

B-10 地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究

(5) 沿岸域に対する災害リスクの変化予測と対応策策定目標に関する研究

Risk prediction for coastal area and goal setting for protection option

研究代表者 港湾技術研究所 堀江 毅

運輸省 港湾技術研究所

次長（元 海洋水理部長）	堀江 毅
海洋環境部長（元 特別研究官（環境担当））	小笹 博昭
特別研究官（環境担当）	國田 治
海洋環境部環境評価研究室（元海洋水理部海域環境研究室）	村上 和男
海洋環境部海水浄化研究室（元海洋水理部海水浄化研究室）	細川 恭史
	古川 恵太
	三好 英一

（委託先）	茨城大学 工学部	三村 信男
	東京大学 工学部	磯部 雅彦
	東京都立大学 理工学部	堀 信行

平成5-7年度合計予算額 45,013千円
(平成7年度予算額 13,049千円)

要旨

海面水位上昇にともなう沿岸域への影響を、地域の脆弱性の評価と災害リスクの変化および対応策の策定法とから検討する。影響の受け皿である沿岸地域の特性と影響外力である気候変動や海面水位上昇の特性とを考慮する。脆弱性評価手法の検討を、異なる地域条件下で比較する中で行おうとしている。沿岸利用が進んだ高密度利用型の海岸として日本を選び、防護オプションを選択したときの対応策について、技術的な検討をすすめた。一方、途上国型の海岸として、アジアの沿岸を選び、島しょ国海岸ならびに大河川河口デルタの低平地への影響の表れ方について、気象・統計データや数値解析等により検討を進めた。タイ国チャオプラヤ川デルタへの台風高潮の影響、中国珠江デルタへの高潮影響、トンガ王国トンガタブ島への影響等を比較した。塩水の遡上や河口付近での土砂の堆積に関し、河床勾配が緩いと流下流量によっても影響を受け、遡上点や堆積ピーク点が上流側へシフトし利水や防災上の脆弱性を増す恐れがあることが確認できた。影響度合いの潜在的大きさを比較検討し、人口や産業の張り付き方や社会経済構造が異なると、影響の様相も異なる事を示した。

キーワード 脆弱性、災害リスク、アジア海岸、島しょ国、大河川河口デルタ、高潮

1. 序

沿岸域には、人口・農地・湿地・社会資本・情報といった有形・無形の資産が高度に集積されている。その資産を高潮・津波等の外力から守るために沿岸防災の諸システムはじめ、給排水システムや、自然海浜の高潮・波浪防護機構等が稼働している。気候の変動や海水面上昇等の影響は、沿岸域の防護機構へ直接・間接の経路により伝搬される。その結果として発現する影響を事前に評価しておくことは、いまだ不確定要素を含む現象である地球の温暖化に対応していく上で重要である。特に、地球の温暖化や気候変動幅・海水面の上昇量が不確定な現状では、ある地域の防護機構が外力に耐えるか否か、被災するか安全か、といった判定は困難である。防災対策上は、ある地域の潜在的脆さ（脆弱性）が、気候変動によりどのように変化するかを見て行く方が有効である。さらに、災害のリスクは、「地域の重要度・集積度」と「地域が被る伝搬された外力変動」「外力変動に対する地域の応答性」とを考慮することで評価される。

2. 研究の方法

アジアの沿岸低地は、太平洋インド洋島しょ国と並び、海面水位上昇に対し脆弱であるとされている。また、我国のように高密度な利用がなされた沿岸にとって、海面水位上昇の影響は広範囲に及ぶとされている。しかし、地域毎に特性を持つ沿岸に対し、どのような地形や土地の利用がどのような気候変動に対し脆弱なのかは不詳である。研究は、影響の伝搬経路に関する検討をふまえ、影響の受け皿である沿岸地域の特性と影響外力である気候変動や海面水位上昇の特性とを把握する。また、脆弱性評価手法の検討を、異なる地域条件下での海水面上昇等に対する応答性を比較・解析する中で行おうとしている。

沿岸利用が進んだ高密度利用型の海岸として日本を選び、沿岸情報のデータベース化の準備をすると共に、防護オプションを選択したときの対応策について、技術的な検討をすすめた。

一方、人口や産業の張り付き方や社会経済構造がやや異なる途上国型の海岸として、アジアの沿岸を選び、影響度合いの潜在的大きさを既往の文献・データから比較検討した。アジア沿岸域の自然条件（地理、自然外力等）・社会経済条件（経済、人口、土地利用等）を調査した。調査結果は、等高線の入った地図上に社会経済条件の統計値を重ね合わせることによって、海水位上昇シナリオで仮定される海水位の上昇が起こる場合における潜在影響を粗く推定した。脆弱性評価の基礎資料として沿岸部の相互比較を試みた。大河川河口デルタの低平地への影響の表れ方について、気象統計データや数値解析等により検討を進めた。河口デルタ地域の大きな特性のうち、土砂の堆積傾向の変化、塩水の遡上の変化、台風による高潮影響を取り上げ、温暖化や海面水位上昇による変化を検討した。また、島しょ国における沿岸影響を人口圧力の表れ方から推定した。

3. 検討結果

（1）高密度利用型の沿岸に対する防護対応策の検討

a. 浸水のリスク比較

地域の特性として、影響外力の分布と受け皿である地域の社会経済活動の分布とが主要なものである。影響外力は、潮汐・波浪・高潮とした。潮汐では、日本海側で小さく太平洋側で大きい。波浪では、内湾や内海で小さく、外洋に面した沿岸では大きい。社会経済的な活動では、いずれも海に面した沿岸域という特性はあるものの、三大湾奥部での産業と人口の極めて高い集積が目立つ。

地域毎の影響の比較のために、都道府県別に沿岸での影響面積や影響人口を見積もった。国土庁の沿岸区分などを参照に日本沿岸を大きく4つの地区と内湾とに区分し、外力の代表値を与えることにした。潮汐・波浪・高潮条件につき地域の代表値を表-1のように与えた。平均水面の上昇を考慮した波高の上昇等を見積を行っている。国土数値情報などを利用し、都道府県別に氾濫危険地域（平均満潮位以下の標高の土地）の面積増加分・影響人口増加分を求めた。海面水位上昇が1 mの時の現状との差（増加分）の結果を図-1 a, bに示す。三大湾背後の関東・濃尾・大阪といった三大平野の奥部に影響が広がっていること、北海道・宮城・茨城・新潟といった外海に面した沿岸では影響面積の増大に比べ影響人口の増大が小さいこと、等の傾向に気付く。内湾湾奥や内海沿岸への人口や都市の集中の影響が、沿岸外力の変化よりも、より強く表れているものと思われる。ただし、波浪や高潮は季節風や台風を主因にして起きるが、大陸からの冬季季節風の変動や台風の変動は考慮していない等、表-1に示した値は気候変動の地域性を考慮した予測値ではない。

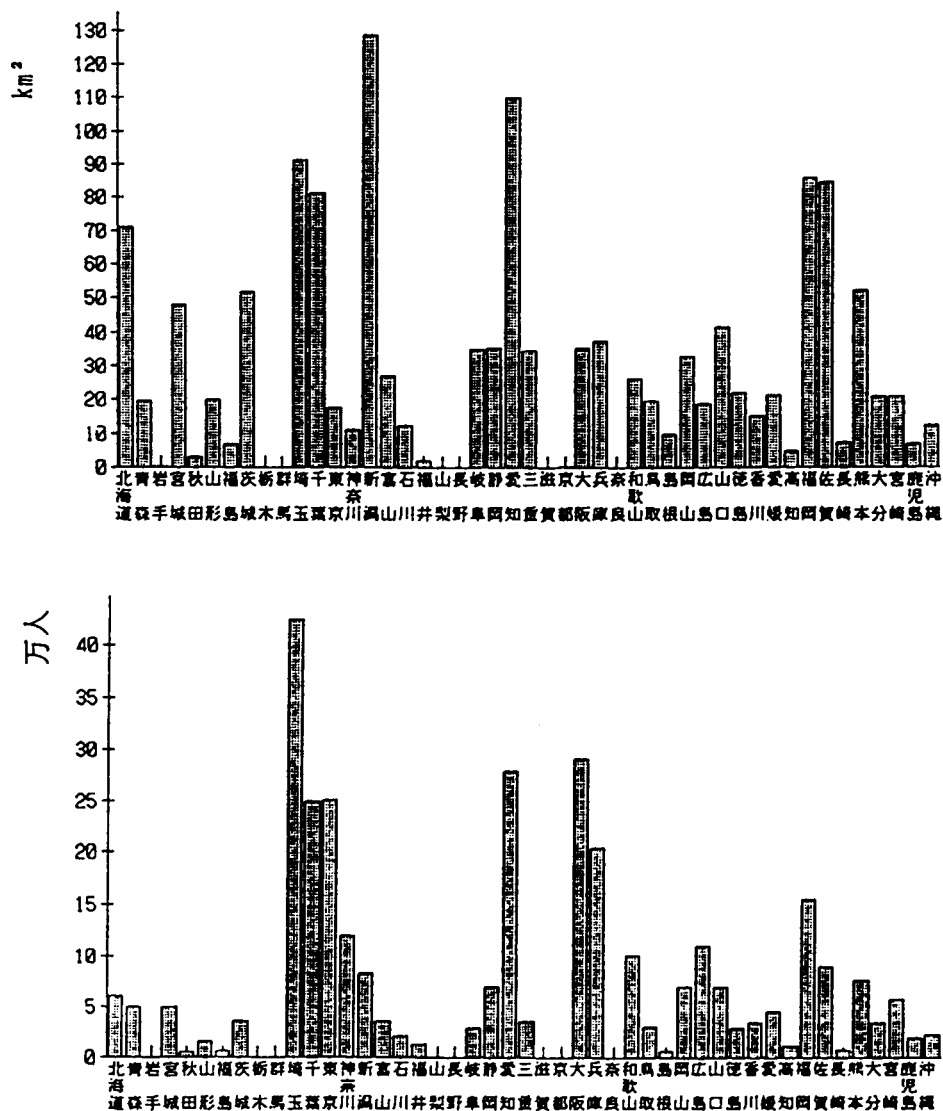


図-1 都道府県別の影響面積・人口の増加（現状と1 m上昇時との比較）
（上図 a：影響面積 単位km²，下図 b：影響人口 単位：万人）

表－１ 地区別に与えた潮汐・波浪・高潮条件

地 域	朔望平均 満潮位 ① T.P. m	既往最大 偏差 ② m	1/2計画波高 ③ m	現状での 設定浸水深 ④=①+②+③ m	海面水位 上昇量 ⑤ m	水位上昇後 設定浸水深 ④+⑤ m
閉鎖性内湾	1.17	1.30	1.11	3.6	1.0	4.6
日本海	0.71	0.63	1.73	3.1	1.0	4.1
太平洋岸北部	0.63	2.37	2.15	5.1	1.0	6.1
太平洋岸南部	0.90	1.10	2.20	4.2	1.0	5.2

ｂ．現在の防護施設の脆弱性

ついで、対応策について検討評価を試みた。I P C Cによれば、海水面の上昇に対する沿岸の対応策としては３つの選択肢があるとされている。すなわち、「防護(protection)」「順応(accommodation)」「撤退(retreat)」である。しかし、高密度に利用が進んだ沿岸部に対しては事実上「撤退」や「順応」の選択は不可能に近く、現状では「防護」によるところが大きい。海岸を所管している建設省や運輸省等各部局は、その最も基本的な「護岸のかさあげ」について検討していることが多い。一方、護岸のかさあげは、背後市民の海へのアクセスを阻害しやすい、景観上単調で人工的な海岸になりやすい、一箇所の破壊が一気に背後全体の被災につながりやすい、等の課題を抱えることになる。防災政策における、「環境配慮などを含めた多目的化」と「外力に対する粘り強さを配慮した複数手段の組み合わせ化」とを対応策検討時にも考えておく必要があると思われる。ここでは、「防護」の選択をしたとして、現在の技術として何が問題で何が可能であるのかを再整理¹⁾した。

海岸部の「防護」施設の水位上昇に対する脆弱性は、施設の種類・施設の設置水深等に依って変わる²⁾。施設の種類によって外力へ対抗する機構が異なるからであり、水深によって外力が変化するものの浅い水域では水位上昇の相対的な効果が大きくなるからである。構造物の大きさは、地盤や地震とともに波に対する強さを考慮して設計される。沿岸の波高（エネルギー）は、浅海での底面との摩擦などによりエネルギーを減衰させ、岸に向かって徐々に低下している。更に浅海部では、砕波により来襲波エネルギーは大きく放出され、波高は小さくなる。多くの構造物は、自重により来襲波をくい止めあるいは来襲波のエネルギーを逸散させている。

例えば、比較的沖合いに設置される防波堤では、水位の上昇は、浮力の増大による自重の減少と来襲波のエネルギー減衰率の低下（波高の増大）とにより防波機能の低下（天端を飛び越える波が頻繁に生じてくる）もしくは構造物被災（構造物が動いたり壊れたりする）の方向に働く。仮想地形上に置いた単純な断面の防波堤を対象に、被災の様子をシミュレートしてみると、水位上昇による構造物被災は主に波の衝突による滑動（防波堤が波の力で滑り動くこと）として起こり、各水深に対し最適な設計で構築すると浅い場所の防波堤ほど水位上昇後の滑動の確率が上昇前よりも大きくなることが解った。特に、水位上昇により砕波点が浅海構造物の設置位置にまで移動すると構造物に働く波力が急増することになる。

また、離岸堤や突堤などの海岸防護構造物は多くの場合浅海の砕波領域に設置される。砕波領

域の波高は水深にほぼ比例する。海水面の上昇により構造物設置位置での水深は増大し、波高も増大する。離岸堤などに用いられている消波のための異形ブロック（自重数トン程度のものが多い）等では、波の揺り動かしに対し自重等で対抗している。必要重量は波高の3乗に比例する。そのため、水位上昇後の必要重量の増加率は波高の増加率（概ね水深の増加率）の3乗分になる。特に浅海部で構造物が不安定になり、波の揺り動かしによりブロックなどが散逸する恐れが増すことになる。

以上のように「防護」施設の間では、水深の浅い場所での比較的小さな施設が、水位上昇に対する影響が大きいと想定される。海浜は、水際線付近から始まる砂粒子により構成される地形である。海面水位上昇により、他の構造物に比べても大きな影響を受けることが容易に想像される。1 mの海面上昇による影響をBruun則モデル（安定断面変化モデル）から評価すると、全国の海岸砂浜の約9割の面積が消失するとの算定がなされた³⁾。表-2に府県別の結果も同時に掲げる。

表-2 海面上昇による全国規模の砂浜侵食量の予測

	海岸線延長 (km)	砂浜延長 (km)	砂浜面積 (ha)	海面上昇量s=0.3m			海面上昇量s=0.65m			海面上昇量s=1.0m			明治～昭和 侵食面積 (ha)
				水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	水没面積 (ha)	侵食面積 (ha)	侵食率 (%)	
全国計	31,642	5,508	19,113	6,294	10,810	56.6	11,049	15,611	81.7	13,824	17,267	90.3	12,539
北海道	3,023	1,489	4,398	1,721	3,015	68.6	2,974	4,051	92.1	3,667	4,255	96.8	4,534
青森県	730	276	1,250	397	539	43.1	663	745	59.6	846	897	71.8	676
岩手県	713	37	137	34	76	55.5	66	108	78.5	85	121	88.2	21
宮城県	864	91	492	132	196	39.8	256	345	70.2	340	419	85.2	68
秋田県	264	128	507	235	369	72.8	431	498	98.2	493	507	100.0	447
山形県	133	38	215	106	116	54.1	205	213	99.1	213	215	100.0	84
福島県	153	63	246	91	138	56.1	148	206	83.6	179	230	93.4	259
茨城県	179	115	671	173	295	44.0	298	507	75.6	403	614	91.4	300
千葉県	476	147	964	241	339	35.2	460	623	64.6	592	774	80.3	315
東京都	585	27	83	27	67	80.7	54	82	98.5	68	83	100.0	0
神奈川県	430	62	334	102	143	42.8	179	254	75.9	223	293	87.7	62
新潟県	598	217	647	262	467	72.1	437	612	94.6	529	640	99.0	847
富山県	152	31	118	27	76	64.2	47	115	97.3	59	116	97.9	305
石川県	597	146	504	253	341	67.6	407	490	97.1	468	504	99.9	384
福井県	433	52	191	53	123	64.4	97	180	94.6	124	191	100.0	56
静岡県	517	151	1,404	259	372	26.5	545	757	53.9	768	1,087	77.4	327
愛知県	660	124	621	167	205	33.0	278	343	55.2	337	412	66.3	298
三重県	1,089	134	399	166	220	55.1	274	323	80.8	325	362	90.7	196
京都府	302	40	126	38	89	70.5	70	123	98.2	89	126	100.0	49
大阪府	187	15	31	5	20	65.6	10	29	95.4	15	31	100.0	20
兵庫県	778	95	175	70	113	64.3	114	158	90.0	147	172	98.0	635
和歌山県	667	51	152	53	117	77.2	96	149	98.2	115	152	100.0	38
鳥取県	161	68	355	75	188	53.0	157	285	80.4	206	307	86.5	137
島根県	1,032	100	323	107	227	70.2	205	318	98.5	274	323	99.9	51
岡山県	581	53	52	36	46	88.4	45	52	100.0	50	52	100.0	165
広島県	1,123	118	157	51	122	78.1	92	147	94.2	119	154	98.1	40
山口県	1,551	153	269	126	211	78.4	193	259	96.4	228	269	99.9	191
徳島県	436	47	171	42	90	52.7	77	142	83.0	100	158	92.8	233
香川県	791	205	377	110	250	66.4	191	323	85.6	239	345	91.4	61
愛媛県	1,544	196	322	137	221	68.7	218	298	92.5	264	315	97.7	296
高知県	709	82	408	98	206	50.6	177	358	87.9	236	403	98.8	114
福岡県	687	118	271	145	216	79.6	214	258	95.2	242	266	97.9	189
佐賀県	290	11	51	14	20	39.8	28	40	79.3	40	49	96.8	39
長崎県	4,389	154	517	103	254	49.2	199	366	70.9	272	416	80.5	85
熊本県	993	37	175	53	60	34.4	94	106	60.6	118	125	71.7	17
大分県	723	85	309	110	139	45.1	178	227	73.5	221	269	87.2	356
宮崎県	347	125	479	138	291	60.8	249	437	91.2	323	468	97.5	170
鹿児島県	2,761	426	1,212	336	831	68.5	619	1,081	89.2	807	1,150	94.9	474
沖縄県	1,713	705	1,085	883	1,032	97.0	1,030	1,080	99.5	1,060	1,033	99.8	341

※全国計は沖縄県を除いた数値である。

c. 現在の防護施設の機能低下

浸水の防護には、浸水をもたらす高潮や高波に対する防護と内水の排除とから成り立っている。高潮などへの防護には、海岸線や主要河川に沿った防潮堤、内湾湾口に設けられる高潮防波堤等が用いられる。入り組んだ海岸線を持つ河口デルタ地形では、海岸線が凹凸し防護延長が長くなるため、海に面した峰絡線に沿って直線的な防潮堤を配することがある。この場合、防潮堤で仕切られた陸側には、河川や水路・運河等の水面が残ることになる。通常、堤内の水面と外海とは水門で結ばれ、高潮来襲時には水門を閉じ堤内水はポンプで外海へ排除される。浸水リスクの高い三大湾においては、湾奥に河川デルタ地形が広がり大都市が立地している。東京湾を例に、高潮に対する防護策を見てみる。江東地区低地に対しては、海に面した海岸線に高い外郭防潮堤を築き、低地内の運河等の水面は水門を介して外海とつながっている。主要な水門脇には排水機場が配されている。低地内の運河や河川の堤防は外郭防潮堤に比べて低く、橋などへのアクセスが良い。沖合いの新規埋立地は、いずれも高い地盤高（防潮堤の天端高に近い）で仕上げられている。港南地区～港地区～中央地区～江東地区を結んだ外郭防潮堤と水門等の様子を図-2に示す。

南に開口している内湾では、台風が湾の西側を通過する時に湾奥に大きな高潮がもたらされる。伊勢湾台風規模の台風では、風による水面の吹き寄せ効果と低気圧による水位の上昇効果で2～3 m程度の高潮偏差となる。潮汐の振幅は、大潮時1.5 m程度である。台風時の来襲風波の波高は湾央部で4 m程度に達するが、沿岸部では浅海域での砕波などが関係し低減する。これらを加えて、防潮堤の天端高が決定されている。海水面の上昇後に台風が東京湾を襲い、湾奥に高潮が押し寄せる状況を高潮数値モデルで試算し海水面の上昇前と比較してみた⁴⁾。湾沿岸に沿って高潮偏差の分布を調べると、江東地区から千葉港にかけて高くなり、大潮時の振幅との和（＝低潮位からの高さ）で4 m程度となる。水面の上昇後には、台風規模が変わらなければ、水面の上昇量と同程度水面が高くなった。台風強度が20～40%程度強まり、中心気圧で15～30 hPa程度低下したとすると、高潮偏差は0.5～1.3 m程度大きくなった。また、湾央部での有義波高も同時に0.1～0.7 m高くなった。海面水位上昇分による氾濫域の増加の静的見積りは、台風規模が変化しなければ内湾高潮に対してそれほど大きな見誤りにはならないことが解った。一方、台風強度や規模の増大は、水位上昇と同程度かそれ以上の影響を与える可能性が認められた。

内水排除用の排水機の能力は、背後地への降雨を外海に素早く送り出し、内水面の水位を低護岸天端以下に抑える用に設計されている。海面の水位上昇は、排水機の送り出し水頭差（低い内水面の水を高い外海水面に送り出すときの持ち上げる高さ）が増大するための排水能力の低下、低い内水面の維持のため早めの水門閉鎖と遅れめの水門開放とからくる排除降雨量の増大、をもたらす。江東地区の排水機場などを想定して、水面上昇時の影響をシミュレーションしてみた²⁾。1 m程度の水位上昇があるとき、ポンプの排除能力の低下は内水位の上昇を招くが、背後降雨域に対する内水面の面積比が十分あれば上昇量は数cm程度と僅かであった。背後地の都市化により増大した降雨流出が起こる（流達率の増加）影響や、降雨のパターンが変わり短時間に集中する（降雨強度の10%増加）、降雨量が10%増えるといった気象条件の変化が、水面上昇の影響以上に大きかった。また、内水面面積比が江東地区の1/10程度と狭く、背後降雨が集中して流入する条件では、1 mの海面上昇でも内水面上昇量が大きくなった。ここでも、降雨という気象条件の変化が大きな影響を与える可能性が認められた。また、都市化による降雨の循環の歪が地域の浸水リスクの増大に寄与していることが解った。

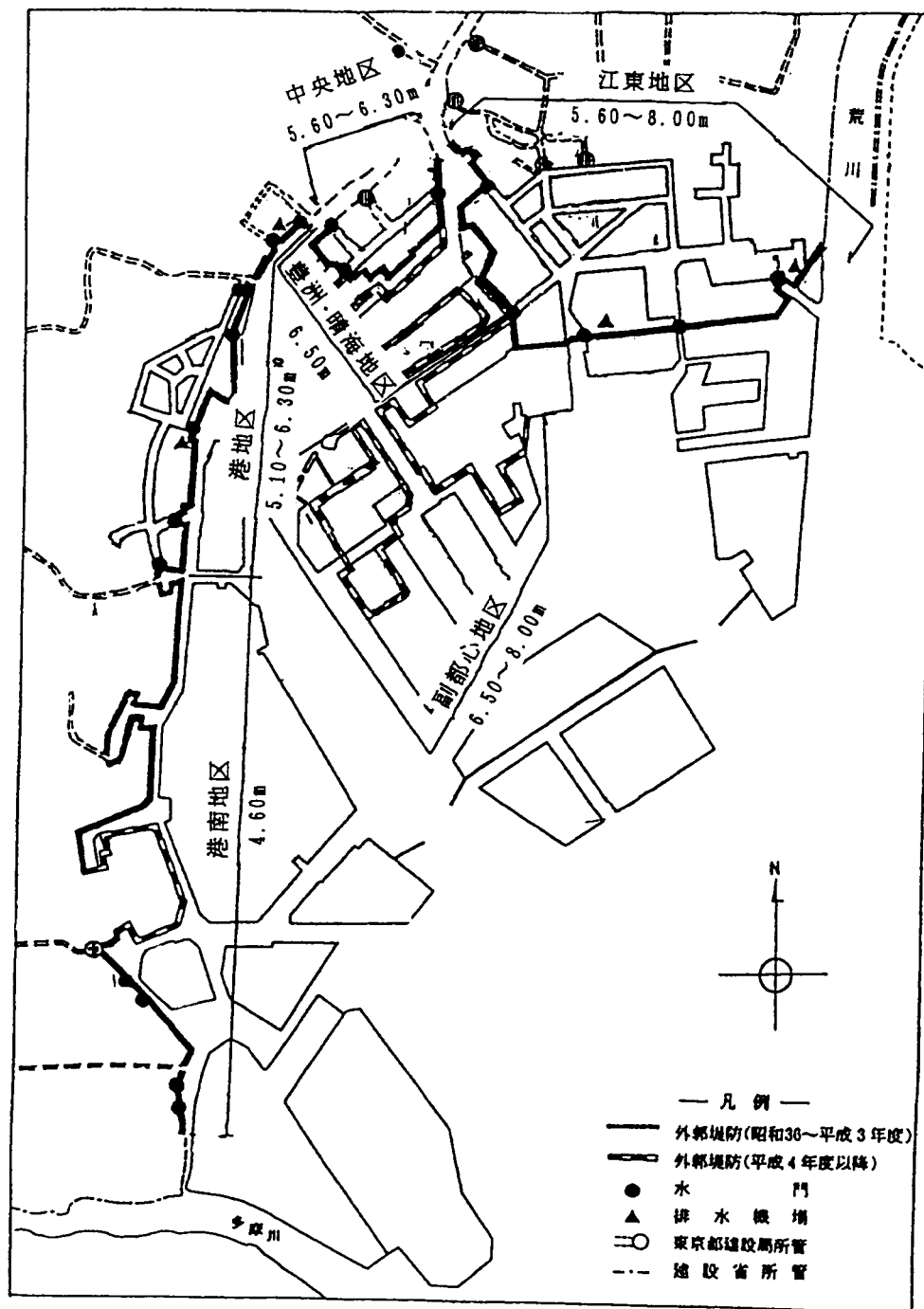


図-2 東京都における外郭防潮堤の整備計画（数字は天端の高さ 単位：T. P. + m）

沿岸部の浸水については、海水面の上昇のみであれば静的な解析で脆弱性のおおよその評価ができることが確認できた。一方、水位上昇のみならず気象変動（降雨の変化・台風の変化等）も、沿岸防災上同様に重要であることが指摘できる。しかし、温暖化にともなう地域の気象変動の予測が難しいこと、従来の気象変動に対する確率的な解析が不十分であること、等から、十分解析

で対応策を考えると、「後悔最小」の原則が良く持ち出される。都市の水循環の健全化や都市内残水面の活用による環境向上・空間の余裕づくり等の対策は、温暖化による気象変動が予測と大きく食い違っていたとしても、社会的に受け入れやすい（事前投資に対する「後悔」が小さい）。

e. まとめ

海水面の上昇による浸水の潜在リスクは、三大湾を中心にした産業と人口の集積地で大きく増大する。現在、我国沿岸ではハードな施設構造物を中心にして浸水防護策が組み立てられている。現在の防護策が水位上昇後にも役に立つかどうか調べて見ると、個別施設毎に水位上昇時の影響の様子が少しずつ異なる。具体的には、個別施設の評価ができる空間スケールレベル（各内湾や港ごと）での検討が必要である。一般的には、短期的には、浅い場所の小さな施設が影響が大きそうである。0.5～1 m程度の水位上昇対策には、構造物嵩上げが、自重増大・天端高の上昇の為に、最も容易な対応策とされる。ただし、三大湾内の内奥部では、台風による高潮で構造物の天端が決まっていることが多い。背後地の安全は、水位の上昇のみならず、台風規模や強度の変動の影響も大きい。こうした気象条件の変化に対する影響にも、十分な事前検討が必要である。

時間を長くにとって考えると、複数の防護施設の組み合わせや海岸線浅海部の利用の仕方の検討さらには防災の仕組み自体の改変も視野にいった総合的な検討が必要である。都市の水循環の健全化や内水面の確保など、都市環境の向上や空間的余裕（redundancy）の向上など、常時の環境改善が温暖化後の台風など異常気象時の防災機能の向上につながる場合がある。対応策策定の優先順位検討の参考になる。

（２）途上国型海岸の脆弱性評価

a. アジアの沿岸の特徴の比較

全世界を視野にいった脆弱性評価の試みの例⁵⁾では、データの精度等に問題を含んではいるものの、地球規模での大づかみな傾向を教えている⁶⁾。1000年確率高潮の潮位以下の地域に住む人口（population-at-risk）の観点からは、アジア、南地中海、アフリカ大西洋岸、インド洋沿岸、カリブ海、及び多くの島国で影響が大きい。沿岸湿地帯への影響は、米国、地中海、アフリカ大西洋岸、アジアのインド洋岸、オーストラリア、パプアニューギニアで大きい。米作は低地で耕作されているが、世界の生産高の85%が南、東南、東アジアで生産され、このうち10%を生産する面積が1 mの海面上昇の影響域内にある。このように、影響の内容や程度は地域的に異なる。生態系と社会・経済活動との両者で著しい影響が想定されたのは南、東南アジア、アフリカのインド洋岸、地中海沿岸である。

アジア太平洋地域には、大河川の三角州やマングローブ林など外力の変動や海面の上昇に対し、最も弱いとされている海岸が集中している。そこで、アジア太平洋地区において国別の標高10 m以下の地域の特定と面積算定を行い、あわせて定性的に人口や土地利用との対比を行った。地理情報としてWBD II・ETOP05を用い、内挿法により空間の分解能を見かけ上上げている。国土に対する標高10 m以下の地域の割合、標高10 m以下の地域の単位海岸線あたりの面積をそれぞれ図-3, 4に示す。国別では、バングラデシュ、カンボジア、ベトナム、パプアニューギニアと

いった国で影響が大きいと予測された。このうちバングラデシュとパプアニューギニアを例に、社会経済的な影響内容を比較した。前者では低地に人口が集中し米・バナナの栽培が行われているが、後者では沿岸低地は人口希薄で森林として存在している。地形的に影響の大きな国々の間でも、沿岸低地の社会経済的な重要性は大きく異なっている事がある。

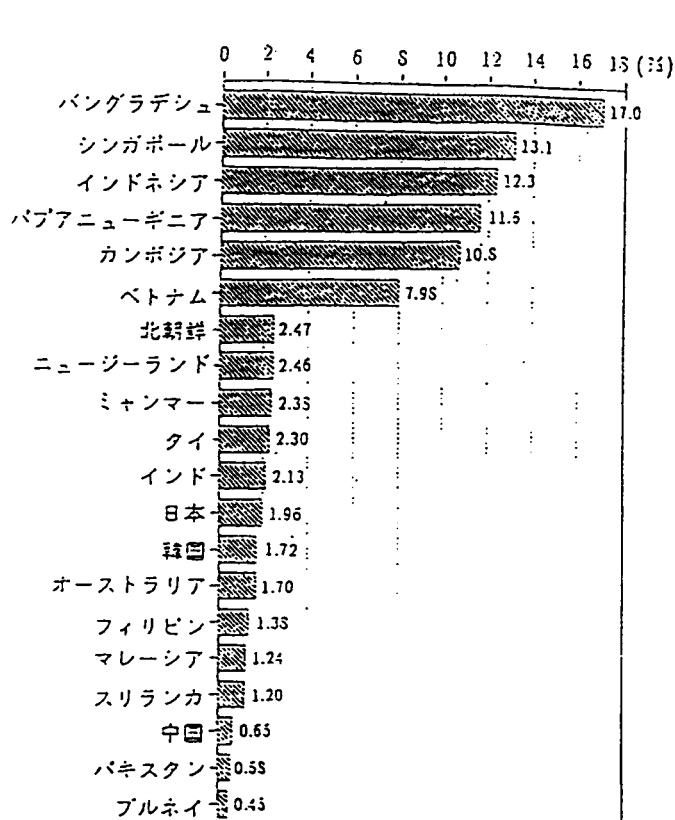


図-3 10m以下の低地の国土に対する割合

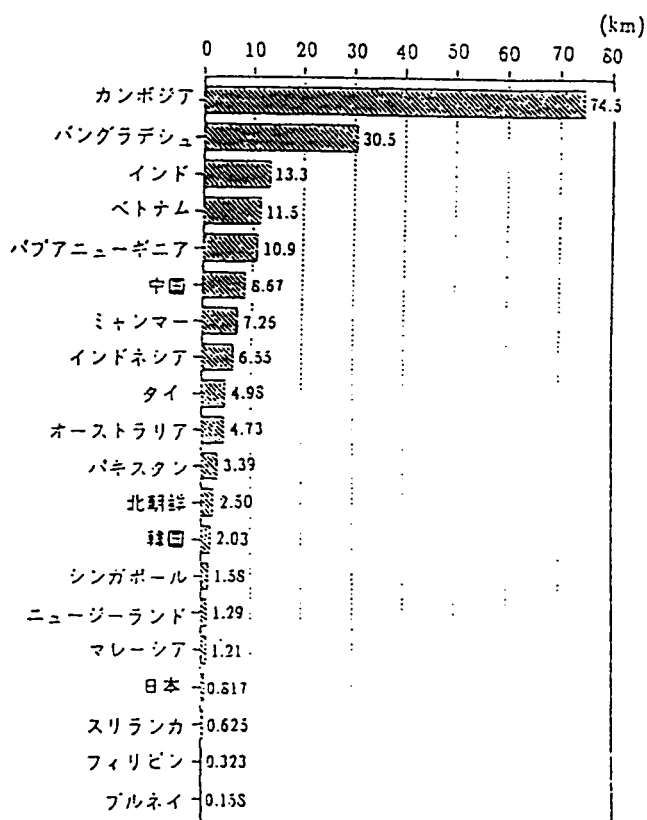


図-4 10m以下の地域の単位海岸線あたりの面積

更に、etopo5に加え、米国NOAAの過去100年間の台風・サイクロンの規模経路記録を用い、標高と台風影響域とを地図上に重ね合わせて見た⁷⁾。アジアオセアニア地区を緯度経度で1/12度メッシュで区切り、表-4の様なランク分けをしてみると、各ランクに落ちるメッシュ数は国別に表-5のようになった。ここでもやはり、バングラデシュ、インド、ベトナム、中国などの河口デルタを有する国で脆弱性が高いことが確かめられる。

表-4 標高・台風による影響ランク区分

	標高	過去100年間で の台風の影響	最大風速64ノット 以上の台風
ランク0	10 m 以上	—	—
ランク1	10 m 未満	ゼロ	—
ランク2	10 m 未満	50回未満	—
ランク3	10 m 未満	50回以上	20回未満
ランク4	10 m 未満	50回以上	50回以上
ランク5	10 m 未満	50回以上	50回以上

表－5 影響ランク毎のメッシュ数の国別集計

国 別	ランク0	ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	ランク5
日本	5,252	0	38	0	0	0
中国	132,788	27	808	0	23	20
北朝鮮	1,789	0	28	0	0	0
大韓民国	1,295	0	17	0	0	0
台湾	436	0	0	0	0	0
ベトナム	3,776	0	279	2	14	0
カンボジア	1,893	0	234	0	0	0
タイ	6,104	0	128	0	0	0
マレーシア	3,905	7	6	0	0	0
シンガポール	10	0	0	0	0	0
フィリピン	3,124	0	9	0	0	0
インドネシア	18,636	2,176	323	0	0	0
ミャンマー	7,979	0	181	0	0	0
バングラデシュ	1,268	0	2	309	76	0
インド	39,101	0	258	340	124	0
スリランカ	747	0	0	0	0	0
パキスタン	11,597	0	57	0	0	0
オーストラリア	98,562	10	1,720	1	0	0
ニュージーランド	4,064	6	54	0	0	0

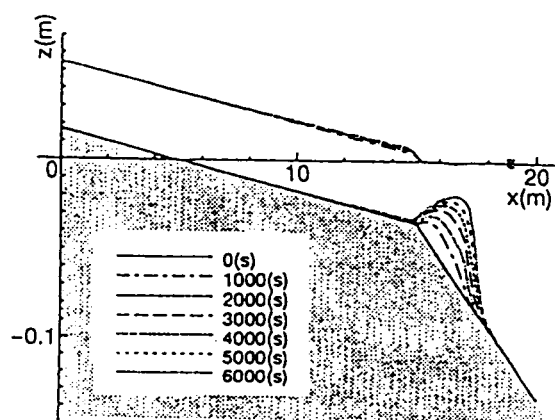
b. 河口デルタの問題

アジア太平洋地域には、大河川の三角州やマングローブ林など外力の変動や海面の上昇に対し、最も弱いとされている海岸が集中している。大河川河口デルタの多くは、運搬された流下土砂の沈積により長年にわたって沖側へとデルタが拡大してきている。土地の利用や沿岸都市構造は、沖側への陸地の前進・展開を前提になされていることが多い。海面水位上昇は、地域の長年の経験とは全く逆の現象を持ち込む可能性があり、地域コミュニティの脆弱性は高い恐れがある。

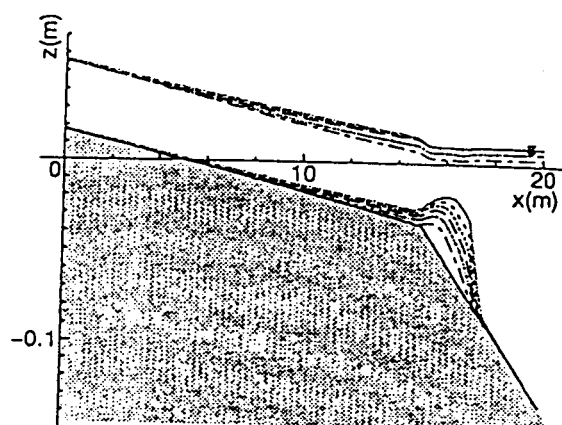
ここでは、タイのチャオプラヤ河および中国南部の珠江を取り上げた。降雨量と塩水遡上との関係の統計解析、海面水位上昇による流下土砂の堆積地点の変動の数値計算、河口デルタに対する高潮影響の数値計算を試みた。いずれも、脆弱性の変化検討のための数値計算であり、被災の有無の予測ではない。

河床勾配が緩やかな大河川の場合、降水量の減少は、塩水の上流までの遡上をもたらす。一方、降水量の増加は河川内の水位の上昇をもたらす。チャオプラヤ河を対象に、1980年の降水量が10%増加した場合を想定すると、河口から約100km上流のバンサイで最高12cmの水位上昇を招くことになるかと推察された。珠江デルタは殆どが標高2m以下の低地で、珠江・北江・西江の河口部は30cm以下の地域が広がっている。香港返還を控え、従来からの土地利用である水田・養殖池と混在して高密度都市域が分布している。単純化した河川と前面海域を含む河床変動モデルで海面水位上昇の影響を検討した³⁾。流下土砂による河口テラスの発達が数値的に計算される。海面水位上昇がない場合、砂の堆積はもっぱら河口から沖側で生じており河道内の堆積は少ない。海面が徐々に上昇すると、河川水面も背水効果で上昇し、河道内に砂の堆積が生じるようになる。河口テラスの規模は小さくなりテラスの頂点は陸側に移動する。こうした効果で河川水面はさらに上昇し、

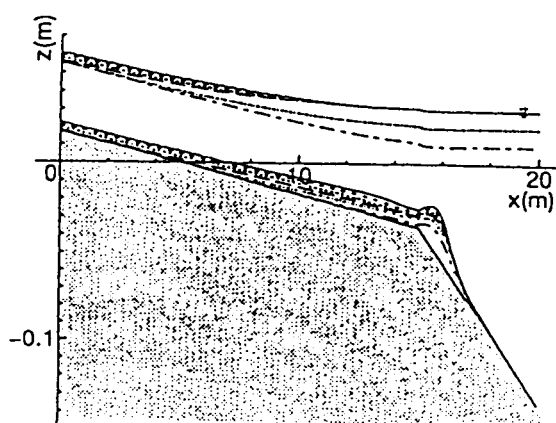
河道内の上流にまで砂堆積の影響がおよぶこととなる。河床断面形状の経時変化の計算例を図－5に示す。外海水位の上昇による塩分の河川内遡上や地下水の塩水化とともに注意が必要になる。



(a) シナリオ1 (海面上昇なし)



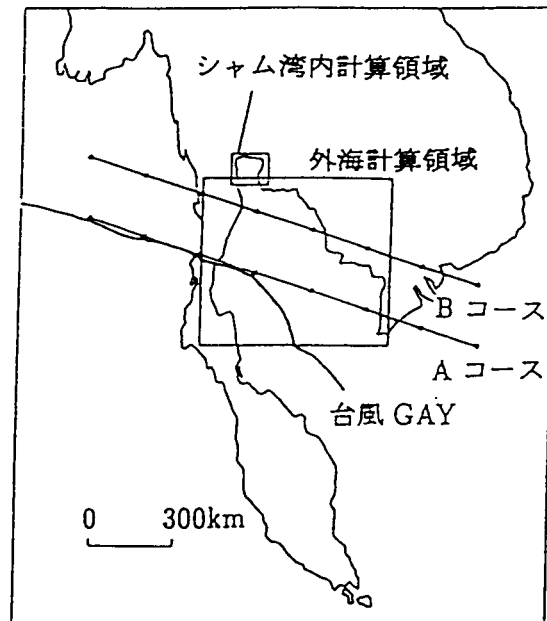
(b) シナリオ2 (海面上昇小)



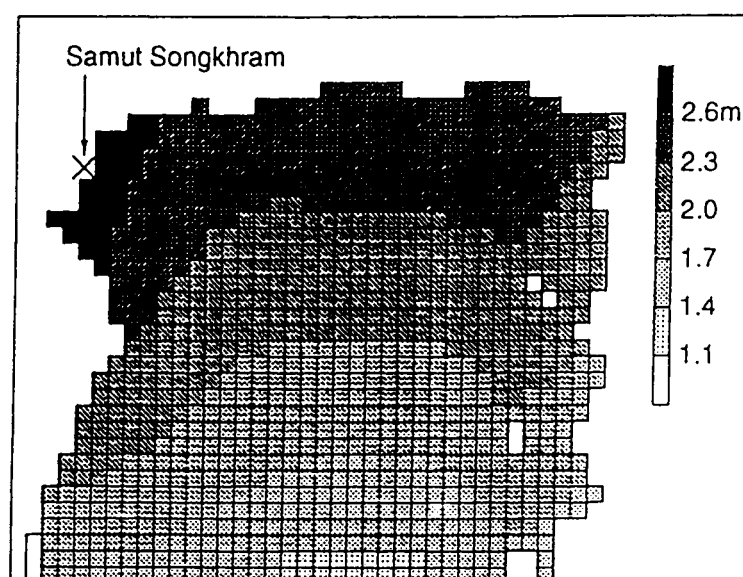
(c) シナリオ3 (海面上昇大)

図－5 モデル河川の河床縦断形状の時間変化計算例（実線が初期地形）

チャオプラヤ河口デルタの面するシャム湾では、巨大台風の襲来は稀である。しかし、河口デルタ上に立地する首都バンコクには人口や資産の集中がおきており、防災施設の整備は遅れている。1989年台風GAYが来襲し、死者450名といわれる大きな被害をもたらした。この台風は、湾を東から西に横切っている。タイ国経済の発展につれ、シャム湾沿岸域における社会・経済価値や意味が変わりつつある。こうした状況下での海面上昇や気候変動の影響を評価するためには、災害の機構についての考察が欠かせない。そこで、台風GAYを参考に、湾内の高潮の生起状況を数値計算した⁹⁾。



図ー6 シャム湾高潮の計算領域と台風通過経路⁹⁾



図ー7 Bコース通過時のシャム湾内の高潮分布（50時間後）⁹⁾

図-6 に計算に用いた台風ルートを台風GAYの通過ルートとともに示す。Bコースでのシャム湾内の高潮の分布を、図-7 に示す。湾の西岸で大きな水位上昇が起きることが解る。Aコース通過時と比べると、西岸の都市Samut Songkhram での高潮偏差は、1.5mから3m近くに達していた。岸よりコースで高潮が大きくなることが解った。また、湾の地形的な特性から、台風の通過速度によっては湾内水位が弱い共振を起こす事も解った。さらに、65cmの海面上昇を仮定した場合と、海面上昇に加えて台風強度や規模を1割大きく仮定した場合とについて、Aコースでの高潮計算を行った。西岸都市での高潮偏差分を比較すると、表-6 の様になる。海面上昇だけの影響では、ほぼ上昇分だけ水位が上がっており、現在の高潮偏差に海面水位上昇分を加えた値で差し支えないようである。しかし、台風規模や気圧深度が変わると高潮偏差は非線形的な増加が見られ、気象の変動には十分配慮が必要であることが解る。

表-6 シャム湾西岸 Samut Songkhram市での最高水位⁹⁾

条件	最高水位 (m)
台風Aコース 現況	1.05
海面上昇65cm	1.65
海面上昇65cm+台風強度・規模1割増加	2.28

c. 島しょ国の問題

サンゴ礁に囲まれた平坦な島しょ国としてトンガタブ島を取り上げた。トンガ王国はニューギニアの北東に位置し、171の島からなる。このうち36島に人が住んでいる。平坦な島が多い。人口の約7割が首都のある最大の島トンガタブ島（面積265km²）に住み、その3割が首都に住んでいる。例年2月から3月にかけて数個のサイクロンに見舞われる。中でも、1982年のサイクロン「アイサック」はトンガタブ島の標高3m以下の地域23km²を水没させた他、1990年の「オフア」等が大きな被害をもたらした。

サンゴ地形の深浅測量から過去のサンゴコロニーの成長速度を評価すると、現在予想されている海面水位上昇速度に対しては、環境条件が適切なら十分追いつけることが第一次近似として見いだされた¹⁰⁾。そこで、サンゴ礁域での波浪変形特性が変化しないととりあえず仮定した。海面水位上昇により、その水面以下の土地面積や住んでいる人口を見積もるため、標高ごとの面積と人口（1986年ベース）を調べた。結果を表-7 に示す。1mの水面の上昇後、サイクロン「アイサック」クラスの高潮（2.8m）が押し寄せたとき、約40km²が水没し島の人口の約半分が影響を受けることになる。

表-7 トンガタブ島の各標高以下の土地面積と居住人口

標高	陸域面積(km ²)	居住人口(千人)
1 m	～ 0	～ 0
2 m	1 0	9
3 m	2 7	2 3
4 m	4 0	3 1
5 m	5 8	4 0
全島	2 6 5	6 3

この国では、憲法により成人男子には所定の広さの畑と居住地が与えられる。トンガタブ島の男女人口の経年変化の様子を、図-8に示す。人口の増加と沿岸部の集中は、沿岸部における住居地不足を招いている。このため、サンゴ礁湖部の埋立による住居地の造成が進んでいる。町が海に向かって延び出していくことは、従来以上に高潮や海面水位上昇に対し脆弱性を強めている。一方、島外との交易の拡大は従来の自立的な島の経済を変えつつある。タンパク源を礁湖水産業に、炭水化物を背後農地に求めてきた従来の生活様式・集落形態は、徐々に都市化に向かっている。こうした社会変化のもたらす影響についてはさらに検討が必要であろうが、自然に直接頼って生きてきた従来の社会に比べ、自然変動に対しいっそう対応がとりにくくなってくるであろう。地下淡水資源の賦存量などの資源制約とともに、島しょ国の脆弱性評価においては配慮が必要であろう。

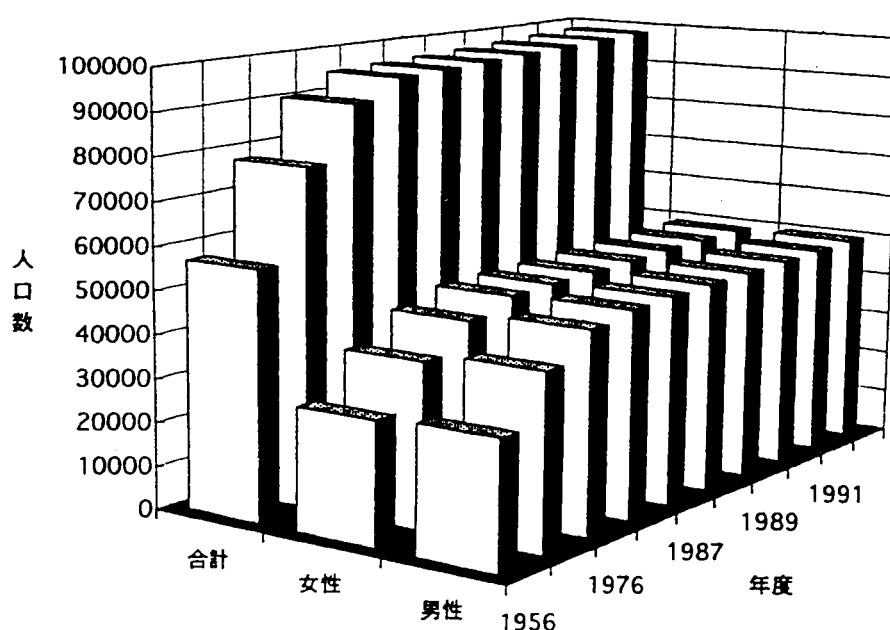


図-8 トンガタブ島の人口の経年変化 (1956～1992)

4. まとめと課題

ここでは、沿岸の自然条件や社会的条件の差異による、0.5～1mの海水面の上昇の影響の表れ方を比較した。

高度な土地利用が進んだ我国沿岸では、海水面の上昇やそれともなう来襲波高の増大の地域分布よりも、沿岸平地に展開した人口や産業の集積状況によって、影響人口等がより大きく左右される。そのため、特に三大湾の奥に展開する平野部での浸水リスクが顕著に高まることが示された。人口や産業の集積地域は、既に構造物で高潮や高波から防護されている。防護の仕組みがどう影響を受けるのか調べた。海域の施設では、設置水深によって水位上昇の影響が異なり、概して浅い水深に設置されている施設ほど影響が大きかった。離岸堤などに用いられている消波ブロックや緩傾斜護岸に用いられている被覆ブロックでは、必要重量が波高の3乗に比例することから、さらに水位上昇の影響を大きく受けやすい。また、水際線（水深0m）から沖に延びる砂浜でも、広い範囲で侵食が進むと見られた。高潮防護や内水排除システムでは、海水面の上昇とともに、台風強度や降雨パターンなどの気象変動によっても大きく機能低下をもたらす可能性が見いだされた。水位上昇幅が小さく防護システム自体が社会変化に対して陳腐化しないうちは、既存システムの手直し（主には施設の嵩上げ）で対応可能であり経済的であろう。気候変動への対応には、沿岸における水循環の見直しも重要である。一方、社会の沿岸域へのニーズの変化への対応や防災機能の粘り強さ向上といった観点から長期的な検討も同時に必要である。このために、対応策の分類分け・対応策の多機能化・対応策の組み合わせ等の考え方を整理した。

アジアの沿岸を対象に、不十分な資料からの粗い整理ではあるが、途上国型海岸における影響を調べた。海水面の上昇にともなう影響は、社会条件と自然条件の両者から特徴が分かれる。しばしば台風・サイクロンが来襲する東アジア～インドでは、広い河口デルタ低地で影響が大きいとされる。沿岸低地での土地利用により、農業影響や都市影響が顕著になったり、自然資源への影響が卓越したりする。また、河口デルタでは、従来の土地利用の前提となっていた淡水（灌漑）と粘土（土砂堆積）の供給様態が変化することが示され、浸水のみならず産業構造自体が変更を強いられる恐れが示された。

高度な土地利用が進んだ我国沿岸についても、アジアの沿岸についても、個別地域の問題は今後より詳細に個別地域毎に解析をしてゆく必要がある。

引用文献

- 1) Ozasa, H., T. Itoh and Y. Hosokawa (1993): Engineering Methods in Responce to Sea Level Rise, Vulnerability Assessment to Sea-Level Rise and Coastal Zone Management, Proceedings of the IPCC Eastern Hemisphere Workshop (Ed. by R. McLean & N. Mimura), Tsukuba, pp. 227 - 236
- 2) 土木学会海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会 (1994): 地球温暖化の沿岸影響, 土木学会, 221p.
- 3) 三村信男ら (1994): 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2), 海岸工学論文集, 第41巻, 1161-1165

- 4) 磯部雅彦ら(1994):海面上昇後の東京湾沿岸における高潮浸水の予測計算,第2回地球環境シンポジウム,土木学会,168-173.
- 5) Delft Hydraulics(1993):Sea Level Rise -A Global Vulnerability Assessment, 2nd Revised Edition.
- 6) 三村信男ら:海面上昇・気候変動に対する脆弱性評価ー沿岸域に対するインパクトの地球規模の見取り図ー,第2回地球環境シンポジウム,土木学会,
- 7) 町田 聡ら(1994):アジア・太平洋地域を対象にした海面上昇に対する脆弱性評価,海岸工学論文集,第41巻,1156-1160
- 8) 三村信男ら(1995):海面上昇に対する海岸地形の応答,第3回地球環境シンポジウム,土木学会,97-102.
- 9) 藤城 透ら(1996):シャム湾における高潮被害の予測,土木学会第51回年次学術講演会,(印刷中)
- 10) 堀 信行(1994):未発表資料

国際共同研究等の状況

1993年8月3-6日に筑波においてIPCC東半球ワークショップが開催された。このワークショップの組織委員会及び実行委員会に本研究チームメンバーは参加・主導し、アジア地区を中心とした沿岸脆弱性研究の交流とIPCCのVA共通手法に対する意見集約をはかった。成果は、実行委員会委員長(茨大・三村)により同年11月のIPCC世界海岸会議(WCC93)にインプットされた。その後、IPCC第2次報告書における沿岸・島しょ国への影響の節に対し、リードオサー(三村)およびコトリビューター(細川)として報告書作成に寄与した。

中国北京大学韓(Han)教授と共同で、中国南部広州市周辺海岸における脆弱性調査に平成5年度より着手した。タイ・バンコク周辺およびチャオプラヤ川の検討を国土地理院・タイ国大学関連機関との協力の下実施した。トンガ王国トンガタブ島における調査を政府の協力の下実施した。沿岸干潟の地形応答に関し、オーストラリア海洋研究所等と情報交流を行った。

主な発表論文

McLean, R. & N. Mimura(Ed.)(1993):Vulnerability Assessment to Sea-Level Rise and Coastal Zone Management, Proceedings of the IPCC Eastern Hemisphere Workshop, Tsukuba, 429p. +39p. (この報告書には例えば次のような3報告が含まれている)

Machida, S. et. al. (1993):Database System for Vulnerability Assessment to Sea Level Rise: An Asia-Pacific VA, pp.69-78

Han, M. et. al. (1993):Vulnerability Assessment of Coastal Zone to Sea Level Rise. A Case Study on the Tianjin Coastal Plain North China by Using GIS & Landsat Imagery, pp.189-196

- Ozasa, H. et al. (1993): Engineering Methods in Response to Sea Level Rise, pp. 227-236
- Mimura, N. et al. (1993): Chapter 6. Coastal Zone, in 'The Potential Effects of Climate Change in Japan', Center for Global Environmental Research, NIES, Environment Agency of Japan, 57-69.
- Hosokawa, Y. & N. Mimura (1994): Chapter 8. SEA LEVEL RISE AND ITS CONSEQUENCES, in 'LOW-LANDS Development and Management' (Ed. N. Miura et al.), A. A. Balkema, Rotterdam, 157-190
- Nicholls, R. et al. (1995): Climate Change in South and South-East Asia: Some Implications for Coastal Areas, Journal of Global Environment Engineering, Vol. 1, 137-154.
- Mimura, N. (Ed.) (1996): Data Book of Sea-Level Rise, Center for Global Environmental Research, NIES, Environment Agency of Japan, 88p.
- 町田 聡ら(1993): 地球温暖化にともなう海面上昇に対する脆弱性評価支援データベースの構築, 環境システム研究 Vol. 21, 200-209.
- 三村信男ら(1993): 海面上昇・気候変動に対する脆弱性評価のためのデータベース, 234-239.
- 三村信男ら(1993): 砂浜に対する海面上昇の影響評価, 海岸工学論文集, 第40巻, 1046-1050
- 磯部雅彦ら(1994): 海面上昇後の東京湾沿岸における高潮浸水の予測計算, 第2回地球環境シンポジウム, 土木学会, 168-173.
- 町田 聡ら(1994): アジア・太平洋地域を対象にした海面上昇に対する脆弱性評価, 海岸工学論文集, 第41巻, 1156-1160
- 三村信男ら(1994): 海面上昇・気候変動に対する脆弱性評価-沿岸域に対するインパクトの地球規模の見取り図-, 第2回地球環境シンポジウム, 土木学会, 154-161.
- 三村信男ら(1994): 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2), 海岸工学論文集, 第41巻, 1161-1165
- 藤城 透ら(1995): バンコク周辺の海面上昇と温暖化の影響予測に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会
- 三村信男ら(1995): 海面上昇に対する海岸地形の応答, 第3回地球環境シンポジウム, 土木学会, 97-102.
- 藤城 透ら(1996): シャム湾における高潮被害の予測, 土木学会第51回年次学術講演会, (印刷中)