

沖合い空港島による波浪・河川流への影響に関する模型実験

平石 哲也*・奥野 光洋**・宮里 一郎***

大型河川の河口部に建設される海上空港が、波と河川流に与える影響について模型実験を実施している。実験水槽は、多面式多方向不規則波造波装置と複数の潮流発生装置を有する“環境インテリジェント水槽”で、実験縮尺は 1/250 である。空港島の構造は、埋立式、25 m 間隔で直径 1 m の杭で滑走路を支える棧橋式および両者を組み合わせた複合式である。計画高水流量を流下させても、河川水だけの場合は、各種の空港島が設置されても、空港島が設置されないときに比べて、河口部の流速ベクトルおよびフローターの軌跡に変化は見られない。空港島周辺の波高は、埋立式と複合式では遮蔽部分で低減が確認できている。空港島なしの場合より波高が上昇する場所は生じない。

1. はじめに

航空需要の伸張に伴い、首都圏や関西圏では沖合いに人工島を建設して新たな空港を開港する要請が強い。一方、新たな空港建設には莫大な建設費がかかるとともに、アクセスする交通機関を新規に整備する必要があり、建設期間も長くなる。そこで、比較的低コストで、急激に上昇する航空機の発着回数を処理するために、関西空港や羽田空港では既存空港に隣接して沖側に新たな滑走路用地を埋め立て等で確保する計画が進められている。

このとき、既存空港が臨海部の都市地域に近い場合や、河川の出水地域に位置している場合および周辺の浅瀬に貝類が繁殖している場合には、新たな沖合い滑走路の建設に伴い、現在の水環境がどのような影響を受けるかを把握しておく必要がある。

大規模構造物の建設による波や流れの変化は、数値計算（たとえば、樁木ら, 1999）で検討される場合もあるが、数式中の係数・定数の設定に問題が含まれており、正確な推定は困難である。そこで、羽田空港の沖合い拡張案をモデルケースとして、多方向不規則波、潮流および河川流を任意の方向へ発生させることができる実験水槽を用いて、埋め立て式や棧橋式の長大人工島によって、周辺の波浪、流れ、河川流がどのような影響を受けるのかを模型実験で調べた。

2. 実験の内容

図-1 に、実験水槽における造波装置と流れ発生機の配置を示す。水槽の長さ、幅はそれぞれ 30 および 40 m で、図の上および右側側壁に沿って 94 枚の造波板からなる多方向不規則波が設置されている。造波機の駆動信号は、各造波板の設置位置を考慮して、斜め波の造波理論 (Takayama, 1982) による造波信号を改良したマルチ・フェース造波機制御方式 (平石ら, 1995) にしたがった。

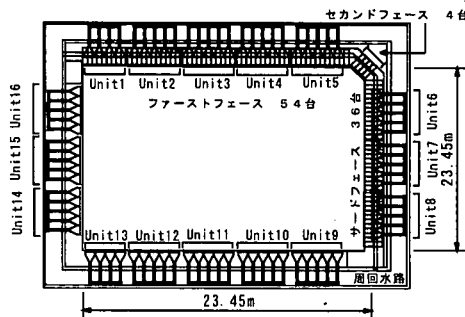


図-1 環境インテリジェント水槽平面

図の右側側壁の 36 枚をサードフェース、上側側壁の 54 枚をファーストフェースとしている。両面の連結は、従来のマルチ・フェース造波システムでは 1 枚の可動連接板で接続していたが、本装置では 4 枚の造波板を設置して、連続的に波が造波できるようにした。この部分をセカンド・フェースとして制御する。

造波機の下方には、幅 120 cm、高さ 10 cm の吐出口を有する床面設置型の潮流発生機がある。吐出口は、吸い出しと吸い込みが可能で、水槽全周面に沿って合計 78 機置かれている。4 台あるいは 5 台の吐出口でユニットを構成しており、ユニット毎に真空ポンプを設置し、回転方向と出力を調整し、出力一定の定常流および周期的に振幅が変動する振動流を再現できる。この水槽は、人工干潟や人工海浜における水環境に大きな変化を与える極浅海の波浪変形と海浜流の特性を調べるために 2001 年 5 月に完成したもので“環境インテリジェント水槽”といわれる。本実験では、造波装置は、全造波板を使って多方向不規則波を造波し、潮流発生装置は、図のユニット Unit 7, Unit 8 および Unit 1, Unit 2 を開放して、東京湾の上げ潮と下げ潮を再現した。河川流は、Unit 14 のうち 2 機のみを運転し、河口部で所定の流量が再現できるようにポンプの出力を調整した。なお、河川が出水を続けると水槽内の水位が変化してしまうので、同一の流量を Unit 5 および Unit 6 から吸い込んでいる。

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
*** 正会員 (株) エコー 環境水理部

図-2に沖合人口島の模型および計測器の配置を示す。実験では、沖合の拡張部のない状態で波、河川流および潮流の状態を再現し、次に沖合拡張部を設置して、拡張部周囲の波と流れの状況を調べた。対象とした沖合拡張部の工法は(1)埋め立て式、(2)棧橋式および(3)複合式である。埋め立て式は長さ約3000mの沖合拡張部をすべて護岸で囲って内部に土砂を投入するもので、周囲には反射波を軽減するための消波ブロックが置かれる。実験では、直径を相似にした玉石を用いて消波ブロック層を再現した。棧橋式は、沖合拡張部をすべて杭式の棧橋で製作するもので、杭間隔は25mとし杭の直径は1mとした。複合式は、河口の影響が強いと考えられる部分のみを棧橋とし、それ以外の部分を埋め立てとしたものである。図-2では、現在の羽田空港島の南側に2本の連絡橋で結ばれた複合式拡張部が示されており、その長軸はほぼ東西方向を向いており、河川の流下方向とは直角である。沖合拡張部の斜線部分が棧橋構造、黒い部分が埋め立て構造に相当し、棧橋部分の総延長は約1000mである。模型縮尺は、ひずみのない1/250とした。

東京湾の潮流については日運輸省第二港湾建設局等による現地観測結果の整理がなされており(村上, 1998)、羽田沖の測点で0.5 m/sが得られている。そこで、実験水槽でも、沖合拡張部が無い状態で、現在の羽田空港島沖で東京湾の長軸方向に0.5 m/sの流れが再現できるように潮流発生装置のポンプ出力を調整した。波は、東京湾でMRI(気象庁波浪推算モデル)を用いて羽田沖での100年確率波が求められている(沿岸センター, 2000)。設計で用いられる100年確率波高は、 $H_{1/3}=4.1$ mで、周期は $T_{1/3}=11.0$ sである。ただし、模型縮尺で模型波の周期を算出すると、 $T_{m1/3}=0.7$ sとなり、造波機で再現できない。そこで、実験では、造波装置で再現できる最も短い周期を設定し、波形勾配が一致するように波高を設定した。設計波の主波向はSEで、水槽では、サードフェースにほぼ直角である。そこで、サードフェースとセカンドフェースで方向集中度 $S_{max}=10$ の多方向不規則波を造波し、ファーストフェースは、反射波吸収機能を有する消波面として用いた。潮位については、東京湾の高潮計算(河合ら, 2001)結果に基づいて、朔望平均満潮位に伊勢湾台風が最も危険なコースを通過したときの高潮偏差を加えて実験潮位(H.H.W.L.)とした。表-1に実験で用いた波と流れの諸元を示す。

河川流は、現在の計画高水量4600 m³/sおよび将来の計画高水量7000 m³/sを再現した。図-3は、河口部で測定した流速で、図-2の下側すなわち現地では多摩川右岸側の流速が大きくなっており、羽田空港側(左岸)の方が流速が小さい。これは、羽田空港側に土砂が堆積し、水深1mの浅瀬が広がっており、河川が右岸を中心に流

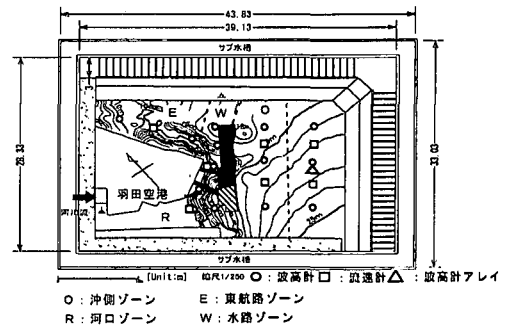


図-2 模型と計測器の配置

表-1 実験で用いた波と流れ

入射波	波高	周期	波向	方向集中度	造波波数
	11.6 m	14.2 s	SE	$S_{max}=10$	500 波
多摩川放水路流量	計画高水流量		将来計画高水流量		
	4600 m ³ /s		7000 m ³ /s		
潮流速度	上げ潮時		下げ潮時	満潮時	
	0.51 m/s		0.51 m/s	0.0 m/s	
潮 位	平均潮位		満潮位	計画高潮位	
	L.W.L.+1.2 m		+2.1 m	+5.1 m	

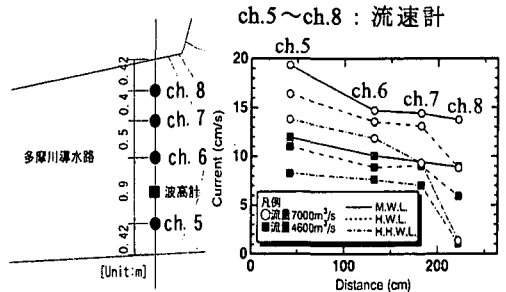


図-3 河川内の流速分布

下しているためと考えられる。河川流量が7000 m³/sおよび4600 m³/sの場合に、潮位が高くなりH.H.W.L.になると、左岸側のch. 7およびch. 8と右岸側のch. 5の流速差は顕著になり、左岸側の流速は計測点では、0に近くなる。河川流量が大きくなると、堆積土砂はフラッシュされ、水底地形が変化する可能性があるが、現地の粒径等が不明であり、ここでは河床地形は変化しないものとしている。河川流量は、平均流速と水位計で測定した河川水位の積として計算し、所定流量となるように、ポンプ出力を調整した。出力は一つの実験ケースでは一定で、河川流量の変化を考慮していない。

実験では、図-2で示した○印の計測点で容量式波高計で水位変動を測定し、□印の水平2成分流速計で流速を測定した。水位変動からは、統計処理後、有義波高お

よび最高波高を整理し、流速データからは平均流速と流向を求めた。また、平均的な流れの状況を求めるために、直径 2.5 cm のフローターを河川上流側から流し、模型床上で 30 sec 間隔（現地換算量で約 8 min 間隔）で水槽天井から写真撮影を実施してフローターの位置を求めて、軌跡を整理した。海底地形は、25 m 以深は水平床とした。

3. 実験の結果

図-4 は、河川の上流部から流したフローターの軌跡について、現況、沖合拡張部として埋め立て、棧橋、複合式を設置したケースを比較したもので、河川流量は $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ である。いずれのフローターも沖合拡張部に阻害されずに河口から東京湾内へ流下している。図のフローター位置は、現地換算で約 16 min 間隔の軌跡になる。菱形の埋立式の場合には、流下してきたフローターが一度拡張部の端部にあたって流下方向を変更したような軌跡を示すが、やや右岸側へ流下方法を変化した後は、すみやかに沖合へ運ばれている。■で示した棧橋式では、拡張部の上流側で移動速度が現況の場合よりも速くなり、現況の 2 倍程度の速度で沖側へフローターは運ばれる。これは杭が格子状に並んだ棧橋構造が整流板のような働きをし、沖合拡張部の無い現況よりも沖側へ向かって河川水を流下しやすい状況を作っているためと考えられる。対照的に、●印の現況地形では、沖合拡張部予定地では河川水が広く分散しながら流れており、フローターは図中の上方へ広がるように運ばれている。複合式の場合には、沖合拡張部を通過するまでは、棧橋構造と同様に河口から直線的に沖合へ流下しているが、拡張部を通過するとやや右岸側へ向きを変え埋立式と同様に、右岸沿って沖合へ移動する。埋立式と複合式で、フローターが最も右岸より運ばれるのは、沖合展開部の影響で河川水が左岸方向へ広がらずに右岸側だけで流下していくためと思われる。ただし、流下場所の変化を許容すれば、どの構造形式もほぼ現況の沖合拡張部が無い状態とほぼ同一の移動を示しており、沖合拡張部がフローター軌跡に与える影響は小さい。これは、河川流が右岸を中心に流下し、羽田空港よりの左岸側には、大きな流量が流れないためで、左岸側から張り出した状態になっている沖合拡張部周辺では、もともと流速が小さく、大きな障壁にはならないと考えられる。

図-4 の結果は、河川流量が最大の $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ の結果であり、河川流量が現況計画の $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ についても同様の比較を行った。図-5 は、複合式についてフローターの位置を約 16 min 間隔で示したもので、現在の羽田空港島側にあたる左岸部分に近い海域をフローターが通過するときにやや滞留が見られ、河川の上流側へ少し戻るよ

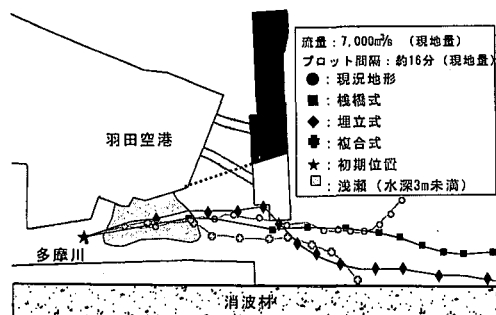


図-4 河口部のフローターの軌跡の比較

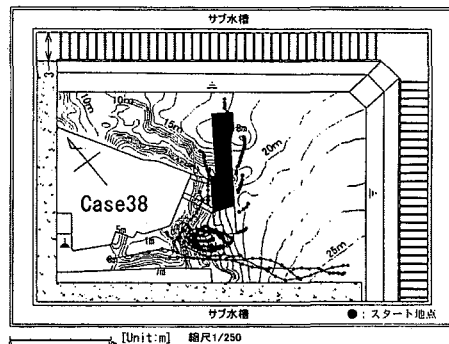


図-5 複合案でのフローターの軌跡

うな軌跡が生じている。このような滞留状況は、埋め立て式や棧橋式では見られなかった。複合式は、直立壁で囲まれた埋立部に接続して、杭が密集した複雑な構成となっており、埋立部端部で渦が発生し、それが棧橋構造のために十分剝離せずに、逆流のような流況を生じている可能性がある。河川出水量が $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ と大きくなると、多摩川右岸側の流量が顕著になり、そのような滞留が生じても影響を与えないが、河川流量が $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ では左岸側の流況変化がフローターの運動にも影響を与えるようになると考えられる。

実験では、河口部の水深 5 m の部分に電磁流速計を設置して、深さ方向では中心位置での 2 成分流速を測定した。平均流速ベクトルの向きと絶対値を比較した図が、図-6 である。方向は現地で北方向を 0° とし時計回りを正として定義した。工法が変化しても、流速ベクトルの絶対値と方向には変化がみられずは、流速計の計測結果だけからは、河川流の流下状況については、沖合構造物は影響を与えないと考えることができる。

次に沖合構造物を設置したときの波の特性変化を調べた。ここでは、沖合部周囲の観測有義波高 $H_{1/3}(\text{m})$ を整理するとともに造波機前面での反射率について現況との相違をまとめた。水位は水槽内の 14 測点で計測している。そこで、図-2 に斜線で区分した各ゾーンに含まれる

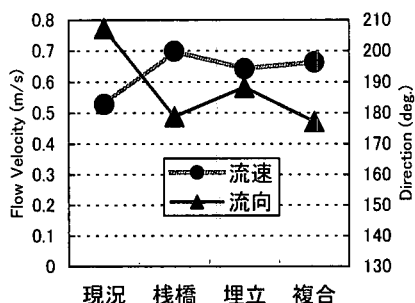


図-6 河口部での流速ベクトル

観測点の平均値をゾーンの代表値とした。ゾーンは、拡張部沖側の3点が含まれる沖側ゾーン(O), 拡張部の背後で、既存の羽田空港島との間に位置する水路ゾーン(W), 拡張部背後で河川護岸を延長した区域に含まれる河口ゾーン(R)および既設空港島東側で東京港への航路にもあたる東護岸・航路ゾーン(E)に分割した。波の反射率は、造波機のサードフェイスに沿った3測点での解析結果の平均値を示した。

図-7および図-8に各ゾーンでの波高計測値を拡張部の無い現況での波高で除して波高比を算出し、各ゾーン毎に平均した平均波高比を示した。現況の波高比は1.0として表されている。図-7と図-8は、それぞれ、波のみ、および河川出水を7000 m³/sとして同時に考慮したケースに相当する。沖合拡張部の沖側ゾーンでは、栈橋式では現況と波高比は変化しないが、埋め立ておよび複合式では若干波高が増大する。ただし、護岸が玉石で消波されているため、波高増大の影響は小さく、沖合での反射率は変化しない。河口ゾーンでは、埋め立て式では波高が軽減する。拡張部と既設空港との間の水路

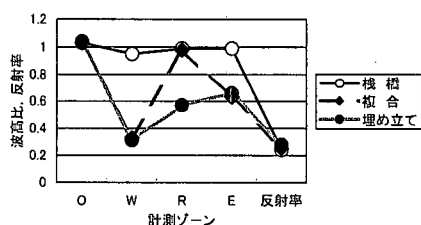


図-7 観測ゾーンにおける波高の変化

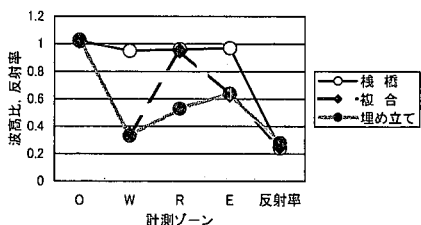
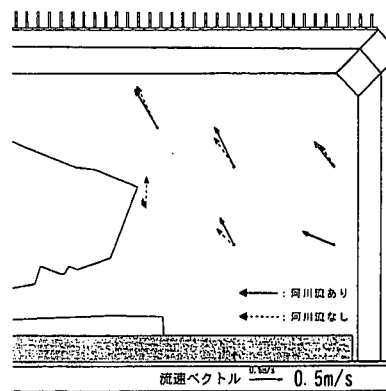
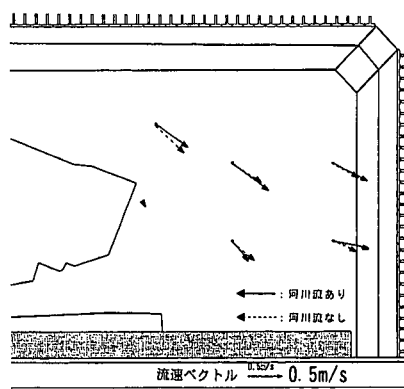


図-8 河川出水時の波高変化



(1) 上げ潮時



(2) 下げ潮時

図-9 空港島周辺の潮流ベクトルの分布

ゾーンでは、埋め立て案と複合案では波高が大きく軽減し、既設護岸の越波対策としても活用できる。既設空港東側の航路ゾーンでは、埋め立て式と複合式の場合に波高が軽減し、現在の港湾の静穏度向上にも効果を有している。

図-8では、河川が出水中でも図-7と同様な結論が得られ、栈橋式と複合式では、河口ゾーンでの波高比が1.0になり、河川流が大きくなっても波高低減効果への影響は小さい。

東京湾の環境には潮流が大きい影響を及ぼしているの、潮流作用時の変化についても検討しておかなければならない。図-9(1)および(2)に、それぞれ現況地形における再現した上げ潮と下げ潮時の平均流のベクトルを破線で示す。既設空港島の角で0.5 m/sの観測値が得られており、この状況を現状での潮流状況とした。図中の実線に河川流量が7000 m³/s時の潮流ベクトルを示す。河口部で潮流ベクトルは東側へ偏向しており、計画高水時には沖合の潮流方向にも影響を与え、北側から来る河川流に押されて東寄りに進路を変えながら上げ潮が発生する。

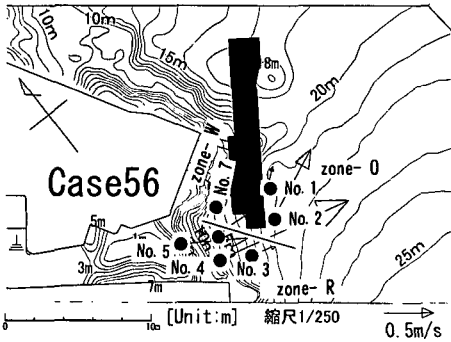


図-10 複合および埋立式の周辺流速の計測点

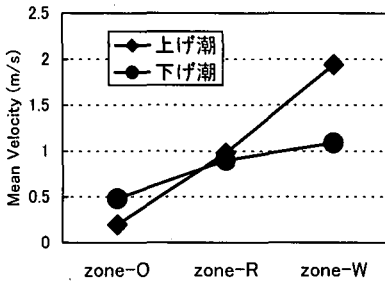


図-11 複合および埋立式の周辺流速の比較

従来の設計では、朔望平均満潮位に高潮偏差を加えて設計潮位を決める。満潮時には潮汐による流れは比較的小さいが、拡張部の影響を調べるために、潮流、河川および波浪の3つの要素がすべて作用した場合の河川流の変化を、埋立式と複合式とで比較した。

図-10に沖合拡張部周辺に密に流速計を配置した計測点を示す。これらを沖合部(O)、河口部(R)、水路部(W)に分けて、それぞれの平均値を採用し、埋立式の値を複合式での値で除した流速比が図-11である。河口部(R)では、上げ潮時と下げ潮時ではともに、流速比は0.9~1.0で変化は小さい。沖側(O)では下げ潮時に流速比は0.5であるが、上げ潮時は0.2となり両者の差が生じる。水路部(W)では、上げ潮時に流速比が1.9となり、上げ潮時の方が埋立式と複合式との変化が顕著になる。また、河川からのフローターの軌跡には構造形式で顕著な差は生じていなかったが、潮流まで考慮して流速を比較すると、沖合拡張部と既設空港島との間の水域で構造形式による流速差が生じてくることが判明した。

海の波が流れの影響を受けて、そのスペクトル形と方向分布特性を変化させることは、中川ら(1994)が指摘しており、本実験でも複合案について、河川出水時の方

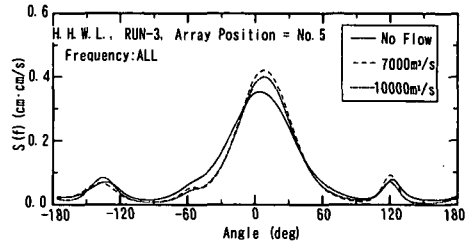


図-12 河川流の有無による方向スペクトルの変化

向スペクトルの変化を調べた。図-12は、図-11のNo.5の河口部に波高計アレイを設置して測定した方向スペクトルである。方向スペクトルは、波高計アレイで同時計測した水位データを EMEP(橋本ら, 1993)で解析し、周波数方法にエネルギーを積分した2次元方向スペクトルで示した。ピーク出現角度は、河川水の有無で変化せず、主波向は河口流が発生しても変化しない。河川出水時には分布形のピークがより高くなり、河川水が逆流として波に影響するため、方向集中度が上昇し、波の多方向性が小さくなる。

4. おわりに

海上空港島建設が波と河川流に及ぼす影響を模型実験で調べ、どの工法でも河川から流出したフローターの軌跡には変化が生じないことを示した。また、拡張部背後の水域に対して、埋立および複合式は遮蔽効果を与えること等を明らかにした。

参考文献

- 沿岸開発技術研究センター(2000): 東京湾自然条件基礎調査報告書, 200 p.
- 河合弘泰・竹村慎治・山城 賢・柴木秀之・平石哲也(2001): 我が国沿岸の想定高潮偏差と湾形状による増幅特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 301-305.
- 樺木亨ら(1999): 環境圏の新しい海岸工学, フジテクノシステム, pp. 408-413.
- 中川康之・鶴谷広一・橋本典明(1994): 方向スペクトルの推定に及ぼす流れの影響に関する検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 116-120.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃(1993): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張, 港研報告, 第32巻, 第1号, pp. 3-25.
- 平石哲也・金澤 剛(1995): 多面式造波装置の適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 131-135.
- 村上和男(1998): 閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究, 港湾技研資料, No. 900, 142 p.
- Takayama T. (1982): Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-makers, Rept. of P.H.R. I., Vol. 21, No. 2, pp. 3-48.