

横浜港周辺における海食崖と砂嘴の発達に関する一考察

宇多高明¹・田中常義²・森 義将³・峯 浩二³・木村 尚⁴

A Note on Formation of Sea Cliff and Sand Spits in the Vicinity of Yokohama Port

Takaaki UDA¹, Tsuneyoshi TANAKA², Yoshimasa MORI³, Koji MINE³
and Takashi KIMURA⁴

Abstract

Formation of the barrier where the central part of Yokohama City is located was investigated by the comparison of old maps and geological surveys. This barrier was formed as the sand spit extending northwestward from the end of Ishikawa Upland. Behind this barrier, lowland mainly composed of alluvial cohesive soil extends. In this area, jet of sand and subsidence of structural foundation were observed during the Kanto Great Earthquake. Thus, the understanding of the formation of this barrier and lowland is important to consider potential vulnerability of this area. Comparison of profiles along several sections crossing Ishikawa Upland showed that sand was supplied from this upland while forming sea cliff. Supplied sand was carried by longshore sand transport caused by wind waves in Tokyo Bay. In this area predominant wind directions are N and NE. Waves from these directions make large incident angle greater than 45 degrees reference to the shoreline direction, and this large wave incidence accelerates the formation of sand spit by the mechanism given by Ashuton et al. (2001).

Key words: *spit, barrier, Yokohama, sea cliff*

1. ま え が き

宇多ほか(2000)は、1995年兵庫県南部地震による神戸市西部の被害集中域に関して、

2002年6月12日受付, 2002年10月28日再投稿, 2002年11月12日受理

¹ (財)土木研究センター 審議役なごさ総合研究室長 (110-0016 東京都台東区台東1-6-4) (タカラビル)

¹ Public Works Research Center

² 株式会社テトラ (231-0033 横浜市中区長者町3-8-13)

² Tetra Co. Ltd.

³ 日本ミクニヤ(株) 東京支店 (213-0032 川崎市高津区久地1-2-12)

³ Tokyo branch office, Mikuniya Co.

⁴ 特定非営利活動法人 海辺づくり研究会 (213-0013 横浜市中区住吉町1-6 MPS 関内607号)

⁴ Study Team for Creation of Waterfront.

神戸市西部の被害集中域が、東向きの沿岸漂砂によって運ばれた砂礫が堆積して延びた砂嘴（和田岬）背後の低地に集中しており、したがって海岸低地の発達に地震被害と密接に関係していることを明らかにした。わが国沿岸の海岸低地には神戸市西部と同様、砂嘴が細長く延びてバリアーが形成され、その背後に低湿地を有するものが数多く存在している。このような場所では規模の大きな地震が起これば兵庫県南部地震時と同様な被害が生じる可能性がある。このようなことから各地域の海岸低地の地形発達について考察することは重要なことである。横浜周辺の海岸低地については、古藤田・若松（1978）が1923年9月1日に発生した関東大地震による横浜市街の液状化地点を地形分類とともに示し、大岡川の河口付近や干拓地の前面には顕著な砂嘴が発達していることを明らかにしている。しかしこの研究では地形分類を示したにとどまり、砂嘴の発達機構については触れていない。そのほかの研究でもこの地域の低地の発達について記載した研究は見あたらない。このことから、本研究では、東京湾内の横浜周辺の海岸低地について既存の資料を収集し、同様な主旨より分析を行う。なお、本研究の一部は日本地形学連合の2002年春季大会で発表したものである。

2. 横浜周辺地域の古地形

Fig. 1は復刻された横浜港の開港時（1859）の絵図（資料1）であり、当時の横浜の状況が描かれている。スケールは明らかではなく、また鳥瞰図であるために定量的評価はできないが、開港当時の横浜の地形特性を読み取ることができる。この図は横浜を北側から眺めており、東部の本牧では海食崖が連なっている。現在、山下公園がある横浜中心部は、水路に架かる関所で区分された外国人居留地であったが、その西（右）端には陸側へと緩

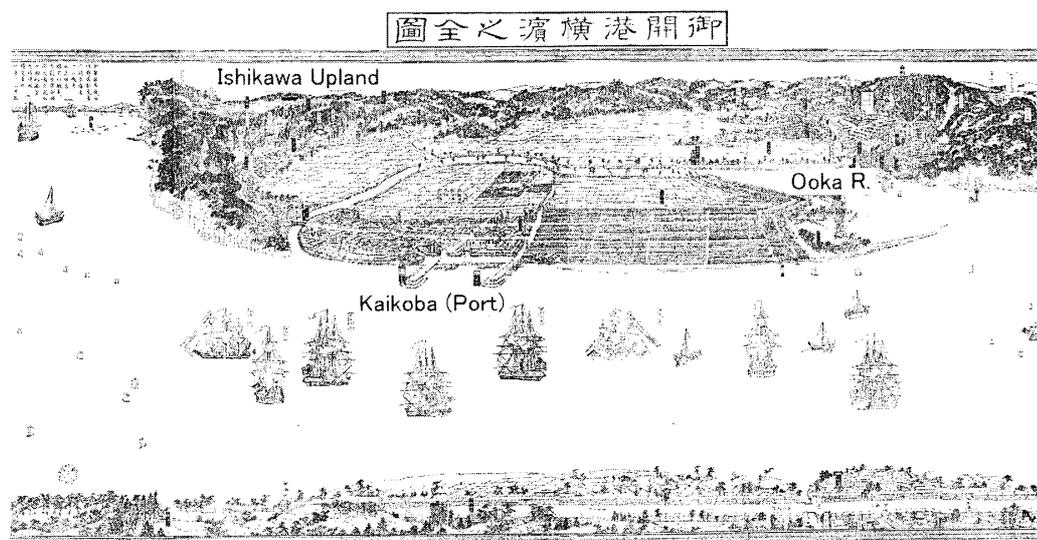


Fig. 1. Picture of Yokohama Port in 1859

く湾曲した砂嘴が伸びていた。また砂嘴の陸側には砂州で取り囲まれた小規模な池が存在していた。さらに細長く延びた居留地の内陸側には広い低地が広がっていた。この図によれば、砂嘴は当時の外国人居留地のあった砂浜から連続的に伸びていたことから、砂嘴を構成する土砂の供給源は外国人居留地の東側の海食崖であったと推定できる。横浜は、連続的に延びる砂浜と砂嘴によって海側を囲まれていたために大岡川を始めとする中小河川からの流出土砂が堆積するとともに、新田開発などによって低地の陸化と開発が進んだと考えられる。

Fig. 2は国土地理院の5万分の一地形図（1999年修正測量）である。いずれの区域においても埋め立て地造成が進んでいるが、図右下部の三溪園前面の本牧市民公園（地点A）付近を南から撮影したのがPhoto. 1である。丘陵地が波の作用で浸食され、比高約30mの海食崖が残されている。この付近の地質は第三紀の上総層群であり、主にシルト岩・砂岩で構成されている。

Fig. 3は、Fig. 2に破線で示すように大岡川と首都高速狩場線に囲まれた釣り鐘状低地の江戸時代の古地図（横濱村外六ヶ村之図）である（太田久好編，1971）。この区域は浅い入

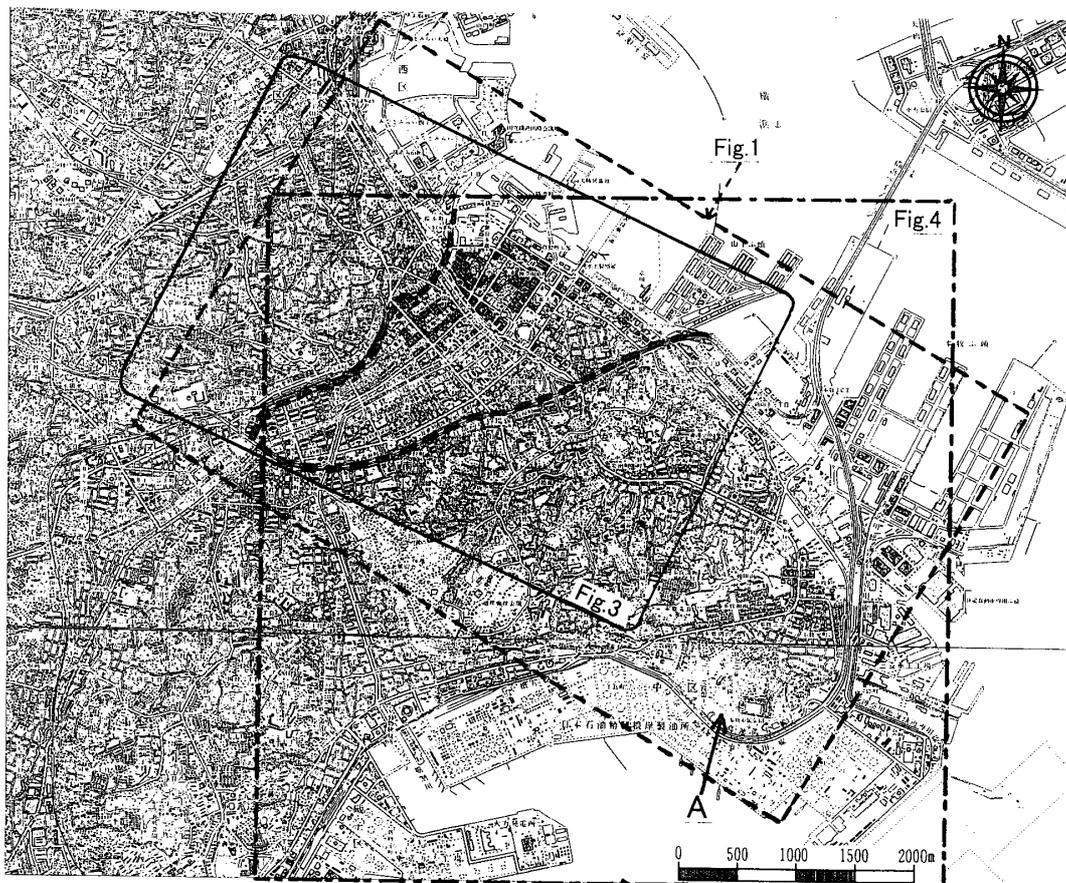


Fig. 2. Map of Yokohama (by the Geographical Survey Institute 1:50000 Scale Topographic Map).

り江であったが、開墾されて新田が開発された。この地図においても、現在の石川台の台地に沿って海食崖が連なり、その北西端から砂嘴が細長く伸びていたことが分かる。

Fig. 4には1897(明治30)年作成の海図(水深の単位は尋(1尋=1.8288 m))を、陸域の地形図とともに示す。根岸湾の奥には弓状の海岸線が伸び、その前面には最大幅約

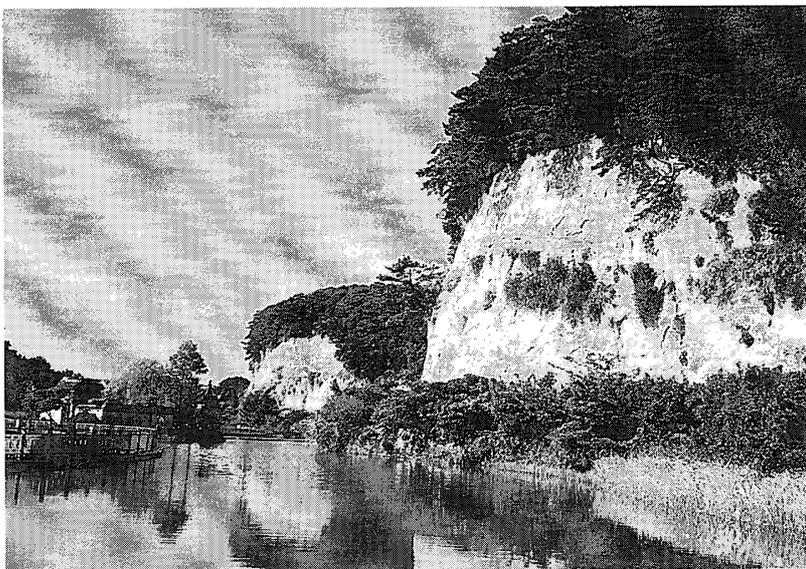


Photo. 1. Sea cliff at Sankeien Park in November 4, 2000.

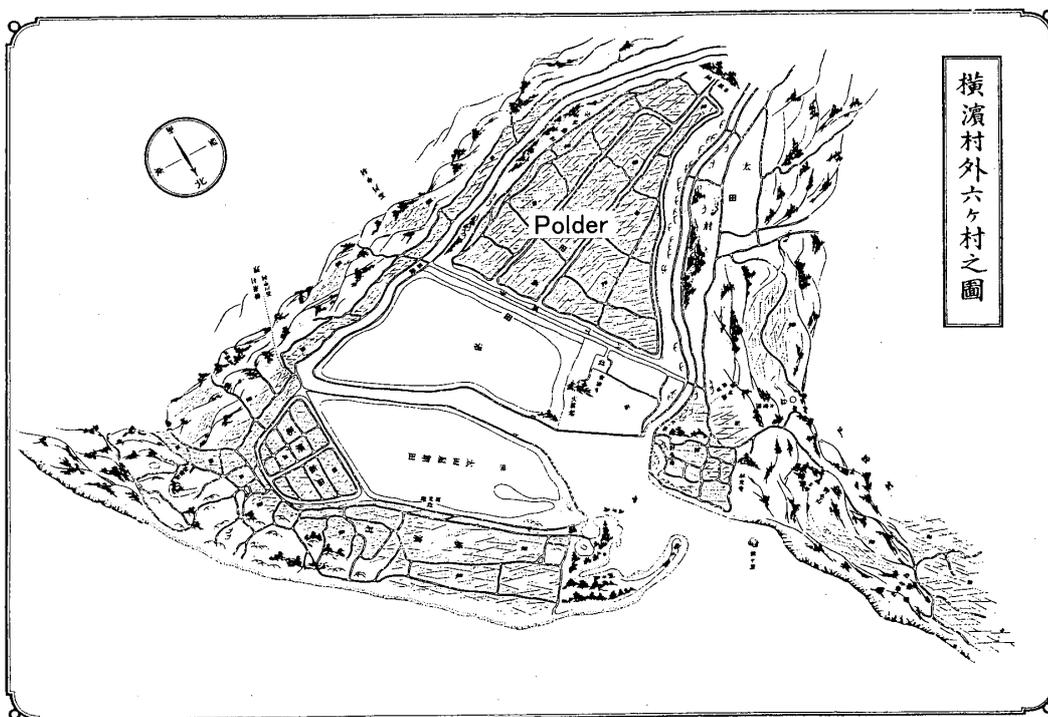


Fig. 3. Old map around Yokohama.

0.5 km の干潟が広がっていた。また根岸湾内の海岸線が本牧の丘陵地と接する付近より東側の丘陵地の海側には海食崖が発達していた。この海食崖を連ねる線は最も南側に突出した点（八王子鼻付近）から走行方向が変わり、北東方向へと次第に標高が低下し、本牧では消失している。その付近には平坦な低地と干潟が広がっていた。この位置のさらに北の石川付近でも再び海食崖の発達が見られる。この海食崖の前縁を滑らかに連ねる線の延長上には横浜の開港場があった。一方、市街地は旧外国人居留地を中心として内陸側へと発展し、釣り鐘状の旧開墾地にも海側から家屋の密集地が広がった。

根岸湾中央部を流下する堀割川は、この川を通して釣り鐘状の開墾地を区切る運河を経由して横浜に到達可能なように人工的に開削され、広げられた水路である。

海底地形については、1.8 m（1 尋）の等深線が根岸湾内では干潟の外縁線とほぼ平行に延びていたが、本牧の海食崖東端の八王子鼻付近から沖向きに急突出し南東方向へと延

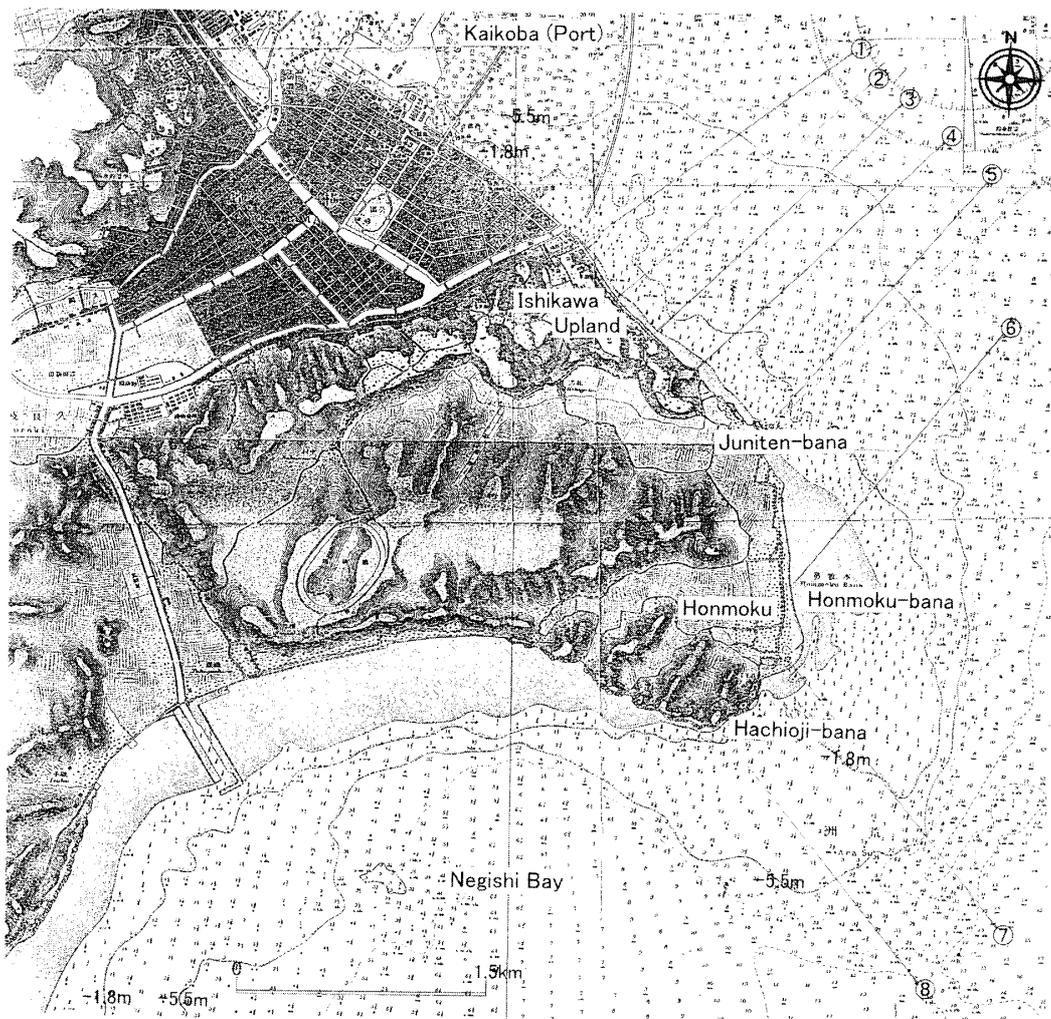


Fig. 4. Sea bottom contours around Ishikawa Upland and Honmoku-bana in Tokyo Bay.

びている。これに対して5.5 m (3 尋) の等深線は根岸湾の中央部よりも東側に偏って湾入していた。八王子鼻沖では水深1.8 ~ 5.5 m に緩勾配の海底面が広がるが、その沖では海底勾配が急になる。一方、本牧鼻は最大幅0.5 km で干潟状に突出していた。干潟の外縁線は十二天鼻の南東側ではやや凹状となるが、全体として南東方向になだらかに延び、砂嘴のような形状を有していた。十二天鼻の南東側で干潟の外縁線が幾分後退し北西側ではわずかに凸状となっていることは、干潟の構成土砂が石川の海食崖から供給され、南東方向に移動して本牧鼻を形成したことを示唆する。

さらに、水深5.5 m (3 尋) の等深線は横浜の開港場から本牧沖までは海岸線とほぼ平行に延びているが、本牧沖から八王子鼻にかけて1.8 m (1 尋) の等深線に急激に接近する。この理由は、南東方向への沿岸流によって運ばれた土砂の一部が本牧沖に堆積したためと考えれば説明可能である。

Fig. 5(a), (b) は石川と本牧の台地周辺の海岸縦断形である。測線位置は Fig. 4 に示す。測線①~④は海食崖によって切られた縦断形であり、沖合には海食台が発達しているが、測線①~③では沖合の海食台に、Fig. 5(a) に矢印で示した明らかな勾配急変点が見

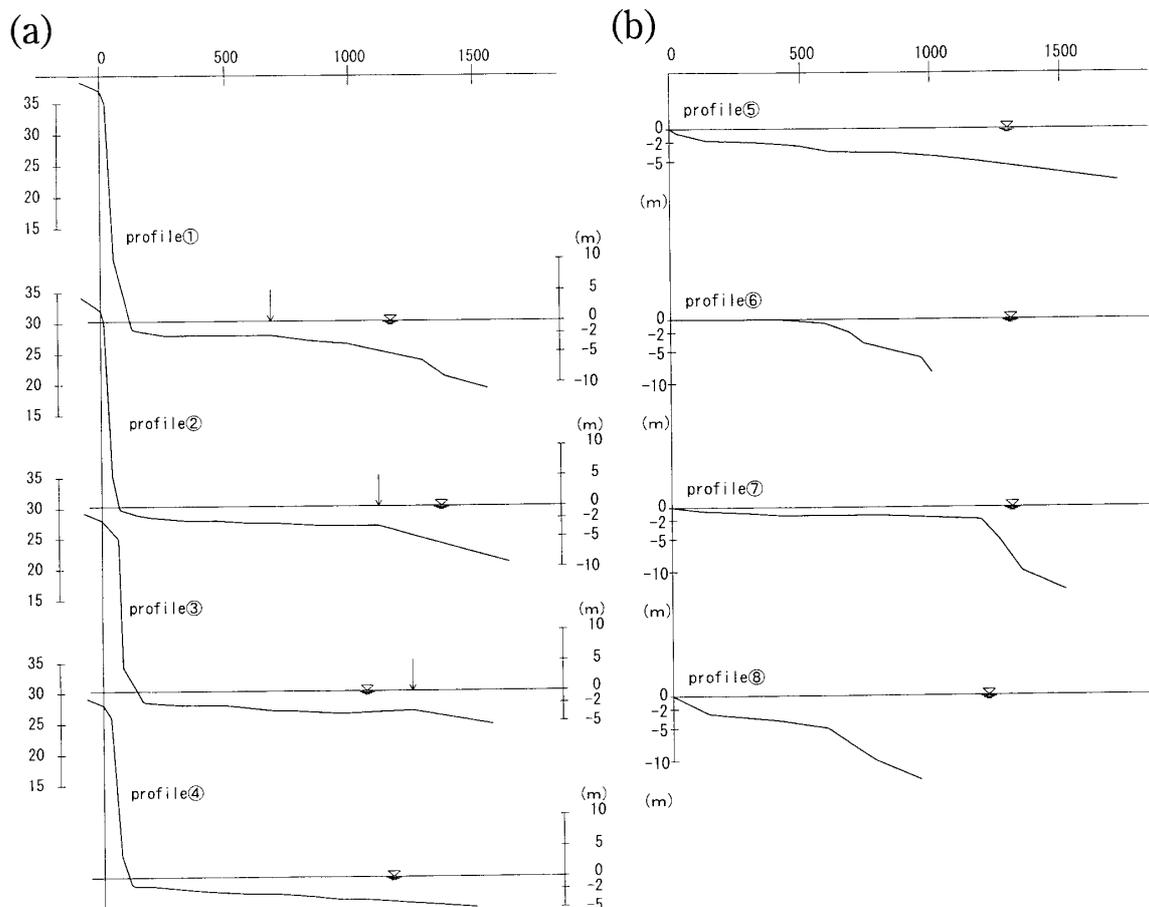


Fig. 5. Longitudinal profiles off Ishikawa Upland and Honmoku.

られる。各測線における勾配急変点の海食崖基部からの沖向き距離は 500 m (①), 1000 m (②), 1150 m (③) と南東側ほど大きくなる。これと対照的に、測線⑥～⑧では汀線から平坦面が発達しているが、沖合では急勾配で落ち込んでいる。とくに測線⑦では浅い平坦面の幅は約 1200 m もある。その沖では海底勾配が最大で $1/20$ と急になる。一般に、砂嘴周辺において土砂の供給源側では砂礫が削り取られる結果、海面下に緩勾配の海底面が形成され、逆に土砂の堆積域では陸上部には平坦面が、そして海面下では土砂の落ち込みによって急勾配斜面が形成される(宇多・山本, 1986)が、上述の海底地形特性はこのような砂嘴周辺での一般的な海浜縦断形特性をよく満足している。

3. 横浜の地質

Fig. 6には、横浜市公害研究所(1988)に基づく大岡川と首都高速狩場線に囲まれた釣り鐘状低地の砂質土層厚分布を示す。また Figs. 7(a), (b) は Fig. 6に示した測線 X-X', Y-Y' に沿う推定地質断面である。Fig. 6に示すように山下埠頭から新港埠頭にかけて釣り鐘状区域の出口を塞ぐようにして層厚 20 m 以上の砂礫層が分布している。釣り鐘状の区域を縦断的に見たのが Fig. 7(a) であるが、砂礫層の層厚は石川の台地北端(X')から約 700 m 付近で最大となり、それより北西側では台地からの距離とともに次第に減少している。これらのことから、砂礫層は南東から沿岸漂砂の作用で運ばれ、堆積域が次第に北西へと伸びたと推察される。一方、Fig. 7(b) に示す地質縦断分布(Y-Y')によれば、大岡川低地では、基盤の上総層群の上に粘土～シルト層が堆積しており、砂礫層は現海岸線付近

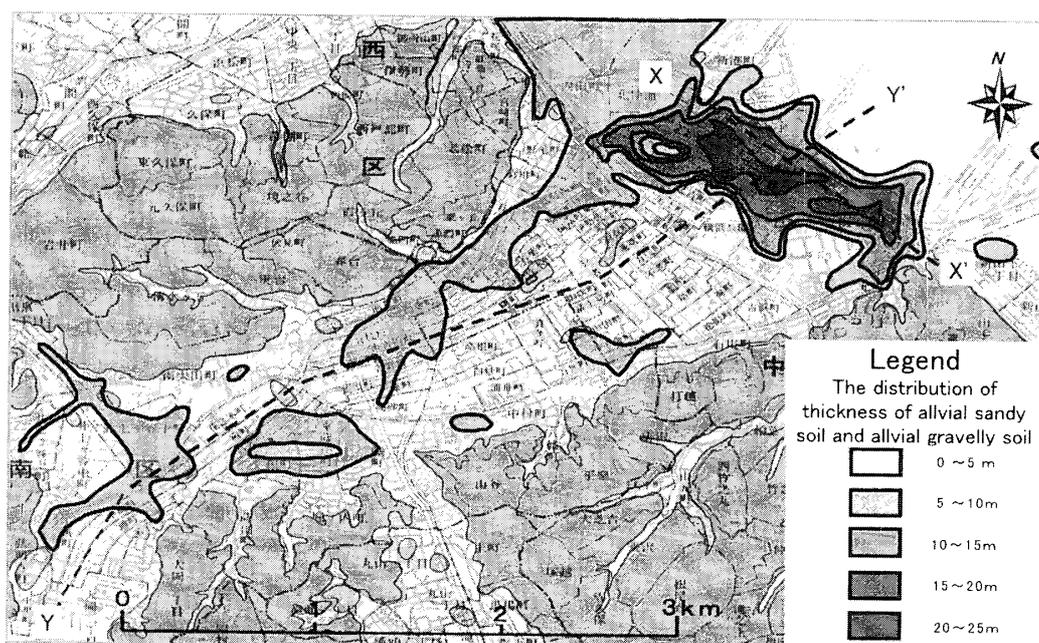


Fig. 6. Distribution of alluvial sandy soil and alluvial gravelly soil in lowland.

にのみ見られ、大岡川の河道沿いには分布しない。これらのことを併せて考えると、山下埠頭から新港埠頭にかけて分布する砂礫層は河川起源ではなく、石川付近の海食崖から供給された砂礫が運ばれ堆積した海成起源の地層と考えられる。

4. 1923年の関東地震による横浜の地盤災害

1923年の関東地震による横浜市での被害は神奈川県で最も多かった。翠川(1997)は横浜市での被災者数と住宅の被害について横浜市(1996)をもとに要約した。これによれば横浜市での死者・行方不明者は23,335人で、当時の人口の約5%であった。また住宅は全体(99,840戸)のうち62,608戸(63%)が焼失し、半壊(9,800戸)・一部破損(10,732戸)をあわせると95%が被害を受けた。またOmote(1949)は横浜市の旧市街地での家屋の全壊率分布を示したが、これによればFig. 2に示した釣り鐘状の区域での被害率は最大で90%を超えていた。

古藤田・若松(1978)は、1923年9月1日に発生した関東大地震による横浜市街の液状化地点を地形分類とともにFig. 8に示し、大岡川の河口付近や干拓地の前面には顕著な砂嘴が発達していること、そして液状化地点は干拓地・埋め立て地に限定されており、これらの地区を取り巻くデルタや砂嘴には生じていないことを明らかにした。また、液状化地点では砂の噴出は全く見られず、地割れや陥没箇所から噴き出した泥水のために一面膝を没するほどになったと述べている。このように地形分類の結果は関東大地震による液状化

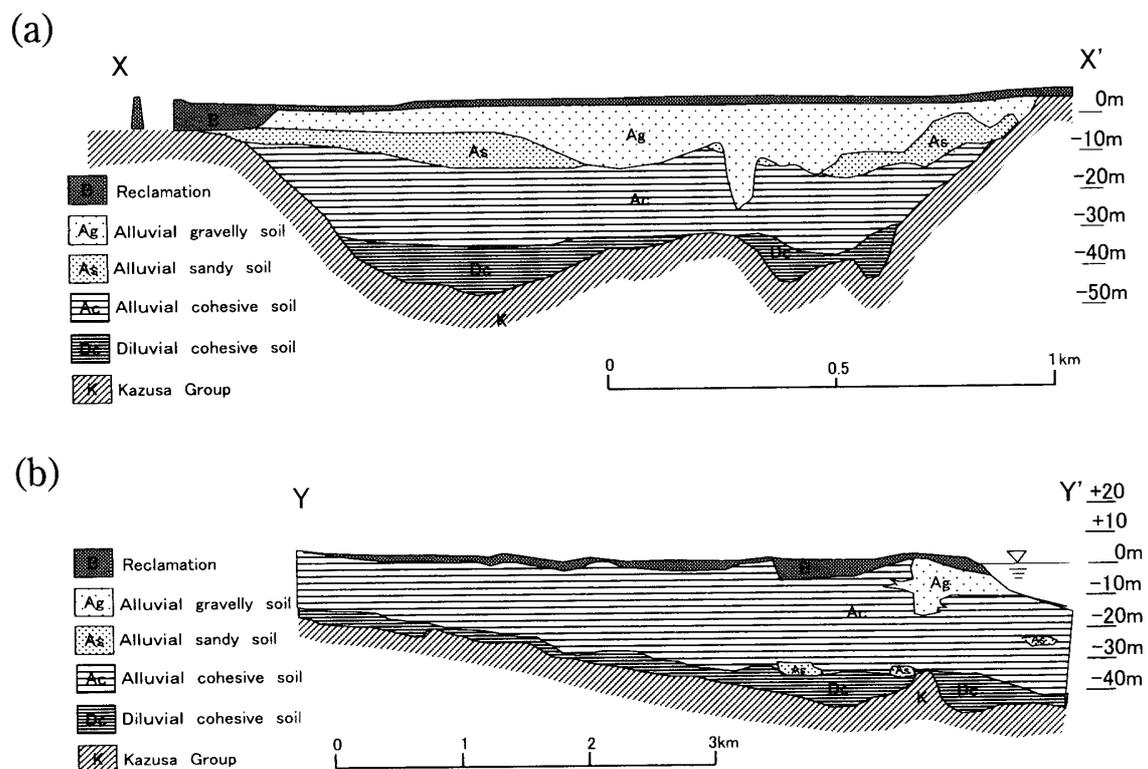


Fig. 7. Geological profile along X-X' and Y-Y' sections.

をよく説明している．このことはその地点の地形形成が地震被害と密接に関係していることを意味する．しかし Fig. 8では地形分類は行われているものの，この砂嘴の形成要因についての説明はない．

5. 砂嘴の形成因の検討

5.1 横浜の風向特性

Fig. 9には横浜地方気象台（横浜市中区山手町 99）による 2000 年の気象観測データより作成した風配図を示す．これによると，横浜での風向は N が著しく卓越し，これに SW, NNE, SSW が続く．また SW, SSW は主に夏季に出現する．ここでは省略するが風速 10 m/s 以上の強風でもその風向は N と SW が卓越する．しかし海岸線の方向がほぼ NW ~ SE に延びることから，SW を中心として $\pm 90^\circ$ 以内に入る風向は，砂礫の供給源と推察される石川の台地に対しては陸風となって風波の発達には関係しない．また，石川の台地に対して吹送距離が長い NE および ENE の頻度は非常に低い．したがって地形形成に主に預かるのは N および E からの風によって発達する風波と考えられる．

5.2 波のエネルギーフラックス

横浜における風向特性を考慮して波浪推算を行った．波浪推算にあたっての吹走距離の読み取りには，東京湾で大規模な人工的変化が加えられる前で，自然地形を最もよく表すと考えられる明治 26 年刊行・大正 8 年最終改補の海図を利用した．石川の台地中央に点 O を定め，これに対する東京湾内の吹送距離を読み取った．波浪推算は SMB 法（波の発

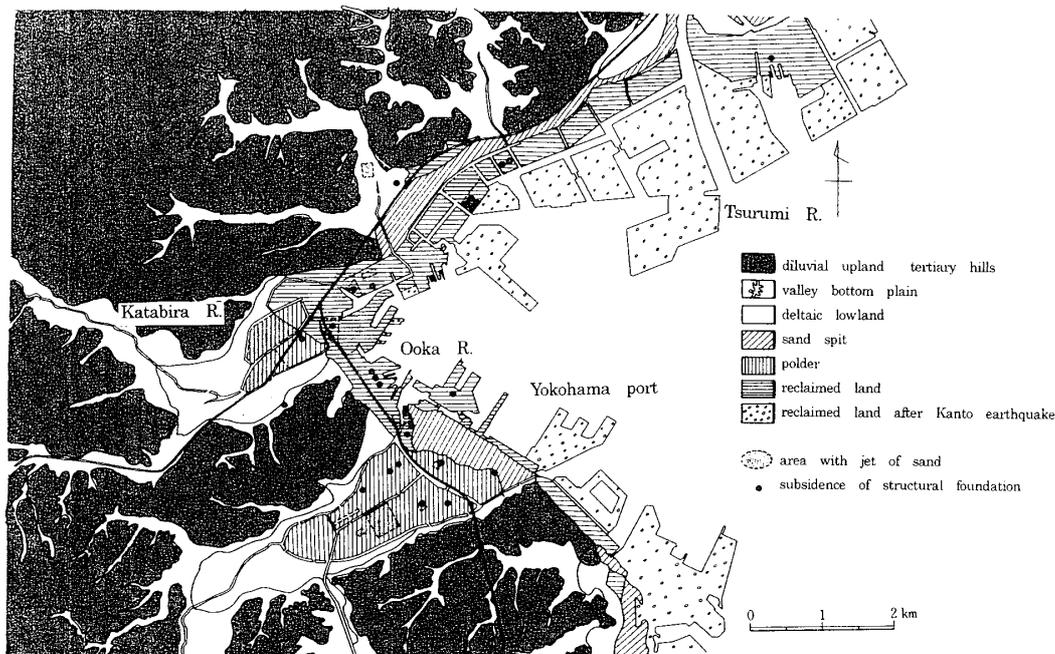


Fig. 8. Classification of landforms of Yokohama City (after Kotoda and Wakamatsu, 1978).

生・発達に関係する最も支配的な要素である風速と吹送距離より、有義波高 $H_{1/3}$ 、周期 $T_{1/3}$ を推算する方法で、Sverdrup と Munk が提唱し Bretschneider によって補正されたもの)で行うこととした。波浪の推算は、砂嘴地形の形成に大きく寄与すると考えられる N、E について行った。吹送距離に対岸距離を用いると、吹送距離 F は 6.4 km (N)、22.3 km (E) となる。SMB 法では有義波高 $H_{1/3}$ 、周期 $T_{1/3}$ は式 (1)、(2) で与えられる。

$$gH_{1/3}/U^2 = 0.30 (1 - 1/(1 + 0.004 (gF/U^2)^{1/2})^2) \quad (1)$$

$$gT_{1/3}/2\pi U^2 = 1.37 (1 - 1/(1 + 0.008 (gF/U^2)^{1/3})^5) \quad (2)$$

ここに、 g は重力加速度、 U は風速である。波浪推算に用いる風のデータは各風向別に作用風力の平均化を行った。これらは石川の台地への平均的な波浪作用を考えること、また地形形成に関係するのは作用波浪のうちでもエネルギーレベルの高い波浪と考えられることから、風向毎に風速の大きい順に並べ、上位1/3の平均値を求めた。この結果、風速は $\bar{U}_{1/3N} = 6.3$ m/s (出現回数 2,644 回、頻度 30.1%)、 $\bar{U}_{1/3E} = 4.3$ m/s (出現回数 566 回、頻度 6.4%) となった。この値を式 (1)、(2) へ代入すると、N および E からの風で発達する波浪 ($H_{1/3}$) は 0.29 m ($T_{1/3} = 1.9$ s)、0.30 m (2.2 s) となった。

作用波高は、石川の台地からの供給土砂を SE へと運ぶ作用をもたらす N の風と、NW へと運ぶ E の風とでほぼ同様な値となったが、風向の出現頻度は N が約 5 倍大きい。N および E からの作用波浪が同一レベルなので、風向頻度が砂嘴形成に大きな影響を及ぼすことになる。すなわち N の出現頻度が高い場合、E からの風の影響で横浜の開港場方向へと石

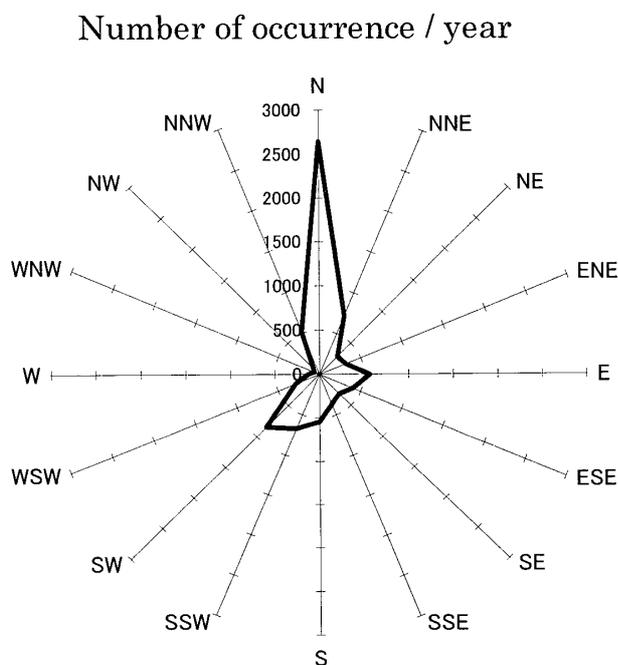


Fig. 9. Wind rose in Yokohama in 2000.

川の台地の海食崖から運ばれた土砂は、Nからの風波を起源とする沿岸漂砂によって押し戻される結果、石川の台地の南西側にあたる本牧付近にしか堆積できないと推察される。しかしながら、長期にわたって横浜には砂嘴が存在し上記の結果とはなっていないことは古地図等から明らかである。このことから、単に互いに逆方向を向いた沿岸漂砂の存在のみでは石川の手食崖からの土砂供給によって海食崖の両側に砂嘴が形成された理由を必要十分な意味では説明できない。

そこで、Fig. 10に示すように1897（明治30）年作成の本州南岸東京海湾横濱港近海の手図において、石川の台地中央部の点Oを中心として、横浜の砂嘴の先端から本牧鼻まで約4.5 km区間に0.5 km間隔で計算点を設け、各点ごとにN、E方向の吹送距離を測定し波高・周期および沖波のエネルギーフラックスを式（3）により算定した。

$$W = 1/8 \rho g (H_{1/3}^2 C_g)_0 \cdot \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad (3)$$

ここに α_0 は沖波入射角である。さらにN、E方向の風の出現頻度と観測時間を乗じて求めたエネルギーフラックスの累積値を波高とともにFig. 10に示す。計算において沖波の入射角は、Fig. 10に示すようにNからの入射波では測点5～10において 45° を超える入射角となる。逆にEからの入射波では測点1～4で 45° を超える。このように入射角が大きい場合海岸線は不安定となり、小さな擾乱から砂嘴が発達する（Ashuton et al., 2001）。本研究では 45° を超える入射角の場合には入射角を 45° と置き換えて計算を行った。

Fig. 10によれば、SEへの沿岸漂砂を起こすNからの波のエネルギーフラックスは、NWへの沿岸漂砂移動を起こすEの値と比較すると絶対値が約5倍大きい。実際には、NおよびEから波が入射した場合、それぞれFig. 10に示す海岸線の半分の区域では不安定的に砂嘴が発達する条件下にある。以下ではその機構について考察する。

5.3 砂嘴の発達機構の検討

最初に、石川の台地が矩形状に海に突出していた条件を考える（Fig. 11）。この場合、海底地形は左右対称形であったとする。海岸線の走行方向はNW～SE方向である。このような条件下で台地を切る中心線方向から波が入射するのであれば、地形の対称性から台地の両側に一對の砂嘴が形成される（Fig. 11（a））。その原理は、宇多（1983）が水理模型実験で示したように、台地正面が侵食されて海食崖が形成され、そこからの供給土砂が沿岸漂砂の作用によって台地の端部方向へと運ばれ砂嘴が形成されるものである。しかしながら横浜の場合には、波の入射方向は台地の海岸線に対し $\pm 45^\circ$ 傾いた斜め入射となっている。このため海岸線の変化はFig. 11（a）の場合とは異なる。そこでFig. 11（b）を参照し、まずN方向からの入射が作用したとする。このとき台地はGG₁G₁'G'部分が削られ、そこから供給された砂礫は土砂収支を満足しつつ南東端に砂嘴を形成する。その形状は単純化すればOに原点を持つ半円形で近似される。このような条件下で波の入射方向がE方向になるとOを中心として堆積した砂礫のうちE方向からの入射波が直角入射となる点

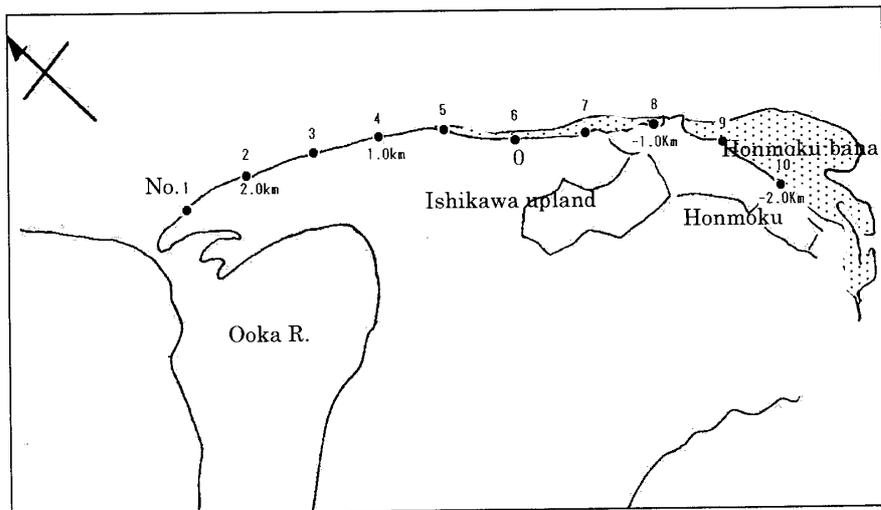
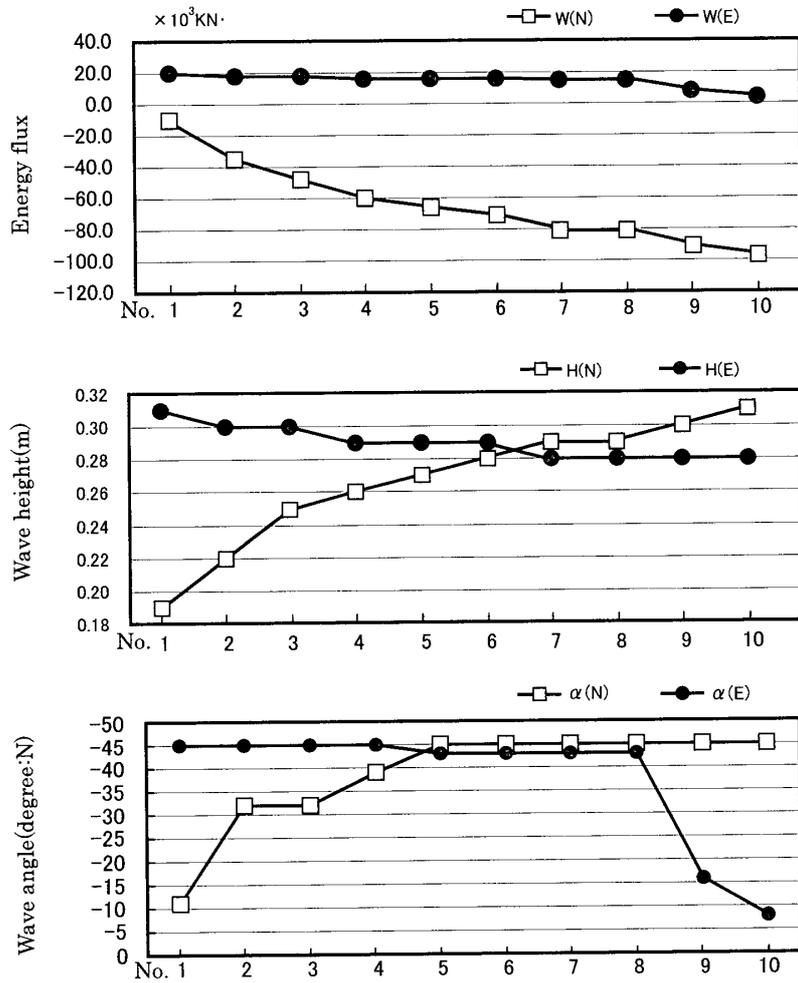
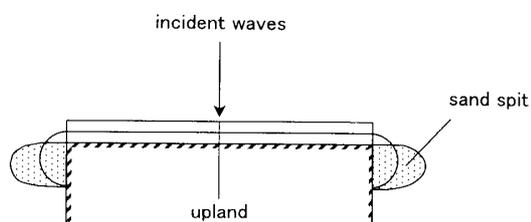
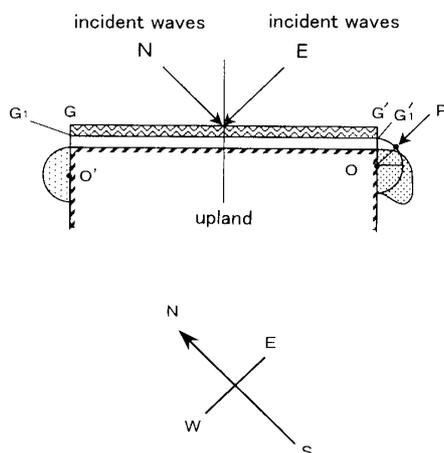


Fig. 10. Predicted wave height and energy flux of deep water waves.

(a) perpendicular wave incidence



(b) oblique wave incidence

**Fig. 11.** Formative mechanism of sand spit at both ends of Ishikawa Upland.

Pより北西側の区域に堆積した砂礫はNW向きの沿岸漂砂の作用によって運び出される。Oを中心として円弧状の形状を有する砂嘴の汀線のうちPより南側では砂嘴が内側に押し込まれ、南側に膨らみが形成される。一方、NW方向への沿岸漂砂によって砂礫が逆流するとともに新たに台地が削られ、その砂礫は台地の北西端にO'を中心とする砂嘴を形成させる。このような作用が繰り返されることによって台地は後退を続け、台地の両側に砂嘴が形成されたと推定される。この場合一度形成された砂嘴も波の入射方向が変化した場合、一部は再度侵食されるが、大部分の構成土砂は湾奥へと押し込まれる。このように海岸線に対する波の入射角が大きいため、単に波向変動に伴う周期的な地形変動ではなしに海食崖の両端部に砂嘴が発達し得たと考えられる。

6. ま と め

本研究により、大岡川の河口付近に発達している顕著な砂嘴は、石川の台地より夏季のEからの風波の作用によってNW方向へ運ばれた土砂が堆積して形成されたものであることが分かった。また本牧鼻～八王子鼻には、石川の台地から冬季におけるNからの風波の作用によってSE方向へ運ばれた土砂が堆積したことが明らかになった。このことは、八王子鼻以西に存在する海食崖からの供給土砂は根岸湾内へと運ばれ、本牧鼻～八王子鼻の地形形成とは無関係であったことを意味し、石川の台地周辺での漂砂の系は、横浜の砂嘴～石川の台地～本牧鼻の砂嘴で閉じており、八王子鼻の海食崖以西の漂砂の系とは独立したものであったと言える。

引用文献

- Ashuton, A., Murray A. B. and Arnault O. (2001) Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves: *Nature*, **414**, 296-300.
- 古藤田喜久雄・若松加寿江(1978) 関東大地震の液状化地図: 基礎工, **11**, 77-90.
- Omote, S. (1949) The relation between the earthquake damages and the structure of ground in Yokohama: *Bull., Earthq. Res. Inst.*, **27**, 63-68.
- 太田久好編(1971) 横浜沿革誌全, 有隣堂, p. 183.
- 翠川三郎(1997) 神奈川の地盤の特徴と地震災害: 公開市民講座「よこはまの地盤と防災対策」: (社)地盤工学会・横浜市, 23-36.
- 宇多高明・山本幸次(1986) 湖および湾内に発達する砂嘴地形の変形特性: 地形, **7**, 1-22.
- 宇多高明(1983) 河口内の矩形砂州の変形実験とその変形予測: 第27回水理講演会論文集, 773-779.
- 宇多高明・西原在浩・加 三千宣(2000) 大阪湾に面した神戸市和田岬の形成機構に関する一考察 - 1995年兵庫県南部地震による神戸市西部の被害集中域に関連して - : 地形, **21**, 329-340.
- 横浜市公害研究所(1988) 横浜市軟弱地盤層調査報告書-軟弱地盤構造と地盤沈下特性-, p. 103.
- 横浜市(1996) 関東大震災からの復興記録, p. 76.

資 料

- 資料1: 復刻古地図御開港横濱之全図, 安政六年(1859年), 人文社
- 第一軍管地方2万分1迅速測図原図 1881(明治14)年または1882(明治15)年当時の地形図
- 海図 日本本州南岸東京海湾 横浜港近海(水路部 M 31.7)
- 海図 日本本州南岸東京海湾 横浜港付近(水路部 T 13.8)
- 海図 日本本州南岸東京海湾 (水路部 M 26.5)