過してもあまり変わらず、また、WAVE-A、WAVE-B とともに類似したものとなっている。スペクトルのピークの最大は 9.8 sec から 10.8 sec の範囲にあり、続いて 36 sec~40 sec、20 sec 前後にピークがある。このスペクトルのピークの最大を示す周期の値は有義波周期とほぼ同じ値である。

つぎに、長周期波としての解析を行うため波浪データに 50 秒間の移動平均をかけ、短周期波成分を除去した。その波形は 図—6 (a) のとおりである。

この有義波は $H_{1/3}=0.11\text{ m}\sim 0.21\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=2.3\text{ min}\sim 3.3\text{ min}$ である。この場合 WAVE-B の方が WAVE-



(a) 波形



(b) スペクトル

図—6 50 秒移動平均の波 (じょう乱時)

A よりも 1.4 倍程大きな値になっている。スペクトル解析の結果 (図—6 (b))、2.5 min~3.3 min に最大のピークがあり、ついで 1.6 min~1.9 min、3.0 sec~40 sec にピークがみられる。40 sec 付近のピークは波浪としての解析の場合にも現われたものである。

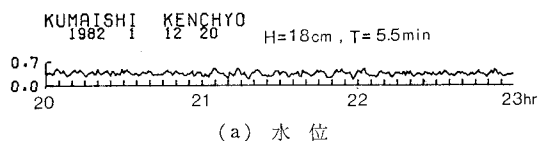
b. 水位

20 分程度までの長周期波成分を解析するために、港内波観測期間に前後 1 時間を合せた計 3 時間分のデータを用いる。この場合の波形は 図—7 (a) のとおりで、この有義波としての値は $H_{1/3}=12.2\text{ cm}\sim 18.0\text{ cm}$ 、 $T_{1/3}=4.4\text{ min}\sim 5.7\text{ min}$ である。このスペクトル (図—8 (a)) は、7.5 min~8.2 min に第 1 のピーク、2.7 min~3.0 min に第 2 のピークがある。

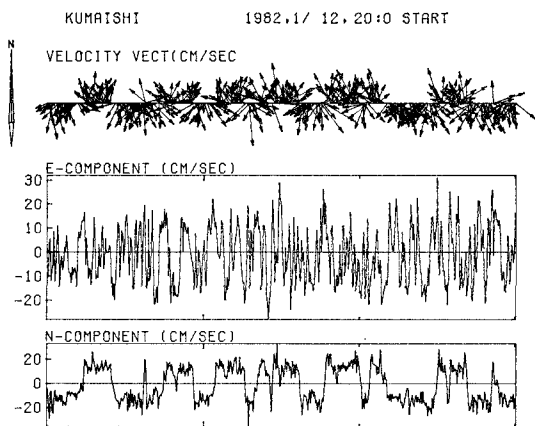
c. 流れ

水位の解析時間に合せた流れの変化を 図—7 (b) に示す。流速のベクトルについてみると、最大で 38.5 cm/sec、平均で 16.3 cm/sec~17.8 cm/sec であり、静穏時に比べ 4 倍もの値である。また、流向の変化も著しく、南流、北流を中心に東西方向の規則的変動がみられる。この変化は全体的には反時計回りの転流をしている。

方向成分別にみると、E-COMP では 10 分弱の変動がみられるのに対し、N-COMP では数十分といった非常

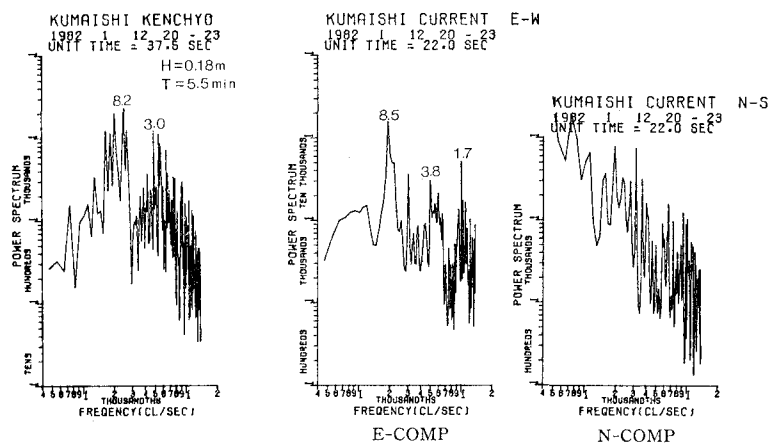


(a) 水位



(b) 流れ

図-7 水位と流れ (じょう乱時)



(a) 水位

(b) 流れ

図-8 スペクトル (じょう乱時)

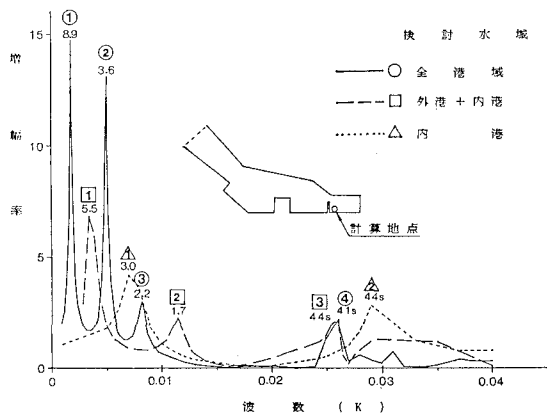


図-9 応答曲線

に長い周期の変動がある。このスペクトルの結果は、図一8 (b) のように E-COMP では 7.2 min~8.5 min, 2.8 min~3.8 min, 1.5 min~1.7 min にピークが認められる。

3. 数値解析による共振周期

本港のふ頭、突堤の配置を考慮し、港形を表一に示す3通りに仮定し、Jiin-Jen Lee の副振動の数値解析プログラムを用いて計算した。この理論については、文献3), 4), 5)を参考にして頂きたい。

計算結果のうち WAVE-A 及び水位計の設置個所に近い位置での応答曲線を図-9 に示す。縦軸は増幅率で、入射波の振幅と湾が閉じている場合の反射波の振幅の和に対する港内の任意点での振幅の比である。横軸は波数で波長の逆数である。図中○印は全水域、□印は外港と内港を合せた水域、△印は内港のみの水域で計算したときの増幅率のピークを示し、各記号の中の数値は増幅率の大きさの順位を表わしている。また記号の下の数値は周期を示し、s の付いたものは単位が秒を、付かないものは分を示す。

各増幅率のピークに対応する港内の振幅の平面分布の値を港軸に沿って、結ぶと、おおよそのモードが得られる。このモードと増幅率のピーク周期との関係をまとめたのが表一である。全水域の単節モードの周期は 8.9 min で最も長く、続いて 3.6 min, 2.2 min に双、3 節モードがある。外港と内港を合せた水域の場合には 5.5 min, 1.7 min, 45 sec に夫々モードがみられる。内港だけの場合は 3.0 min, 44 sec に単、双節モードがあり、13.9 sec では港軸直角方向に双節のモードが現われてい

表-1 共振周期

(Jiin-Jen Lee の数値解析)

検討水域	諸元	モ ー ド		
		単 節 港	双 節 港	3 節 港
全 水 域	周期(分)	536 (8.9)	215 (3.6)	134 (2.2)
	波長m	3142	1256	785
内港と外港	周期(分)	331 (5.5)	100 (1.7)	45
	波長m	1795	546	242
内 港	周期(分)	181 (3.0)	44	
	波長m	897	217	

る。以上の共振周期を近い値でまとめ、長い順に並べると、8.9 min, 5.5 min, 3.6 min, 3.0 min, 2.2 min, 1.7 min, 44 sec $\sim$ 45 sec となる。

ここで、外港と内港を合せた水域の場合の3節モードと、内港だけの場合の双節モードの周期は共に 40 sec 強である。このことは両港形とも共振を起し易い位置に突堤が存在しているものと考えられる。

4. 考 察

現地観測の結果をまとめると表-2のとおりである。観測した港内のじょう乱は、それほど大きなものでないのにも係らず内港で 0.6 m もの有義波高が観測された。このことから港内がより大きな波浪によってじょう乱することは容易に推定できる。この異常な港内波浪の原因は、港内付近に存在する浅瀬が、特に南からの波に対し、波高を増大させ、この波が航路筋に沿い港内に侵入する

ためであることが、水理実験によって検証されている。

つぎに、水理実験の結果を加え、共振周期について周期の長い順に整理すると、表-3 のようになり、互いに近似した値になっていることがわかる。同表から本港の基本モードは 8min 程度の周期であり、内港での共振周期は他に 3.0 min, 1.7 min, 40 sec, 20 sec である。これらの共振周期と係留漁船の surging 固有周期が近いと、危険な状態が生じることが指摘される。

流れについては、じょう乱時には最大で 40 cm/sec もの流速を観測し、静穏時の 4 倍程度の値である。同時に、流向の変化も著しくなり、全体的には反時計回りの転流である。この反時計回りの現象は水理実験でも検証された。このように、じょう乱時には港内の流速は相当に速くなり、かつ、流向が著しく変化するため漁船の動揺への影響は大きいものと考ええる。

5. あとがき

波浪から長周期波までの波を対象に、現地観測、数値解析及び水理実験を行い、港内じょう乱の実態とその原因について相当明らかに出来たことは大きな収穫であった。また、副振動の数値解析の結果は、観測、実験とよい対応がみられたことから、現地への適用性は高いものと考えられる。この共振周期と漁船の固有周期との関係及び、流れと漁船の動揺との関係については今後調査研究を進める必要がある。

最後に、この調査にあたり御協力下さった北海道開発局農水部水産課、同電子計算室、函館開発建設部江差港湾建設事務所、土木試験所の皆様に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺栄一：港内じょう乱調査・解析——波浪から長周期波まで——，開発局技術研究発表論文集，1982。
- 2) 土木試験所：熊石漁港水理模型実験報告書，1982。
- 3) 中村重久：数値モデルによる大阪湾の湾水振動，第 26 回海講論文集，pp. 139 $\sim$ 142, 1979。
- 4) 大村哲夫・他：長周期波の観測と解析について（1），第 28 回海講論文集，pp. 49 $\sim$ 53, 1981。
- 5) Jiin-Jen Lee: Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape, CIT, Rep. No. KH-R-26, 256 p., 1969。

表-2 観測結果

港内の状態		静 穏	じょう乱					
観 測 期 間		56.5.26 ～27	5 7. 1. 12 $\sim$ 13					
区 分	長周期	波 浪			長 周 期			
スベクトルのピーク周期	パワースペクトルの順位	1	1	2	3	1	2	3
	波 浪	—	9.6 $\sim$ 10.8秒	3.6 $\sim$ 4.3秒	$\div$ 20 秒	2.5 $\sim$ 3.3分	1.6 $\sim$ 1.9分	3.9 $\sim$ 4.0秒
	水 位	7.2 $\sim$ 9.0分	—			7.5 $\sim$ 8.2分	2.7 $\sim$ 3.0分	—
	E-W成分	7.5 $\sim$ 7.8分	—			7.2 $\sim$ 8.5分	2.8 $\sim$ 3.8分	1.5 $\sim$ 1.7分
平均波	N-S成分	特になし	—			特になし		
	流れ	特になし	—			特になし		
平 均 波	波浪	H $\sqrt{3}$	—	0.52 $\sim$ 0.61 m			0.11 $\sim$ 0.21 m	
		T $\sqrt{3}$	—	9.6 $\sim$ 10.8秒			2.3 $\sim$ 3.3 分	
波	水位	H $\sqrt{3}$	6.6, 9.5 cm	—			0.12 $\sim$ 0.18 m	
		T $\sqrt{3}$	7.9, 8.6 分	—			4.4 $\sim$ 5.7 分	

表-3 共振周期のまとめ

区分		単位	秒			分		
現地観測	波浪		9.6 $\sim$ 10.8	$\div$ 20	3.6 $\sim$ 4.3	1.6 $\sim$ 1.9	—	2.5 $\sim$ 3.3
	水位		—	—	—	—	—	2.7 $\sim$ 3.0
	流れ		—	—	—	1.5 $\sim$ 1.7	—	2.8 $\sim$ 3.8
理論解析			—	—	4.4 $\sim$ 4.5	1.7	2.2	3.0 $\sim$ 3.6
水理模型実験			10	20 $\sim$ 25	40	—	—	—