

海岸保全計画論

1. 概 説

1.1 戦後の海岸災害と保全事業

戦後における主要な災害を列挙すれば表-1.1 のようになる。これからもわかるように、台風や津波による高潮などの海岸災害と集中豪雨による災害が多く、これは戦後の災害の特徴ともいえるものである。

表-1.1 戦 後 の 主 要 災 害

年 別	主 要 災 害
昭和 21 年	南海震災
22	カスリン台風
23	北陸震災, アイオン台風, マグネス台風
24	デラ台風, ジュデイス台風, ヘスター台風, 栃木震災, キティ台風
25	ジェーン台風, キジヤ台風
26	ルース台風, ケイト台風, マージ台風
27	ダイナ台風, 十勝沖震災
28	2号台風, 和歌山水害, 西日本水害, 13号台風
29	6, 7月水害, 15号台風
30	22号, 23号台風
31	9号, 12号, 15号台風
32	7月, 8月集中豪雨, 5号台風
33	7月集中豪雨, 21号, 22号台風
34	7号台風, 15号台風
35	チリ地震津波, 16号台風
36	第2室戸台風, 26号台風
37	9号, 10号台風
38	9号台風
39	新潟災害, 14号, 20号台風

表-1.2 海岸災害の被害額 (経済企画庁資料)

(単位; 百万円, 30年価格)

年 別	家財及び事業用資産	農 作 物	災 害 復 旧	総 計
昭和25年	76,617	5,763	18,305	100,685
26	45,100	2,669	12,792	60,561
27	862	1,533	3,000	5,395
28	26,213	7,870	28,351	62,434
29	3,654	2,746	5,550	11,950
30	15,139	596	1,818	17,553
31	4,200	436	1,520	6,156
32	8,546	2,783	1,980	13,309
33	7,486	1,793	2,482	11,761
34	126,571	22,398	20,984	169,953
35	11,387	3,958	5,782	21,127

海岸災害の内訳を、戦後の25年から35年までの被害額で示せば表-1.2のようになる。この表でみると、家財ならびに事業資産の損失が公共土木施設の災害復旧に比して非常に大きいことに気づく。歴史的な推移をみるため被害の実態を損失額で考え、その構成比率の変化を明治、大正、昭和の戦前、戦後について、おのおの10ヶ年の期間について示せば図-1.1のようになる。比較のために、洪水など河川災害を中心とした風水害の構成比率の推移を図-1.2に示す。図-1.1、図-1.2から共通していえることは公共土木施設、農地農業用施設の被害と農作物の被害の比率が減少してきており、建物、家財、事業用資産の損害比率は逆に増加してきていることである。とくに海岸災害については、戦後において公共土木施設などの被害率は激減し、建物、家財、事業用資産の比率が極度に増加していることが目立っている。このような現象は、臨海地域の利用が質的に変化していることに原因すると考えられる。わが国の地勢は山地部と平野部の比率が約7:3で構造平野がなく、平野はいずれも河川が海に注ぐ地域の沖積平野としてできたものである。したがって明治以来の産業ならびに都市の発達には、この沖積平野を主体として行なわれており、戦後とくに著しい工業の発展は臨海部が中心であった。産業の発展は必然的に人口の集中を促し、35年の国勢調査によれば、海岸都市人口の全国人口に対する比率は表-1.3のように79%に達している。逆にこれを海岸災害による人命損失の推移からみると、表-1.4に示されるように、昭和期に入ってその比率ならびに絶対数が激増しており、風水害による人命損失の値と比較

表-1.3 人口の分布

	海岸都市	全国
人口	74,086,612人	93,428,428人
面積	167,923km ²	369,421km ²
密度	441人/km ²	253人/km ²

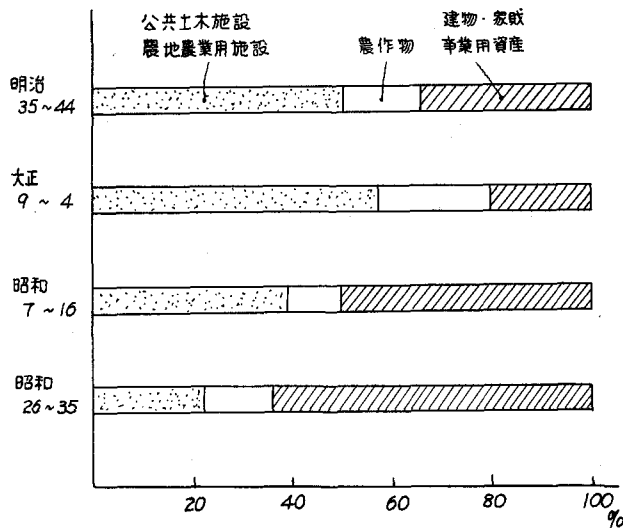


図-1.1 海岸災害の比率 (経済企画庁資料)

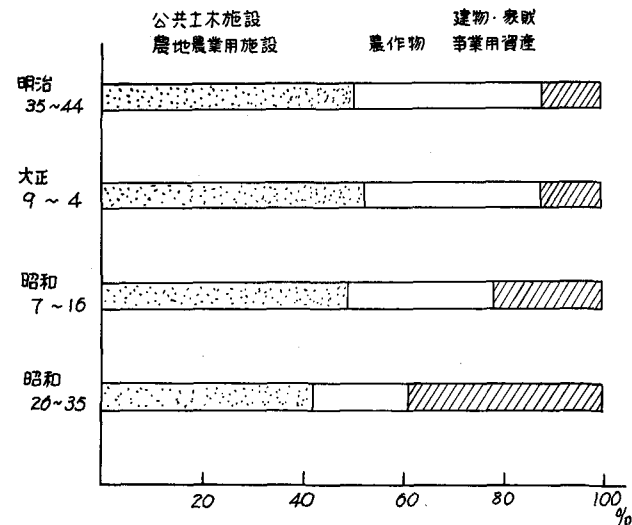


図-1.2 風水害の比率 (経済企画庁資料)

表-1.4 災害による人命の損失 (経済企画庁資料)

区分	期 間	人口10万人 に対する年間 死者行方不明	死 者 行方不明
風 水 害	明治35~44	3.09 人	4,419 人
	大正 9 ~昭和 4	1.66	2,957
	昭和 7 ~16	0.75	5,202
	昭和26~35	1.33	11,851
海 岸 災 害	明治35~44	0.30	429
	大正 9 ~昭和 4	0.12	219
	昭和 7 ~16	0.48	3,324
	昭和26~35	0.61	5,454

して際立った特徴を有している。

一方、このような海岸災害に対処する保全事業の推移はどのようなであったか、戦後における海岸事業費の実績を示せば表-1.5のようになる。わが国の海岸事業の歴史は、治山治水事業と異なりきわめて新しく昭和25年に開始されている。もとより海岸事業としての海岸堤防や護岸の建設は、古くから災害復旧あるいは地方有力者の個人事業として行なわれてはいたが、規模も小さくまた計画に統一性がないため、その効果は局地的なものにとどまっていた。その後、広い意味の海岸事業として海岸施設災害復旧事業が国の助成のもとに実施されたが、その規模は限られたものであった。ところが24年のキティ、デラ、ジュディス台風の被害とともに、海岸保全事業の必要性を強く人々に認識せしめ、25年度から予算措置としてではあるが海岸事業予算として、災害復旧に改良費を加えた改良復旧の性格で事業が進められてきた。しかるに28年に至り、13号台風による甚大な被害は海岸法制定の気運に一層の拍車をかけ、31年5月遂に海岸法の成立をみるに至っている。海岸法成立後の事業費は比較的順調な伸びを示しており、これを国土保全施設の粗資産額の推移で示せば表-1.6のようになる。海岸保全施設の資産の増加は、治山治水資産のそれに比して伸び率においてはきわめて著しいことが認められる。

表-1.5 海岸事業費

年 度	海岸事業費
昭和25	17 億円
26	20
27	26
28	24
29	15
30	13
31	14
32	19
33	27
34	157
35	312
36	232
37	217

表-1.6 国土保全施設粗資産額 (経済企画庁資料)

(単位：億円，35年価格)

年 度	治 山	治 水	海 岸	計
昭和25年	686	8,054	340	9,080
26	798	8,408	354	9,560
27	912	8,772	375	10,059
28	1,032	9,071	392	10,495
29	1,133	9,396	403	10,932
30	1,235	9,776	413	11,424
31	1,328	10,133	424	11,885
32	1,415	10,451	439	12,305
33	1,511	10,734	462	12,707
34	1,630	11,145	617	13,392
35	1,753	11,694	926	14,373
36	1,883	12,081	1,161	15,125
37	2,017	12,502	1,377	15,896

1. 2 財政ならびに産業活動と関連した海岸保全の問題

前節で述べたことから、海岸災害とその保全の戦後における姿の一端を知り得たのであるが、現状における海岸保全はどのようなものであろうか。なるほど表-1.6から保全施設の大幅な増加は認められるが、もともと絶対額が不当に小さいものから出発したものであり、現在に至るも治山治水資産と比較してきわめて低く、表-1.3、表-1.4に示される臨海部の人口集中あるいは人命の損失などの点からみても決して満足すべき状態ではない。海岸保全施設資産の内容は海岸統計によれば表-1.7に示すとおりで、保全施設を必要とする海岸線の延長は12,000 km もあり、絶えざる海岸保全の投資を必要としている。またこの表に示す既存の保全施設も、かつて地方公共団体や地方有力者の単独事業によって建設されたものが多く、施設の考朽が甚だしく早急に改良を必要としているのである。このような長期にわたる投資需要、いいかえるならば経済規模の拡大に対する慢性的な投資不足は、海岸保全事業だけにとどまるものではない。これを治山治水事業についてみると、明治30年頃の資産水準とした場合の想定損失額から治山治水費と水害損失額との和を差し引いたいわゆる超過便益と、水害損失額とを、治山

表-1.7 海岸保全施設の内容

海岸保全 区域指定延長	海岸保全 区域指定延長	海岸保全施設					保全施設 による 防護延長
		堤防	護岸	突堤	離岸堤	水門、樋門	
km	km	km	km				km
12,331	9,106	1,904	3,165	6,299基 199km	199基 25km	1,792門	5,134

治水費の1単位に対する値として算定すれば図-1.3のようになる。この図から治山治水費と損失価額との対応は、戦後から現在に至る間に多少改善されたとはいえ、戦前に比べればきわめて悪い状態にある。それにもかかわらず、戦前とはほぼ同程度の超過便益を享受していることは、過去の治山治水資産に頼り、現在の経済規模の拡大に追いつけ得なかった治山治水事業の姿を如実に示しているものといえよう。その他、道路、港湾、都市計画、工業用水道など社会的間接資本に対する投資不足は、過密都市、用地用水の不足、輸送力の停滞、公害の問題となって現われており、これらの問題点の解決が国の行なう公共事業の重要施策となってきているのである。このため各所管省においては長期事業計画を樹立して、目標年次における整備状況を書き、5年ないし10年程度の計画期間内で達成しようと試みるわけである。

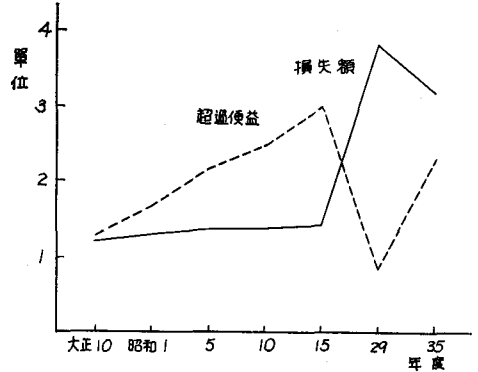


図-1.3 (経済企画庁資料)

しかしながら、このように独自の立場でおのおのが計画を樹立すれば、当然のことながら経済的、財政的な可能限度を大きく超過してしまい、毎年度の予算はおのおのの長期計画が要求する投資規模をはるかに下回る結果となる。このために数年を経ずして計画の練り直しが必要となり、事務的に無駄な努力を重ねることとなる。また事業の実施に当っては、予算規模に対して過大な事業個所に着工することに陥りやすく、予算の執行がいたずらに総花的に流れる弊害をもたらす。これらの弊害を除去するためには、国民経済の発展に則した投資規模を策定し、適正な長期計画を樹立することが要求される。公共事業の国民経済に対する効果は、さきにあげた外部経済の充足による国民所得増加の基盤を造成することと、景気調整策あるいは雇用対策などにみられる。このために計画の適正化は、将来の国民経済の発展に関する政策的問題と、それに基づく各長期計画に対する投資配分、また個々の事業計画の社会的経済厚生に関する効果の面から検討されなければならない。したがって、効果の測定は個々の事業計画が持つ事業効果、すなわち直接効果と間接効果に対する検討とともに、長期計画総体が持つ波及効果、すなわち雇用、原材料などに対する需要、あるいは景気調整効果などの面からも考慮されなければならない。公共事業の性格からして、両者はともに長期的な観点からみなければならないが、個々の事業計画を問題にする点で前者は微視的であり、後者は総体としての投資規模からみる点で巨視的となり、この二面からする検討が必要となるのである。

さらに別の問題として、わが国の工業立地の近年の傾向からしても、臨海部の産業基盤の安全を確保することが海岸保全の重要な責務である。遺憾なことに、わが国の産業活動と防災上の配慮は均衡を保って進行しておらず、伊勢湾台風以後とくにこの欠点の是正が要求されている。産業活動と海岸保全事業との関係は、あくまで前者が主動的な役割を維持し、後者はその後始末を行なっているのが現状であり、保全事業に多分のしわ寄せが行なわれている。このため事業実施に当っては、かなりの技術的難点が生じてきている。このもっとも典型的な例は地盤沈下問題で、海岸沿いの工業都市は大なり小なり地盤沈下を起こしているのが多く、高潮ならびに地震に対する防災で保全計画上多くの問題をもたらしている。その他にも、わが国では港湾、漁港の数が非常に多く、荷役などの関係から水際線の機能を円滑に生かすことが重要視されており、防災方式として単純に海岸堤防を水

際線に阻撓させることは、なかなか実現が困難な場合がある。このために外かく堤防方式とか、高潮防波堤、津波防波堤などの特殊な防災方式も考慮しなければならない、これらの防災方式が有する技術的問題点の解決が迫られるのである。

この小論では、海岸保全計画に要請される投資の経済的分析方法を紹介し、また産業の活動と開発から波及した海岸保全の問題点を二、三指摘して、計画立案の一助に役立たせようとするものである。

2. 投資分析と海岸保全計画

海岸保全計画の立案に必要な投資規模の分析は、海岸保全事業の歴史が浅いことにもより資料の収集が十分でなく、現在まで研究が十分行なわれたとはいえない。この点では、治山治水事業は明治以来歴史も古く分析資料が比較的整備されており、また戦後の公共事業も昭和20年代は治山治水事業に主力が注がれたこともあって、経済分析の手法に関してはかなりの進展をみている。治山治水の投資分析に用いられる方法は、国土保全、民生の安定という共通の目的を有することから、海岸保全の投資分析にも参考となる点が多く、場合によっては、その手法がそのまま海岸保全にも適用し得る。したがって、ここでは広い意味の国土保全という見地から、治山治水事業の分析方法も引用して論ずることとする。

2.1 微視的分析の方法

ここで述べる微視的分析の方法は、単に個々の事業計画に適用されるだけでなく、分析方法の基本的な思想は巨視的分析にも拡張して用いることができる。周知のように、企業の生産活動は完全競争を前提とする場合、平均費用と限界費用との交差する最適生産点か、あるいは限界費用と価格とが交わる利潤極大点か、その目安となる(図-2.1)。公共事業においてもこれらと類似の考え方が用いられており、以下数種類のモデルについて説明してみよう。

(1) 費用便益モデル¹⁾

この方法は経済分析の手法として初めて T.V.A. 計画に用いられたもので、わが国でも26年に国土総合開発計画審議会が採用している。このモデルで用いられる指標は費用便益比率と超過便益である。

費用便益比率は次のように表わされる。

$$Q_1 = \frac{B_0 + B_1 + B_2 + \dots}{C_0 + C_1 + C_2 + \dots} \quad (2.1)$$

または

$$Q_2 = \frac{B_0 + S_1 + S_2 + \dots}{C_0} \quad (2.2)$$

超過便益は次のように表わされる。

$$S = (B_0 + B_1 + B_2 + \dots) - (C_0 + C_1 + \dots) \quad (2.3)$$

ここで B は便益額、 C は費用額、suffix の 0 は直接的な費用便益を表わし、 i は間接的な波及費用便益を示す。また $S_i = B_i - C_i$ である。(2.1) は計画の適格条件ならびに着手の順位を定めるために使用され、 $Q_1 > 1$ であり、 Q_1 が大きいほどさきに着手される。(2.2) は厳密に言えば費用便益比率とはならないが、例えば政府投資が少額で、波及費用が二次的な性格しか持たない場合には、個々の事業計画の相対的な緊急性を判定するために有効である。一般には事業計画において S が極大となるように事業規模を計画する。これは費用便益比率が極大であっても、なお超過便益の附加する可能性があり、資源の完全な利用とならないからである。すなわち、図-2.2(A)において $B=C$ の直線を引けば P_3 で交わる。原点から $B-C$ 曲線に切線を引きその点を P_1 とする。また $B=C$ の直線に平行な切線を引きば P_2 で $B-C$ 曲線に切する。 $B-C$ 曲線は一般に上に凸となる。図からも明らかな

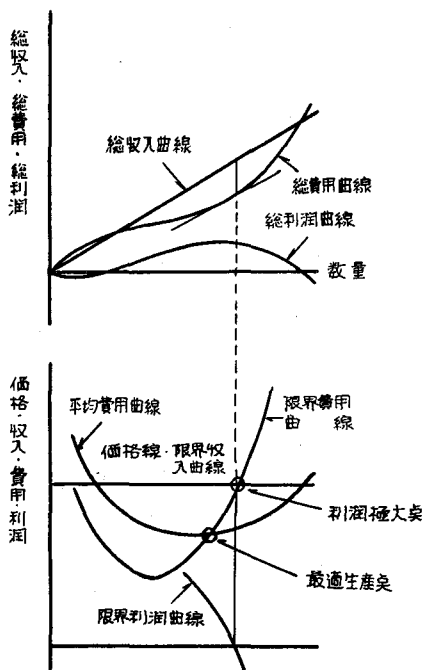


図-2.1 企業の生産活動

ように、 P_1 は費用便益比率が極大となる点であり、 P_2 は超過便益が極大となる点である。また P_3 は費用と便益が等しくなる点である。図-2.2(b) からみると、 P_2 は限界費用便益比率、すなわち、 $\frac{dB}{dC}=1$ となる点で、この点を越えての費用増分は附加される便益増分よりも大きくなり、経済的妥当性を失なうものである。また P_1 と P_2 を比較すれば、 P_1 の超過便益は小さく、さらに P_2 まで資源は開発されなければならない。これは仮に P_1 で事業規模を定めると、後に再開の問題が生じたとき、さきの投資に無駄が生ずることを考えても P_2 で計画する方が有利である。

(2.1)および(2.3)でみられるように、便益、費用ともに貨幣尺度に換算できるものはすべて金額で表わし、計画のもたらす社会的な便益とこの便益を提供するに必要な社会的費用を、最終的な波及効果を含めて考慮することが原則である。便益と費用は年単位で表わし、施設の存続期間中の平均額で表示する。また費用については利率、固定資産の減価償却費を計上するのが普通である。利率は財政資金の投入によって行なわれる公共事業でも、国民の資本蓄積から支払われるものであり、他の用途に向けられれば一定の資本的効用を持つものであるから、これに相当する利子を負担すべきものと考えてのである。利率は事業の種目によっても異なり、国土総合開発審議会が定めた国土保全事業に対する値は、固定資本に対して年5.5%、運転資本に対して年10%である。減価償却については、公共施設も通常の資本維持の原則を基礎とするものであり、年月の経過によって減耗する価値を計算に組入れて妥当な評価を行なう。一般には費用の算定は減価基金法による資本費用に、補填費用を加えるのが普通で、また便益も現時点の評価額という意味から利率で割引いた平均額で表示する。

資本の機会費用を考えると、必ずしも上記モデルの適用は合理的とはいいがたくなる。いま資本に限界があり、二つの事業計画 P_1 、 P_2 を実施しなければならないとき、 P_1 が $\frac{dB}{dC}=1$ となるまで実施されるならば、 P_2 は資本不足により実施されないとしよう。この場合 P_1 への限界支出の機会費用は P_2 において犠牲にされた便益である。したがって超過便益は資金を部分的に P_1 から P_2 に移すことによって増加され得る。これはいわゆる社会的限界生産力を均等にするることにより、もっとも有効な投資配分が行なわれるという考え方と同じもので、総合的な判断が必要となる点で注意を要する。

海岸保全にこのモデルを適用する場合には、直接便益は投資による被害軽減額で示されるが、災害は不確定現象であるからその確率を乗じ、期待便益額で表わすのが妥当である。間接便益には、営業停止の損失が軽減されることから生ずる所得増加、災害に対する安全増加による土地利用の高度化などがあげられる。しかし間接便益の評価は判断の基準が定めがたく、この算定は非常に困難である。アメリカの水資源開発の投資規準²⁾は、この超過便益極大のモデルを採用しており、費用便益の概念、その測定上の問題、また事業計画に対する具体的な適用について詳細に論じている。これらは海岸保全事業に対してもかなり参考になる。

(2) 期待効用極大化モデルと所得極大化モデル

Harvard 大学水資源開発計画セミナーの指導者 Eckstein の分析モデル³⁾は、わが国の投資分析法に影響するところが大きく各方面から注目されているものである。これは効用関数を洪水制御の計画に利用したもので、効用極大のモデルは所得極大のモデルより一層洪水制御の必要に導びくことを証明している。ただ Eckstein の導

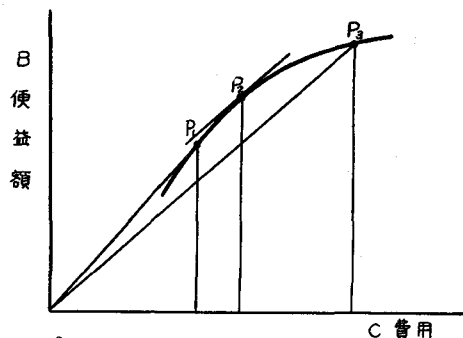


fig. A

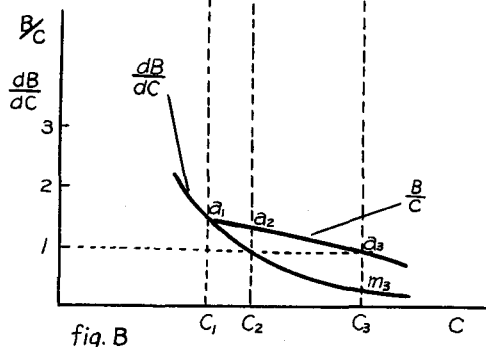


図-2.2 費用便益モデル

びき方は、関数の符号について多少の混乱があるので、ここではわかりやすい方法で説明を行なう。

いま効用が次式によって所得と関係づけられるとする。

$$U = F(Y) \quad (2.4)$$

効用関数は上に凸であるから、 Y が増加するにつれて $F'(Y)$ は減少する。 s を治水工事のない場合の最大浸水深とし、 r をダムなどの制禦工事で減少し得る洪水水位とすると、

$$x = s - r$$

は治水工事が施行された後の洪水水位となる。ここで s, r は水位以外の指標でもよく、洪水被害と関数関係にあるものを用いることができる。 s の起こる確率は $p(s)$ によって表わされる。説明の便宜上 s は離散的な値とする。洪水 x による所得の減少 $g(x)$ と、洪水のないときの所得水準 Y_0 から、効用の損失は、

$$\Delta U = F(Y_0) - F(Y_0 - g(x)) = h(x) \quad (2.5)$$

となる。ここで期待効用の極大、すなわち洪水による効用損失の期待値の極小化をはかりたいのである。損失は二つの源から発する。それは洪水被害と治水工事の費用である。 $C(r)$ を r の費用とすると、極小化されるべき関数は次のようになる。

$$\overline{h(r)} + F'(Y_0)C(r) = \Phi(r) \quad (2.6)$$

ここで $\overline{h(r)}$ は、治水工事が洪水水位を r だけ下げることに関与した場合の $h(r)$ の期待値であり、 $F'(Y_0) \cdot C(r)$ は r の費用となった所得の限界効用である。したがって極小化の条件は r で微分して、

$$\overline{h'(r)} + F'(Y_0) \cdot C'(r) = 0 \quad (2.7)$$

しかるに、

$$\overline{h(r)} = \sum_{s=r+1}^{\infty} p(s)h(s-r)$$

であるから、(2.7)は

$$\sum_{s=r+1}^{\infty} p(s)h'(s-r) = F'(Y_0)C'(r) \quad (2.8)$$

となり、(2.8)の解が投資規模を表わす。以上が期待効用極大化のモデルである。

次に所得極大化の条件、すなわち洪水によって起こる所得の減少を極小にするための条件を考えてみよう。

$h(r)$ の代りに $g(r)$ とおけば、所得損失関数は、

$$\Psi(r) = \overline{g(r)} + C(r) \quad (2.9)$$

となる。すなわち、洪水によって生ずる所得減の期待値と治水工事の費用との和である。したがって

$$\Psi'(r) = \overline{g'(r)} + C'(r) = 0 \quad (2.10)$$

または

$$\sum_{s=r+1}^{\infty} p(s)g'(s-r) = C'(r) \quad (2.11)$$

が極小条件となる。これが r について求められなければならない。

Eckstein は(2.8)の解は(2.11)のそれより大きくなることを次のように証明している。 r_0 を(2.11)の解とし、(2.8)が一つの解しか持たないとすると、(2.5)から

$$h'(x) = F'(Y_0 - g(x)) \cdot g'(x) \quad (2.12)$$

また $F'(Y)$ は減少関数であるから

$$F'(Y_0 - g(x)) > F'(Y_0) \quad (2.13)$$

よって

$$h'(x) = F'(Y_0 - g(x))g'(x) > F'(Y_0)g'(x) \quad (2.14)$$

ただし、ここで、 $x > 0$ なるとき $g(x) > 0$ 、 $g'(x) > 0$

(2.14)を用いて、(2.6)より

$$\begin{aligned}
 -\Phi'(r_0) &= \sum_{s=r_0+1}^{\infty} p(s)h'(s-r_0) - F'(Y_0)C'(r_0) \\
 &> F'(Y_0)\left\{ \sum_{s=r_0+1}^{\infty} p(s)g'(s-r_0) - C'(r_0) \right\}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

r_0 は(2.11)の解であるから, (2.15)は

$$-\Phi'(r_0) > 0, \quad \Phi'(r_0) < 0$$

となる。これは(2.8)の解が r_0 より大きいところにあることを示しており, 効用極大化は所得極大化よりむしろ洪水抑制へと導びくことを表わしている。(2.15)を計算すればわかるように, 効用極大化の解が所得極大化の結果を越える範囲は, 洪水確率の分布と所得の限界効用曲線の弾力性に依存することになる。

このような結果から, 事業計画の規模は期待効用を極大にする点に求められるが, 社会的効用関数を具体的にどのように表現するかは, また極めて困難な問題である。Eckstein もこれについては具体的に論じてはいない。したがって, 所得極大のモデルから妥当な投資規模を求め, それ以上のところに計画の最適点があると解すべきであろう。

(3) 費用極小化モデル

Eckstein の所得極大化モデルは, 換言すれば所得損失極小化のモデルであり, 極小化されるべき関数は, 所得損失額と建設投資額との和であった。この関数は一般に費用ともみなされるもので, このような場合には, このモデルは費用極小化モデルということができる。

広い意味でこのモデルの範疇に属するものとして高橋の研究⁴⁾がある。高橋のモデルを簡略に説明すれば次のようになる。災害の破壊力を f で表わし, その発生する確率は次式のように指数分布になるものとする。

$$p(f) = \exp\left(-\frac{f}{f_0}\right) \frac{df}{f_0} \tag{2.16}$$

いま想定破壊力を F とするとき, これに耐える構造物の費用を $C(F)$ とする。 F の超過確率は(2.16)から

$$\exp\left(-\frac{F}{f_0}\right)$$

となる。構造物の耐用年数を L , 一つの破壊力が作用する時間間隔を τ とするとき, t 時間後に破壊力が F を越し, 構造物が破壊する確率は

$$(1 - e^{-\frac{F}{f_0}})^{\frac{t}{\tau}-1} \cdot e^{-\frac{F}{f_0}}$$

である。したがって, 構造物が効用を果たす時間の期待値は, 近似的に次のように表わされる。

$$\bar{T} \approx L(1 - e^{-\frac{F}{f_0}})^{\frac{L}{\tau}} + \int_0^L (1 - e^{-\frac{F}{f_0}})^{\frac{t}{\tau}} \cdot e^{-\frac{F}{f_0}} \frac{t}{\tau} dt \tag{2.17}$$

(2.17)の積分を行なえば,

$$\bar{T} = L(1-S)^m \left\{ 1 + \frac{S}{\log(1-S)} \right\} + \frac{\tau S}{\{\log(1-S)\}^2} \{1 - (1-S)^m\} \tag{2.18}$$

$$\text{ここで } e^{-\frac{F}{f_0}} = S, \quad \frac{L}{\tau} = m$$

となる。一方, 建設費が

$$C = AF^n$$

と表わされるものとすれば,

$$C = A\{-f_0 \log S\}^n = \alpha \{-\log S\}^n \tag{2.19}$$

となる。 C を $\bar{T}$ で除した値は単位時間当りの工費となる。 S が小さいことから

$$\frac{C}{\bar{T}} = \frac{\alpha}{L} \frac{mS(-\log S)^n}{1 - (1-S)^m} \tag{2.20}$$

が得られる。(2.20)で S を変数として、極小となる値が所要の求める解である。 $Sm=\kappa$ とすると、この条件は

$$\log m = \log \kappa + \frac{n(1-e^{-\kappa})}{1-e^{-\kappa}-\kappa e^{-\kappa}} \quad (2.21)$$

となる。ところで F の起こる再現周期は確率論の定義から $T=\tau/S$ である。したがって、

$$\kappa = Sm = \frac{S}{\tau} \cdot \tau m = \frac{L}{T}$$

となり、 L を定めれば κ より T が定まり、計画破壊力すなわち構造物の計画強度が決定される。高橋はさらに、構造物の強度が L の間で線型的に弱まると仮定し、破壊力がrandomに起こる時系列のモデルをつくり、モンテカルロの方法を用いて、同じような分析を行なっている。高橋のモデルは、単位時間の建設費用極小化モデルともいうべきもので、災害による所得減を考慮していないから、このモデルによる投資規模は、他のそれに比して下回るものとなろう。しかし、構造物と災害の破壊力との関係を明らかにしている点で注目すべきものがある。

鶴田、長尾、井島のモデル^{5),6)}は、海岸保全を対象にした投資の経済分析で、わが国では初めてのものである。この分析法は費用極小化モデルに基づいており、分析を行なう前に次のような分析資料を作成する。

(1) 高潮位の発生頻度は、該当する地域の長年にわたる高潮位の記録に基づいて、年間発生超過確率の分布を求め、次式のような指数分布をあてはめる。

$$m = 10^{\frac{h-h_1}{s}} = e^{\frac{\alpha(h-h_1)}{s}} \quad (2.22)$$

ここで m : 年間発生超過確率

h : 潮位

$\alpha: \log_e 10 = 2.3026$

h_1 : 超過確率が1となる潮位

(2) 高潮位ならびに波浪による浸水は、図-2.3、図-2.4のように、潮位、波浪の時間的変化を二等辺三角形に単純化し、過去の記録からそれぞれの継続時間を定める。潮位は天体潮と気象潮との重畳と考え、天体潮のみでは浸水は起こらないとする。

潮位による浸水は、堤外潮位と

内部の浸水深との関係から、越流堰あるいは潜り堰として算定する。越波による浸水は、波高が1.0mより大きく、また天端と潮位との高さの差 R_0 が $H \geq R_0 \geq -H$ (H : 沖波波高) のときに起こるものとする。

(3) 防護区域の資産を正確に評価するため、各種資産の単価について抽出調査、数量については悉皆調査を行なう。

(4) 資産の浸水による被害は、伊勢湾水害経済調査、チリ地震津波水害経済調査などを参考にして求めた被害率を用い、また営業停止などによる間接被害は、通産省などの資料により値を定めた。これらの被害率、数量、資産単価を用いて、堤外潮位に対する想定被害額を算定する。公共土木施設の被害も、過去の災害を参照して、これに含めている。

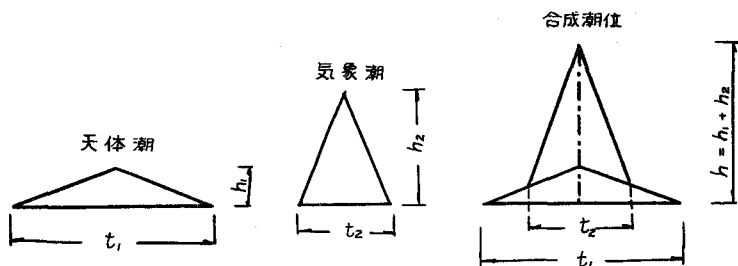


図-2.3 潮位のモデル

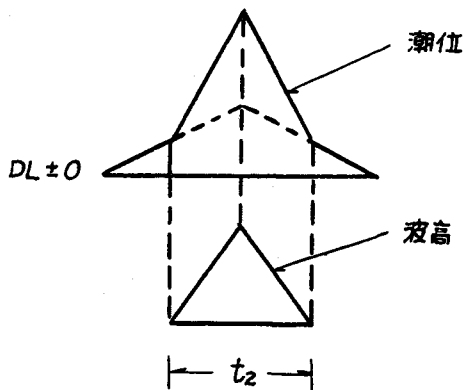


図-2.4 波浪のモデル

(5) 保全施設の建設費は天端高の関数として、過去の記録から求める。

これらの資料を前提にして分析を進める。まず想定被害額と堤外潮位との関係は図-2.5のように表わされる。また潮位の年間発生確率は図-2.6のようになる。建設費と天端高との関係は図-2.7に示される。潮位の年間発生確率と想定被害額から、年間想定被害の期待値が得られる。これを図-2.8に示す。いま保全施設の天端高を h_1 から h_2 ($h_2 > h_1$) にしたとき年間想定被害期待値は減少する。この差額は保全施設による防護額とみなされ、いわゆる便益となるものである。一方、 h_2 に高めてもなお被害は生ずるのであるから、これは未防護額となる。この未防護額と建設費との和は費用となるもので、これらを保全施設の天端高の関数として表現すれば、図-2.9のようになる。この図から、費用が極小となる天端高を計画の最適規模とみなすのである。図-2.9の M 点は費用と防護便益が等しくなる点で、N 点は費用が極小となる点である。

M 点は費用便益モデルにおいて説明した図-2.2の P_3 点に相当するものであり、また N 点は P_2 点に相当するものである。なぜならば、いま投資をしないときの想定被害期待値を D_0 、投資による防護額を P 、建設費を C とするとき、費用は天端高 h の関数として次のようになる。

$$\Phi(h) = \{D_0 - P(h)\} + C(h) \quad (2.23)$$

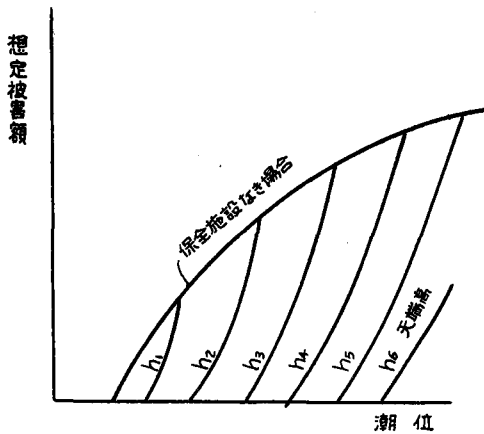


図-2.5 想定被害額

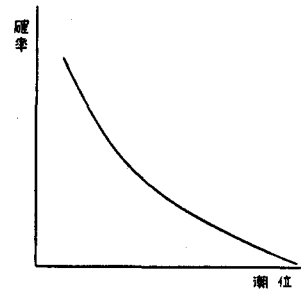


図-2.6 高潮位の年間発生確率

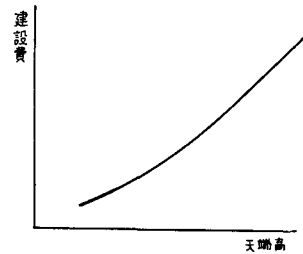


図-2.7 保全施設の建設費

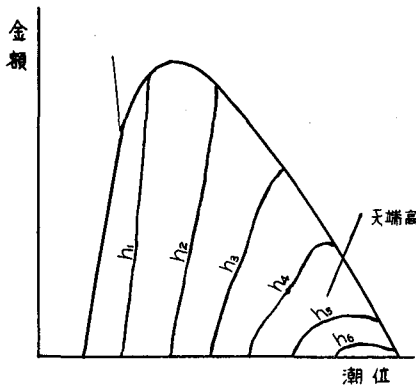


図-2.8 年間想定被害期待額

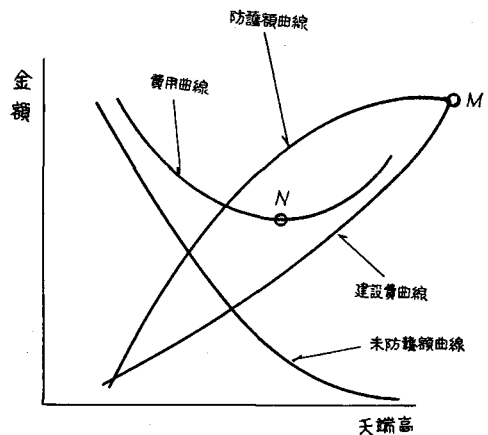


図-2.9 費用極小化モデル

N 点に相当する天端高は

$$\Phi'(h) = -\frac{dP}{dh} + \frac{dC}{dh} = 0,$$

$$\text{したがって, } \frac{dP}{dh} / \frac{dC}{dh} = \frac{dP}{dC} = 1 \quad (2.24)$$

と表わされる。いま防護額 P が、費用便益モデルに含まれる便益と同一の範囲、同一の種類について算定されているとすると、(2.24)は

$$\frac{dP}{dC} = \frac{dB}{dC} = 1 \quad (2.25)$$

となる。すなわち N 点は、超過便益が極大となる点である。

なお便益となる防護額は現時点への評価額としており、防護額の生産する利益率と資本に用いられる長期利率を区別して用いている。すなわち、施設の耐用年数を n とし、 m 年 ($m < n$) に生ずる防護額を P_0 とするとき、 P_0 の現在評価額 P_m は、

$$P_m = P_0 \frac{(1+i_p)^{n-m}}{(1+i_c)^n} \quad (2.26)$$

i_p : 利益率

i_c : 長期利率

したがって、 n の全期間にわたる防護額 P_n は

$$P_n = \sum_{m=1}^n P_m = \frac{P_0}{(1+i_c)^n} \frac{(1+i_p)^n - 1}{i_p} \quad (2.27)$$

となる。これに対応して建設費も現在価格の総額 C_0 として表わせば、投資効率 Q は、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{P_n}{C_0} = \frac{P_0}{C_0} \frac{(1+i_p)^n - 1}{(1+i_c)^n i_p} \\ &= \frac{nP_0}{C_0} \cdot \frac{(1+i_p)^{n-1}}{n(1+i_c)^n i_p} \\ &= \frac{nP_0}{C_0} \cdot \frac{1}{I} \end{aligned} \quad (2.28)$$

となる。実際には、背後地域の経済成長を考慮して I に修正をほどこしている。

以上説明したように、このモデルの分析はかなり細密な点まで考慮しているが、これを行なうには多くの人員と日数を要し、大変な作業である。

2. 2 巨視的分析の方法^{7),8)}

巨視的モデルによる分析は、治山治水事業において多くの試みがなされているが、なかなか有効なモデルがなく、今後の研究にまつところが大きい。ただ Eckstein の所得極大化モデルが出現してから、やや一歩前進した感があり、この成果は、39年に樹立した中期経済計画の、国土保全事業に対する投資規模の決定に役立っている。

今まで用いられたモデルを簡略に説明すると次のようになる。

(1) G.N.P. との相関モデル

沖積地帯における国富の増大に伴って、河川、海岸などの保全機能は増加されていかなければならない。ところで国富統計は毎年実施されていないので、国民総生産(G.N.P.)を、長期的にみれば国富と同様な傾向を示すものと考え、G.N.P.の傾向と同じに保全事業の規模を増加させるというのが、このモデルの方法である。現在行なわれている海岸保全事業の長期計画も、このモデルに沿っており、昭和31年から37年に至る海岸保全施設の資産額とG.N.P.との相関式を求め、目標年次におけるG.N.P.から、逆に保全施設の資産額を導びいている。このモデルの弱点は、投資規模の妥当性を示す指標が何も存在していないことである。

(2) 原単位方式

このモデルは資本係数の概念を用いたもので、他の公共事業計画にもかなり使われたものであった。原単位と

は資本係数の一種であって、国土保全事業に例をとるならば、年平均浸水面積を1単位減ずるための資産額といえよう。したがって、目標年次にいたるまでの浸水防除面積を計画し、これに原単位を乗ずれば投資規模が決定される。しかしながら、この原単位の値は、過去の最も保全機能がいかされた時期の値が採用されやすく、土地利用の高度化など経済情勢の変化、あるいは防災技術の革新などを考慮するとき、この原単位を決定する基準は非常に不明確なものとなる。したがって、経済的な効果を表示する尺度とはなりがたい。

(3) 投資効率方式

この方式は所得倍増計画作成時に、治山治水事業計画に適用されたモデルである。基本的な思想は、洪水確率年を1単位下げのに要する投資額を、単位投資額として算定し、これに国民経済全体からみた投資の限界効率を乗じて、治水に対する限界単位投資から最低限得られなければならない限界期待額を決定している。次に洪水確率年別に被害可能額を推計し、さきに求めた限界期待額と等しくなる被害可能額の洪水確率年を決定して、その確率年の洪水を防禦し得る治水状態を、目標年度に確保されなければならない治水状態としている。計画期間中の投資額は目標年度に確保されなければならない確率年から、計画策定当初すでに確保されていた確率年を差し引いた確率年に、単位投資額を乗じて算定している。ただここで問題となるのは、国民経済計算からする限界資本効率は、産業によって大きな幅があり、また耐用年数の異なった多様の施設への投資を含んでいる。一方、治水施設の耐用年数は、民間設備投資に比してきわめて長いのが特徴であり、便益も長い期間にわたって算出される。したがって、このような異なったものの資本効率を比較するのはいささか無理と思われる。

(4) 積上げ方式

これは一定した徹視的モデルに基づき、全国にわたる事業規模を決定する方式で、公共施設の性格からして、本来、各地域においてその効用を果たすものであるから、個別に検討された計画に基づき、集計されることが最も実情に則している。海岸保全事業では、全体の妥当投資規模の目安がつけられていないので、この積上げ作業はとくに必要とされるものである。ただ、この方式では、国の財政規模との関係がつけられず、この点、何らかの方法を用いて改良する必要がある。

(5) 費用極小化モデル

この方式は、中期経済計画立案に参加した社会資本分科会⁹⁾が用いたもので、今までのものに比し、一歩前進した方法といえる。モデルは Eckstein の費用極小化モデルを適用したもので、次のように行なう。

治山治水、海岸保全を含めた国土保全を対象にして、毎年の被害額を G.N.P. の7ケ年移動平均値で除した数値を年平均被害率とする。これを表-2.1に示す。保全施設の資産と年平均被害率とは関数関係にあるものと考え、

表-1.6に示した国土保全施設粗資産額を用いて相関を求めれば、

$$F = 1.629 \times 10^6 \times K^{-1.9192} \tag{2.29}$$

F : 年平均被害率 (%)

K : 国土保全施設資産額 (単位10億円)

となる。

いま V を国民総生産、 i を利子率、 n を施設の耐用年数とすると、年平均被害額は $F \times V \times 10^{-2}$ となる。また減債基金法による資本費用は

$$\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \cdot K$$

と表わされる。したがって年費用 C は、これらの和をとり、

$$C = (1.629 \times 10^4 \times V \times K^{-1.9192}) + 0.05473K \tag{2.30}$$

ただし、 $n = 50$ 年 $i =$ 年5%

となる。(2.30)を K に関して微分し、 $\frac{dC}{dK} = 0$ とすれば

$$\log K = \frac{\log V + 5.6567}{2.9192} \tag{2.31}$$

表-2.1 年平均被害率

年 度	年平均被害率
昭和25	4.26 %
26	3.76
27	3.23
28	2.78
29	2.31
30	2.18
31	2.42
32	1.55
33	1.41
34	1.35

目標年次の V を(2.31)に代入すれば、そのときの妥当粗資産額が得られる。投資規模はこの値から現在の粗資産額を差し引き、それに補填投資を加えたもので表わされる。このように、国民経済との関係、費用極小化による規模の妥当性を含めてこのモデルは表示しており、従来のモデルに比較して進歩したものといえよう。

以上のように、巨視的モデルの分析法を簡単に紹介したが、これでもうのように近年になってようやく軌道に乗った感があり、今後の開発が大いに期待される。

公共事業のもつ乗数的波及効果については、33年に産業関連分析を行なって、35年度の経済白書にも一部報告されている。その資料¹⁰⁾によれば事業費1000億円に対する需要効果は次のように表わされている。

	就労人員 千人	鋼 材 千トン	セメント 千トン	木 材 千m ³
治 山 治 水	233	59	1,215	406
道 路 整 備	182	109	1,393	161

これから各事業の性格が明らかにされ得るが、その後の生産要素の変動が大きいから、現時点でさらにやり直す必要があろう。

一方、財政のもつ Built-in stabilizer に対して、公共事業の比重はがなり大きいものといわれており、各事業の長期計画が集計されると、いわゆる財政の下方硬直が強くなるおそれがある。このように巨視的分析に附随して、多分に政策的判断に依存する要素が出現し、必ずしも計量モデルによる分析が一義的に規模を決定することとはならない。

3. 産業活動と海岸保全計画

3.1 地盤沈下

地盤沈下の原因には地下水の揚水、地盤の圧密、地震などがあげられるが、ここで取り上げるのは地下水の揚水に基づく沈下問題が主である。

わが国で地下水が多量に利用されるのは、水道施設に投下される資本不足に一半の原因もあるが、次のような事情にもよっている。

- (1) 地下水資源がきわめて豊富であるため、手近かなしかも経済的な水源である。古くは江戸人口100万の用水はそのほとんどが井戸でまかなわれ、また現在でも工業用地下水の取得費は全国平均で約3円/m³程度にしかない。
- (2) 地下水は安定した安全な水源である。これはわが国の特徴として、地表水の水量、水温、水質の変動が非常に大きいのに比し、きわめて安定した良質の水であるからである。

このような事情から地下水は工業用水、都市用水として重用され、戦後の急速な産業の拡張、人口の都市あるいはその周辺部への集中の結果、地下水源の枯渇、塩水の混入、地盤沈下の現象などが著しく現われてきているのである。工業用水の地下水に対する依存は表-3.1に示すとおりで、地下水の比重は多少減少しているが使用量の増加が大きく、所得倍増計画作成時に予定した45年度の使用量800万トン/日を大幅に上廻っている。現在の地下水使用状況を概観すれば¹¹⁾、京浜、阪神、中京の既設工業地帯は多年にわたる揚水の結果、地下水位の低下、あるいは地盤沈下に対処するため法的規制がしかれたことなどにより、地下水使用は頭打ちの状態にある(表-3.2)。また法的規制を受けている他の工業都市も使用量はそれほど増加してはいない。ところが新規工業地帯の地下水依存は表-3.3のように非常に大きく、工業の進出に

表-3.1 全国工業用水と地下水
(工業用水統計) (単位; 千トン/日)

	工 業 用 水 使 用 量	地下水使用量	地下水の比率
33年	23,930	7,836	32.8%
37	37,320	11,092	29.7%
37/33	147.6%	141.6%	

表-3.2 京浜、阪神、中京の工業地帯に
おける地下水使用 (工業用水統計)
(単位; 千トン/日)

	工業用水需要	地下水汲上量	地下水比率
33年	3,875	1,311	33.8%
37	6,370	1,566	24.6%
37/33	164.4%	119%	

よりこの依存度は今後とも増加することが懸念されている。このようにみると、工業の発展は用水需要を増加させ、必然的に地下水使用の増加を促し、その結果地下水位の低下、地盤沈下の現象が出現し、法的規制を行なうという過程をどこでも繰返すとみなされる。

地盤沈下が海岸保全に及ぼす影響は、第一には保全施設の沈下により高潮に対する保全能力が減少すること、第二にはこれを防ぐため保全施設の嵩上げ補強を行なうが、構造に無理があり耐震性を損なう点にある。また第三には沈下により低地帯が広く形成され、浸水を生じたときの被害が大きくなることである。海岸沿いの工業都市の沈下傾向は図-3.1に示すとおりで、地域によっては年間10cm以上も沈下しており、保全上憂慮すべき状態にある。これら地域の保全計画は、10ヶ年程度の将来沈下量を見込み施工するのが通常的方式であったが、いずれにせよほとんどが既存の保全施設の嵩上げ補強であるため、耐震性が十分でなく、問題となる点が多いのである。新潟地震による新潟市の被災は、全国における沈下地域の海岸保全に、耐震性に関する注意を喚起し、あらためて地盤沈下都市の海岸防災について再検討を要求したものである。

防災対策としては二つの面から検討されなければならない。第一には沈下の軽減、除去である。沈下を防ぐ対策としては、次のようなものがあげられる。

- (1) 地下の滞水層調査、地質調査、透水調査を実施して安全揚水量ならびに井戸の安全間隔を定め、地下水利用の適正化を図る。
- (2) 工業用水法などの法的規制を徹底させ、必要ならば法の改正をも考慮する。
- (3) 工業用水道、排水の回収装置などの設置を積極的に進め、水利用の転換を図る。

第二には、海岸保全における防災方式に検討が加えられなければならない。老朽した既存の保全施設は嵩上げ補強を行なっても所要の耐震性を得ることは困難な場合が多く、この場合の対策として次のような方式が考えられる。

- (1) 海岸堤防などの線による防禦を帯による防禦に変換する。すなわち水際線の保全施設背後に地盤嵩上げを行ない、その高さは沈下を予想した十分な高さとなし、幅は地震による法肩の崩壊によっても安全な幅員とする。これは新潟市の復旧にも用いられたものである(図-3.2)。

- (2) 保全施設を縦深的に設置する。すなわち、第一線堤、第二線堤と設け、第一線堤が所要の耐震性を満足しなくても、第二

表-3.3 新工業10地域の地下水使用
(工業用水統計) (単位:千トン/日)

	工業用水需要	地下水汲上量	地下水比率
33年	3,078	1,731	56.2%
37	5,269	2,931	55.6%
37/33	171.2%	169.3%	

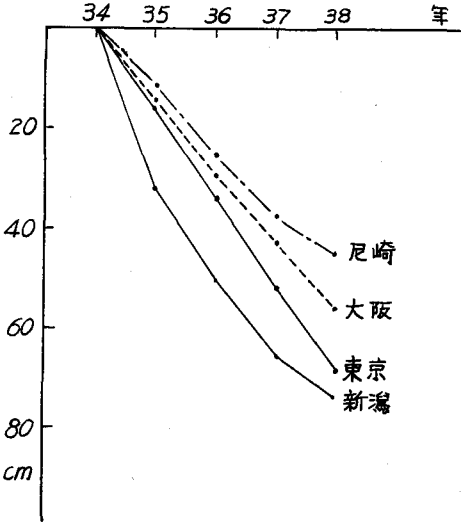


図-3.1 都市の地盤沈下 (港湾局資料)

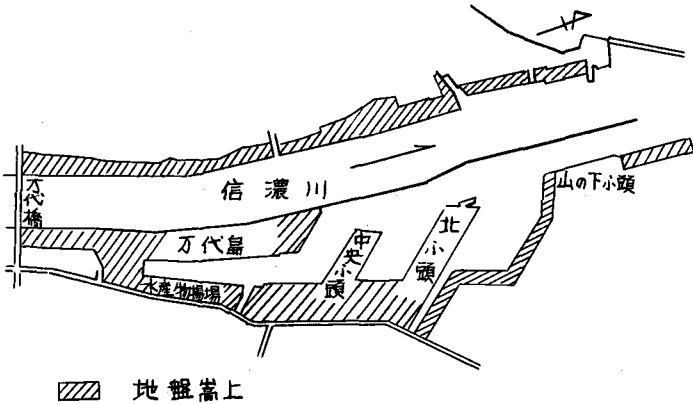


図-3.2 新潟市の地盤嵩上げ

線堤が十分の耐震性を有するように設置し、第一線堤に近いほど、被害の軽減がもたらされる。

3.2 内水排除

尼崎、東京江東区などにみられる水閘門をそなえた外かく堤防方式は、水際線の機能をいかすためにとられた防災方式であるが、この場合には台風時の降雨を排除しなければならない。また輪中堤による方式も内水排除を考慮する必要がある。内水排除の計画は問題が多面的であるため、比較的重要な点のみについて、計画立案の手順に従って論じることとする。

(1) 計画潮候曲線

計画高潮位は保全施設の設計潮位と同一となるのが原則であろうが、潮候曲線は、いままで得られた高潮の潮候曲線の記録でその最高潮位の起時を一致させたとき、これらを包絡するように選ぶのが望ましい。これは排水量の決定に重要な影響を及ぼすから、潮候曲線の発生する頻度、地域的特性、維持すべき内水位などから考慮して総合的に判断すべきである。

(2) 計画降雨曲線

日雨量の強度を求めるには次の3種の方法¹²⁾がある。

(i) 気象力学の方程式による計算方式

(ii) 雨量に関係する台風の中心気圧、地域の最低気圧、相対過度、台風の経路などの Parameter を用いての多重相関方式

(iii) 小河原の方法による超過確率雨量の計算方式

(i), (ii) の方法は、風速に確率を導入することにより降雨の確率表現が得られる。通常標準とされている降雨の再現周期は50年であるが、浸水被害が甚大となる恐れのある地区では100年程度が望ましい。東京では100年確率雨量に対しても安全がどうか検討を行なっている。降雨の時間的配分は、台風時の降雨継続時間が長いいため Talbot, Sherman 型の適用は困難で、通常次の式が用いられる。

$$R_t = R_{24} \left(\frac{t}{24} \right)^K \quad (3.1)$$

R_t : t 時間継続の最大雨量

R_{24} : 24時間最大雨量

$$K = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$$

K は雨の性格によって異なり一概には律せられないが、 $K = \frac{1}{3}$ はやや過少で、 $K = 0.4 \sim 0.5$ とみられている¹³⁾。

(3) 計画流出量曲線

わが国では流出量の算定に合理式を用いることが多いが、都市の流出は、家屋、舗装道路、裸地面が複雑であるから注意を要する。合理的な式は次のとおりである。

$$Q = \frac{1}{360} C i A \quad (3.2)$$

Q : 流出量 (m^3/sec)

i : 降雨強度 (mm/hr)

C : 流出係数

A : 排水面積 (ha)

ここで問題となるのは流出係数で、通常加重平均によって平均流出係数を求めている。

$$C = \frac{\sum C_j A_j}{\sum A_j} \quad (3.3)$$

C_j : 用途別、工種別の流出係数

A_j : 同上の面積

流出係数については、一般に都市計画が整備されてくると増大する傾向にあり、したがって将来の変化を見込ん

で流出係数を求めるか、または将来排水施設をさらに増加するなどの処置が必要となる。また1回の降雨において、累加雨量が増加すると流出係数は増大し、低地帯の都市の場合、累加雨量が150mm以上では $C=1.0$ になることが多い。

計画流出量曲線は、その最大流出量が計画潮候曲線の最高潮位と時間的に一致するように決定する。これは内水位を一定の高さに管理するため、最も条件の悪いときでも排水能力が十分であるように計画することを示す。

(4) 内水位の管理

内水位の決定に影響を与える因子は、内部護岸の天端高、流出量、水閘門の閉鎖時期、護岸の改良および排水施設の建設費などである。このうち水閘門の閉鎖は海難防止の警備体制と関係を有し、強風時における船舶の航行限度とそのときの潮位を既往の記録から調査検討して、いかなる潮位のときに閉鎖すべきかを決定する。建設費は極小となるように内水位を選定するのであるが、ここで問題となるのは地盤沈下である。内水排除に用いるポンプは低揚程であるため、地盤沈下の進行につれて計画内水位を低下させ、その負担をポンプの揚程変化に求めることはほとんど不可能である。実際にはポンプの計画実揚程の10%程度がその可能限度である。したがって地盤沈下の影響は内部護岸で受けもたねばならないのである。その他、内部護岸には必ず余裕高があるように内水位を決定すべきで、これは計画以上の降雨にも対処するための配慮である。

(5) 計画排水量

排水量を決定するには通常次のように行なう。図-3.3に示すように貯留水量と内水位との関係を求める。次にポンプの機種と台数を仮定して予想特性曲線を作製する(図-3.4)。この場合には実揚程曲線を使用し、全揚程曲線から損失揚程、概略0.5~0.6m、を差し引いたものになる。図-3.5は計画潮候曲線と計画流出量曲線とを互いにピークを時間的に一致させて画いたものである。水閘門閉鎖と同時に排水運転を開始するものとし、潮候曲線上で ΔT 時間すなわちA-B間の平均水位 h_1 を求め、図-3.4によりそのときの排水量 q から、 $q\Delta T=V_p$ なる排水量を求める。同時に計画流出量曲線から、a-b間の流出量 V_a を求める。次に図-3.3により貯留水量 $V=V_a-V_p$ における内水位変化 ΔH_1 を読み図-3.5に図示する。同様の手段により、図-3.5のB-C間の平均水位

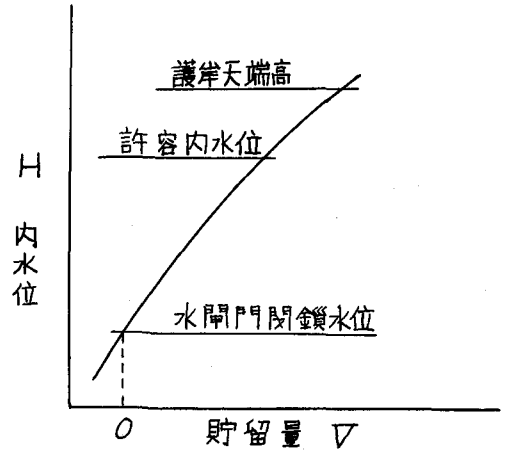


図-3.3 内水位貯留量曲線

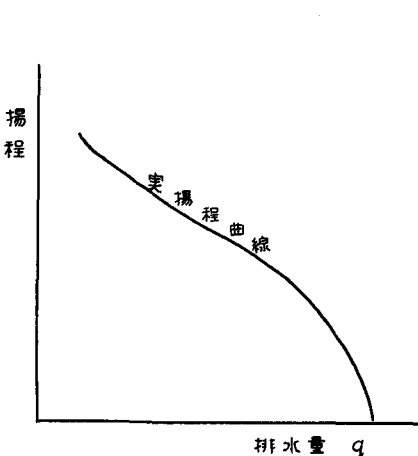


図-3.4 ポンプ予想特性曲線

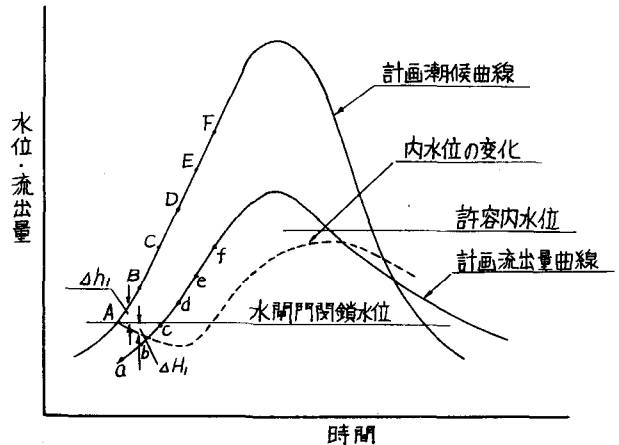


図-3.5 計画曲線と内水位の変化

h_2 を求め、 $h=h_2-\Delta H_1$ に相当する排水量を図-3.4 から求める。次に b-c 間の流出量から図-3.3 を利用して ΔH_2 を求めることができる。これを繰返して行なえば内水位の時間変化が得られる。これが許容内水位より低くなるように排水量を計画するのである。

(6) ポンプの設置台数

これは一般に経済比較、危険分散、ポンプ容量の限度から定められ、同一容量、同一機種で大型にするほど経済的となるが、危険分散の意味から3～5台程度にするのが望ましい。

(7) ポンプの機種の選定

機種の選定は全揚程、吐出量、使用状態における総合効率などを考慮して行なうが、大体の目安は表-3.4 から求められる。軸流ポンプは全揚程が4.0m以下の場合、回転数が高くとれるので有利となるが、吸込性能は斜流ポンプに比して劣っている。また大幅な絞り運転を必要とするときには斜流ポンプが適している。

表-3.4 ポンプの機種の選定

	横 軸	立 軸
軸 流 ポ ン プ	全揚程 4 m以下	全揚程 7 m以下
斜 流 ポ ン プ	3～10m	5～15m
タービンポンプ ポリュートポンプ	5～120m	5～170m

(8) ポンプの型式の選定

これには吸込揚程の変化、据付場所の良否、排水機場の浸水などが影響する。一般的には表-3.5 に示す利害得失が判断の目安になる。

表-3.5 ポンプの型式の得失

	横 軸 ポ ン プ	立 軸 ポ ン プ
長 所	1. 主要部が水面上にあるため腐蝕が少ない 2. 保守点検、修理が便利 3. 原動機との接続が容易 4. 一般に価格が安い	1. 据付面積が小さい 2. キャビテーションが起こり難い 3. 呼水装置が不要の場合が多い 4. 浸水に対しても原動機の保護がし易い 5. 深い所から揚水できる
短 所	1. 据付面積が大きい 2. 吸込揚程を高くするとキャビテーションの危険がある 3. 呼水装置が必要である 4. 浸水に対して原動機の保護が必要である	1. 主要部が水中にあるため、腐蝕し易い 2. 保守点検、修理が不便 3. 立軸の原動機を用いる。横軸を用いるときは特殊な歯車が必要である 4. 価格は一般に高い

(9) 原 動 機

一般に台風時には停電することが予想されるから、ポンプの運転はディーゼルエンジンによって行なう。また種々の補助機械に対する電源も、エンジンによる発電を行なうのが普通である。

(10) 吐き出しに関する注意

吐出口における波の影響は、ポンプの実揚程を変化せしめる。周期が短い場合には問題とならないが、比較的長い周期のときは明らかに影響がある。対策としては消波装置を設けるか、または計画実揚程に20～30%の余裕をもたせる。また地盤沈下により吐出管がせん断されやすいので、排水機場と吐出槽は一体として造るのが望ましい。

3.3 沿岸汚染

外かく堤防方式あるいは高潮防波堤などは、海水の循環を悪化させるので、内部に工業地帯がある場合には水質が汚濁されやすい。東京江東区の例¹⁴⁾では、現在それほど顕著な傾向は現われていないようである。昭和33年頃と、外かく堤防を建設中の37年の記録を、DO、COD の年平均値で較べると図-3.6、表-3.6 のようになる。もっとも、まだ外かく堤防は完成していないから速断することはできないが、江東区の内陸の運河網に関する調査

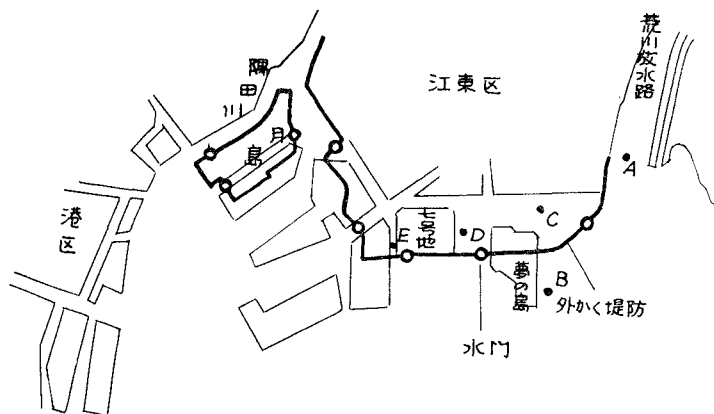


図-3.6 水質調査地点

表-3.6 水質の比較
(上段35年, 下段37年)

地点	DO	COD
A	1.42 ppm	7.95 ppm
	1.63	10.05
B	2.76	6.38
	3.11	6.72
C	2.44	6.30
	3.37	8.56
D	3.30	6.16
	4.35	8.66
E	2.43	4.50
	2.52	6.51

でも¹⁵⁾、汚染源は隅田川、荒川放水路などにあり、引き潮のときにこれらの川から汚染水が流入し、上げ潮に川を遡上する海水で希釈されている傾向を示している。

沿岸海域の汚染物質の拡散、希釈に関する物理的な研究は数多く行なわれているが、不明な点が多く、今後とも解明が必要である。現在行なわれている方法を簡略に説明すれば次のようになる。

(1) 拡散型方程式の適用

いわゆる Fickian Type の方程式がもつ不合理については、Richardson, Stommel¹⁶⁾がすでに指摘しており、拡散係数が位置の関数として表わされても、方程式は幾何学的な表現にとどまり、拡散がその linear scale によって変化することを表現していないとしている。代りに Distance Neighbour Function

を定義し、別の拡散方程式を提案している。すなわち、

$$\text{Distance Neighbour Function: } q(l) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(x) \bar{S}(x+l) dx \quad (3.4)$$

$$\text{拡散方程式 } \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left(F(l) \frac{\partial q}{\partial l} \right) \quad (3.5)$$

ここで $\bar{S}(x)$: 物質の平均濃度

$F(l)$: Diffusivity for Neighbours

$F(l)$ は 2 個の粒子間隔 l が、 $t=0$ のとき $l=l_0$ 、 $t=T$ のとき $l=l_1$ で l_0 が l_1-l_0 より大きいとき

$$F\left(\frac{l_0+l_1}{2}\right) = \frac{(l_1-l_0)^2}{2T}$$

と表わされる。いま $l = (l_0+l_1)/2$ として、 l に対する $F(l)$ の変化を求めれば、Olson, 市栄¹⁷⁾がまとめた結果では図-3.7 のようになる。

$F(l) = al^{\frac{4}{3}}$ (a は常数) として (3.5) に代入し、その解を求めると

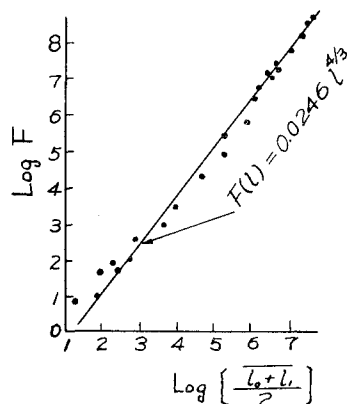


図-3.7 Neighbour Diffusivity

$$q(l) = \frac{A}{(at)^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{l^{2/3}}{(4/7)at} \right\} \quad (3.6)$$

が得られる。ところが実測の結果では (3.6) 式の有効性は証明されていないのである。また現実には拡散をとり扱う場合には、 $\bar{S}(x)$ を対象にする方が便利であり、しかも上記の方法は物質が点源として与えられたときの拡散を論じているのであるから、汚染源が散布していて、非定常で乱れも一様でない海の拡散を論ずるときは、やはり従来の拡散方程式も捨てがたいのである。ただ拡散係数については考慮が必要である。一般に拡散方程式は

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_i \bar{S}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_j} \right\} \quad (3.7)$$

$$K_{ij} = 0 \quad i \neq j$$

$$K_{ij} > 0 \quad i = j$$

と表わされるが、 K_{ij} はとくに水平拡散の場合、時間、位置だけでなく、平均値のとり方によっても変ってくる。Gesenzwei¹⁹⁾ によれば、観測時間を T とするとき実験的に

$$K = CT^{\frac{2}{3}} \quad (3.8)$$

となり、係数 C については次元解析を行なうと次のようになる。

$$C = m \varepsilon^{\frac{1}{3}} \nu^{\frac{2}{3}} \quad (3.9)$$

ε : エネルギーの逸散率

ν : 動粘性係数

m : 無次元常数

$$\text{したがって, } K = m \varepsilon^{\frac{1}{3}} \nu^{\frac{2}{3}} T^{\frac{2}{3}} \quad (3.10)$$

$(\nu T)^{\frac{1}{2}}$ は長さの次元を有するから、 $K \sim l^{\frac{4}{3}}$ と表わされ、 $l^{\frac{4}{3}}$ 法則の適用も可能となるのである。井上¹⁹⁾ は $K=0.01l^{\frac{4}{3}}$ の表現を与えて広範囲の scale に適用できるとしているが、種々の実測結果からすると、比例常数は $0.002 \sim 0.05 \text{cm}^{\frac{2}{3}}/\text{sec}$ の間に变化している。

鉛直混合に関しては、躍層やまた乱れの integral scale が現象の scale と近い値を有することなどにより、 $l^{\frac{4}{3}}$ 法則の適用は困難である。この方面の研究は現在の段階ではまだ十分でなく、今後の研究が待たれている。一般には、Rossby-Montgomery²⁰⁾ に準じた混合距離に基づく方法が用いられ、次のように表わされる。

$$K_0 \sim l^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| (1 + \beta R_i)^n \quad (3.11)$$

ここで R_i ; Richardson 数

l ; 中立のときの混合距離

β ; 比例係数

Rossby-Montgomery によれば、 $n=-1$ または $n=-2$ などの値が得られている。

(2) 確率過程論の応用

一般化されたマルコフ過程²¹⁾では、ある特定の粒子が $t=t_0, t_1, \dots, t_{n-1}$ のとき、それぞれ $\mathbf{X}=\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{n-1}$ となる確率密度は

$$W_n(\mathbf{X}_0, t_0; \dots; \mathbf{X}_{n-1}, t_{n-1}) = W_1(\mathbf{X}_0, t_0) \cdot P_2(\mathbf{X}_0, t_0 | \mathbf{X}_1, t_1) \cdot P_3(\mathbf{X}_0, t_0; \mathbf{X}_1, t_1 | \mathbf{X}_2, t_2) \\ \dots \dots P_n(\mathbf{X}_0, t_0; \mathbf{X}_1, t_1; \dots \mathbf{X}_{n-2}, t_{n-2} | \mathbf{X}_{n-1}, t_{n-1}) \quad (3.12)$$

となる。ここで $P_i(\mathbf{X}_0, t_0; \dots \mathbf{X}_{i-2}, t_{i-2} | \mathbf{X}_{i-1}, t_{i-1})$ は条件付確率密度である。したがって、 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{k-1}$ のいかによらず、 t_0 のとき $\mathbf{X}_0$ で、 t_k において $\mathbf{X}_k$ となる推移確率密度は

$$Q(\mathbf{X}_0, t_0 | \mathbf{X}_k, t_k) = \int \dots \int P_2(\mathbf{X}_0, t_0 | \mathbf{X}_1, t_1) \cdot P_3(\mathbf{X}_0, t_0; \mathbf{X}_1, t_1 | \mathbf{X}_2, t_2) \\ \dots \dots P_{k+1}(\mathbf{X}_0, t_0; \dots; \mathbf{X}_{k-1}, t_{k-1} | \mathbf{X}_k, t_k) d\mathbf{X}_1 \dots d\mathbf{X}_{k-1}$$

これを变形して

$$Q(X_0, t_0 | X_k, t_k) = \int Q(X_0, t_0 | X_{k-1}, t_{k-1}) R(X_{k-1}, t_{k-1}; X_k, t_k) dX_{k-1} \quad (3.13)$$

が得られる。

いま点源に、瞬間的に物質が投下され、拡散の質量中心に対する水平拡散のみに注目して考えれば、 S を物質の平均拡散量、 M を拡散物質の総量とすると、(3.13)の Q は

$$Q(0,0,0 | x,y,t) = S(x,y,t)/M$$

とみなされる。

円対称の場合を考えれば、(3.13)式は次のようになる。

$$S(r, t + \Delta t) = \int_0^\infty S(\rho, t) R(\rho, t; r, t + \Delta t) 2\pi \rho d\rho \quad (3.14)$$

大久保²²⁾ は (3.14) 式に基づいて、 S の満足すべき方程式を Kolmogorov の方法に準じて導出し、Fickian Type, Joseph-Sendner²³⁾, Obukhov²⁴⁾ などの解が得られることを明らかにした。すなわち、 S の方程式は次のようになり、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ a f(t) r^{m+1} \frac{\partial S}{\partial r} \right\} \quad (3.15)$$

その一般解は、

$$S(r, t) = \frac{(2-m)M}{2\pi(2-m)^{\frac{4}{2-m}}\Gamma\left(\frac{2}{2-m}\right)a^{2-m}\left\{\Psi(t)\right\}^{\frac{2}{2-m}}} \exp\left\{-\frac{\gamma^{2-m}}{(2-m)^2\Psi(t)}\right\} \quad (3.16)$$

ここで Γ : ガンマ関数

$$\Psi(t) = \int_0^t f(t') dt'$$

で表わされる。 $f(t)$, m に種々の値を入れるとき、

$$(1) \quad f(t) = 1, m = 1 \quad S = \frac{M}{2\pi b^2 t^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{bt}\right) \quad : \text{Joseph-Sendner の解}$$

$$(2) \quad f(t) = t, m = \frac{2}{3} \quad S = \frac{M}{\frac{3}{4}\pi^{3/2}\alpha^3 t^3} \exp\left(-\frac{\gamma^{4/3}}{\alpha^2 t^2}\right) \quad : \text{大久保の解}$$

$$(3) \quad f(t) = t^2, m = 0 \quad S = \frac{M}{\pi\beta^3 t^3} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{\beta^3 t^3}\right) \quad : \text{Obukhov の解}$$

が得られる。これらの結果を、点源に瞬間的に物質を投入したときの実験値と比較してみると 次のようになる。濃度のピークは、 t^{-2} または t^{-3} に沿って減少しており(図-3.8)、また距離による S の変化は図-3.9のようになっている。ただし、一定濃度の時間と距離に対する推移は、あまり良い適合を示していない。

(3) 乱流論の Lagrange の方法

この方法は Taylor が用いたもので、市栄²⁵⁾ はこの方法により Gunnerson のカルフォルニア沿岸の拡散実験を検討している。点源からの拡散ではかなり適合する結果を得ている。方法については紙数も尽きたので、Hinze²⁶⁾, Batchelor-Townsend²⁷⁾ などの説明を参考にせられたい。

以上述べたように、物質の拡散は、実測値に多少適合する場合もあるが、多くの場合一致することは少なく困難な問題が多いのである。この他にも波による乱れ、水温、塩分の不連続など影響する要素が多く、地形の複雑な湾内の汚染を問題にするときは、一層の困難が予想される。

4. 結 語

以上に述べたように、投資の経済分析と 2, 3 の技術的問題を論じたが、結局のところ、未解決の分野が非常に大きいことを指摘する結果となった。また通常の企業と異なり、公共事業においては、施設の耐用年数、利率、直接、間接便益の概念などについていろいろ議論のあるところで、この小論で論ずることはなかなかむずか

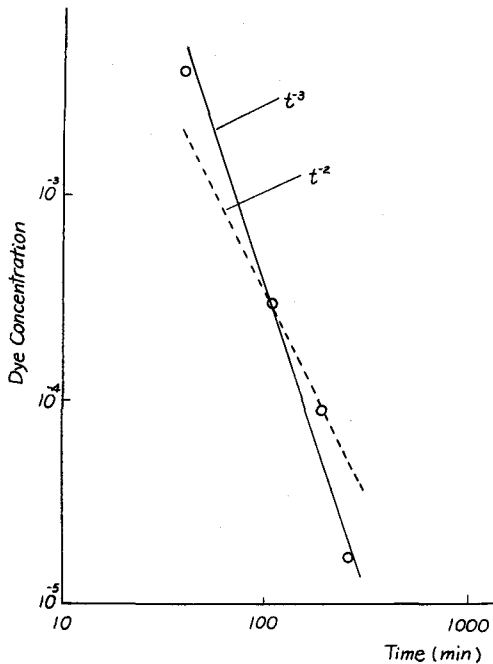


図-3.8 Peak Concentration (東海村の観測値)

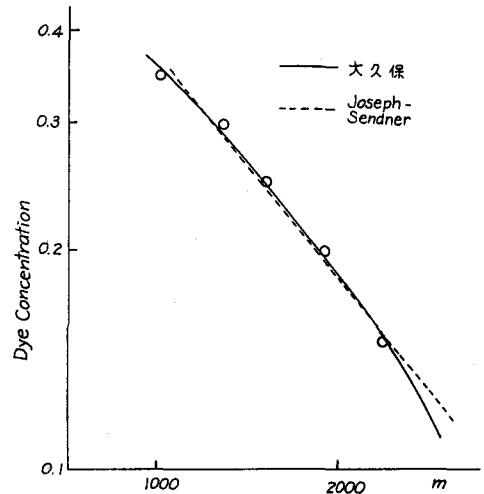


図-3.9 Cape Canaveral 沖の実験

しいため省略している。

近来、公共事業の投資効果ということがやかましくいわれてきており、海岸保全計画の計画立案者は一層の努力を要求されている。この小論がその端緒をつくることになれば幸いである。なお、この小論は防災課長久保島信弘が指導にあたり、補佐官堀口孝男が執筆した。

参 考 文 献

- 1) 宮崎 仁編；公共事業と財政，上巻，財務出版，昭37.
- 2) 建設省河川局資料；米国における水資源開発の投資基準，昭37.
- 3) O. Eckstein; A Survey of the Theory of Public Expenditure Criteria Public Finances, Needs and Utilization, N. B. E. R., 1961.
- 4) 高橋浩一郎；災害に関するオペレーションズリサーチ，気象庁研究時報，9巻1号，昭23.
- 5) S. Tsuruta, Y. Nagao, T. Ijima; The Economical Heights of Sea Walls for Coast Protection in Japan, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., 1964.
- 6) 運輸省港湾局資料；海岸保全施設計画策定要領，昭38.
- 7) 経済企画庁資料；治山治水投資の巨視的分析，昭38.
- 8) 宮崎 仁編；公共事業と財政，下巻，財務出版，昭37.
- 9) 経済企画庁資料；中期経済計画における部門別所要投資額について，総合計画局，昭39.
- 10) 1) と同じ.
- 11) 池口小太郎；前進する地下水利用合理化政策，工業用水，第74号，昭39.11.
- 12) 江東地区内水排水機場建設にともなう降雨解析調査，気象協会，昭37.
- 13) 河川工学便覧，上巻，コロナ社，昭29.
- 14) 東京都内湾水質調査報告書，東京都水産試験場，昭39.

- 15) 東京都墨田, 江東地区運河の防潮水門設置に伴う汚濁水質の影響調査, 建設省土木研究所, 昭36, 37, 38, 39.
- 16) L. F. Richardson, H. Stommel; Note on Eddy Diffusion in the Sea, *Jour. Met.*, Vol. 5, No. 5, Oct., 1948.
- 17) F. Olson, and T. Ichiye; Horizontal Diffusion, *Science*, Vol. 130, No. 3384, Nov. 6, 1959.
- 18) A. N. Gesenzwei; On the Dependence of the Coefficient of the Horizontal Macro Exchange in Sea upon the Averaging Period of the Current's Velocity Pulsations, No. 1, p. 63 of English translation, A. G. U., 1959.
- 19) E. Inoue; On the Turbulent Diffusion Phenomena in the Ocean, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 7, 1951.
- 20) C. Rossby, and R. Montgomery; The Layer of Frictional Influence in Wind and Ocean Currents, *Pap. Phys. Oceanogr. and Met.*, Vol. 3, 1935.
- 21) 国沢清典; 近代確率論, 岩波全書, 昭37.
- 22) A. Okubo; Horizontal Diffusion from an Instantaneous Point-Source due to Oceanic Turbulence, Tech. Report 32, Chesapeake Bay Institute, 1962.
- 23) J. Joseph, and H. Sendner; Über die horizontale Diffusion im Meere, *Dt. Hydrogr. Z.*, Vol. 11, 1958.
- 24) A. Obukhov; Description of Turbulence in Terms of Lagrangian Variables, *Advances in Geophysics*, Vol. 6, 1959.
- 25) T. Ichiye; A Note on Horizontal Diffusion of Dye in the Ocean, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 15, 1959.
- 26) J. Hinze; *Turbulence*, McGraw-Hill, 1959.
- 27) G. Batchelor, and A. Townsend; *Turbulent Diffusion, Surveys in Mechanics*, Cambridge Univ. Press, 1956.