

養浜の現地実験とその追跡調査について Field experiments of beach nourishment

横浜市港湾局開発部	○ 正会員	田中常義
建設省土木研究所海岸研究室	同 上	宇多高明
横浜市港湾局開発部	同 上	小池 博
同 上	同 上	伊藤 広

1. ま え が き

近年、人工的に砂を供給して砂浜を造る養浜事業が脚光を浴びているが、横浜市では従来から行われて来た埋立事業によって失われた自然海岸に代って海の自然を取戻し、また様々なレクリエーション及びスポーツの場とするために、横浜市金沢区に海の公園を計画¹⁾した。計画は現在実施に移されているが、公園計画の中でも重要性が高いのは人工海浜であり、断面形状として前浜勾配 $1/30$ 、沖浜勾配 $1/100$ とし、緩やかな斜面にはアサリが生息できるようにし、潮干狩などが可能なものとする予定である。このため昭和54年4月より8月までの期間に約110万 m^3 の砂を用いて養浜を行った。

これらの結果については現在資料を整理中であるため別の機会に報告することとし、本報では海浜の計画段階において行った養浜の現地実験について述べることにする。すなわち、漂砂による地形変化は非常に複雑な問題であるために、現在では十分な精度で予測を行える段階に至っていない。したがって、まず計画予定地で実際に現地実験を行うことにしたものであり、また繰り返し十分な精度で測定されたデータは、漂砂による地形変化を一般的に論ずる上で重要な資料となり得ると考えられた。このため長期間、同一精度で海浜測量を継続した。

ところで、この養浜実験の一部については前報³⁾で述べたが、これについては追跡調査の時間が短い欠点があった。本報ではその後も調査を継続することによって延べ548日間に達した地形変化に関する追跡調査について述べることにする。ただし本報では地形変化データを用いた解析について述べるものであるが、漂砂による地形変化について数値モデルは利用せず、できる限り解析的な方法によって検討を加えることにした。

2. 養 浜 実 験

横浜市が海浜公園を造成している金沢湾は図-1に示すように東京湾の南西に位置し、三方を陸地に囲まれ、北東に開口部を有する水面積約7.75 km^2 の小湾である。この湾の中に図-2に示すように延長約1,000 m の人工海浜が造成されている。

養浜実験は図-2に示すように計画では埋立地となる位置で行い、実験中の波浪条件は湾口(図-2参照)に設置したステップ式波高計によって測定した。養浜砂としては浅間山山砂($d_{50} \div 0.25\text{ mm}$)を用い、昭和52年3月19日に約12,000 m^3 の土砂によって養浜を行い、その後の地形変化を延べ16回の深淺測量によって調査した。

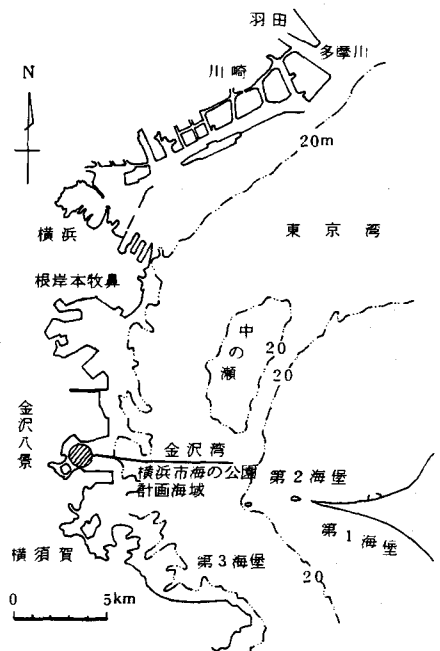


図-1 金沢湾一般図

まず、図-3は汀線形状の経時変化を示しており、また表-1は汀線位置を数表にしたものである。なお図-3と一部同様な図は前報²⁾でも明らかにしたが、その際基線の設定に誤りがあったため、原点から離れた所で誤差が生じた。したがって前報の図-11は本報の図-3のように訂正が必要である。

さて、図-3によればほぼ三角形形状であった汀線形状は漂砂によって次第に滑らかな形状へと変化している。また、この際の時間的変化をより詳しく調べるために、各断面における基準線から汀線までの距離の経時変化を図示したのが図-4である。548日間の地形変化が示されているが、その変化は初期ほど速く、その後は漸的に遅くなることがわかる。

3. 解析的モデル

図-3に示した地形変化は係数値を定めれば汀線変化モデルによって追跡することができよう。しかしながら一般的特性を調べるには解析的な方法によって検討を加える方が望ましい。このためここではできる限り問題を単純化して調べることにした。

まず解析の基礎式としては地形変化の連続式と漂砂量式としてSavage 公式を用いれば次式のようになる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q = F(-\frac{\partial y}{\partial x} + \tan \theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 y は汀線位置、 h は地形変化の代表水深、 θ は入射角、及び $F=1/8 \cdot \alpha W_o K r^2 (H^2 C_g) u$ である。ここで、 F 、 h 、 θ が

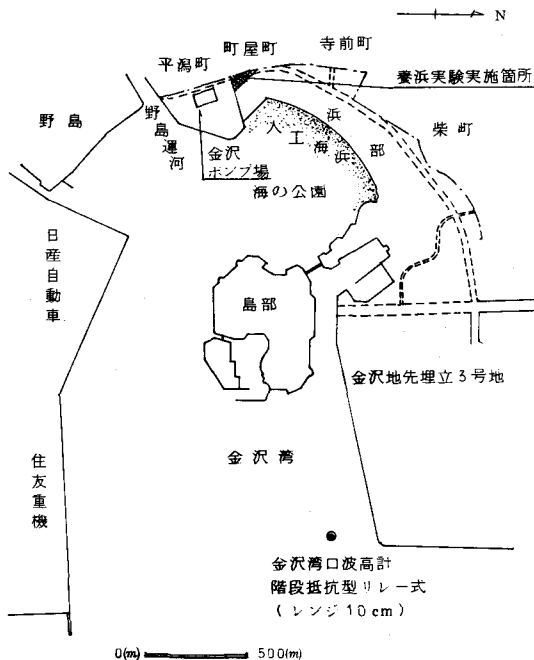


図-2 人工海浜計画図

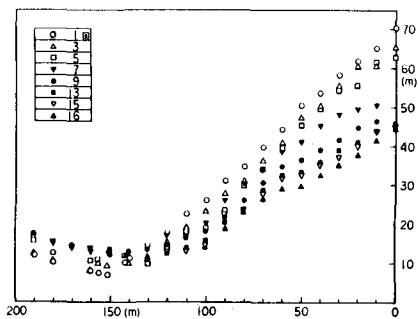


図-3 汀線形状の経時変化

表-1 汀線位置

回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
日数	328	416	429	611	630	82	928	1028	1130	1131	225	351	51	66	816	
日数	6	28	41	94	103	124	192	222	255	313	342	376	407	448	528	
x=0m	703m	681	654	649	627	536	448	457	459	475	478	464	456	454	457	444
10	650	627	606	603	616	510	508	470	465	458	467	448	441	445	441	414
20	618	650	605	591	555	496	495	494	447	434	437	426	413	405	403	376
30	582	561	555	561	543	477	482	440	418	400	405	376	370	381	374	350
40	536	508	503	524	487	458	463	405	390	374	377	355	340	351	359	324
50	505	488	473	464	452	413	413	374	365	368	350	343	335	324	331	295
60	443	449	407	414	398	365	390	354	350	345	337	335	329	314	321	290
70	396	363	363	374	342	324	349	319	306	292	289	286	287	265	279	263
80	348	318	309	318	287	288	305	273	260	254	254	255	235	229	235	234
90	310	267	277	259	255	232	262	225	217	202	211	213	207	198	220	187
100	260	231	231	228	189	195	202	187	187	178	178	178	160	157	150	145
110	225	192	192	192	183	183	170	170	167	162	160	154	141	140	139	135
120	178	154	154	150	142	169	174	145	145	144	135	135	129	130	130	128
130	148	118	118	118	97	97	156	136	136	127	120	121	118	109	106	101
140	115	78	102	90	121	121	129	131	132	126	120	124	120	120	120	120
1413	104	81	108	126	123	135										
150							130	128	127	127	135	135	135	135	130	130
1512	71	74	94	119	128	116										
1557	76	76	100	84	112	112										
160	82	82	82	91	108	118	150	127	138	148	149	148	139	139	142	141
170							139	144	148	148	149	147	145	148	149	153
180	104	104	107	110	128	143	150	157	154	154	160	151	155	156	155	160
190	122	122	125	128	158	172	177	177	172	172	177	150	149	150	173	175

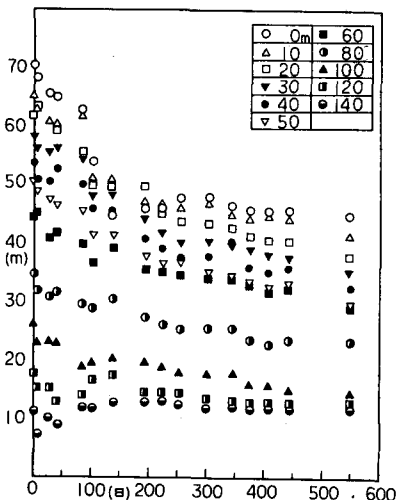


図-4 汀線長の経時変化

定数と仮定されれば、式(2)を式(1)へ代入することによって次の拡散方程式が得られる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{F}{h} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)は F/h が定数であるから境界条件が与えられれば、前報で示したようにラプラス変換によって解が求まる。しかしここでは解の特性が容易に理解できる近似的な解を求めることにした。

まず変数分離法によって解を求め、 $x = 0$ で y が極値をとるとい
う条件を考慮したとき式(3)の解は次式のようになる。

$$y(x, t) = \sum_n A_n \cos a_n \sqrt{\frac{h}{F}} x \cdot e^{-a_n^2 t} \dots\dots\dots (4)$$

さて、汀線の時間的变化図(図-4)を用い、 $t = 548$ 日の地形
をはば最終形状と仮定し、この時刻までの変化量を基準として地形
変化量を無次元化したところ、図-5が得られた。ただし図中の実
線は式(4)の時間変化を示す項($e^{-a_n^2 t}$)において $a_1 = 0.073$ とおいた
ものである。データはバラツキがあるものの測定値と計算値はほ
ぼ一致をみている。なお、図-5によれば、最終形状までの変化量
の1/2の変化が生ずるのは約128日であることもわかる。

一方、空間的な分布については、各点における初期汀線位
置と548日後の最終汀線位置との差として地形変化量を算出
した。この結果を示すのが図-6である。ただし、 $x = 150\text{m}$
及び 170m 地点では初期形状が測定されていないために初期
におけるこれらの値は前後の地点の値を補間して求めた。図
-6によれば、実測値は $x \leq 170\text{m}$ の範囲では式(4)による値
とはほぼ一致をみている。ただし式(4)において $n = 1$ の場合に
ついて考え、 $A_1 = 25\text{m}$ とし、また、

$$a_1 \sqrt{\frac{h}{F}} = \frac{\pi}{280} \dots\dots\dots (5)$$

とおいている。以上の点より養浜実験で生じた地形変化は、式(4)で $n = 1$ とおいたものではほぼ表わされると
言えよう。勿論、精度を上げるには第2項以下が必要であろうが、測定値のバラツキのためこれらの算出は
相当困難であろう。

ところで、地形変化の代表水深としては前報²⁾の図-12で明らかにしたように $h = 1.2\text{m}$ という値が得られ
ている。したがって式(5)より F を計算すると、 $F = 50.8\text{m}^2/\text{day}$ となる。前報の数値モデルによる検討の際に
は $F = 30\text{m}^2/\text{day}$ において計算を行ったが、この値と比較すると約70%大きい値となっている。この原因は明
らかではないが、一つの原因として波浪条件の変化が考えられた
ために、湾口で行った波浪観測結果の比較を行った。図-7は有
義波高を各年別に整理したものであり、また、図-8は対応する
周期の頻度分布を示している。波高分布は、昭和52年より昭和53
年の期間がそれ以前に比較してわずかに波高が大きくなっている
が、卓越波高としては約30cm程度であり、経年的にはそれほど変
化していない。このため波高の増加が係数 F の増加原因とは考え
られないであろう。したがって、この原因はむしろ前報の計算に
おける計算データの不足による誤差が主要因ではなかろうかと考
えられる。

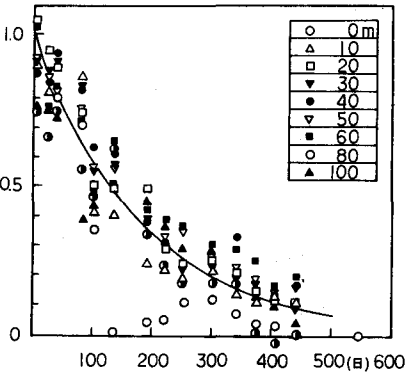


図-5 無次元化された地形変化量の経時変化

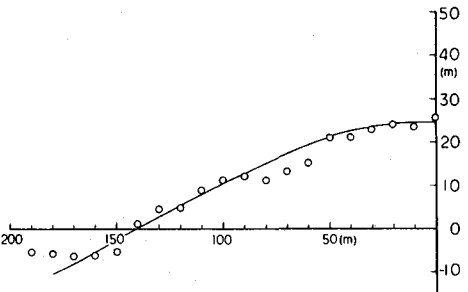


図-6 地形変化の空間分布

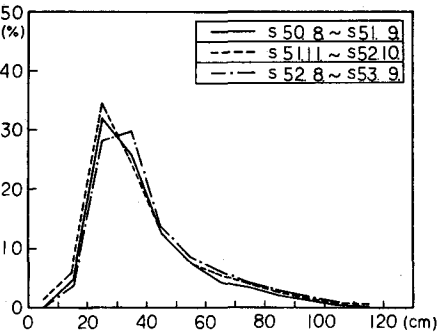


図-7 有義波高の頻度分布

最後に図-9は $x = 0\text{ m}$ 断面における断面図の変化を示したものである。断面形状はほぼ相似形で、汀線位置の移動とともに平行移動していることがわかる。ただし前浜部分で勾配が大きいのが、これは図-10に示すように粒径が細かいシルト系のものを多く含んでいたため、土砂の粘着力によって急勾配になったものと考えられる。ただし図-10は $x = 70\text{ m}$ の前浜部分で採取した資料を分析して得られたものであり、このように細粒径が多かったのは浅間山山砂を臨接した埋立地に利用した後、再び掘削して利用したため、在来シルト系の土砂が混同したためである。

ところで、以上の断面形状の特性をより詳細に検討し、汀線の移動と断面形状変化との関係を明らかにするため、次節では empirical eigenfunction の応用を図ることとした。

4. empirical eigenfunction の応用

Winant³⁾らは empirical eigenfunction を用いて海浜地形解析を行った。その計算では水深データを場所と時間の関数の積に分離しているが、ここでは計算法を次のように変える。すなわち水深 h は離岸距離 y 、沿岸方向距離 x 、及び時刻 t の関数として $h = h(x, y, t)$ の形に与えられているので、これを式(6)のように固有関数展開する。

$$h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n e_i(y, t) \cdot c_i(x, t) \quad \cdots (6)$$

式(6)の展開によれば、海浜形状変化について沿岸及び岸沖方向漂砂による地形変化を分離できる可能性があることはすでに著者らの1人が明らかにしたが、^{4), 5)}ここでは式(6)を更に変形した形で用いることにする。

すなわち、海浜断面形状は図-9に示したように汀線位置の移動とともに平行移動していると考えられるために、固定座標系 (x, y) で展開しても特性は明らかにならないであろう。このためここでは図-11に示すよう岸沖 (y) 方向の距離については汀線位置からの相対距離 (φ) に変換することにした。したがって計算を行うには汀線位置と一定距離にある点の地形データが必要である。このため原点 (0) より沿岸方向に 10 m ピッチで検査断面を設定し、この断面内の汀線位置 $(0')$ より陸側へ $17, 12, 7, 2, 0\text{ m}$ の点と、海側へ $2, 7, 17, 27, 37, 47\text{ m}$ の合計12点において $T, P, 0\text{ m}$ を基準とする高さを求め、次にこれらの沿岸方向に10点、岸沖方向に12点のデータを用いて式(6)の形に固有関数展開を行った。ただし、これらの計算に利用可能な詳細な地形図は第7回以降しか得られなかったために、計算は第7回以降の10回

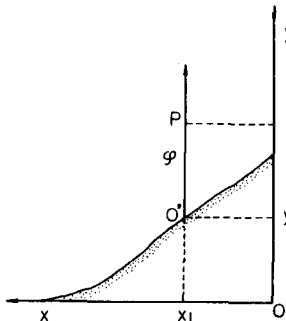


図-11 座標系(1)

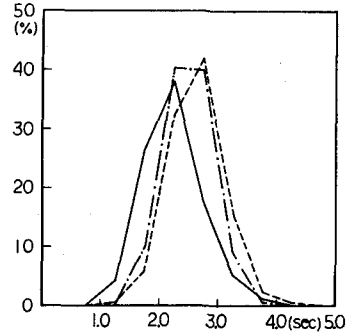


図-8 周期の頻度分布(線の区別は図-7と同様)

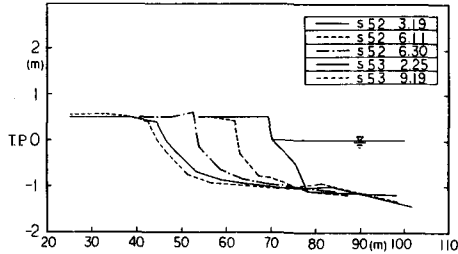


図-9 断面図の変化($x = 0\text{ m}$ 断面)

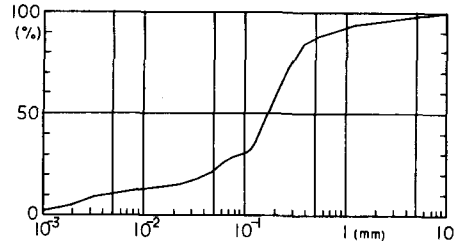


図-10 粒径加積曲線

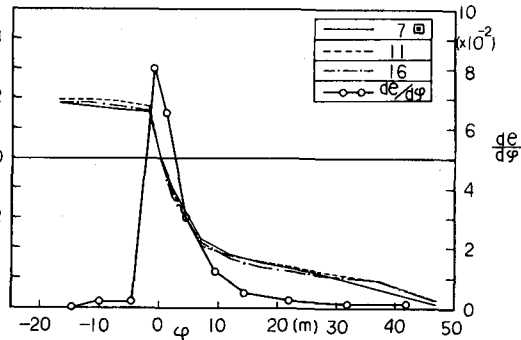


図-12 固有ベクトル e_1 と $\frac{de_1}{d\varphi}$ の岸沖分布

について行った。なお計算方法については文献^{3),5)}を参照されたい。

さて、図-12は $e_1(\varphi, t)$ の φ 軸(岸沖)方向の分布を示すものであり、代表的に第7回, 11回, 16回目の測量データを用いた結果が示されている。図によれば、 $e_1(\varphi, t)$ は、ほぼ時刻に独立であり、したがって単に $e_1(\varphi)$ と書くことができよう。なおこの場合の固有値(λ_i)の大きさは λ_1 が非常に卓越しており、第7回より16回目までの平均固有値の相対的割合は $\bar{\lambda}_7/\lambda_1 = 2.17 \times 10^{-3}$, $\bar{\lambda}_{16}/\lambda_1 = 0.96 \times 10^{-3}$ であった。このため式(6)の展開はほぼ第1項のみによって近似されることになる。

次に図-13は測定時刻(回数)をパラメータとしたときの $C_1(x, t)$ の沿岸方向分布を示している。時間的にはわずかに減少傾向にあり、また護岸との境界面($x=0m$)で小さな値となっているが、この点を除けば、平均的には $C_1 \sim 2.7$ 程度であり C_1 はほぼ定数とおいても良いであろう。

以上の点より、海浜断面は汀線上に原点を置いたとき、ほぼ汀線からの岸沖距離 φ のみの関数として、次(7)のように定義されよう。

$$h = h(\varphi) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、汀線位置を y 及び汀線の移動速度を $C(x, t)$ とおけば、 φ としては、

$$\varphi = y - \int_0^t C(x, \tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係が成立する。また $C(x, \tau)$ は汀線の移動速度であるから、式(4)を用いれば次式のように定義される。

ただし式(4)の第1項目をとり、添字の n は省略する。

$$C(x, t) = \frac{\partial y}{\partial t} = -a^2 A \cos a \sqrt{\frac{h}{F}} x \cdot e^{-a^2 t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

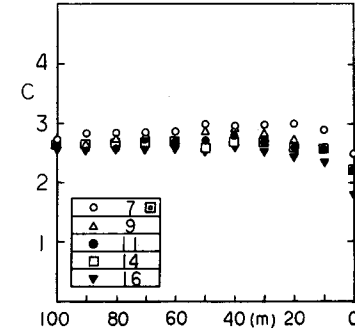


図-13 関数 $C_1(x, \tau)$ の沿岸方向分布

5. 沿岸漂砂量の近似的岸沖分布

前節の検討によって、地形は簡単な関係で表示できることが明らかになったので、この結果を用いて沿岸漂砂量の分布形を調べることにする。

まず漂砂の連続式は空隙率を ϵ とおいたとき、一般的に式(10)のように定義される。

$$(1-\epsilon) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial q\beta}{\partial \beta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、座標軸 α, β は図-14に示すように汀線上に原点をとって接線方向に α 、それと直角方向に β 軸をとる。

さて、式(10)で直角方向の漂砂が無視できるとすれば、式(10)の右辺第2項は第1項に対して省略できよう。

次に式(10)の左辺に式(7)を代入すると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{dh}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -C(x, t) \cdot \frac{dh}{d\varphi} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となるから、

$$\frac{\partial q\alpha}{\partial \alpha} = (1-\epsilon) a^2 A \cos a \sqrt{\frac{h}{F}} x \cdot e^{-a^2 t} \cdot \left(\frac{dh}{d\varphi} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる関係式が得られる。ここで α と x 軸のなす角 θ が小さければ近似的に $\alpha \sim x$ とおくことができよう。ただし厳密にはこれらの議論は成立せず、方向余弦成分として y 成分も含まれた形となるべきである。しかしながら、ここでは近似的な値を求めることにして上記の近似を行い、また $q\alpha$ を単に q とおき、積分すると q は次式のようになる。

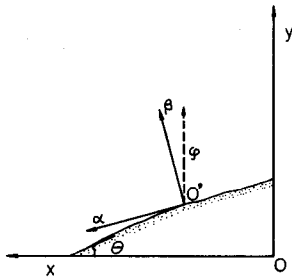


図-14 座標系(I)

$$q(x, \varphi, t) = (1 - \varepsilon) a \sqrt{\frac{h}{F}} A e^{-a^2 t} \cdot \sin a \sqrt{\frac{h}{F}} x \cdot \frac{dh(\varphi)}{d\varphi} \quad \dots\dots\dots (13)$$

したがって沿岸漂砂量の汀線位置から相対的にみた岸沖分布は係数値は別にすれば、

$$\frac{dh(\varphi)}{d\varphi} \div c_1 \cdot \frac{de_1(\varphi)}{d\varphi} \quad \dots\dots\dots (14)$$

によって表示されることになる。このため図-12の第7, 11, 16回の計算値より平均値 $\bar{e}_1(\varphi)$ を求め、これより $\frac{d\bar{e}_1(\varphi)}{d\varphi}$ を計算した。この結果が図-12に示されている。沿岸漂砂量は、岸沖方向には $\bar{e}_1(\varphi) = 0$ となる T.P. 0 m の位置において極大値をとり、これより海側は急速に減少する分布形を有することがわかる。

6. あ と が き

本論文では養浜の現地実験を長時間追跡調査することによって得られた地形変化データを解析的方法によって検討を加えた。この結果、汀線変化を極めて簡単な式によって表示しうることが明らかとなり、これによって拡散型の方程式に支配された汀線変化の特性を明らかにすることが可能となった。また断面形状の岸沖分布については、汀線に原点を設けた新しい座標系をとれば、断面形状はほぼ相似形であることがわかった。また汀線変化のモデルと断面変化の相似性を合せれば、今回の養浜実験で生じた地形変化の時空間分布は、ほぼモデル化されうることが明らかになった。

ところで、一次元モデルは岸沖方向の情報を得ることができないために、ここでは経験的な方法によって岸沖分布を検討しようとしたわけであるが、前報^{4), 5)}と合せて考えると、経験的な方法によって誤差はあるものの、その海岸に特有な岸沖形状特性をほぼ明らかにし得ると考えられる。このため今後の問題としては、代表的な海岸でこれらの処理を行い、計算された岸沖分布が、波浪や底質特性の変化によってどのように変化するかを調べることが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 横浜市都市開発局臨海開発部：金沢地先埋立海の公園砂浜基本計画報告書，p.193，昭和52年3月。
- 2) 田中常義・野呂清司・末広忠雄・宇多高明：海浜変形モデルの人工海浜計画への応用，第25回海講演文集，1978，pp. 213~217.
- 3) Winant, C.D., D.L. Inman, and C.E. Nordstrom : Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, J.G.R., Vol. 80, No.15, pp. 1979~1986. 1975.
- 4) 橋本 宏・宇多高明：経験的海浜変形モデルの小川原湖海岸への応用，第26回海講演文集，1979.
- 5) 宇多高明：経験的海浜変形モデルによる現地データの解析，土木技術資料，1979.