

## 長周期波による被災について

関本 恒浩\* 原 基久\*

### 要 旨

近年、海岸工学における未解決分野の一つであった周期1～数分程度の長周期波に関する研究が盛んに行われており、構造物などの被災において長周期波が少なからず影響することが明らかになってきている。しかしながら、過去の被災事例において長周期波の影響による被災として報告された例は少ない。本論文は、既往の研究成果から長周期波が原因と考えられる被災事例の調査を行うとともに、それらに対する対策について考察した。また、数少ない長周期波による災害事例のうち、死者十数名を数え、家屋の全半壊の被害が生じた、台風6626号による駿河湾奥での被災事例に着目し、長周期波に関する数値シミュレーションによって被災原因の検討を行った。

### 1. まえがき

周期1～数分程度の長周期波については、Munk<sup>1)</sup>やTucker<sup>2)</sup>が現地観測によってその存在を確認して以来、これまで海岸工学における未解決分野の一つであった。近年になって、長周期波に関する研究が盛んに行われ、単一方向波浪については長周期波の発生原因に対してある程度の解決を見るに至っている。長周期波は、係留船舶の長周期動揺、遡上域における地形変化やサンドバーの形成過程あるいは構造物の安定性に影響を及ぼすことが知られている。また、長周期波が直接あるいは間接的に関係し、構造物などが被災を受けることも少ないながら報告されている。

本論文では、周期1分程度の長周期波を対象として、これによる被災事例の紹介を行うとともに、それらに対する対策について述べる。また、台風6626号によって駿河湾奥で発生した被災に着目し、モデル地形を用いた数値シミュレーションを行い、被災メカニズムについて考察した。

### 2. 長周期波による災害事例について

長周期波が関係したと報告されている災害事例は非常に少ない。この理由は、(1)長周期波の発生や伝播などの現象の理解が十分でなかったため、長周期波の重要性の認識が薄かったこと、(2)長周期波が顕著になるような条件では、波浪も非常に大きく、高潮も同時に起こる可能性が高いため、高波や高潮が直接的な被災原因としてクローズアップされ、長周期波の影響が見過ごされてしまうこと、(3)これまでの波浪観測では高波浪時に波浪データの欠測が多く、被災時の波浪条件の検討が詳細かつ十分に行えないことなどが考えられる。

以下に、長周期波が関係したと考えられる数少ない災害事例として、越波による堤防背後域の災害、長周期波

による防波堤の被災、港内の水面上昇に伴う浸水災害、災害とは言えないが船舶の係留時における係留策の切断事故等を紹介する。図-1にここで取り上げた被災位置を示すとともに、図-2にはこれらの被災をもたらした台風の移動経路を示す。

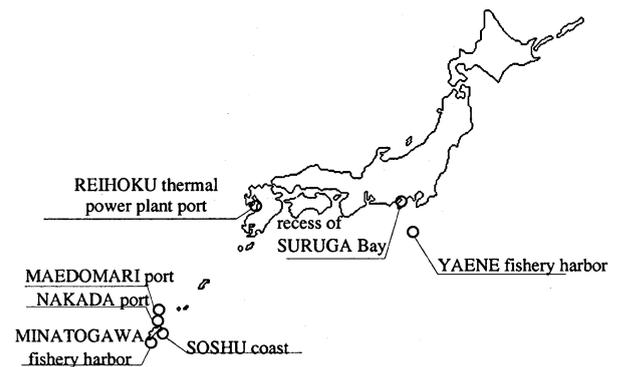


図-1 被災地点位置図

### 2.1 越波による被災

#### (1) 静岡県駿河湾奥<sup>3)</sup>

1966年9月23日0時マリアナ諸島北部で熱帯性低気圧から変化した台風6626号は、発達しながら北上し25日0時には、中心気圧960hP、最大風速35m/s、進行速度65km/hrとなり御前崎の西側に上陸し、駿河湾西方を通過した。その後は勢力を弱めながら甲府を通過した後進路を北東に変え、前橋付近を通り9月25日9時に三陸沖に抜けた。この台風で、駿河湾に異常な高波浪が発生し非常に大きな災害をもたらした。駿河湾西側から湾奥にかけて、海岸堤防の破壊、越波による家屋の浸水・流出あるいは前面洗掘による防波堤の傾斜などの被災が見られた。特に、湾奥の吉原海岸では大規模な越波により死者十数名、か

\* 技術研究所

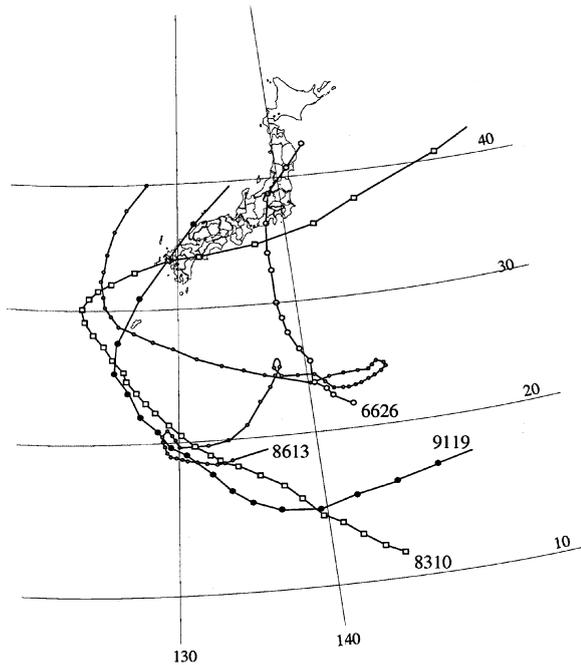


図 - 2 台風経路図

なりの数に及ぶ家屋の全半壊が見られた。

被災時の吉原海岸は砂利浜海岸で、前浜勾配は1/8程度、後浜勾配は1/10程度、海浜幅は130m程度であった。その背後には海岸堤防が設置されており、パラペットの天端高はT.P.+13mであった。

被災当時の沼津港の水圧式波高観測記録によると、大瀬崎による遮蔽の影響のため通常の波浪成分は小さくなっているものの、周期70秒以上の長周期波が波高1.3m



図 - 3 被災地点位置図

にも達していることが示唆された。その後、運輸省によって水圧式波高計とlow-pass filterを組み合わせた長周期波の観測が実施され、駿河湾奥では、高波浪時にいわゆるサーフピートが発生することが確認されている。

なお、被災時の潮位はT.P.+0.3m程度、潮位偏差(高潮)が約1mとされている。しかしながら、この高潮には長周期波の一部が含まれていると考えられる。後で述べるように被災時には波浪に伴う長周期波として、まず波群の変形と波群による砕波点の変動によるものが考えられる。さらに、当該地点は弧状海岸となっており、湾奥手前側の海岸では波が斜め入射することによりエッジ波が発生し海岸にトラップされたものがこれに加わったものと推測される。

(2) 沖縄県楚州海岸<sup>4)</sup>

1986年8月16日フィリピン沖で熱帯低気圧より変化した台風8613号は北東へ向かった後18日から23日にかけて小笠原諸島のはるか南海上を迷走した。その後、進路を西北西に取り25日に南大東島に急接近し、26日朝には沖縄本島を通過した。沖縄本島通過時における台風の中心気圧は950hP、中心付近の最大風速は45m/s、移動速度は30km/hrと観測史上3番目の非常に大型の台風であった。沖縄本島北部の楚州海岸では25日10時過ぎにはD.L.+7.5mの天端の護岸を越波し、民家に半壊の被害が見られたほか、護岸背後の道路には重量約10kNの根固め捨石が打ち上げられるとともに、40mの区間にわたって道路の決壊が見られた。この護岸は、設計沖波波高12mに対して設定された許容越波流量を満たすように設計されていた。越波状況は10分~15分程度の間隔で3波程度連続して打ち寄せられたと報告されている。

仲座・日野<sup>4)</sup>は、水理実験に基づきこの被災原因としてBore状サーフピートを挙げている。Bore状サーフピートは、波群性の波浪がステップ型地形に入射すると、波群によって砕波点の変動が生じ、これに伴い発生した長周期波がステップ上で共振現象を起こすことによってその振幅を増大させるものである<sup>5)</sup>。楚州海岸の位置する沖縄本島北部はリーフが発達しており、このリーフ地形がステップの役目を果たしている。

2.2 防波堤の被災

(1) 沖縄県前泊港の被災<sup>4)</sup>

前述の台風8613号によって、沖縄県伊平屋島の前泊港では防波堤の被災が見られた。防波堤は、天端高D.L.+3.5m、幅4.7mの消波ブロック被覆ケーソン堤で、消波ブロック重量は20kNであった。この防波堤の設計沖波は11.0mであるが、防波堤の前面に幅300~400mにわたって発達したリーフがあり、リーフ上の水深は約2mであった。リーフによる波浪減衰効果のため堤体前面の設計波

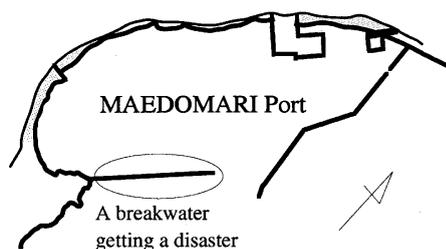


図 - 4 前泊港と被災位置

高は比較的小さいものとなっており、現行の設計法だけではこの被災原因を説明することは困難である。

仲座ら<sup>6)</sup>は水理実験により、Bore 状サーフビートが段波として堤体に作用し、堤体に大きな波力を発生させることを明らかにしており、前泊港の被災はこの Bore 状サーフビートが原因であるとしている。

(2) 沖縄県仲田港の被災<sup>4)</sup>

これも台風8613号による被害である。仲田港は沖縄県伊是名島にあり、被災した防波堤は仲田港南防波堤で、20kN消波ブロック被覆傾斜堤である。被災状況は、340mの堤長の内の堤頭部110mを除いた230mの区間に渡り被覆していた消波工が港内側に飛散したものであり、中には数10mも飛散したものもある。この防波堤も水深2m程度のリーフ上に建設されており、現行設計法では被災の原因を説明することは不可能である。

仲座・日野<sup>4)</sup>は、前述の Bore 状サーフビートが日本海

中部地震津波でみられたように段波状に伝播することと、日本海中部地震津波における消波ブロックの被災状況と仲田港における消波ブロックの被災状況が類似していることから、Bore 状サーフビートが被災原因であるとしている。

(3) 苓北火力発電所専用港湾<sup>7)</sup>

1991年9月13日9時にマーシャル諸島の東で発生した弱い熱帯低気圧は、16日9時にマーシャル諸島の西で台風となった。台風は、22日にフィリピンの東で大型で非常に強い勢力となり、26日に宮古島の東約140kmの海上を北上、勢力を保ちながら九州西岸を通過し、27日16時過ぎに佐世保市の南に上陸した。上陸後は日本海を日本列島に沿うように北東に進行し、大型で強い勢力のまま北海道を通過千島近海に抜けた。台風の勢力は、佐世保市で中心気圧941hPaを観測したほか。この台風による被害は、九州、中国、東北地方で大きく、死者62名、負傷者1499名を出すなど、非常に大きな被害を各地にもたらした。この台風によって、当時建設中であった苓北火力発電所専用港湾は、主防波堤と埋立護岸が被災を受けた。

防波堤の被災は堤頭部から屈曲部まで850mの区間のちょうど中央部10函200mに渡りでケーソンに最大4.2m滑動が見られた。当地点では被災時に堤頭より3函目において、ケーソンに作用する波圧の観測を実施しており、原因の究明のための検討が行われた。被災原因として設計波力と同程度の波力が作用していたこと、中詰め砂の施工密度が設計に比べ約6%程度小さかったことが確認された。しかしながら、滑動安全率として1.2を見込

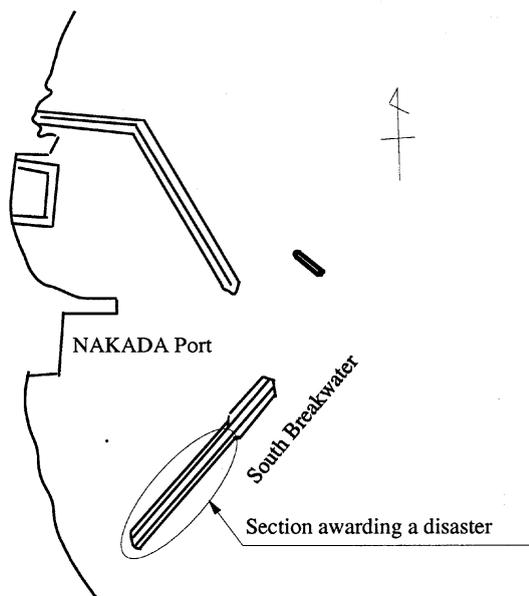


図 - 5 仲田港と被災位置

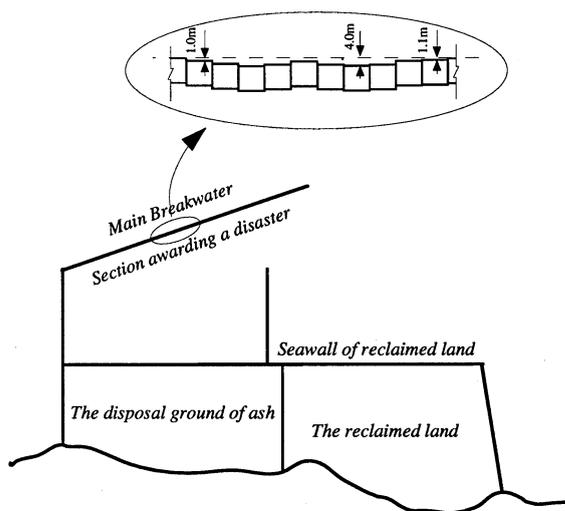


図 - 6 苓北専用港湾と被災位置

んでいるため、これだけでは被災結果を説明することができず、長周期波の回折・散乱波によって防波堤中央部における堤体前面と背面に水位差を生じ、岸向きの静水圧が増加したこともその原因の一つと考えられた。清水ら(1995)は、現地観測と数値シミュレーションによって島堤における長周期波の影響を検討し、入射波に自由長周期波が存在すると、長周期波の周期と島堤の長さの関係によっては、長周期波の回折散乱波によって島堤中央部で前背面で水位差が生ずる可能性があることを示している。特に、台風時のように非常に大きな波浪が発生するような条件下では長周期波の入射波に多くの自由波成分が存在しているものと考えられる。

2.3 港内水位上昇による被災

(1) 港川漁港<sup>4)</sup>

台風8310号は、1983年9月19日トラック諸島で発生した弱い熱帯低気圧が発達したもので、20日21時カロリン諸島西部で台風となった。その後、発達しながら北西に進み9月25日から26日にかけて沖縄本島南西約170kmの沖合いを通過し、上海の沖合いで進路を北北東に変え勢力を弱めながら長崎県へ上陸した。台風の最盛期における規模は、沖縄の南東約1000kmの海上で、中心気圧885hP、中心付近の最大風速55m/sの猛烈なもので、沖縄本島接近時でも中心気圧915hP、最大風速55m/sを記録している<sup>4)</sup>。

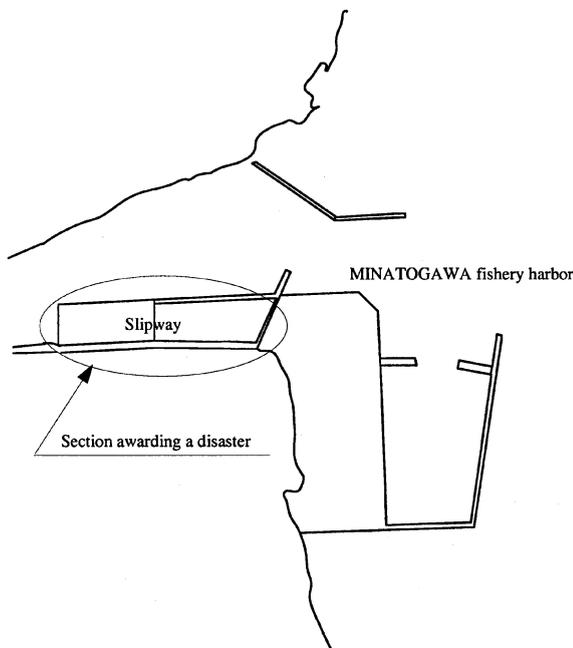


図 - 7 港川漁港と被災位置

この台風に伴う波高は9月25日23時には沖波で、11.5mに達したことが報告されている。

この台風によって、沖縄県南部の比較的リーフの発達したところに位置する港川漁港周辺では大きな災害を被った。港川漁港内では水位が急激に上昇し、台風に合わせてD.L.+6.0~7.0m程度に陸揚げしていた漁船がこの水位上昇によって流出、破壊している。このときの水位上昇量は、D.L.+7.2mにまで達したことが、水位の痕跡から明らかになっている。高山ら<sup>8)</sup>によって提案されたリーフ上の水位上昇量評価式を用いて計算される水位は、被災時の潮位を考慮してもD.L.+4.5m程度であり、この被災原因を説明することができない。仲座・日野<sup>4)</sup>は、この原因を前述のBore状サーフビートによるとしている。

(2) 東京都八重根漁港<sup>9)</sup>

東京都八丈島南西岸に位置する八重根漁港でも沖縄県港川漁港と同様の現象が確認されている。当該地点では、大きな被災こそ発生していないが、台風などによる高波浪来襲時には漁港内の水位が上昇することによって港内全体が冠水し、冷蔵庫などの漁港施設がしばしば被害を受けていた。

清水ら<sup>9)</sup>は、水理模型実験とBoussinesq方程式による数値シミュレーションを実施し、水位上昇の原因を究明するとともに、対策案の検討を実施している。

清水ら<sup>9)</sup>によれば、漁港は規模が小さく碎波帯の中に位置することが多いため、碎波による水位上昇の影響を受けやすく、碎波によって励起されるサーフビートも漁港内へ進入することになる。また、漁港の規模も周期1~数分程度の長周期波に対して共振しやすいものとなっている。八重根漁港の冠水による被害もこれが原因であることが、水理模型実験と数値シミュレーション<sup>10)</sup>によって確認されている。また、これらの知見に基づいて

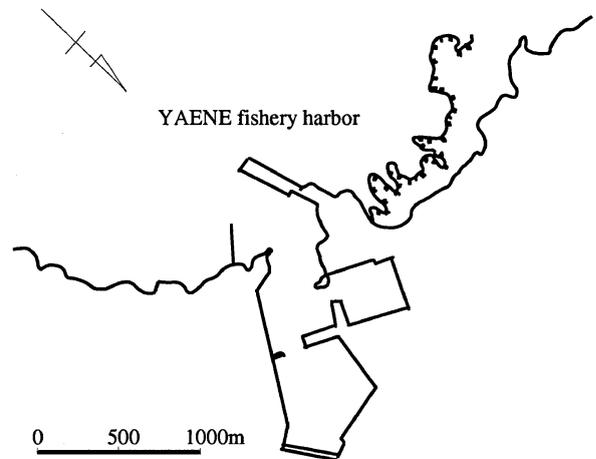


図 - 8 八重根漁港

対策案についても検討しており、港口を水深の深いところへ配置するなど、外郭施設の配置を工夫することにより長周期波の影響を低減できることを示している。

2.4 係留船舶の被害<sup>11)</sup>

災害とは言えないが、従来より、港内に係留された船舶が大きい水平運動を生じ、荷役が中断されたり、係留策が切断されるなどの事故が報告されている。最近の研究成果によれば、港外で発達した長周期波が港内へ進入することがわかっており、船舶の大型化に伴い係留系の固有周期がちょうど長周期波の周期にほぼ一致するため、わずか10～20cmの長周期波によって船体が大きな水平運動することがわかっている。

平石ら<sup>11)</sup>は、苫小牧東港（北海道）14m岸壁、志布志港（鹿児島県）13m岸壁、能代港（秋田県）14m岸壁の係留策切断事例をまとめている。表-1に平石らによってまとめられた最近の係留策の切断事例を示す。なお、ここに示したものは、係留策切断事故の一例であり、実際にはもっと多くの事例があるものと考えられる。また、荷役の中止や船舶の緊急退避などの事例はさらに多くあるものと考えられる。

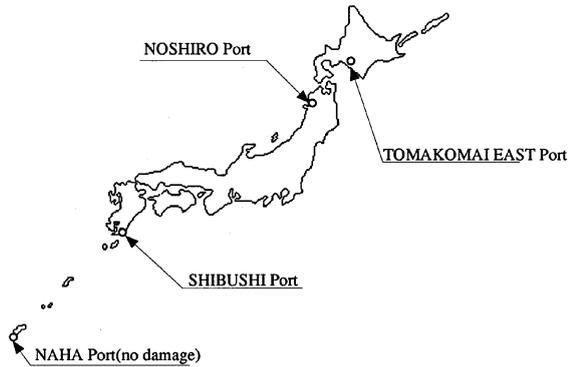


図-9 係留船舶の障害についての検討地点

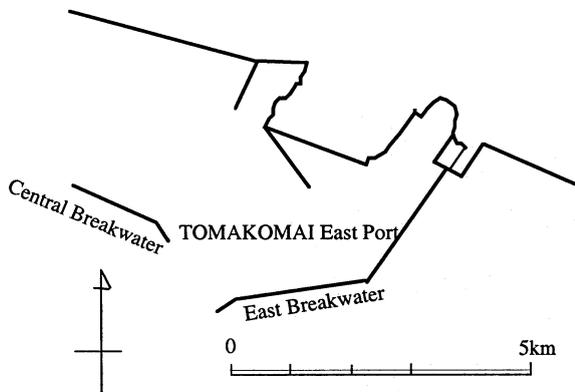


図-10 苫小牧東港

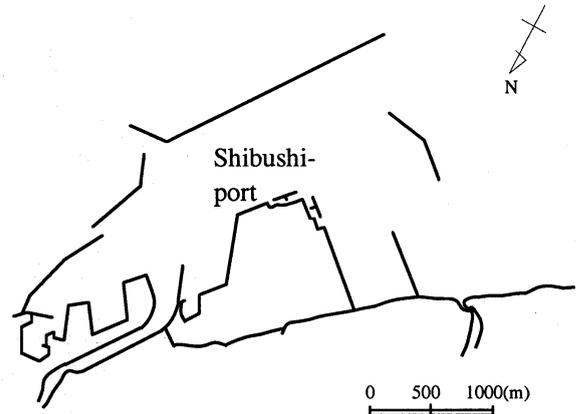


図-11 志布志港

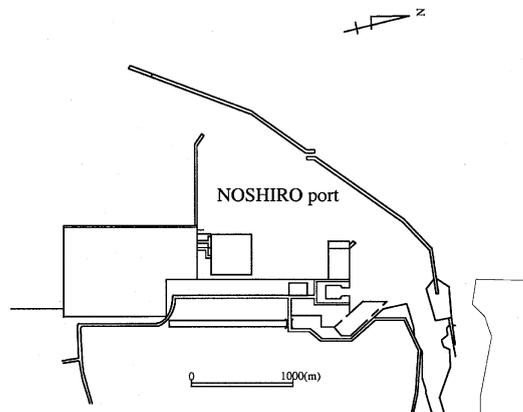


図-12 能代港

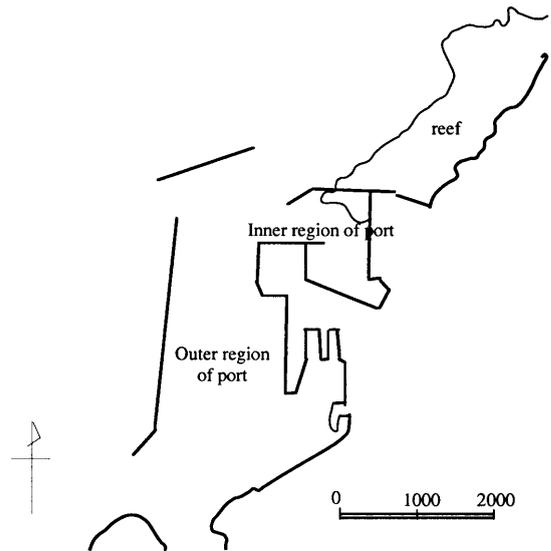


図-13 那覇港

表 - 1 係留作切断事象の例 (平石ら<sup>1)</sup>による)

	Date *1	D.W.T.	Number of broken rope	H <sub>1/3</sub> *2 (m)	T <sub>1/3</sub> *3 (sec)	U (m/s)
SHIBUSHI (Wharf depth:-13m)	1991	2. 13	60,000	1	3.84	10.0
		4. 26 ~ 4. 28	60,000	1	0.97	7.7
		8. 27 ~ 8. 28	60,000	12	2.31	7.8
		9. 6 ~ 9. 10	60,000	1	2.26	13.5
		9. 12 ~ 9. 13	60,000	1	2.08	9.5
		9. 17 ~ 9. 20	60,000	1	2.41	11.5
	1992	10. 4 ~ 10. 7	60,000	2	1.39	9.2
		3. 2 ~ 3. 5	60,000	4	1.97	7.9
		4. 7 ~ 4. 11	60,000	2	1.71	7.8
		8. 3 ~ 8. 6	60,000	1	1.84	10.4
		8. 11 ~ 8. 14	60,000	1	1.43	12.7
	1993	11. 7 ~ 11. 11	60,000	4	2.48	15.9
		5. 28 ~ 6. 2	60,000	2	3.70	7.8
	1994	7. 28 ~ 8. 5	60,000	5	4.28	9.8
		3. 6 ~ 3. 13	60,000	6 *5	3.14	14.2
11. 3 ~ 11. 6		60,000	*5	2.05	7.5	
TOMAKOMAI (Wharf depth:-14m)	1991	1. 26	38,000	1	1.27	7.3
		10. 3	37,000	1	2.48	9.9
	1992	3. 31	36,000	2	2.82	10.8
		5. 7	35,000	2	2.02	6.8
		9. 25	37,000	2	2.03	7.6
		10. 26	49,000	2	0.88	6.9
		11. 7	26,000	1	1.10	11.8
	1993	1. 29	23,000	5	1.86	5.7
		6. 4	37,000	3	3.75	8.7
		8. 29	37,000	1	1.73	7.3
		9. 4	37,000	2	2.28	6.4
		10. 9	49,000	4	2.30	11.9
		11. 14	49,000	1	4.99	8.5
	1994	3. 10	38,000	2	1.58	9.3
		9. 18	36,000	4	3.76	16.3
NOSHIRO *4 (Wharf depth:-14m)	1992	9. 30	60,000	4	2.97	8.60
		11. 4	60,000	22	0.97	7.70
		12. 12 ~ 12. 14	60,000	18	-	20.0
	1993	3. 1	60,000	22	5.27	9.30

\*1 At Shibushi and Noshiro, it shows the cargo handling period which contains the day rope breaking.

\*2 H<sub>1/3</sub> in table is maximum value of significant wave height in a period or day in table.

\*3 T<sub>1/3</sub> in table is the value at the same time H<sub>1/3</sub> observed.

\*4 Wave record was observed at FUKAURA port that is near NOSHIRO port.

\*5 It shows the case that fenders were also broken.

係留策切断の対策としては大きく2つ考えられる、一つは係留系による対応であり、係留系の固有振動を長周期波の固有振動からずらすことである。もう一つは、港湾の外郭施設の形状を変更し、長周期波が船舶係留地点に入らない工夫をすることが考えられる。那覇港(沖縄県)港外では比較的大きな長周期波の存在が確認されているが、船舶の接岸岸壁では係留策の切断事故は全く報告されていない。これは、那覇港の港湾形状は外港部と内港部の2段になっており、長周期波が船舶の接岸岸壁のある内港部には直接進入しにくい構造となっているためと考えられる。

### 3. 長周期波による被災を防ぐための方策

現行の設計法では長周期波を考慮するようにはなっていないものの、ある程度の影響は必然的に考慮されているものと考えられる。すなわち、現行設計の拠り所と

なっている波力や越波量などの各種の評価式、評価図表は、水理模型実験などによって検証されたものであり、不規則波を用いた水理模型実験では、意識的には考慮していなくてもある程度の長周期波が造波段階や伝播・変形過程で必然的に含まれるため、結果として現行設計においてもある程度考慮されたものとなっている。しかしながら、ここに示した被災事例は長周期波の特性上、通常よりも長周期波の影響が顕著に現れたものばかりであり、計画段階で来襲する長周期波を精度良く見積もることができればいずれも防ぐことができたものと考えられる。

越波による被災については、高波浪来襲時の長周期波の振幅が正確に予測できれば、予測された長周期波の振幅を平均水位の上昇と見なすことによって、現行の越波流量算定図表を用いることにより越波流量の評価が可能であろう。

防波堤に長周期波が作用する場合についても、喜岡<sup>12)</sup>、清水ら<sup>13)</sup>が検討しているように数値シミュレーションによって、長周期波の水位変動を定量的に評価することが可能である。堤体の安定性を考える場合には、波による波力に加え、長周期波による水位変動を静水圧的な波圧としてを加えることによって全体的な作用波力を評価すればよい。

リーフ上の長周期波の影響については、数値的に水位変動の定量的評価が可能であるので、リーフ上での長周期波の水位変動から、津波波力の算定式を用いることによって、仲屋・日野<sup>4)</sup>が示したBore状サーフピートによる波力を精度良く算定することが可能であると考えられる。

港内における船舶係留時の係留索の切断事故に対する対策も、数値シミュレーションを用いて検討することが可能である。港内はほとんど自由波と考えることができる<sup>14)</sup>ため、港内の長周期波が推定できれば、通常の船体動揺シミュレーションを用いて、動揺量の検討が可能である。

また、港内における長周期波は、港口における境界条件の取り扱いに注意すれば線形の数値解析法を用いて精度の良い推定が可能であろう。非線形波浪解析法が行えればさらに精度の良い解析が可能と考えられる。

このように、これまで述べてきた被災の対策は長周期波さえ評価できれば現行設計法を用いて安全な構造物を設計することが可能である。

4. 数値シミュレーションによる検討例

長周期波の評価については、近年この分野の研究の進展に伴って、ある程度の評価は可能となっている。特に

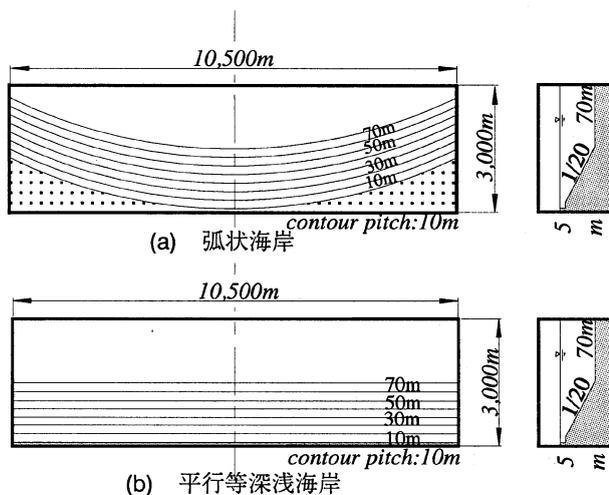


図 - 1 4 計算領域

Boussinesq方程式に基づく数値シミュレーションは、弱非線形、弱分散性が扱えることから、波群に伴う非線形拘束波や波群の変形や砕波に伴って発生する自由長周期波を数値的に算定する有望なツールとなっている。Boussinesq方程式を用いた検討としては、金山ら<sup>10)</sup>が港内への長周期波の伝播と港内での挙動について水理模型実験結果と比較検討を行っている。また、清水ら<sup>9),13)</sup>は、島堤前背面の長周期波の水位分布や港内における水位上昇の検討を行い、現象の定量的評価に成功している。一方、港内の長周期波の検討において平石ら<sup>11)</sup>は、港内ではほとんどが自由波として伝播すること<sup>14)</sup>を考慮し、線形長波による検討を行っている。ただし、線形長波理論を用いる場合は、港内への入射波としての長周期波を正しく見積もらなければ定量的な評価ができないため、精度の良い評価が必要な場合には、港内における拘束波や港内で発生する自由波を別途評価するなど特別な検討が必要である。一方、Boussinesq方程式では、港内における拘束波や港内で発生する自由波も含めて数値的に検討することができるため、特別な取り扱いが必要がないというメリットがある。

ここでは、Boussinesq方程式を用いてモデル地形に対して、1966年に駿河湾で起こった現象を数値的に検討してみる。ここで用いる Boussinesq 方程式は、斜面勾配を考慮したもので、Peregrine<sup>15)</sup>によって提案された式を用いており、砕波減衰項は佐藤・鈴木<sup>16)</sup>と同様に渦動粘性係数を導入した形で評価した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + v_e \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x^2 \partial t} \right) + v_e \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、 $\eta$ は水面変動、 $p$ と $q$ はそれぞれ $x$ 方向と $y$ 方向の線流量である。 $v_e$ の見積りは、片山・佐藤<sup>17)</sup>と同様の方法を用いた。

図 - 1 4 に計算に用いたモデル地形を示す。ここでは、平行等深線海岸と、駿河湾湾奥を模擬した弧状の海岸を対象として、同一の波浪条件の波を入射させて地形の違

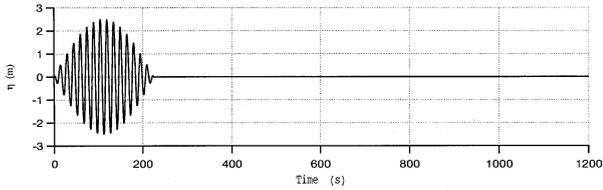


図 - 1 5 入射単一波群波形

いによる長周期波の挙動を調べた。なお、等深線に直角な海底勾配を両地形とも 1/20 とし、水深 5m より岸側はすべて水深 5m とし、スポンジ層による消波を行っている。また入射波としては、現象の理解のため単一波群を入射させた。単一波群は、周期 15 秒の基本波が 15 波分の長さとし、波高は 5m とした。すなわち、

$$h(t) = a \sin(\pi t / T_g) \cos(2\pi t / T), 0 \leq t \leq T_g \quad (4)$$

ここで、 $T_g$  は波群長さ (225s)、 $T$  は基本波周期 (15s)、 $a$  は最大振幅 (5m) である。図 - 1 5 に計算に用いた単一波群波形を示す。

図 - 1 6 は計算結果を示したものであり、計算領域において沿岸方向の中心線に沿った測線での水位変動の時系列を示したものである。この図では沖から岸に向かって水深 26.25m、18.75m、11.25m、5.25 m、5.00m の地点の波形を示した。図中の破線はローパスフィルターによって分離した長周期波成分である。一次波の波形は、弧状海岸の方が波高減衰が若干大きいものの等深形状の違いは顕著ではない。ただし、弧状海岸においては長周期波成分が、一次波の消滅した後でも残っているのに対し、一様勾配斜面では一次波の消滅とともに長周期波も消えていることがわかる。図 - 1 7 は長周期波の時系列図を示したものである。上述のように、弧状海岸においては波群消滅後もかなり長い時間にわたって長周期波が存在していることが分かる。波群消滅後の長周期波に着目すると、岸沖方向の振幅は沖に行くにしたがって小さくなるが、位相はほぼ同じであることがわかる。また、図 - 1 8 は弧状海岸に対する計算結果について、水深 5m のコンター上を中心から 450m 毎の長周期水面変動の時系列を示したものである。図中の水位変動のはじめの方に見られる大きな盛り上がりは、波群に直接的に関係して発生した自由長周期波で、岸から沖に向かって進むため位相差はほとんど見られないが、それ以降の波については約 26m/s 程度の位相速度で沿岸方向 (双方向) に波

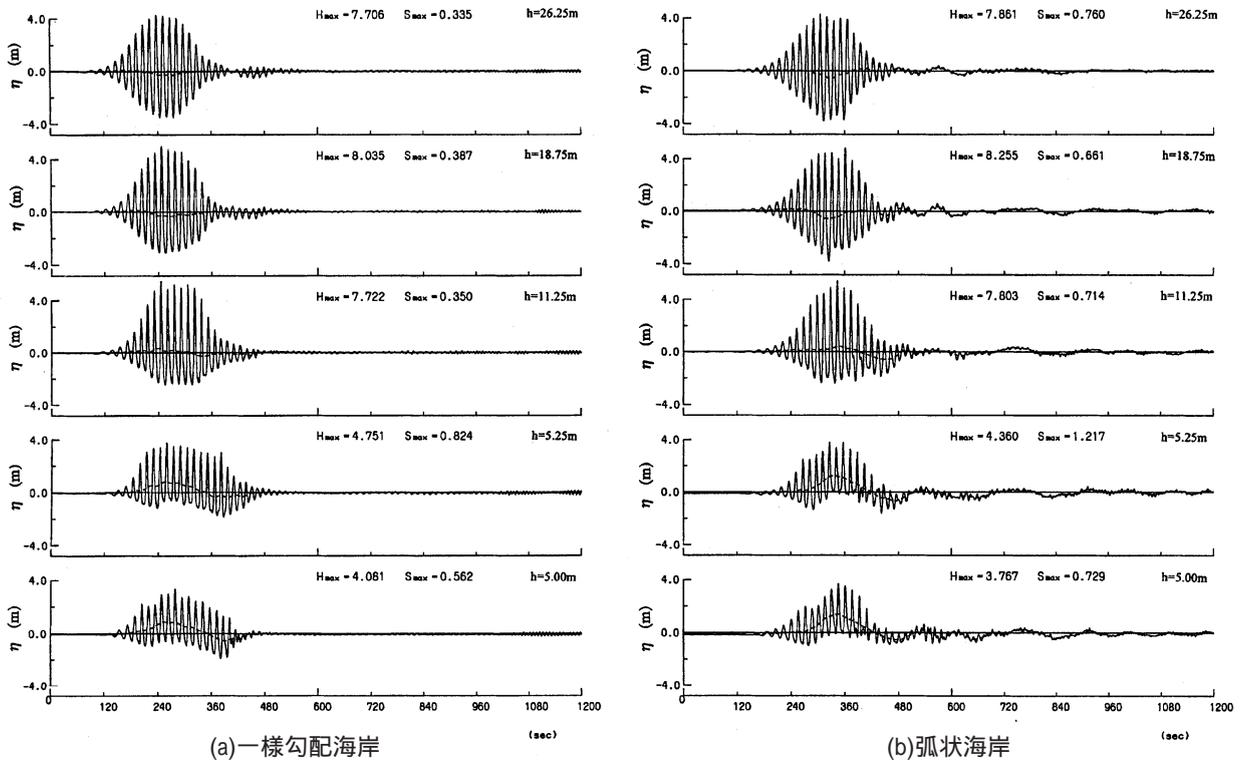


図 - 1 6 波群の伝播に伴う変形

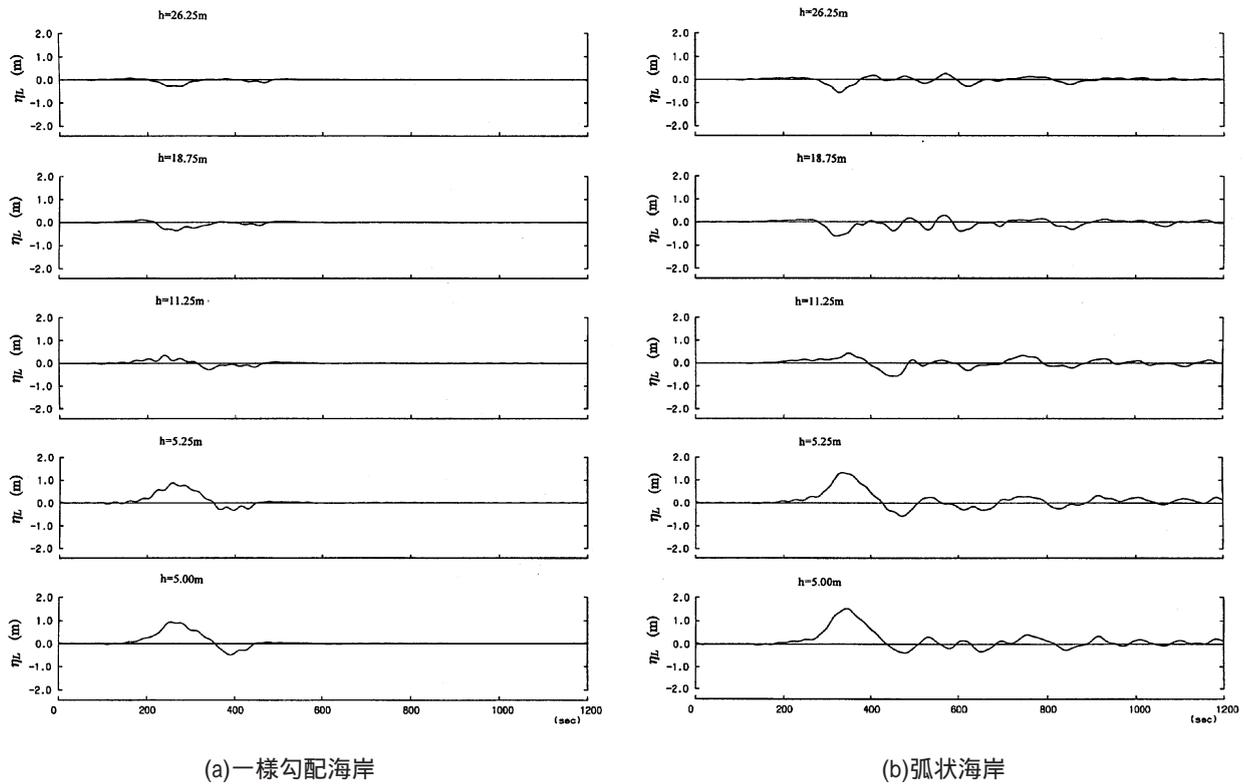


図 - 1 7 伝播に伴う長周期波の変形

として進行するようすがみてとれる。ちなみに、一様勾配斜面を長波が斜めに入射した場合のエッジ波の分散関係式を用いて沿岸方向の位相速度は次式で示される。

$$C_y = \frac{g}{\omega} (2n+1) \tan \beta \quad (5)$$

ここで、 $\tan \beta$ は海底勾配、 $n$ はエッジ波のモード(0,1,2,...)である。この式を用いてエッジ波の沿岸方向の位相速度を計算すると、 $n=0$ で、 $C_y = 17.54\text{m/s}$ であり、計算結果に比較的近い。これらの差異は対象とした海岸が一様勾配斜面ではなく弧状海岸であったこと。岸側の境界条件が式(5)導出の際の仮定と異なることなどが挙げられるが、詳細については今後の課題である。

以上によって、岸沖方向には重複波となり、沿岸方向に進行波として存在する可能性が高いことがわかる。すなわち、弧状海岸では長周期波は海岸にトラップされており、その発生原因としてはエッジ波が有力であると考えられる。不規則波は波群が連続的に現れたものと考えられることができるから、高波浪が作用した場合には長周期波がどんどんトラップされ、長周期波はさらに増幅するものと考えられる。吉原海岸において発生した被災の主要因のひとつと考えられる。

### 5. おわりに

ここでは、周期1～数分の長周期波に起因する災害や事故について事例を述べるとともに、長周期波による災害を未然に防ぐには長周期波を定量的に評価する必要がある、数値シミュレーションによる検討が有効であることについて述べた。なお、数値シミュレーションはあくまでも数学的なモデルであり、その適用限界があることは注意する必要がある。この分野については今後更なる研究が進むことが期待される。

また、災害を未然に防ぐには、被災原因の究明が必要不可欠である。しかしながら、現状では非常に大きな災害や大きなプロジェクトが受けた災害については、ある程度の検討を行うことがあっても、比較的規模の小さい災害については、復旧を急ぐこともあって十分な原因究明がなされないままとなっていることも多いものと考えられる。大きな災害を未然に防ぐためには、小さな災害の原因を研究し、その中に含まれる災害要素を抽出・検討することが重要と考えられる。したがって、小さな被災についても被災原因の究明は重要であり、今後このような取り組みが積極的に推進されることが期待される。

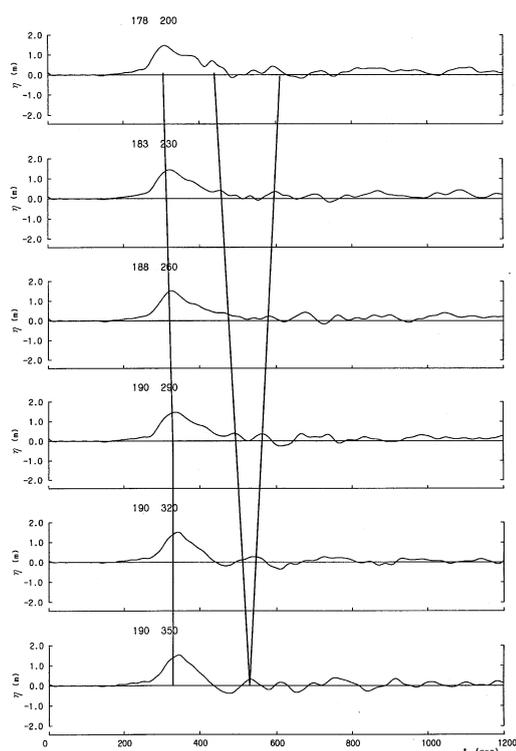


図 - 1 8 長周期波の沿岸方向の分布

### 謝 辞

本研究の実施に当たって、琉球大学仲座栄三助教授、港湾技術研究所水工部平石哲也波浪研究室長には資料の提供を快く承知して下さった。ここに感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1 ) Munk, W. H. : Surf beats, Trans. American Geophysical Union, Vol.30, No.6, pp.849 ~ 854, 1949
- 2 ) Tucker, M. J. : Surf beats: sea waves 1 to 5 min. period, Proc. Roy. Soc. London, No. A 207, pp.565 ~ 573, 1950
- 3 ) 佐藤昭二・森平倫生・入江功・谷本勝利：駿河湾海岸踏査報告、港湾技術研究所報告、第6巻7号、pp.1 ~ 70、1967
- 4 ) 仲座栄三・日野幹雄：リーフ地形海岸における Bore 状サーフビートによる災害の実態調査、第35回海岸工学講演会論文集、pp.202 ~ 206、1988

5 ) 日野幹雄・仲座栄三・興那覇健次：波群によって引き起こされる Bore 状サーフビートに関する研究、第35回海岸工学講演会論文集、pp.197 ~ 201、1988

6 ) 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・大城 勉：波群津波の津波力に関する研究、第35回海岸工学講演会論文集、pp.202 ~ 206、1988

7 ) 田中征夫・溝辺 哲・岡部成光：苓北地点 9119 号台風災害の原因究明と復旧対策、電力土木、No.242、pp.81 ~ 89

8 ) 高山知司・亀山 豊・菊池 治：リーフ上の波の変形に関する研究、港湾技研資料、No.278、32p.、1977

9 ) 清水琢三・金山 進・服部 武・武藤亮介・高木伸雄・二見耕左：漁港内の長周期水面変動と平均水位上昇に関する現地観測、海岸工学論文集、第41巻、pp.76 ~ 80、1994

10 ) 金山 進・清水琢三・磯部雅彦：ブシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算、海岸工学論文集、第41巻、pp.61 ~ 65、1994

11 ) 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可：港湾で観測された長周期波の特性、港湾技術研究所報告、第36巻、第3号、pp.3 ~ 36、1996

12 ) 喜岡 渉・飯田耕三・水谷隆夫：離岸堤周りの長周期水位変動の変形特性、海岸工学論文集、第37巻、pp.609 ~ 613、1990

13 ) 清水琢三・鶴飼亮行・片山裕之・金山 進・川俣 奨・近藤浩右：島堤の滑動安全性におよぼす長周期波の影響について、海岸工学論文集、第42巻、pp.846 ~ 850、1995

14 ) 関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央：港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地観測、海岸工学論文集、第37巻、pp.86 ~ 90、1990

15 ) Peregrine, D. H. : Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp.815 ~ 827, 1967

16 ) 佐藤慎司・鈴木秀典：砕波帯における底面流速変動波形の評価法、海岸工学論文集、第37巻、pp.51 ~ 55、1990

17 ) 片山裕之・佐藤慎司：ブシネスク方程式を用いた不規則波の浅水・砕波変形の数値計算、海岸工学論文集、第40巻、pp.16 ~ 20、1993