

水工学シリーズ 02-B-8

高潮・津波対策の今と将来

(独)港湾空港技術研究所 高潮津波研究室長

富 田 孝 史

土木学会
海岸工学委員会・水理委員会
2002 年 9 月

高潮・津波対策の今と将来

Countermeasures Against Storm Surge and Tsunami at Present and in Future

富田孝史
Takashi TOMITA

1. はじめに

我が国は、高潮と津波による災害を古くから繰り返し受けている。津波、高潮等による被害から海岸を防護し、国土を保全することを目的とした海岸法が1956年に制定され、1959年の伊勢湾台風およびその翌年のチリ地震津波による大災害の経験を通じて、海岸保全施設が精力的に整備されてきている。現在、我が国に約3万5千kmある海岸線のうち、何らかの整備を行わなければならない海岸が約1万6千km（全体の45%）あり、その内で既に防護された海岸は1万km程度（全体の28%、整備の必要な海岸延長の62%）となっている（国土交通省河川局海岸室、2001）。

しかし、海岸における防護対策がまだ完了していないところ、防護施設があっても老朽化しているところ、防護施設を計画・設計したときに想定した高潮や津波などよりも大きなものが作用したところで、高潮や津波などによる災害が今も発生している。最近の高潮や津波による災害では、1993年北海道南西沖地震津波により北海道を中心に230名の死者および行方不明者が発生し、1999年の台風18号では八代海において12名の高潮による犠牲者が出ている。人的な被害がなかった場合でも被害は発生している。例えば、昨年2001年の台風11号と15号による高潮と高波は太平洋沿岸の各地で浸水被害などを発生させ、2001年6月のペルー地震津波は養殖筏を破損するなどの被害を発生させている（首藤ら、2002）。

これまでの高潮や津波に対する防災の考え方は、防潮堤などのハード的な対策の強化による防護が中心であった。しかし、被害が無くならない現状を変え、少なくとも人的被害をなくすために、ハード的な対策に加えてソフト的な対策を充実させて、システムとして防災をおこなうようになってきている。

本稿では、これまでの高潮や津波への対策を最近の事例を中心に紹介するとともに、これからの対策としての防災システムについて紹介する。

2. 北海道南西沖地震津波後の奥尻島における津波対策

1993年北海道南西沖地震津波は北海道奥尻町（奥尻島）に壊滅的な被害をもたらした。その後、津波に対して防潮堤の整備などのハード的な対策と合わせて、高地移転や防災無線の強化などソフト的な対策にも力が注がれ、津波に対して強い町づくりが行われた。

2.1 北海道南西沖地震津波による奥尻島の被災概要

1993年7月12日午後10時17分に発生した北海道南西沖地震（マグニチュード7.8）とそれに伴った津波により、奥尻島は壊滅的な被害を受けた。この地震および津波による奥尻島における死者は172名（奥尻島以外の場所では30名）および行方不明者は26名（2名）を数え、犠牲者の死因は津波による溺死者が138名と死亡者数の80%に達する（奥尻町、1996）。津波による被害は、全島沿岸に及んだが特に島の南端に位置する青苗地区と北端の稲穂地区において著しかった（高山ら、1994；首藤ら、1994）。この地震津波の最大の特徴は、津波来襲時間の早さにある。青苗地区（写真-1）は、地震後約5分で西から（写真左側から）10mを越える津波に襲われ、岬の先端の低地に建っていた全家屋（77戸）が流出してしまった。その4分

後に、岬の沖の浅瀬（岬先端から沖合 2km 程度まで水深 10m）によって屈折した津波が再度北東から襲い、岬の東側にある青苗漁港およびその周辺は被災した（朝日新聞「奥尻その夜」取材班、1994）。この地区は、1983 年の日本海中部地震のときにも地震後約 15 分で約 4m の津波に襲われ漁師と釣り客の 2 名が死亡している。奥尻町役場の調査によるその当時の青苗地区の岬部における浸水域（谷本ら、1983）は、北海道南西沖地震津波による浸水域とほぼ同じとなっている。

また、最も高い遡上高を記録したのは島の西側で、無縁島と平島という二つの小島背後の浅瀬につながる 250m 程度のポケットビーチにおける海崖である。その遡上高は T.P.+23.3m であり、局所的に V 字谷になっているところでは 31.7m となっている（首藤ら、1994）。

2. 2 奥尻町災害復興計画

大災害にあった奥尻町では、単に復旧ではなく復興を企図する災害復興計画を策定し、事業を推進している（奥尻町、1996）。その基本方針は、「生活再建」、「防災まちづくり」、「地域振興」の 3 本柱から成り立っている。特に「防災まちづくり」は、次のような基本計画である。

- ① 安全な地域づくりは、まず人命を守ることと町民の財産を守ることを第一に考えなければならない。そのため、各被災地の状況に応じて、高台への移転や土地の再編による高度利用などを行い、住みよい住環境を後世まで継承できるような、安全で魅力ある集落づくりを展開する。
- ② 今回の災害を教訓とし、災害に対する避難対策を確立する。このためには、災害事象に応じた適切な避難計画を定める。また、それを担保する避難路や避難所など避難施設の整備、および各地域の分断を防ぐための幹線道路、電気、水道、通信などのライフラインの維持・管理については、施設そのものの防災対策や災害に備えた代替路線の確保などを推進する。
- ③ 災害予防対策とともに、最大の発生に備えた防災活動体制の強化を推進するため、通報体制、自主防災組織の育成等を強化し、防災活動施設の整備や改善などを実施し、速やかな対応が可能な防災体制を構築する。

2. 3 高地移転

高地移転は古い過去における津波対策の主流であった（首藤、1986）。北海道南西沖地震津波による被害の大きかった奥尻町青苗地区においても高地移転が行われている。青苗地区は、T.P.+2~8m の海岸沿いの狭い平地と T.P.+30m 程度の高台によって構成されている。特に、津波による被害の大きかった岬先端部の低い場所は、今は公園となっており人は住めない。その代わり、集団移転先として同地区の高台に宅地 55 区画が整備された（図-1）。過去の例では、移転先において集落としての安定性を欠いたところでは、しばらくすると元の土地に復帰してしまうようであるが（渡辺、1998）、青苗地区の高台は、被災以前から住宅などが建っており、その心配はなさそうである。

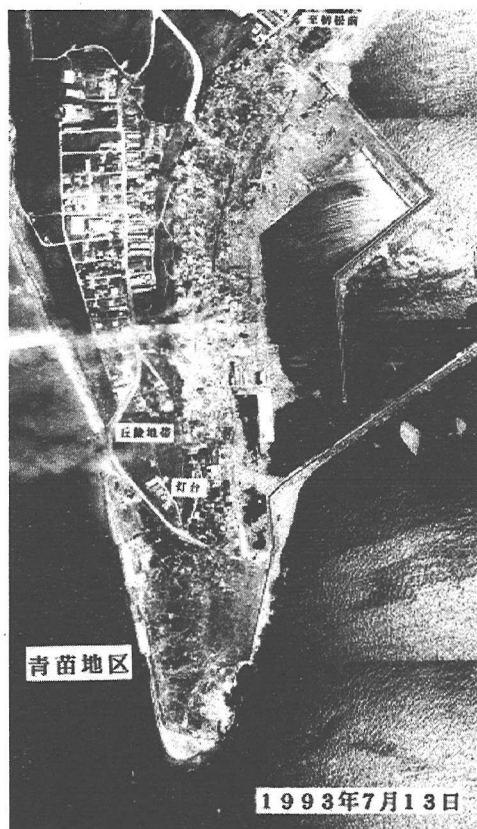
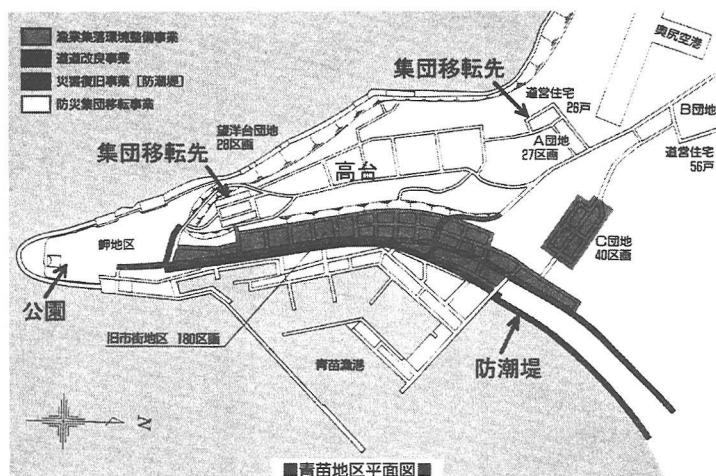


写真-1 北海道南西沖地震津波後の北海道奥尻町青苗地区の航空写真（高山ら、1994）

また、青苗漁港の背後地区においては、津波による被害を免れた D.L.+6m まで盛土をして地盤の高上げを行い、そこに宅地などの整備を行った。対策案の中には、この盛土された地区の住民もより高所となる高台へ移転させる案もあったようであるが、ここに住む漁師の多くは船がある海により近い場所を望んだとのことである。なお、漁港背後地区は、防波堤などの漁港施設により津波が軽減されたため、津波の遡上高は周辺に比べて低くなっている（武内ら、1994）。このため、漁港内へ続く漁港北側の道路を境としてその北側には後述するような高い天端高の防潮堤が設置された。



図－1 奥尻町青苗地区における高地移転

2. 4 防潮堤および水門

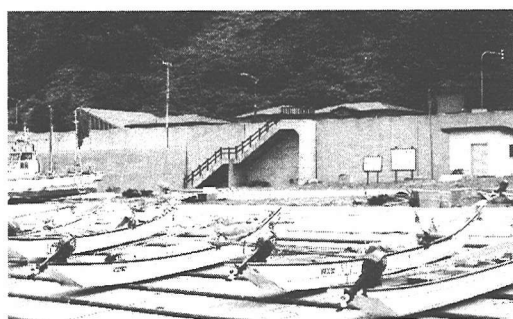
青苗漁港の北側およびさらに北の初松前地区には T.P.+11m 以上の遡上高が記録されている。そのため天端高 11m 以上の防潮堤を整備して防潮堤背後にある集落を防護している。津波の波源域からみて島影になるこれらの地域において高い津波が生じたのは、島周辺の海底地形の影響であり、津波が地形に強く依存する特性の一面を表している。また、島の北端にある稲穂地区では天端高は T.P.+9.1m の防潮堤が整備されている（写真－2）。写真の手前に写っているのは稲穂漁港の東端部であり、漁港および海岸にいる人がいち早く防潮堤を越えて逃げることができるように、防潮堤の海側に避難階段が設置されている。この防潮堤の背後地は 5m 盛土され、その上に宅地を造成している。

このように高い防潮堤を整備することによって、津波や高潮などに対する安全性は高まった。しかし、海へのアクセスや景観は以前に比べると悪くなっている。

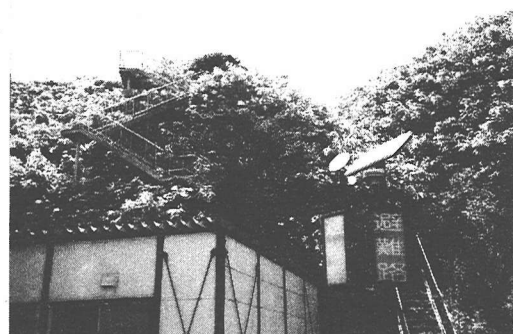
また、河川の脇にあった青苗小学校が河川を遡上した津波により被災したことから、河口部に水門が新たに設置され、震度 4 以上の地震を地震計が検出した場合あるいは津波警報などが発表された場合に自動的に閉鎖されるようになっている。閉鎖に要する時間は 3 分である。

2. 5 避難路

高い防潮堤の整備や地盤の高上げだけでなく、避難路の整備も同時に行われている。稲穂地区の 9.1m の防潮堤の背後に造成された住宅地では、そこからさら



写真－2 防潮堤（奥尻町稲穂地区）



写真－3 避難路

に丘陵地へ避難するための避難路が幾つも造られた。そのなかには丘陵地にある既存の神社を活用した避難路もある。稲穂地区だけでなく町の至る所に避難路が新しく整備されており（写真－3）、避難路にはそれを示す表示板がつけられている。表示板には夜間表示用の電力を蓄えるために、それぞれ太陽電池が取り付けられている。

2. 6 情報の伝達

奥尻町では、1980年に防災行政無線を整備し、屋外スピーカーや各戸に受信機を設置していた。北海道南西沖地震のときにも防災行政無線を使って避難情報や避難勧告を出している。町の記録（奥尻町、1996）によると、地震発生3分後の午後10時20分には、どこよりも早く防災行政無線を使って「津波発生の恐れ有り、避難せよ」の情報を流している。受信機は停電時でも電池により自動的に作動するようになっている。なお、気象庁による大津波警報の発表はその2分後、NHKによる大津波警報の伝達はさらに2分後の10時24分である（朝日新聞「奥尻その夜」取材班、1994）。大津波警報を受けて同町において避難命令が出たのが10時31分である。しかし、津波は早いところで地震発生後3分ほどで島に襲来しており、避難情報や避難勧告がどの程度効果を発揮したのかは定かでない。廣井（1995）によると、津波から助かった人達は地震による揺れが収まるか否かのうちに停電による暗闇の中を取るものもとおりあえず高台へ逃げた人達である。こうした行動の背景には、10年前の日本海中部地震津波による被災経験が大きかったようである。しかし、10年前の被災経験が災いしたケースもあったかもしれない。日本海中部地震の時には、震源が秋田県能代市沖と離れていたために津波が奥尻島に到達するまでに15分程度の時間的な余裕があり、さらに津波も4m程度と北海道南西沖地震津波よりも小さかった。この経験から、津波が来るまでにまだ時間があると思って、避難が遅れたりあるいは浜辺に船を見に行ったりして被災された人もいるかもしれない。

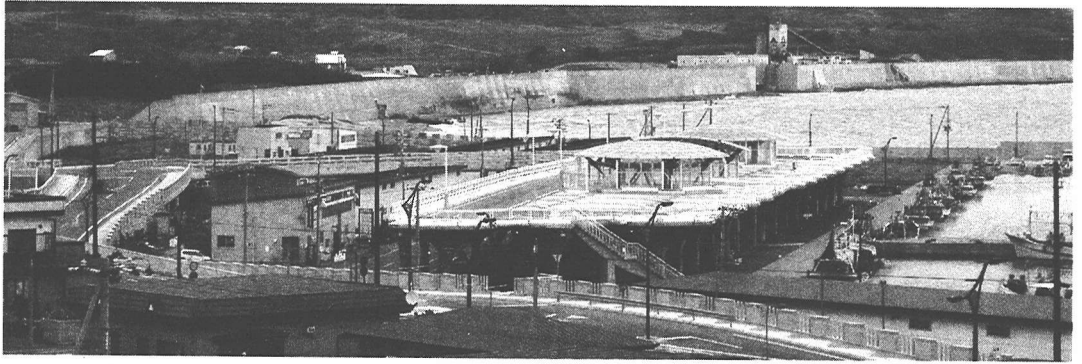
被災を経験していない多くの人に実際にあったことを正しく伝えるのが防災教育の一つである。なぜ津波が襲ってきたのか（津波の発生源と周辺地形との関係など）、なぜ被災してしまったのか（津波の規模と防護施設の関係、避難情報と避難の実態など）、津波などの危機に対してどうあるべきか（防災体制など）などについて、専門家や自治体関係者を交えて、平時から話し合い理解しておくことが将来起こるかもしれない津波や高潮の危険から人命を守ることにつながる。

現在の奥尻町における防災行政無線システムでは、奥尻町役場と消防署に新たに設置した地震計が共に（誤作動防止のため）震度4以上の地震を検出した場合に、津波警報が自動的に防災行政無線で流れるようになっている。今回の津波のように、奥尻島では地震すなわち津波であるからである。

2. 7 人工地盤

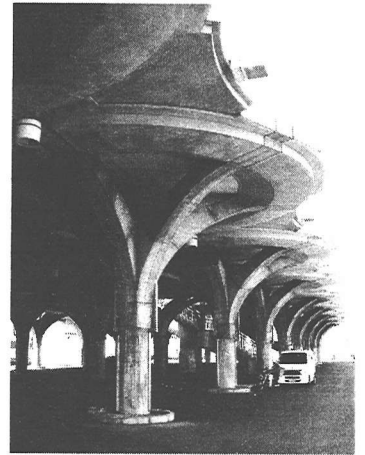
津波による被害の大きかった青苗漁港では、単に復旧にとどまらず災害に強い漁港づくりを目標として、前出の防潮堤の整備や耐震岸壁の整備が行われた。防潮堤の整備により防潮堤背後における安全性は高まったが、防潮堤の整備に合わせてその背後地が盛土されたため漁港と背後集落との間には高低差が4mできてしまい、防潮堤前面にある漁港内で漁業活動を営む人達がこの高低差を乗り越えて背後の高台へ避難することが困難になった。このため、これらの人達が緊急に避難できるような高所部となり、さらにこれを通して背後の高台まで避難できる施設として漁港内に人工地盤が整備された（中村、1996：木口、2000）（写真－4）。人工地盤形式が採用された理由の一つには、漁港施設用地の不足がある。もともと漁港背後に十分な用地が無かったことに加えて、漁港と背後集落を結ぶ臨港道路のための用地が増大してしまったからである。

人工地盤の上下部およびその周囲における漁業活動人数は438人と推計され、これに基づいて一次避難場としての人工地盤の所要面積が1,752m²と算出された。この面積と人工地盤上における通常の漁業活動に必要な面積や1階の荷捌き用地の形状を考慮して、最終的に163.5m×32m=5,232m²となった。人工地盤の高さは、背後の防潮堤の天端高D.L.+6.0m以上で、1階部での作業に必要な高さ4.5mに人工地盤の構造寸法



写真－４ 人工地盤（青苗漁港）とその周辺の様子

を加え、さらに取付道路縦断勾配を考慮して D.L.+7.7m（地盤上 6.2m）である。基本的構造は上部床版を柱で支持する複合アーチ構造（ヴォールト構造）であり、耐震壁はない。ヴォールト構造は、柱および柱間の上部床版を柱の上部に傘状に広がる梁とその外縁の円形梁によって支える構造である（写真－５）。上部床版は柱に合わせてブロック化されており、１本の柱が１ユニットの構造単位を形成して、その集合体として人工地盤を構成する。したがって、津波や地震、あるいは津波による漂流物の衝突によって、１本の柱が破損しても隣の柱にまで影響を及ぼさない構造となっており、一部破損がシステム破壊に至らない。さらに、被災した場合においても、復旧しやすいという長所がある。



写真－５ ヴォールト構造

人工地盤の構造設計に際して、道路橋示方書における修正震度法によって耐震性は考慮されているものの、津波による外力については不明な点が多いということから設計には反映されていないようである。しかし、津波による家屋の破壊率については羽鳥（１９８４）が過去の津波による被災データから検討しており、水流圧力（浸水深×流速^２）が 5～9m³/s² になると家屋の破壊率が 50%を越えるという結果を示している。また、最近では、津波による流体力（松富・大向、１９９９：飯塚・松富、２０００）や津波による流木衝突力が検討されており、これらの研究成果が参考になる。松富（１９９９）は、流木の衝突力に関する評価式として次式を提案している。

$$\frac{F_m}{\gamma_D D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left(\frac{v_{A0}}{\sqrt{gD}} \right)^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma_D L} \right)^{0.4} \quad (1)$$

ここに、 F_m は流木衝突力、 γ_D は流木の単位重量、 D は流木径、 L は流木長、 C_{MA} は見かけの質量係数で定常的な流れの場合は 1.9、 v_{A0} は衝突速度、 σ_f は流木の降伏応力である。また、飯塚・松富（２０００）は、家屋等に作用する津波による抗力を評価する式として次式を提案している。

$$F_D = 0.61 \gamma_w C_D h_f^2 B \quad (2)$$

ここに、 F_D は抗力、 γ_w は海水の単位重量、 C_D は抗力係数で 1.1～2.0、 h_f は前面浸水深、 B は浸水部分の幅である。さらに、飯塚・松富（２０００）は上式を使って家屋の被害判断基準を表－１のように示している。なお、抗力における範囲は、抗力係数 $C_D=1.1\sim 2.0$ に依存している。抗力係数は建造物の形状に依存するものであるため、建造物に及ぼす津波力を設計において評価するためには、建造物の形状と抗力係数に関する検討が

今後必要となる。

人工地盤上へ避難するための階段は、人工地盤上の通常の利用に支障のない範囲で5箇所設置されている。中村(1996)によると、これらの階段を中心として、施設に慣れた健康な人であれば192m、自力のみで行動できにくい人の場合では120mの範囲内にいる人が3分以内に人工地盤上へ避難が可能であると試算されている。また、階段の幅は、避難対象者440人が階段を30s以内に上れるように3mとしている。階段を上るのに必要な30sは、階段の歩行速度0.4m/s(表-2)で12mの階段を上るのに要する時間である。これに階段における流動係数を1.1人・m・s

(表-2)をかけることにより、30s間の単位幅当たりの歩行可能人数が33人と算出される。階段は5箇所に設置するので、 $440(\text{人})/33(\text{人}/\text{m})/5=2.7\text{m}\div 3\text{m}$ である。

3. 高潮防波堤および津波防波堤

3. 1 高潮防波堤

高潮防波堤は、伊勢湾台風による被災の後、波浪と高潮を同時に低減させることを目的として、名古屋港に建設された。

3. 1. 1 伊勢湾台風

1959年9月26日18時過ぎに、台風15号(伊勢湾台風)は潮岬の西方に上陸した。潮岬では、最低気圧929.5mbを記録している。台風は上陸後紀伊半島を縦断し、26日21時~22時には名古屋の西方を通過した。名古屋気象台では最低気圧958.5mb(21時27分)、平均最大風速37.0m/s(22時00分)瞬間最大風速45.7m/s(21時25分)に記録している。その後、23時に高山の南西方を経て27日0時富山市の東方を通過して日本海に抜けた。6時間あまりで日本を横断し平均時速65~70kmであった。

台風特性から進路の右側に位置する伊勢湾では高潮が発生し、名古屋で21時35分にT.P.+3.89mの潮位を記録した。その他の地区では、三河湾奥の前芝で3.03m、伊勢湾口辺りの鳥羽で2.14mである。潮位記録から推算天文潮位を差し引いた潮位偏差は名古屋で3.45m(速報値3.55m)である。1952年以降現在までの名古屋における潮位偏差の第1位がこの記録であり、第2位は第二室戸台風(台風6118号)時の1.97mであるので、伊勢湾台風は極めて高い潮位偏差を発生させた。この高潮偏差の再現期間は、極値分布関数としてWeibull分布を使用した山口ら(1995)によると158年、極値II型分布を使用した高橋ら(2002)によると約120年と推定されている。非常に高い潮位偏差の印象があるが、遭遇確率はそれほど低くない。

さらに、高潮は高波を伴うのが通常であり、このときも伊勢湾の奥部にある名古屋には約3mの高波が来襲していたようである。なお、1999年の台風18号によっても、周防灘の湾奥にあたる苅田では3.5m以上の高波が生じており(永井ら、2000)、当然水深に依存することであるが湾内であっても4m程度の高波が生じることがあるので注意が必要である。

表-1 家屋の被害判断基準(飯塚・松富、2000)

家屋の種類	中破			大破		
	h _f (m)	u(m/s)	F _D (kN/m)	h _f (m)	u(m/s)	F _D (kN/m)
鉄筋コンクリート造	—	—	—	7.0以上	9.1以上	332~603以上
コンクリートブロック造	3.0	6.0	60.7~111	7.0	9.1	332~603
木造	1.5	4.2	15.6~27.4	2.0	4.9	27.4~49.0

中破：柱は残っているが、壁の一部が破壊される。
大破：壁はもちろん、柱のかなりの部分が折れるか失われる。

表-2 避難時の歩行速度と流動係数(中村、1996)

避難者のタイプ	歩行速度(m/s)		流動係数(人・m・s)	
	水平	階段	水平	階段
自力のみで歩行できにくい人	0.8	0.4	1.3	1.2
その建物内の位置・経路などに慣れていない一般の人	1.0	0.5	1.5	1.3
その建物内の位置・経路などに慣れている心身健康な人	1.2	0.6	1.6	1.4

なお、高潮防波堤の内側水域における埋立の効果としては、フェッチが減少することによって港内発生波の波高が低下するという長所がある反面、港口部からの来襲波に対しては伝達距離の減少が来襲波の波高の低減に寄与する海底摩擦効果を低下させること、さらに埋立は港内の浚渫土によって大部分賄われるためこれが海底摩擦効果を減少させることなどの短所が上げられる。したがって、埋立によりその背後地を防護することや埋立による回折効果によって波高を低減させるなどの、埋立法線を十分に検討する必要がある。

3. 2 津波防波堤

津波防波堤は、その背後における津波による水位の上昇や流速を低減することを目的として、通常湾口部に設置されるものである。このため、湾口防波堤ともいわれる。防波堤の開口部における流入面積を小さくするほど防災効果があがるという点については高潮防波堤と同様である。現在、大船渡港においては完成しており、岩手県の久慈港および釜石港、高知県の須崎港において建設中である。その概要は表－3 のようである。

表－3 津波防波堤の諸元

場所	延長(m)	開口幅(m)	水深(m)	水域(km ²)	建設期
久慈港(岩手県)	北 2700 南 1100	350	10～25	12	1990～2021 (予定)
釜石港(岩手県)	北 990 南 670	300	10～60	9	1970～ 2006(予定)
大船渡港(岩手県)	北 244 南 291	202	10～37	7	1963～1976
須崎港(高知県)	東 940 西 480	230	2～18	2.9	1983～ 2006(予定)

3. 2. 1 津波防波堤の建設の背景

世界で初めての津波防波堤は大船渡湾に建設された。これは、1960 年のチリ地震津波による被災に起因している。1960 年 5 月 23 日 4 時頃（日本時間）にチリ中部西海岸で発生した地震（マグニチュード 8.5）は津波を発生させ、チリの海岸だけでなく、北米の太平洋沿岸、ハワイ諸島および我が国にも大きな被害を及ぼした。津波は太平洋を 22～23 時間かけて伝播し、その影響は北海道から南西諸島までの我が国の太平洋沿岸全域にわたった。その中でも三陸地方の被害が大きかった。三陸沿岸は津波が増幅しやすいリアス式海岸であるためチリ地震津波以前にも何度も津波の被害を受けている。昭和三陸地震津波（1933 年 3 月 3 日、マグニチュード 8.1）や明治三陸地震津波（1896 年 6 月 15 日、マグニチュード 8.5）にときには、10～20 分程度の周期の津波に襲われている。これに対して、チリ地震津波は約 40 分と長い周期であったことが特徴的である。岩手県（1969）によると、チリ地震津波以前に防潮施設が造られていた老田町や三陸町吉浜などでは津波はそれほど大きくなく被害も少なかった。一方、人的被害は大船渡市や陸前高田市に集中し、死者および行方不明者は 61 名であり、岩手県内のその他の場所で行方不明者が 1 名であったことに比べると非常に犠牲者が多い。従来の三陸地震津波の経験から、大船渡湾の湾奥部は比較的安全であると思われていたが、チリ地震津波では湾口部でほとんど被害がないのに比べて湾奥部で被害が発生した。これは比較的最長い周期の津波により大船渡湾が共振したためである。当時は遠地津波についての理解がほとんど無かったが、遠地津波による被害が近地津波による被害と若干違った形で生じており、津波対策を検討する際に近地津波と合わせて遠地津波にも注意を払う必要がある。

なお、チリ地震津波が太平洋沿岸諸国に多大な被害をもたらしたことを契機として、1968 年に太平洋津波警報組織（ITSU）がユネスコの政府間海洋学委員会（IOC）のもとに設立されている。これは、太平洋沿岸諸国が地震や津波に関する情報を交換し、各国の津波災害の防止や軽減を進展させることを目的としたものであり、現在の参加国は我が国を含めて 25 の国や地域である。太平洋全域に影響を及ぼす可能性のある津波の情報の収集および提供はハワイにある太平洋津波警報センターが担当している。

岩手県におけるその他の港における津波防波堤も大船渡港のものと同様に明治や昭和の三陸地震津波やチリ地震津波などの津波被害を軽減させることを目的としている。高知県須崎港は、1946 年南海地震、1944

年東南海地震、1854 年安政南海地震、1707 年宝永地震、1605 年慶長地震などによる津波により何度も被害を受けている。およそ 100 年から 150 年周期で被害を受けていることになる。さらにチリ地震津波によって湾奥部にある防潮堤などの被害が生じている。

港湾内における津波対策として防潮堤の建設をする場合には、延長が長くなり巨額な費用が必要になるばかりでなく、天端の高い防潮堤は沿岸域の利用に大きな影響を及ぼし、利用上から水門や陸閘などの数が多くなるので維持管理費が増大するとともに津波来襲までに全ての水門や陸閘などを閉鎖することが困難になるなどの短所が上げられる。このため、沿岸部における防潮堤の代わりに、湾に浸入する津波を軽減させ、陸域への浸水を軽減するとともに、湾内に停泊する船舶や養殖水面への影響を軽減するために湾口部に津波防波堤を建設する案が上記の港湾において採用された。

3. 2. 2 津波防波堤の概要

大船渡湾は奥行約 6km、幅約 2km で湾内の水深は最深部 -40m、平均 -20m である (図-3)。この湾の幅 740m の湾口を北堤 244m と南堤 291m により開口幅 202m にまで狭めている。さらに、開口部は 10 万トン級の船舶が入港可能な水深として -16.3m を確保し、それよりも下部には潜堤が設置されている (図-4)。この津波防波堤によって湾口における流入断面積は 3,380m² となった。

釜石湾は W 字型の湾であり、湾口幅は約 2km で湾口部における最大水深は -63m と極めて深い。この湾口を北堤 990m と南堤 670m により開口幅を 300m にまで狭めている。なお、防波堤の陸側に接する両端には湾内外の海水交流の促進、漁船の通行の利便などからそれぞれ幅 50m の開口部も設けられている。主となる開口部には 30m 以上の高さのマウンドを設置して水深 -19m にまで浅くしている。なお、大船渡湾の津波防波堤と異なって一直線上に津波防波堤が配置されていない。これは、一直線上に津波防波堤を配置した場合には大型船の航路が釜石湾内において急角度で屈曲しなければならなくなり、大型船の操船上問題が生じるために考案された。航路をできるだけ曲げない代わりに津波防波堤の方を曲げたことになる。

津波防波堤の設計に際しては、防波堤に作用する津波だけでなく、設置水深が深くなると作用する波浪も大きくなるので、両者を比較して天端高やその他の耐波安定性を検討する。

3. 2. 3 津波防波堤の効果

津波防波堤の効果は、

- ① 湾口を狭めることによって湾内への流入量を減少させること
- ② 開口部に生じる渦によって津波のエネルギーを散逸させること



図-3 大船渡湾

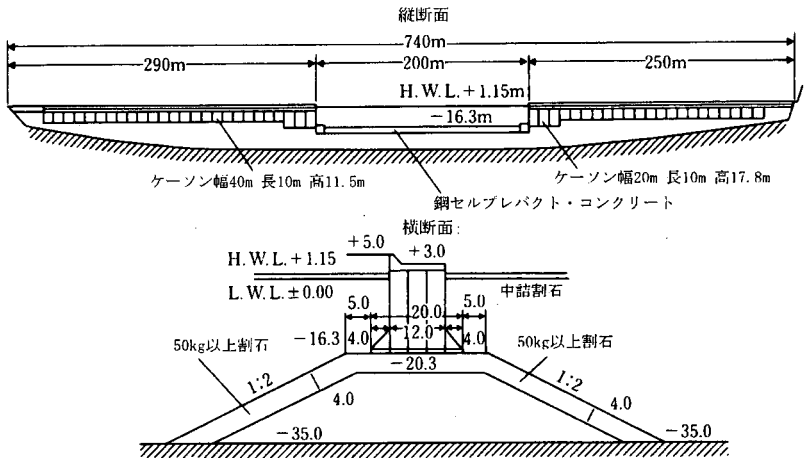


図-4 大船渡湾の湾口防波堤 (津波防波堤) (渡辺、1998)

③ 防波堤によって津波の先端部が段波状になるのを和らげること

④ 湾の共振周期を変えることによって津波による共振を防ぐこと

などであり(中村・林, 1978)、これらの効果によって湾内の水域における津波高や流速を低減し、陸上浸水域を小さくする。

(1) 津波高および浸水域の低減

大船渡湾の津波防波堤が完成した後の 1968 年 5 月 16 日午前 9 時 49 分に発生した十勝沖地震(マグニチュード 7.8)に伴った津波が、大船渡湾に襲った。幸い、津波の最盛期は干潮時であったので防波堤の効果と合わせて、陸上浸水は皆無であった。伊藤ら(1968)は、防波堤のある場合とない場合について数値計算を行って、津波防波堤の津波防止効果を検討した。その結果、湾奥部における津波高は、防波堤がある場合(現況)では観測値と同じ 1.2m であるのに対し、防波堤がない場合では 2.2m と概ね倍の水位になってしまうことが明らかになった。また、湾内の流速についても、津波防波堤の開口部付近を除き、湾内全体にわたって小さくなることを示した。津波防波堤の効果によって速いところでも 1m/s 程度であるのに対し、防波堤がなければ 2m/s に倍増する。

後藤・佐藤(1993)は、遠地津波に対しては曲面座標系の線形分散波理論、沖合における津波に対しては線形長波理論、沿岸における津波に対しては非線形長波理論を適用する津波数値計算システムを使って、大船渡湾や釜石湾における津波防波堤の効果を検討した。また、釜石湾の津波防波堤については、水理実験結果との比較から、防波堤開口部におけるエネルギー損失を数値計算によって再現するための運動量損失係数は 0.5 にすればよいと提案している。なお、この値は釜石湾の津波防波堤を対象としたものであり、防波堤の形状や設置水深などにより変化する可能性がある。そのままだかの津波防波堤へ適用することは難しい。チリ地震津波に対する大船渡湾における津波防波堤の効果に関する検討では、津波高は防波堤がない場合には湾口部で 2.2m 程度、湾奥部で 4.5m 程度となり、防波堤がある場合には湾口部で 1.2m 程度、湾奥部で 1.9m 程度となっており、津波防波堤によって半減する。陸上浸水域は、防波堤がない場合には実際の被害と同様に市街地まで広がっていたものが、津波防波堤がある場合には防潮堤が整備されていない低地部にのみ発生し、その浸水深も数 10cm 程度となった。釜石湾の津波防波堤についても同様な検討を行って、津波防波堤の整備により湾内の最大津波高が減少するとともに陸上浸水域は無くなり、さらに津波防波堤の開口部における運動量損失を考慮することによって最大津波高は 0.2m 程度低減することを示した。また、高田・平石(1998)は周期の比較的短い近地津波を対象として釜石湾の津波防波堤の効果を数値計算で検討し、図-5 に示すように津波防波堤の効果により津波高、陸上遡上域や遡上水深が低減することや、遡上水深などが減少することにより水流圧力(浸水深×流速²)も低減することを示している。

(2) 避難可能時間の増加

簡単な V 字型湾(図-6)を対象として、津波による海域および遡上域における水位の時間変動を図-7 に示す。この図から、津波防波堤を設置することにより、

① 最大津波高や最大浸水深が減少すること

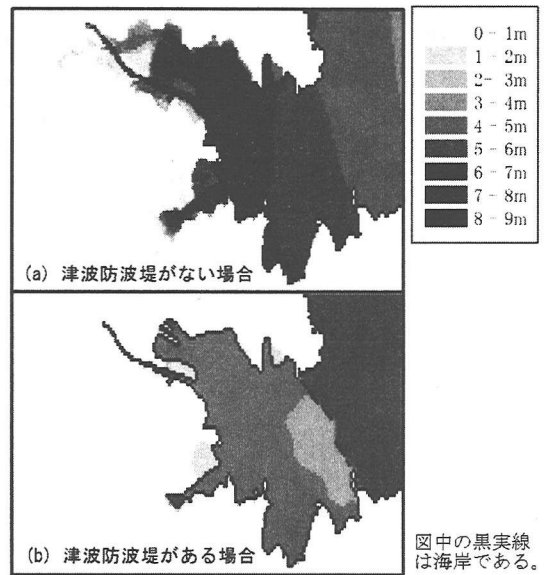


図-5 津波防波堤の有無による津波高と浸水域

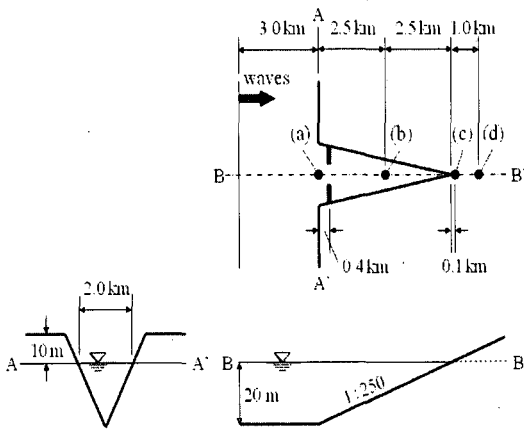


図-6 V字型湾

- ② 遡上域(c)および(d)では最大浸水深は1m程度あるいはそれ以上になるが、浸水深50cmに達する時刻が遅れること

という防災効果があることがわかる。②の効果は、

もし最大浸水深が避難不可能な水深になる場所であったとしても、その浸水深に達するまでの時刻が遅れることにより避難可能な時間が増加することを意味している。すなわち、津波防波堤では防護しきれないような想定以上の津波が来襲して避難が必要になったときに、津波防波堤は避難時間を稼ぐ効果をもっている。

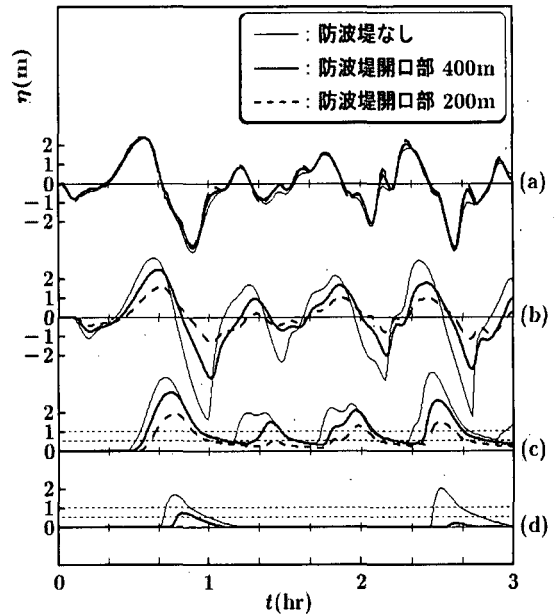


図-7 津波波形および遡上波形

3. 2. 4 開口部における流速増大への対策

津波防波堤は開口部を狭めることにより防災効果を発揮するが、開口部では流速が速くなる。この速い流速は開口部付近の基部の洗掘を引き起こす危険性があり、その対策が必要である。実際、1993年北海道南西沖地震津波の作用によって、奥尻港の東防波堤と東外防波堤の間の幅約35mの開口部における防波堤マウンドが洗掘され、両防波堤の堤頭函が転倒し、水没する被害が発生している。水理模型実験結果によると、5.8m/sの流速が作用すると堤頭部の角部における1トン被覆ブロックが移動し始め、9m/sの流速の作用によりマウンドの洗掘と堤頭函の倒壊が生じることが判明した(鶴谷・中川、1994；木村ら、1994)。

谷本ら(1988)は、釜石湾の津波防波堤の開口部における潜堤のマウンド被覆材の安定性をC.E.R.C.による法面被覆石の必要重量を算定する次式を使って行い、定数 y と被害率 D の関係を明らかにした。

$$W = \frac{\pi w_r u_d^6}{48 y^6 g^3 (w_r / w_o - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (3)$$

ここに、 W はマウンド被覆材の所要重量、 u_d はマウンド被覆材に作用する流速、 w_o は流体の単位体積重量、 w_r はマウンド被覆材の単位体積重量、 g は重力加速度、 θ はマウンド傾斜角、 y マウンド被覆材の安定状況を示す定数である。津波防波堤の開口部では、これらの成果および水理模型実験や数値シミュレーションによる検討から、速い流速への対応を考慮しなければならない。数値計算について、正村ら(2001)は3次元モデルを適用することにより、マウンド上の3次元性の強い流れを精度良く再現できることを示している。

3. 2. 5 環境問題の発生とその対策

既に津波防波堤の完成した大船渡湾では、津波防波堤により湾口部の断面積が約11%に減少して湾の閉鎖性が高まったことにより、水質環境が悪化したと指摘されている。湾の閉鎖性の程度を、村上(1998)は、

閉鎖度指数(E.I.)によって評価し、津波防波堤の建設前は E.I.=1.5 程度の半閉鎖性海域であったが津波防波堤の建設により 13.1 程度の閉鎖性海域になったこと示した。閉鎖度指数が 2.0 以上で閉鎖性海域に分類されることから判断すると、現在の大船渡湾はかなり強い閉鎖性を示すことになる。

$$E.I. = \sqrt{SD_1} / WD_2 \quad (4)$$

ここに、 S は湾の面積、 D_1 は湾内の平均水深、 W は湾口部の幅、 D_2 は湾口部の平均水深である。

さらに、村上(1998)は津波防波堤の具体的な影響を次のようにとりまとめている。

- ① 湾奥・湾央の夏期の透明度が低下した。
- ② 湾内での夏期における上下層の水温差が増大した。
- ③ 湾内の富栄養化が進んだ。堤泥からの栄養塩の溶出量は流入負荷量に比べて大きい。

これらは、津波防波堤により海水交換が悪化したことに加えて、流入負荷量が増大したことが主要な原因である。現状における海水交換を現地観測や数値計算から検討した岡田ら(2000)によると、大船渡湾の底層部における貧酸素水塊の形成や消滅には湾内外水の密度差によって開口部のマウンドを乗り越えて流入する湾外水が重要な役割を果たしているようである。

このように湾口部における防波堤が海水交換を阻害することへの対策として、海水交換を促進させる機能を備えた新形式の防波堤などの開発が進められている。例えば、湾外上層水を湾内底層に流入させる海水交換型防波堤(運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所、1997)、防波堤上部にある貯水部に越波して貯まった水塊を堤内に放出する海水交換型防波堤(下迫ら、1999)、津波防波堤開口部のマウンドと湾内底部とをつなぐパイプを取り付け、下げ潮時に流出する潮流によってパイプ口で発生する負圧を利用して湾内底層水を湾外へ放出する工法(小沢ら、2000)などである。

4. 大型水門

4. 1 都市港湾における大型水門

都市圏の港湾、例えば東京港、ではこれまでに受けた高潮や津波災害の経験を通して防潮堤や水門の整備が行われて来ている。その主要な施設整備は伊勢湾台風以降の 1960 年代から始まっており、現在では施設の老朽化への対応が求められているところも多い。さらに、大都市圏では、臨海部における産業および社会活動の進展にともなって、現在の防潮堤などによって構成される防潮ラインの海側に新たな埋立地が造成されてきている。これらの埋立地は現在物流用地などに利用されているが、これまでの臨海部における土地利用の変遷にも見られるように、今後の都市化の更なる進展によって土地利用の高度化が予想される。

一方、地球温暖化による海面上昇は避けられない状況にあり、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第3次報告書によると、1990年～2100年までの間に9cm～88cmの海面上昇が発生すると予測されている。しかし、我が国の局所的な地域、例えば東京湾、において、将来どの程度の海面上昇が生じるのかはよく分かっていない。ただし、東京湾口の久里浜におけるこれまでの検潮データを解析した永井ら(1997)によると、1958～1995年の38年間に平均的に2.03mm/年の水位上昇が実際に生じている。

このような沿岸域の脆弱性の増大を回避するために、防潮堤などにより沿岸域を囲い込むというような防護対策をとった場合には、海面上昇に応じて海岸線に沿って延びた防潮堤などの防護施設の天端高を随時上げなければならない。さらに、土地利用の変更にともなって防護施設の位置を変更させなければならないことが予想される。

これに代わる対策として、港湾の湾口部を締め切る方策が検討されている。湾口部を締め切ることにより、防護ラインの短縮化が図れるとともに、港湾内における埋立地の高度利用にも柔軟に対応できるようになると期待されている。しかし、大都市圏の港湾には大型コンテナ船も入港するため、それに合わせた幅や水深を確保した航路が必要である。例えば、東京港の第1航路は幅450m、水深15mである。この大きな断面積

を通常時は確保しながら、高潮などの危機に際して締め切らなければならない。そのためには大型水門が必要となってくる。我が国ではこのような大規模な水門に関して技術的な検討が始まったばかりである。

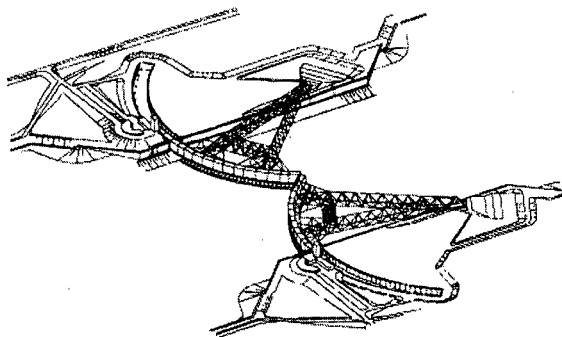


図-8 マエスラント・バリア

<http://parallel.park.org/Netherlands/pavilions/techno/svk/engels/werking/kerendewand.html> より

4. 2 海外における事例

海外における港湾大水門の事例の一つに、ロッテルダム港につながる新水路に建設されたマエスラント・バリア (Maeslant barrier、図-8) がある。ロッテルダム港は、コンテナ取扱量が世界第 6 位 (2001 年) のヨーロッパのハブ港湾であり、北海から 20 万トンクラスの船舶がロッテルダム港の内港地区へ向けて新航路を通過する。

ロッテルダム港があるオランダは、全国土面積の 25% は平均海面以下にあり、65% は防潮堤などの防護施設がなければ海岸や河川から浸水されるといわれる低地国家である。低地であるため高潮災害を何度も経験してきている。1953 年 2 月 1 日の高潮では、800km にわたり海岸堤防が決壊し、2,000km² 以上の土地が浸水し、1,835 名が亡くなり、3,000 以上の家屋が破壊される大災害となった。このとき、平均海面上 3.85m の潮位を南西部で記録している。この高潮災害を契機として南西部のデルタ地帯を高潮災害から防護するためのデルタ計画が立てられた。この計画により、北海に面する 6 つの入り江および河口の内、ロッテルダム港につながる新水路とベルギーのアントワープ港につづくベスターシェルデ (Westerschelde) を除いて、4 つの入り江が締め切られた。デルタ計画における計画潮位は平均海面上 5m であり、その発生確率は 1 万年に 1 回である (合田、1996 : Van De Ven、1996)。

マエスラント・バリアは 1991~1997 年に建設されたデルタ計画の最後の水門であり、世界最大規模のセクターゲートである。水路の幅は 360m、設置水深は -17m (底面は平坦および保護のため施工されている)、計画潮位は +5m (H.W.L. は +1.5m、L.W.L. は -0.65m)、ゲート高さは 22m である。通常ゲートは水路に併設された広場にあるドライドックに格納されており、3.0m 以上の高潮が予想されるときに閉鎖される。閉鎖するためには、格納ドック内への注水とドックゲートを開くのに 30 分を要した後、ゲートの水平移動に 30 分、ゲート内に注水し底面上 1m までの沈むまでに 1 時間、底面の土砂をフラッシングして着床するまでに 1 時間の合計 2.5 時間が必要である。一方、ゲートを開ける場合には、フラッシング操作が必要ないので 1.5 時間で格納ドックまでもどる。また、ゲートを閉めるかどうかは、コンピュータ・プログラムによって決定されるようである (沿岸開発技術研究センター、2001)。

我が国にもセクターゲートはある。例えば、東京港内にある新砂水門である。有効幅員は 23.4m であり、オランダのセクターゲートに比べればかなり規模は小さいが、閉鎖および開放に要する時間は 5 分と短い。セクターゲートの最大の弱点は、通常ゲートを格納しておくために広大な面積が必要となることであり、高密度に利用されている我が国の港湾で 100m 以上の規模のセクターゲートを格納しておくための用地が港湾の入り口にあるところは多くない。そのため、イタリアのベネチアにおけるモーゼ計画で検討されているフラップ・ゲートなど他のタイプのゲートについても検討が進められている。

5. 防災システム

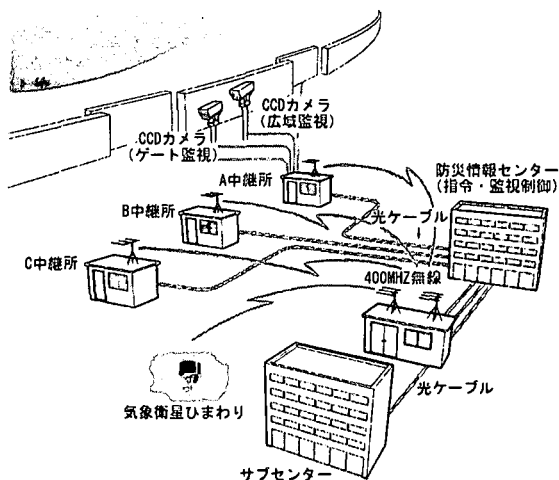
5. 1 津波高潮防災ステーション

沿岸域を津波や高潮から防護する防潮堤や防潮壁には、それらの外にある港湾や漁港施設、あるいは臨海レクリエーション施設などへアクセスするために大小さまざまな開口部が所々に設置される。これらの開口部

これまで、津波や高潮の警報や注意報が発表されたときなどに陸閘や水門を閉鎖するためには、その場所へ人が赴いて人力あるいは電動によって陸閘や水門を閉めていた。陸閘などを閉めに行く人は、その近くの住民、委託した民間会社の担当者、あるいは地方自治体による管理機関の職員など、地域により様々である。しかし、近地津波のように1分でも早く高所へ避難しなければならないよう

まず、津波防災ステーションの整備が、1997 年以降、北海道から静岡県¹の太平洋沿岸の 6 箇所（北海道浜中町、青森県百石町、岩手県種市町、岩手県大船渡市、静岡県清水市および静岡県焼津市）において進められている。また、津波高潮防災ステーションに関しては、静岡県相良町において当初津波防災ステーションとして整備が進められていたものに、1999 年の台風 18 号による高潮災害を契機として高潮防災に関する視点が加えられて、2001 年から全国で第 1 号の津波高潮防災ステーションとして整備が行われている。

水門や陸閘の監視や遠隔操作を一元的に行う防災ステーションのセンターは、24 時間体制のとれる清水市役所の消防通信指令室に設置されている。さらに、高い信頼性を保つシステムにするための幾つか工夫がある。例えば、センターと同等の機能を持つサブシステムが清水港管理局に置かれており、各地区の制御所までは光ケーブルとそのバックアップとして無線が使用できるようになっている。さらに、電源に関しても、商用電力の他、それらが使えない場合に備えて蓄電池が制御所に設置されている。



また、相良町における津波高潮防災ステーションの時間短縮の効果が試算されている。これまで水門や陸間の設置地域における住民に依頼していた閉鎖作業を一元的な遠隔操作によって行うことにより、これまで情報伝達のため時間および人が陸間等へ移動する時間として必要とされた 20 分が不要となり、門扉の実質的な閉鎖時間の 5 分のみで閉鎖が完了するようになっている。

さて、津波高潮防災ステーションが、危機に際して確実に機能するためには、日頃の機械や電気設備の点検整備、陸間や水門における障害物の除去が重要であることは言うまでもない。また、津波高潮防災ステーションは、地震、津波あるいは台風等に関する気象情報を得てから機能するものであるため、特に津波に関しては津波監視網からの確かな情報を得られるようにすることも重要である。さらに、津波高潮防災ステーションが整備されていない場所においては、少なくとも常時開放が必要のない陸間は開けたら閉めるという習慣が大切である。

5.2 ハザードマップ

高潮や津波に対して、防潮堤、水門、防波堤などのハード的な防護対策を整備することによって人命の損失を完全に防ぐことは残念ながらできていない。構造物を計画・設計するときに想定した高潮、波浪、津波などよりも大きなものが来襲することなどがあるためである。このような状況の下、少なくとも人的被害をなくすために、適切な避難を可能にするハザードマップ（図-10）の整備が急がれている。

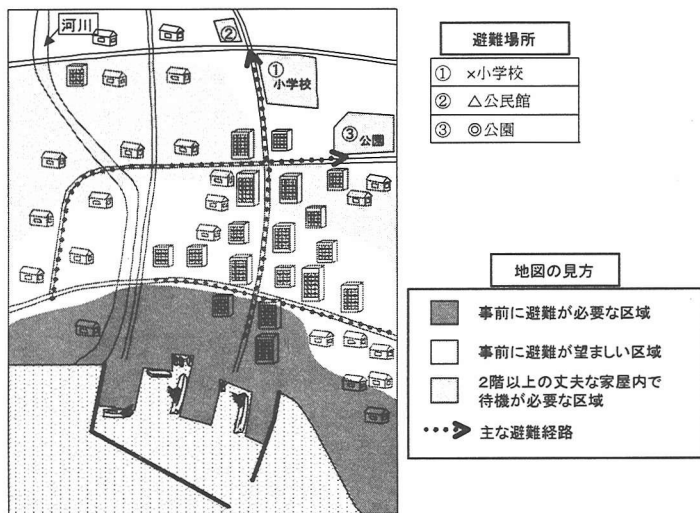


図-10 ハザードマップのイメージ

5.2.1 構造物の設計における高潮および津波

防潮堤などの構造物を作るためには、それに作用する外力を決定することから始まる。例えば、港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（運輸省告示第 181 号、平成 11 年）では、「港湾の施設の構造の設定及び安定の検討に用いる潮位は、天文潮及び気象潮並びに津波等による異常潮位の実測又は推算値に基づいて定めるものとする。ただし、潮汐の影響が大きい湖沼又は河川に係る港湾の施設にあっては、水位記録等に基づいて適切に定めるものとする。」となっており、その解説書（港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会、1999）には、高潮対策施設の設計高潮位の決め方として次の 4 つの考え方が示されている。

- ① 既往最高潮位、あるいはこれに若干の余裕を見込んだ潮位を用いる。
- ② 朔望平均満潮位に既往の最大潮位偏差、あるいはモデル高潮の潮位偏差を加えたものを用いる。
- ③ 既往の異常高潮位の生起確率曲線を求め、外挿により、ある再現期間（例えば 50 年、100 年など）の間に、それより高い潮位の発生回数が 1 であるような潮位を用いる。
- ④ 異常高潮位の生起確率と各潮位に対する背後地の被害額及び高潮対策施設の建設費を勘案して経済的に決定する。

海岸保全施設の場合、①あるいは②を原則としている（海岸保全施設築造基準連絡協議会、1987）。しかし、いずれの方法にしても設計高潮位を越える潮位が将来発生しないことを保証していない。また、津波対策施設においても、既往最大津波となった北海道南西沖地震津波を基準として各種防護施設を整備した北海道

尻町、昭和三陸地震津波規模を対象として防潮堤を整備した岩手県田老町（安藤、1998）など、既往の津波を対象として設計が行われる場合が多く、対象津波以上の津波が将来来襲する可能性は否定できない。

さらに、想定以外の高潮や高波あるいは津波が作用したときに、防護施設はどの程度損傷するのか、どのような浸水が生じるのかなどについては現在の設計手法では分からない。そこで、高橋ら（2002）は、30～100年のレベルⅠ、100～1,000年のレベルⅡおよび1,000～10,000年のレベルⅢの高潮や高波について、施設の重要度に応じて決められる防護性能や安定性能を評価して、既往の高潮や高波以上のものが作用したときに何が起こるのかが把握できる性能設計の考え方を示している。

5. 2. 2 浸水予測

防潮堤などの防護施設において設計対象以上の高潮、津波などが来襲した場合には、海水が陸上に浸入する。浸水予測は、古くは既往の浸水被害を基準にしていたが、現在は対象とする高潮や津波などに対して数値シミュレーションを行うのが普通である。高潮や津波に関する数値シミュレーション手法は、これまでに数多く発表されている（今村、1998：山下、2000）。また、陸上遡上に関する数値シミュレーションも、最近ではかなり詳細に行われるようになってきている（河田ら、1999：山田ら、2000：劉ら、2001）。海上における高潮や津波、あるいは陸上における浸水・遡上を数値シミュレーションするモデル方程式に関しては、非線形性や3次元性を考慮するなど進展しているが、詳細な計算をするためには詳細な地形データが不可欠である。特に建築物、道路、地下空間（地下街や地下鉄など）への入り口など種々のものが高密度に分布している都市部における浸水・遡上計算には詳細な地形データが必要である。

さらに、浸水を予測する際に海岸における防護施設を評価するか否かの問題がある。評価するという場合における理由は、防護施設の本来もっている機能を評価しようということである。一方、評価しないときの理由は、地震後瞬時に襲ってくる津波の場合には陸間などを閉めることができない場合があること、地震により液状化が発生するなどして古い防護施設が破損して所定の防護機能を果たさない可能性があることなどによって、そこから海水が浸入する可能性を否定できないからである。現状において、特に津波に対しては、どちらも正しいと言わざるを得ない。実際に、東海地震による津波に備えている静岡県では、第3次地震被害想定において海岸における施設を考慮したときの浸水予測結果と施設を考慮しない浸水予測結果を併記した浸水予測図を公表している。

今後は、新設だけでなく既設も含めて防護施設の性能設計や性能照査を行えば、幾つかのレベルの高潮や津波などに対する浸水深などが分かるようになるので、その結果をハザードマップなどに反映させることができるようになる。それと同時に、海岸における防護施設の現状を把握し、必要な補修などを行うことも重要である。これらの方面に関する研究開発が今後必要である。

5. 2. 3 避難可能な水深

ハザードマップに記載される事項として最も重要なのは浸水予測図である。前述した静岡県が公表している浸水予測図では、0～0.5m、0.5～1m、1～2m、2m以上というように浸水域が色分けされている。では、どの程度の水深までであれば、避難が可能なのであろうか。

避難可能な水深はこれまでも検討されている。伊勢湾台風災害調査特別委員会報告書によると、平均風速約20m/sの暴風が吹く夜間に浸水地域内を逃げて助かった大人と子供（小学校5～6年）からヒアリングした結果（表－4）から、避難可能な水深は大人の男性では約70cm以下、女性では50cm以下、小学校5・6年の子供では30cm以下であった（饒村、1994）。また、陸上における氾濫水とは若干異なるが、高橋ら（1994）は、親水性防波堤上を利用する人が防波堤を越波する水の流れによって転倒・転落する特性を実験的に検討した。その結果、身長が152cmの人が越波水によって流され防波堤上から転落するときの転落位置における水深は26cmであることを明らかにしている。この水深は身長の17%に相当し、膝よりも少し下

程度の深さであろう。伊勢湾台風当時の小学 5・6 年児童の身長は 132cm～138cm 程度であり、前述した実験結果を参考にして転落限界水深を身長 の 17% に仮定すると、23cm 程度の水深で流されることになる。この水深は、伊勢湾台風災害調査特別委員会の報告書において危険とされた水深にほぼ等しくなる。

浸水予測図には上述したように最低水深として 50cm が採用されているものが多い。これは大人の膝辺りの高さであり、子供が避難するには深すぎる水深となってしまう。しかし、建物を対象にしたときには、浸水深 50cm は床上浸水相当の浸水深 45cm と概ね等しい深さである。

表－4 避難可能水深（饒村、1994）

水深(cm)	大人(人)		子供(人)		
	男	女	男	女	
0-10	42	35	8	15	
10-20			2	1	
20-30					
30-40			0	0	
40-50	11	7			
50-60	2	0			
60-70					
70-80	0	0			
80-90					
90-100					
100以上	0	0			

5. 2. 4 高潮に関するハザードマップ

1999 年の台風 18 号による高潮災害の後、高潮に関係する関係省庁は「高潮防災情報等のあり方研究会」（座長：河田恵昭教授、京都大学巨大災害センター所長）を開催し、「地域防災計画における高潮対策の強化マニュアル」を作成した。その中で、ハザードマップの作成に係る手続き（地域住民の参加など）、記載項目や作成後の対応などがとりまとめられた。ハザードマップの記載項目には、浸水予測区域や避難場所、避難情報の伝達手段など、住民の安全かつ的確な避難活動に役立つ「避難活用情報」、高潮の発生メカニズムや既往高潮の状況など、住民が学習して自主的な防災意識を高めるのに役立つ「災害学習情報」があるとまとめている。さらに、高潮や津波時の住民の避難行動特性をモデル化する試みがある。武田ら(1997)は高潮を対象として住民の避難行動をモデル化しており、今村ら(2001)は津波を対象に住民の避難行動を数値シミュレーションによって再現しようとしている。この方面の研究の発展とその成果のハザードマップなど避難対策への活用が今後期待される。

5. 3 避難タワー

浸水予測から避難が必要な場所であると判断されても、河川等に囲まれて適切な避難路がとれない場合がある。三重県紀勢町錦地区では、そのような場所に 5 階建ての避難棟（錦タワー）を建設した。T.P.+6.5m の津波を記録した 1944 年東南海地震を基準に、2 階(8.1m)以上は浸水しないという想定の下、500 人程度が避難できるタワーである。通常は、1 階は消防倉庫、2 階部は集会所、3 階部は防災資料館となっており、4・5 階部は避難スペースとなっている。また、海岸に並ぶマンションなどの高層ビルを緊急時の避難場所に行っている方策もある。

5. 4 警報および注意報

地震発生後直ぐに襲ってくる津波から助かるためには、自主的な避難が最も基本である。実際に北海道南西沖地震津波の時に津波から助かった人は地震後直ぐに避難した人達であった。しかし、遠地津波や高潮の場合には、津波や高潮が襲ってくるのか否かあるいは何時来襲するのか分からないことがあるので、避難勧告などが有効であり、さらに市民に注意を喚起するとともに避難勧告の発令の基準となる警報や注意報が極めて重要である。なお、法律によって高潮警報は気象庁以外の者は行うことができないが、津波警報に限っては気象庁以外の者であっても政令で定める場合には市町村の長が行うことができるようになっている。

警報あるいは注意報は、重大な災害あるいは災害が発生するおそれのあるときに発表される。津波に関しては、1999 年からシステムが一新され、地震が発生後、予め計算しておいた約 10 万の数値計算による津波データベースの中から、当該地震の震源位置とマグニチュードに最も近いモデルを選択して津波を予想し、

全国の海岸を 66 区に分割しそれぞれの海岸毎に津波注意報 (0.5m)、津波警報 (1m、2m)、大津波警報 (3m、4m、6m、8m、10m 以上) と数値的に注意報や警報が発表されるようになっている。警報などを発表するまでの時間は、北海道南西沖地震の場合には 5 分であったが現在は 3 分にまで短くなっている。一方、高潮警報や注意報は、実際にはあらかじめ各地で発表基準となる潮位が定められていて、その潮位に達すると予想されるときに発表される。例えば、東京地方では注意報は T.P.+2.0m、警報は T.P.+3.0m と定められている。すなわち、基準値を越えるか越えないかの判断は高潮警報や注意報によってできるが、津波予報のようにきめ細かくない。

さて、今年 2002 年 3 月 26 日に石垣島南方沖で発生した地震 (マグニチュードは当時 6.9 から 6.6 へ下方修正) と同月 31 日の台湾付近で発生した地震 (マグニチュードは当時 7.3 から 7.2 へ下方修正) により宮古島・八重山地方に津波警報が発表された。それぞれ予想された津波の高さ 2m と 1m であった。この警報を知り避難した人もいたが、知っていながら避難しなかった住民は多いようである。朝日新聞 (2002 年 4 月 12 日) によると、避難しなかった理由は「揺れがなかったから」、「港に防波堤があるから」などである。実際には、到達した津波は 10~20cm 程度と小さかったので、特に大きな被害は出ていないが、この津波警報と避難に関する実態から、幾つかの問題点が提起できよう。

- ① 警報の精度が悪い。
- ② 警報が発表されたにもかかわらず避難しようとししない。
- ③ 警報により店舗等を閉めて避難したにもかかわらず顕著な津波の来襲がなく、損害が生じる。

①については、前述の朝日新聞に記載されていたが、地震観測網の少ない地域では地震の規模や震源を精度高く求めることが困難であり、さらに断層のずれ方を決定するには 30 分以上かかるためずれ方は想定しなくてはならないなどの問題があるようである。しかしながら、精度向上に向けて努力が続けられているようである。②については、津波の現象、当該地域における過去の被害記録、防護施設の防護機能の限界などについて住民の理解が得られる努力を払わなければならない。③については、このような問題が生じたのかどうか分からないが、避難を勧めるのであればこのような問題も生じるであろう。こういったときの保証のあり方について予め検討しておく必要がある。

警報や注意報、あるいは避難勧告などが外れた場合には、オオカミ少年効果 (事前に行われた警告に間違いがあった場合、その後、その警告に対する信頼性が下がってしまうこと) が発生すると言われている。これは、本当にオオカミが来たときに極めて危険なことであるので、外れたときの住民への事情説明などを十分に行って理解を得る必要がある。

6. おわりに

これまでの高潮や津波への防災対策は、災害が起こった場所に集中的に行われている。北海道南西沖地震津波で大被害を受けた奥尻島などでは、高い防潮堤などが建設された。しかし、その時に被害を受けなかった他の場所には、新たな施設は建設されない。近い将来ではそのような場所の方が津波に遭遇する可能性は高い。そのような地域においては、より一層ソフト的な対策を合わせた防災システムが重要となる。防災システムが、効率的に機能するためにはハード対策の防護性能や安定性能の評価が重要であり、それを考慮した避難計画が実用的である。このため、施設を性能設計するための手法や施設の健全度を調査する手法に関する研究開発が必要である。

また、高潮や津波に関する数値計算はかなり精度高くなっている。しかし、その外力となる台風や震源に関する精度高いデータが得られた場合である。したがって、それらのデータを得るための観測システムや解析手法の進展が必要である。

最後に、これまで後手になりがちであった高潮や津波に対する防災対策が、地球温暖化による海面上昇が進んで沿岸の脆弱性が増大するこれからにおいて、先手がとれるように努力していかなければならない。

謝 辞

本稿の執筆に当たり、京都大学防災研究所の高山知司教授からは貴重なご助言を頂きました。また、情報および資料の収集に当たり、静岡県土木部港湾整備室、静岡県清水港湾管理局工務課、静岡県御前崎土木事務所、北海道奥尻町企画振興課、北海道開発局農業水産部水産課には多大なご協力を頂きました。さらに、図面の作成に際し、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部の高田悦子主任研究官、独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部高潮津波研究室の柿沼太郎研究官にご協力いただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 朝日新聞「奥尻その夜」取材班(1994)：奥尻その夜、朝日新聞社、190p.
- 安藤 昭(1998)：X字型大津波防潮堤、土木学会誌、1998年6月号、Vol.38-7、pp.16-17.
- 飯塚秀則・松富英夫(2000)：津波氾濫流の被害想定、海岸工学論文集、第47巻、pp.381-385.
- 伊藤喜行・谷本勝利・木原 力(1968)：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算（第4報）-1968十勝沖地震津波に対する大船渡津波防波堤の効果一、港湾技術研究所報告、第7巻、第4号、pp.55-83.
- 今村文彦(1998)：15年間における津波数値計算の発展と今後、月刊海洋、号外No.15（津波研究の最前線）。pp.99-104.
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦(2001)：津波避難数値計算シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用、自然災害科学、Vol.20、pp.386-390.
- 岩手県(1969)：チリ地震津波被害復興誌、261p.
- 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所(1997)：平成9年度海水交換技術検討調査報告書.
- 沿岸開発技術研究センター(2001)：大型水門に関する海外調査報告書、127p.
- 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史・古川恵太(2000)：大船渡湾における底層D O濃度の変動に及ぼす湾外の影響、海岸工学論文集、第47巻、pp.1041-1045.
- 奥尻町(1996)：北海道南西沖地震奥尻町記録書、北海道奥尻町役場、255p.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編(1987)：改訂 海岸保全施設築造基準解説、全国海岸協会、p.104.
- 加藤一正(1999)：伊勢湾と三河湾における高潮の特性、平成11年度港湾技術研究所研究特別講演会講演集、pp.1-18.
- 金子正光・山本保博(1999)：奥尻からの警鐘-今再び、北海道南西沖地震を検証する一、荘道社、165p.
- 河田恵昭(2000)：都市水害に備える～高潮・津波・洪水への危機管理～、海岸、Vol.40、No.2、pp.49-53.
- 河田恵昭・石井 和・小池信昭(1999)：津波の市街地への氾濫と地下空間への浸水過程のシミュレーション、海岸工学論文集、第46巻、pp.346-350.
- 木口 輝(2000)：青苗漁港人工地盤の建設-災害に強い漁港づくり一、第45階全国漁港建設技術研究発表会講演集、pp.27-43.
- 木村克俊・山本泰司・笹島隆彦・鶴谷広一・中川康之(1994)：1993年北海道南西沖地震津波による奥尻港防波堤の被災原因について、海岸工学論文集、第41巻、pp.1191-1195.
- 合田良實(1996)：土木と文明、鹿島出版会、pp.281-283.
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、pp.173-174.
- 国土交通省河川局海岸室(2001)：海岸統計、平成12年度、p.8.
- 小沢大造・平出友信・古川恵太・中村聡志・小林茂雄・国栖広志(2000)：負圧を利用した海水交換潜堤の用水特性の基礎的検討、海岸工学論文集、第47巻、pp.1161-1165.
- 後藤智明・佐藤一央(1993)：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発、港湾技術研究所報告、第32巻、第2号、pp.3-44.
- 柴本秀之・中山哲蔵(2000)：密度成層と wave setup を考慮した多層高潮推算による熊野灘高潮痕跡値の再現、海岸工学論文集、第47巻、pp.201-205.

- 下迫健一郎・行動充隆・藤堂ひろみ・福井正幸・高橋重雄(1999): 越波造流型海水交換防波堤の開発とその水理特性、海岸工学論文集、第 46 巻、pp.1096-1100.
- 首藤伸夫(1986): 津波と防災、土木学会論文集、第 369 号/II-5、pp.1-11.
- 首藤伸夫・中丸憲一・越村俊一(2002): 三陸沿岸における 2001 年 6 月ペルー津波、津波工学研究報告、第 19 号、pp.63-71.
- 首藤伸夫・松富英夫・卯花政孝(1994): 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の課題、海岸工学論文集、第 41 巻、pp.236-240.
- 高田悦子・平石哲也(1998): 防波堤による津波防災、津波研究の最前線、月刊海洋、号外 No.13、pp.196-201.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗(1994): 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する研究～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第 3 報)～、港湾技術研究所報告、第 33 巻、第 1 号、pp.3-35.
- 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰(2002): 沿岸防災施設の性能設計の基本的な考え方、海岸工学論文集、第 49 巻、pp.391-395.
- 高山知司ら(1994): 1993 年北海道南西沖地震津波の特性と被害、港湾技研資料、No.775、225p.
- 武内智行・中山哲盛・小柳一利・脇長 正(1994): 青苗漁港周辺の津波遡上とその防止対策に関する模型実験、海岸工学論文集、第 41 巻、pp.1196-1200.
- 武田 誠・井上和也・戸田圭一・川池健司(1997): 高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討、海岸工学論文集、第 44 巻、pp.356-360.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司(1988): 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、Vol.27、No.4、pp.93-122.
- 谷本勝利ら(1983): 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察、港湾技研資料、No.470、pp.56-57.
- 鶴谷広一・中川康之(1994): 北海道南西沖地震津波による奥尻港東防波堤の被災再現実験、港湾技研資料、No.789、20p.
- 土木学会海岸工学委員会海岸施設設計便覧小委員会(2000): 海岸施設設計便覧、2000 年版、土木学会、p.363.
- 永井紀彦ら(1997): 長期検潮記録を用いた平均水位・潮位・長周期波解析、海岸工学論文集、第 44 巻、pp.261-265.
- 永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏(2000): 台風 9918 号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性、港湾技研資料、No.969、48p.
- 中村 誠(1996): 青苗漁港人工地盤の建設に向けて一災害に強い漁港づくりの具体化一、第 41 階全国漁港建設技術研究発表会講演集、pp.86-104.
- 中村龍二・林 直樹(1978): 釜石湾口防波堤による津波防止計画、第 25 回海岸工学講演会論文集、pp.585-588.
- 饒村 曜(1994): 続・台風物語、クライム気象図書出版部、p.48.
- 羽鳥徳太郎(1984): 津波による家屋の破壊率、地震研究所彙報、Vol.59、pp.433-439.
- 廣井 脩(1995): 災害情報と避難、自然災害と防災(下鶴大輔、伯野元彦編)、日本学術振興会、pp.235-248.
- 正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利率(2001): 2 次元・3 次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析、土木学会論文集、No.670/II-54、pp.49-61.
- 松富英夫(1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性、土木学会論文集、No.621/II-47、pp.111-127.
- 松富英夫・大向達也(1999): 津波氾濫流の流体力に関する実験、海岸工学論文集、第 46 巻、pp.336-340.
- 村上和男(1998): 閉鎖性内湾域における海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究、港湾技研資料、No.900、142p.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章(1995): 伊勢湾における高潮の極値推定、海岸工学論文集、第 42 巻、pp.321-325.
- 山下隆男(2000): 高潮の数値シミュレーション、月刊海洋、Vol.32、No.11、pp.752-762.
- 山下隆男・別宮 功(1996): 台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算-推算誤差は波浪か成層か? -、海岸工学論文集、第 43 巻、pp.261-265.
- 山田文彦・滝川 清・永野良祐(2000): 台風 9918 号による不知火町松合地区高潮氾濫の災害特性とその数値計算、海岸工学論文集、第 47 巻、pp.301-305.
- 劉 曉東ら(2001): 市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析、海岸工学論文集、第 48 巻、pp.341-345.
- 渡辺偉夫(1998): 日本被害津波総覧、第 2 版、東京大学出版、pp.42-43.
- Van De Ven, G.P. (1996): Man-made lowlands, History of water management and land reclamation in the Netherlands, Third revised edition, Uitgeverij Matrijs, 294p.