

アジア・太平洋の海岸・沿岸域に対する気候変動の影響評価

佐藤圭輔*・三村信男**・町田 聡***

1. はじめに

温暖化への対策として国際的な努力が進められている。しかし、京都議定書に基づく排出削減策が実行されてもある程度の温暖化の進行は避けられず、その影響は途上国の多くで厳しく現れると考えられる。そのため、適応策の検討が必要になるが、その前提として温暖化の影響に関する定量的情報が必要である。しかし、現状では、地球規模あるいは地域規模での影響の全体像や脆弱な地域の分布を十分把握できていないといえる。そこで本研究では、アジア・太平洋地域の沿岸域を対象にして、海面上昇や高潮の広域的な影響評価システムを構築し、影響の定量的把握を試みた。

評価の枠組みは、温暖化に伴う外力シナリオ（海面水位）の設定、物理的環境の変化（一次影響：台風の影響域、水没・氾濫域）の推定、沿岸域システムへの影響（二次影響：人間の居住や自然環境）の推定という三段階で、従来のものを踏襲している。しかし、新たにアジア・太平洋全域における潮汐と高潮の分布を取り入れて氾濫域を推定するとともに、2100 年までの人口増加を取り込んで、より現実的で精度の高い影響評価をめざした。

2. 影響評価の方法

2.1 対象地域とデータ

本研究の対象は E 30°～W 165°, N 90°～S 60°の領域であり、アラビア半島からアフリカ東部、北はロシアの大半を含んでいる。この領域内の陸域総面積は約 6,500 万 km²で、1994 年時点の総人口は約 38 億人である。この領域に緯度経度 1 分のメッシュを設定し、このメッシュ上で地形や人口などのデータを与えた。これらのデータは、各種の地球環境データセットから入手した(三村ら, 2000)。緯度経度 1 分のメッシュを用いることによって、従来の研究に比べて空間的な分解能は大きく向上した。

2.2 台風の影響域

台風のデータは米国 NOAA が編集した World-Wide

Consolidated Tropical Cyclone Data Set の中から、1949 年から 1988 年の 40 年間分を取りだして用いた。温暖化に伴って台風に変化が生じる可能性が指摘されているが、確度の高い将来予測は得られていない。そこで、過去 40 年間の傾向が今後も変化しないものと仮定した。その上で、台風の影響を定量化するために、個々のメッシュ毎に来襲頻度、平均風速、年当たりの影響時間を計算した。それらの積によって、累積的な台風の風による影響の程度を表すことができると考えた。

2.3 水没域と高潮氾濫域

a) 水位シナリオ

沿岸域に対する水位シナリオとしては、海面上昇と潮汐、高潮を組み合わせ、現状（海面上昇なし）と 2100 年（1 m 海面上昇）における恒常的な海面水位（満潮）と突発的な高水位（満潮＋高潮）の合計 4 通りを与えた。恒常的な海面水位と突発的な高水位は、それぞれ陸域の水没と氾濫に対応すると考えられる。

IPCC (1996) によると、2100 年における海面上昇予測の最小値は 15 cm、最適値 48 cm、最大値 90 cm であることから、2100 年の海面上昇量を 1 m と設定した。潮汐の分布では、潮汐表（海上保安庁水路部, 1999a, b）にあるアジア太平洋全域 1852 地点の潮汐データを入力し、海岸線に沿った線形補間によってアジア・太平洋全域の潮汐振幅のデータを作成した。

b) 高潮の推算

沿岸域に対する高潮の影響はきわめて大きい。高潮の原因は、台風による海面の吸い上げと海水の吹き寄せ (wind set-up) 作用である。高潮の発生時には wave set-up も生じるが本研究では考慮していない。各地点における高潮偏差 (SS) の計算方法は式 (1) に従った。海面の吸い上げ効果は右辺第 1 項に含まれ、吹き寄せ効果及び海浜地形の効果は右辺第 2 項に表現されている。

$$SS = 0.991 \cdot \Delta P + \frac{k \cdot U^2}{10^3 \cdot S} \ln \frac{h_0}{h} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ΔP : 台風中心の気圧低下, U : 風速, $k=4.8 \times 10^{-2}$, S : 平均海底勾配, h : 高潮偏差を求める水深 (5 m), h_0 : 吹き寄せが始まる水深である。

高潮偏差の推算フローを図-1 に示す。本研究で用い

* 学生会員 京都大学大学院環境地球工学専攻
** 正 会 員 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター
*** 正 会 員 パシフィックコンサルタンツ情報技術部長

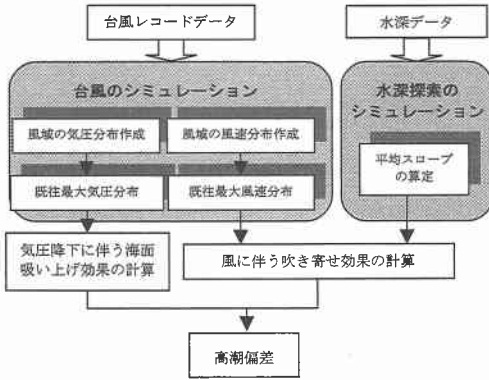


図-1 高潮偏差の推算フロー

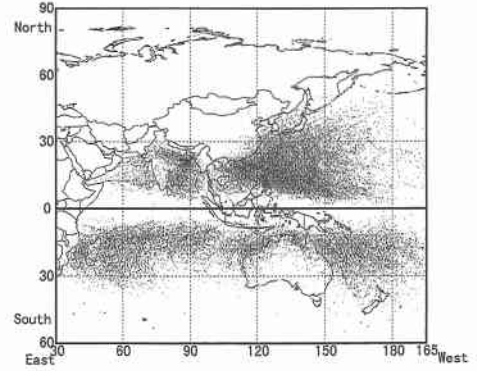


図-2 台風の経路 (1949 年～1988 年)

た台風観測データには、最大風速の情報だけで、中心気圧や台風の規模に関する情報は含まれていない。そのため、高潮偏差を計算するためには、台風モデルを用いて最大風速から気圧分布や風速分布を推定する必要がある。

台風内部の風は、気圧傾度によって生ずる傾度風が主体で、風速は台風内の気圧分布から計算することができる。この気圧傾度に基づいて、台風中心の緯度、中心の気圧低下、台風中心から最大風速までの距離を与えることによって、傾度風を求め、さらに海上風を推定した。これらの算定では、Meyer の気圧分布式 (2)、傾度風の風速分布式 (3)、場の風の効果を含んだ風速の平面分布式 (4) を用いた。

$$p = p_c + \Delta p \cdot \exp(r_0/r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$U_\theta = \sqrt{(r\Omega \sin \phi)^2 + \frac{\Delta p}{\rho} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}}} - r\Omega \sin \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$U = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{C_2}{C_1} M\right)^2} - 2 \frac{C_2}{C_1} M \cos(\pi - \alpha - \theta),$$

$$M = \frac{V}{F(r_0)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 p_c ：台風の中心気圧、 Δp ：台風中心の気圧低下、 r ：台風中心からの距離、 r_0 ：台風中心から最大風速までの距離、 U_θ ：傾度風の風速、 U_1 ：海上風速、 U ：合成風速、 V ：台風の進行速度、 ϕ ：台風中心の緯度、 Ω ：地球自転の角速度 ($7.29 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$)、 ρ ：空気密度、 C_1 、 C_2 ：定数である。

この計算では、台風中心からほぼ最大風速までの距離は経験的に最大風速によって与えられる (山岬, 1982) と仮定し、台風域外の気圧は 1 気圧 (1013 hPa) とした。また、吹き寄せに対する地形の効果を考慮するために、海岸地点毎に水深 100 m までの平均海底勾配を算定した。

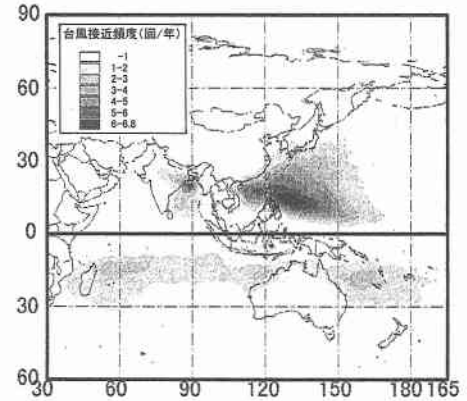


図-3 台風の接近頻度

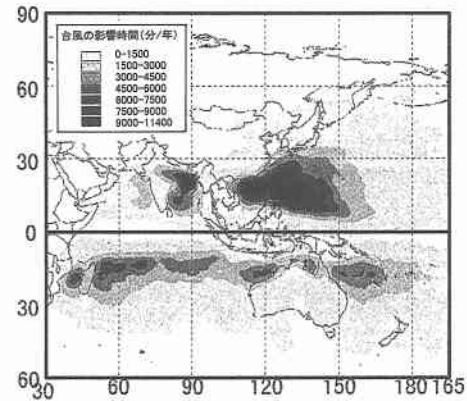


図-4 台風の年あたりの影響時間

このような手順によって、1949 年から 1989 年までの 40 年間に記録された全台風による高潮を推算し、個々の海岸メッシュにおける最大値を既往最大の高潮水位とした。この方法で、伊勢湾台風による高潮 (最大風速 45 m/s、中心気圧 930 hPa、平均スロープ約 1/1000、湾長約 50 km) を計算すると水深 5 m 地点の高潮偏差が 3.2 m 程

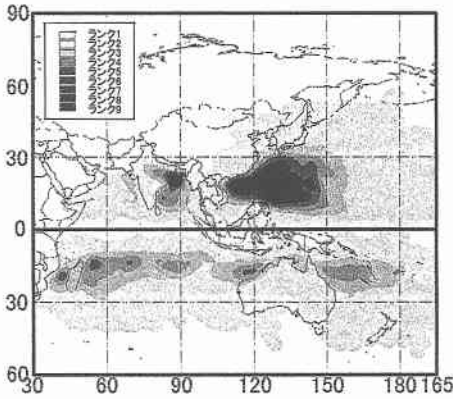


図-5 台風の累積影響の分布

度 (推定値は 3.45 m) になり、ある程度再現性があるといえる。

c) 水没・氾濫の影響の算定

満潮の水位あるいは満潮+高潮の水位より低い標高の地域が水没すると仮定して、水没及び氾濫域を特定した。現実には、多くの地点で海岸堤防などの設置によって満潮位でも浸水しない。そのため、今回算定された水没域は、堤防がない場合の潜在的な水没域である。また、高潮による氾濫域は台風の停滞時間に左右され、一般には海岸近くに限られるので、今回算定した氾濫域は最大の氾濫面積を与えるものと解釈できる。

この水没・氾濫域内に居住する影響人口の計算では、現状としては 1994 年時点の人口分布を用い、2100 年 (1 m の海面上昇時) には世界銀行による「世界人口長期推計'94/95」の推定値を用いた。

3. アジア・太平洋地域に対する影響

3.1 台風の影響域

図-2〜5 に、1949 年から 1988 年までの台風の経路、接近頻度、年当たりの影響時間、そして累積影響を示す。台風は、南北太平洋、インド洋の大部分で発生し、伝播

している (図-2)。この中で、接近頻度、年当たりの影響時間、累積影響をみると、フィリピンから中国南部にかけての南西太平洋、バングラデシュ・インド東部、およびアフリカ南部東岸に影響の大きな地域が存在することが分かる。

3.2 水没・氾濫域

水没及び氾濫地域、その中に住む人口の推定結果を図-6 に示す。

アジア・太平洋全域では、既に述べたように、陸域面積は約 6,500 万 km^2 、1994 年時点の人口は約 38 億人であり、2100 年の人口は約 76 億人に達すると推定されている。これに対して、現状でも満潮位以下の面積と潮汐+高潮の水位以下の面積は、それぞれ 31.1 万 km^2 (全面積の 0.48%) と 61.1 万 km^2 (0.94%) である。これらの地域は、1 m の海面上昇によって、それぞれ 61.8 万 km^2 (全面積の 0.95%) と 85.8 万 km^2 (1.32%) に増加する。高潮による影響面積は、1 m の海面上昇によって 24.7 万 km^2 増加することになる。

影響人口では、現状の満潮位以下の地域と潮汐+高潮の水位以下の地域に、それぞれ約 4700 万人 (全人口の 1.21%) と 2 億 700 万人 (5.33%) が住んでおり、この地域が現在でも高潮などの災害に対して脆弱性が高いことが分かる。1 m の海面上昇が生じると、現在の人口が変化しないとしても、これらの地域に含まれる人口は、それぞれ約 1 億 600 万人 (全人口の 2.73%) と 2 億 5800 万人 (6.61%) に達する。さらに、2100 年までに人口が増加した状況を考えると、同じ地域にそれぞれ約 2 億人と 4 億 5600 万人が住むことになる。1 m の海面上昇による高潮影響人口の増加は、人口の増加を考えなくても 5100 万人に及び、2100 年までの人口増加を考慮すると 1 億 9800 万人に達する。

図-7〜9 には、高潮による氾濫域の分布が示されている。恒久的な水没域に関しては、ニューギニア島南部の河口デルタ地帯、ベトナムのメコン川デルタ地帯などにおいて広範囲に影響を受けることが分かる。また、高潮の影響も考慮した一時的な氾濫域に関しては、特にバングラデシュや中国沿岸域 (長江河口付近など) に影響が大きいたことが分かる。

表-1 に国別の集計結果を示す。国・地域別の一次影響 (水没・氾濫面積) と影響人口を見ると、台湾、ベトナム、カンボジア、ブルネイ、バングラデシュ、グアムなどで影響人口が 10% を越えていた。太平洋の島嶼国は、従来ももっとも脆弱性の大きな国として指摘されてきたにもかかわらず、今回の推定では明瞭にはとらえられていない。これは、キリバスやツバルといった極めて小さな島々は今

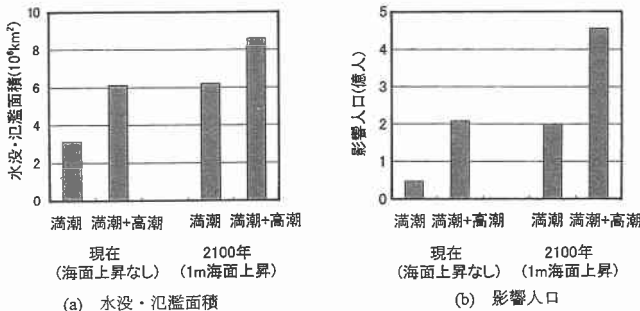
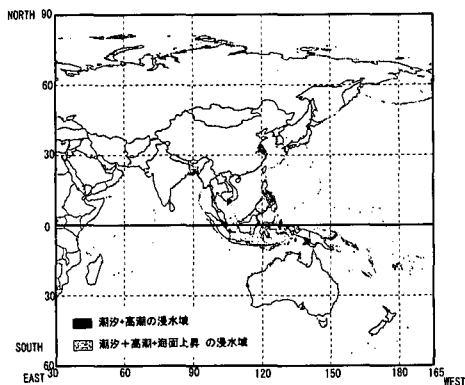
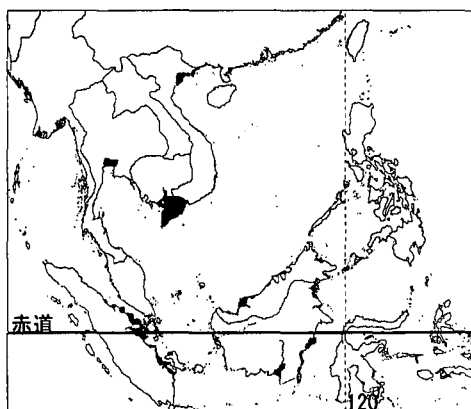


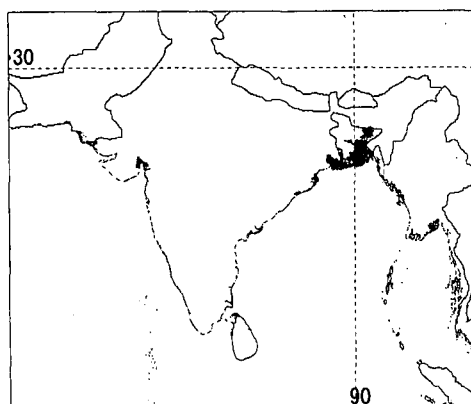
図-6 水没・氾濫面積と影響人口の比較



図一7 水没域と高潮氾濫域の分布（全域）



図一8 水没域と高潮氾濫域の分布（東南アジア）



図一9 水没域と高潮氾濫域の分布（インド・バングラデシュ周辺）

する研究では、予測精度の検証が難しい。ここでは、詳細な予測結果（松井ら、1992）のある日本に対する影響を比較・検討した（表一2）。満潮時水没面積は、松井らの結果に比べてかなり大きく出ているものの、高潮氾濫域はほぼ一致している。また、影響人口は全てのシナリオにおいて本研究の方が小さくなっている。このことの最大の理由は、地形、人口データの分解能の差にあると考えられる。ちなみに松井らの研究は、国土数値情報の第3次メッシュ（250 m）に基づいているのに対して、本研究で用いた標高データ GTOPO 30 は、緯度経度 30 秒、人口データは5分にとどまっている。したがって、今後精度に関してさらに検討を進める必要がある。

今回の予測には、空間分解能の他にも次のような問題点が残されている。標高データの精度には散らばりがある、高潮の影響域は一律に最大の範囲を取っている、災害の危険性が高い沿岸地域においてなおこのような高い人口増が生じるか疑問である等々、である。しかし、第1次推定として考えれば、アジア・太平洋地域の将来の危険性の増大は極めて大きな問題であるといえよう。

4. ま と め

本研究では、地球環境情報を用いて、アジア・太平洋地域に対する気候変動・海面上昇の影響評価を行った。高潮の影響と人口の将来予測を取り込むとともに、緯度経度1分メッシュのデータベースを構築し、空間的な解像度を向上させた。その結果、この地域が、海面上昇に対して、極めて高い脆弱性を有すること、バングラデシュやベトナム、中国など大河川のデルタを中心に危険な地点が分布することなどを明らかにした。将来の人口増加を考えると、その傾向は一層明らかとなる。

これまで、国ベースの影響評価では基本的データの不足が決定的な隘路になってきた。本研究の最大の動機は、地球環境データベースを用いてこの点を克服し、地域影響評価を行おうとした点にある。しかし、より精度の高い、また、個別の地点に即した影響を予測するためには、国毎の研究が不可欠である。結局、国別研究と本研究のようなマクロ的な研究とが相互に補完し合いながらより明確な影響の把握を目指すのが、今後必要である。このような方向は、すでに、EUの環境研究プログラムである ENRICH、アジア・太平洋地域における同様なプログラムである APN のプロジェクトが始まりつつあり、その成果に期待したい。

本研究は、環境庁地球環境研究総合推進費（平成9-11年度、代表：川口博行）と文部省科学研究費基盤研究（B）（2）（代表：三村信男）の援助を受けて行ったものである。心から感謝したい。

回のメッシュでは現れなかったためである。

3.3 予測の精度と問題点

地域あるいは地球規模の影響を長期的に予測しようと

表一 各国に対する影響予測結果

国・地域名	総面積[km ²]	総人口[千人]	1994 年に対する 2100 年の人口増加率	現在				2100 年 (1.0 m 海面上昇時)			
				浸潮		浸潮+高潮		浸潮		浸潮+高潮	
				水没面積 比率[%]	影響人口 比率[%]	水没面積 比率[%]	影響人口 比率[%]	水没面積 比率[%]	影響人口 比率[%]	水没面積 比率[%]	影響人口 比率[%]
中国	9,396,870	1,268,220	1.37	0.1	0.3	0.9	5.6	0.9	0.7	1.1	6.4
朝鮮民主主義人民共和国	120,801	21,763	1.69	1.2	2.0	2.0	3.4	2.3	3.6	2.9	4.7
大韓民国	100,020	43,765	1.23	2.3	2.1	3.8	5.1	3.0	4.6	4.4	5.9
日本	372,568	124,748	0.86	0.4	0.5	1.9	4.7	2.1	4.0	2.6	5.6
台湾	37,166	22,293	1.25	1.3	6.6	5.1	16.7	2.8	9.4	5.8	18.0
フィリピン	300,408	65,631	2.45	0.1	0.1	3.3	3.0	3.0	2.4	3.8	3.7
ベトナム	350,301	70,128	2.21	8.1	18.4	13.2	35.3	11.5	27.9	13.6	38.0
カンボジア	175,979	9,331	2.35	0.1	1.5	3.3	14.9	0.9	4.3	3.6	16.1
マレーシア	344,366	18,879	2.06	3.5	3.7	6.0	6.3	6.3	7.8	6.8	8.5
インドネシア	1,910,220	188,089	1.78	8.2	1.9	9.2	5.4	11.8	10.0	12.1	10.3
ブルネイ	5,389	151	2.12	0.0	0.0	20.4	24.5	18.8	22.9	22.2	26.6
タイ	519,400	56,368	1.69	0.2	0.2	2.3	16.5	0.6	0.8	2.6	17.1
ミャンマー(ビルマ)	647,736	55,331	2.26	0.4	0.9	1.4	4.5	0.9	1.8	1.8	6.3
バングラディシュ	129,506	117,572	2.08	9.7	9.8	24.5	30.9	12.7	14.3	35.6	42.2
インド	3,119,901	889,677	1.98	0.3	0.8	0.9	3.2	0.6	2.0	1.2	4.1
パキスタン	863,271	119,895	3.01	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	0.4
スリランカ	66,649	18,299	1.58	0.0	0.0	3.6	4.3	3.7	4.3	4.8	5.2
イラン	1,673,348	64,498	3.14	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
イラク	435,161	20,187	3.65	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2
クウェート	16,474	1,438	2.23	0.0	0.0	0.9	1.8	0.7	1.3	1.4	2.2
サウジアラビア	1,921,226	18,420	4.54	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
オーストラリア	7,691,934	17,779	1.31	0.7	1.1	1.3	10.1	1.1	11.7	1.5	12.8
ニュージーランド	270,250	3,523	1.33	0.6	2.0	1.4	5.1	1.6	5.2	2.0	6.1
フィジー地(周辺の国を含む)	19,109	1,554	1.64	0.0	0.0	9.7	12.1	11.3	16.7	12.0	17.4
パプアニューギニア	486,927	4,156	2.58	3.1	2.3	4.4	3.5	6.3	4.9	6.9	5.5
サモア他(周辺の国を含む)	2,238	105	2.19	0.0	0.0	10.9	10.1	22.6	10.1	23.2	10.6
グアム	1,428	271	1.78	0.0	0.0	32.8	32.6	34.7	31.1	38.1	34.1
ニューカレドニア	18,899	178	1.74	0.0	0.0	3.8	3.6	7.2	6.7	7.5	6.9
バヌアツ	13,439	168	2.94	0.0	0.0	9.5	9.4	12.2	12.0	12.8	12.0

※国別総人口：CIESIN による人口分布データ（緯度経度 5 分メッシュ）を国境線データ（4.8 分メッシュ）とオーバーレイして算出したために、各国の統一値とは異なっている。

表一2 松井ら（1992）の日本に対する影響評価結果との比較

	現在				1.0 m 海面上昇時			
	浸潮		浸潮+高潮発生時		浸潮		浸潮+高潮発生時	
	本研究	松井ら	本研究	松井ら	本研究	松井ら	本研究	松井ら
影響面積 [km ²]	1,566	861	7,167	6,268	7,849	2,339	9,546	8,898
影響人口 [万人]	63	200	584	1,174	505	410	693	1,542

参 考 文 献

IPCC (1996): Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Cambridge University Press.
海上保安庁水路部 (1999a): 平成 11 年度潮汐表第 1 巻 日本及び近海, 454 p.
海上保安庁水路部 (1999b): 平成 11 年度潮汐表第 2 巻 太平洋及びインド洋, 339 p.

松井貞二郎, 立石英機, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 三村信男, 柴崎亮介 (1992): 海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響評価予測, 海岸工学論文集, Vol. 39, 土木学会, pp. 1031-1035.
三村信男・佐藤圭輔・大高京子・横木裕宗 (2000): 地球環境情報を用いたアジア・太平洋地域に対する海面上昇の影響評価, 第 8 回地球環境シンポジウム講演論文集 (印刷中).
山崎正紀 (1982): 台風, 東京堂出版, 206 p.