浮体式空港の設計と環境影響に関する検討

——海水流動等の変化に関する予測——

正員 井 上 義 行¹ 正員 多部田 茂¹
正員 荒 井 誠¹ 正員 中 澤 和 弘²

Feasibility Design of a Floating Airport and Investigation into its Effects on the Environment
——Effects of a Floating Airport on Ocean Current——

by Yoshiyuki Inoue, *Member* Shigeru Tabeta, *Member*
Makoto Arai, *Member* Kazuhiro Nakazawa, *Member*

Summary

Kansai international airport was newly constructed and opened off Senshu city in the bay of Osaka. This airport was built on an artificial island newly reclaimed from the sea. Although other similar airport projects are also being discussed in Japan, application of reclamation system in the deeper sea is very difficult to realize because of the necessity of the massive sand for the filling of the land. Long period of construction and environmental impacts are also obvious defects of this system.

On the contrary, an airport with floating system clearly has advantages in some points. Especially, it is considered to give less damage to the environment than reclaimed one.

The authors wish to show numerical simulations by means of multi-level model to discuss the effects of artificial islands on ocean current. The boundary conditions of floating islands for numerical model are newly treated in this paper. By means of the multi-level model, differences of current pattern around floating and reclaimed islands are discussed in cases of simplified rectangular bay, Osaka Bay, and Tokyo Bay. It is clarified that a floating airport changes the current pattern less than reclaimed one.

1. 結 言

関西国際空港 2 期工事, 中部新国際空港, 横浜川崎空港¹⁾ 等のように日本国内でも近い将来に向けて数多くの海上での空港建設が考えられている。ところが, 航空機の騒音問題などのため沖合いに設置されることから, 水深が深く, 海底地盤も軟弱となる。このような海域での空港建設は, 従来多く用いられてきた埋立法では大量の土砂を必要とし, 地盤沈下も大きく, 工期が延び, さらに, 埋め立て用の土砂そのものの不足等様々な問題が提起されている。そこで, 埋立法に代わるものとして, 過去にも日本造船工業会等²⁾³⁾⁴⁾でも研究されたことのある浮体式の空港建設案

が最近見直されつつある。浮体構造物は埋立式に比べて海洋環境への影響や地震による影響が少ない, 水深の深い海域でも施設の建設が可能である等の長所が挙げられている。

本研究はこれらの構想に対して環境影響に関する検討課題の一つとして, 湾内に海上空港を建設した場合に, 埋立式と浮体式の海水流動等へ及ぼす影響の差を検討することを目的とする。同様の目的で海水流動の数値シミュレーションを行った例として, 日本海難防止協会の調査研究⁵⁾がある。これは, 湾内に大規模な浮体構造物を設置したときの流動変化を 2 次元単層モデルによる計算で予測したので, 設置浮体による流水断面積の減少と抵抗力の増加を考慮してモデル化を行っている。しかし浮体式海上空港を設置した海域では, 上層部では浮体によって流れが遮られ浮体のない下層部には流れが存在するので, 同報告書でも述べているようにこのような流況は流れの鉛直平均しか扱えない単層モデルでは十分に表せない。そこで本研究では, 多層モデルを用いて海上空港が海水流動に及ぼす影響を検

¹⁾ 横浜国立大学工学部建設学科

²⁾ 横浜国立大学大学院工学系研究科

討する。しかしながら、多層モデルでこの種の問題を具体的に計算した例はない。そこで、浮体式海上空港のモデル化を行い、まず、簡単で考察に都合の良い矩形の湾に単純な海上空港を設置したときの潮流変化の数値シミュレーションを行う。さらに、関西国際空港2期工事と横浜川崎空港を想定し、埋立式と浮体式の相違を調査する。

2. 海水流動の予測モデル

2.1 多層モデル

本研究では、海水流動の予測モデルとして Fig. 1 に示すような多層モデルを用いた。このとき流れの基本方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここで f はコリオリパラメーター、 t は時間、 ρ_0 は海水の密度、 p は圧力、 g は重力加速度、 A_M 、 K_M はそれぞれ水平方向、鉛直方向の渦動粘性係数である。

鉛直方向の運動方程式から

Fig. 1 Multi-level model

$$p = -\int_z^z \rho_0 g dz + p_a \quad (5)$$

となるので式(1)、(2)中の p はこの式から求める。ここで、 p_a は大気圧で一定とする。水位 ξ は海底 ($z = -h$) と海面での境界条件を用いて連続の式を鉛直積分して導かれる次式で求められる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\xi} v dz = 0 \quad (6)$$

境界条件は、陸岸と海底の境界では、no-slip の境界条件を用いた。潮流計算では、通常開境界で観測値の潮位を与えるが、湾内に大規模な構造物を設置したときにはその影響で開境界での潮位が変化することも考えられる。そこで、本モデルでは開境界に無反射境界を用い、 M_2 分潮の湾外からの入射成分を与えた⁶⁾。初期条件はいずれの場合も全計算領域で、水位は入力潮汐の満潮時の水位を与え、流速は 0 とした。

これらの式を leap-frog 法で離散化し、水平方向にスタaggered メッシュを用いたレベルモデルを用いて計算した⁷⁾。計算は流れがほぼ定常状態になる 5 潮汐周期 (60 時間) 行い、最後の 1 周期について検討した。

2.2 海上空港のモデル化

埋め立ての海上空港を考える場合には、海上空港の部分を通常の陸地と同様に取り扱う。

浮体の海上空港の場合には、多層モデルの第1層の厚さを海上空港の喫水にとり、その部分に浮体が存在するとして計算を行った。浮体側面では完全反射の境界条件を用い、水位が変化しても浮体は上下動しないとした。

海面に浮体構造物がある場合には、浮体下面での境界条件

$$w = 0 \quad \text{at} \quad z = -d \quad (7)$$

を満たすように次のようにして浮体構造物の下流速を求めた。ここで d は浮体構造物の平均海面下における喫水である。式(7)を用いて連続の式(4)を鉛直積分すると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{-d} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{-d} v dz = 0 \quad (8)$$

が得られる。まず、前のタイムステップの浮体構造物の下面の圧力 $p_a^{(n)}$ を用いて式(1)、(2)から、次のタイムステップの仮の流速 u^* 、 v^* を計算する。 u^* 、 v^* を式(8)の左辺に代入して残差

$$\frac{\xi^*}{\Delta t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{-d} u^* dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{-d} v^* dz \quad (9)$$

を求める。これを用いて、

$$u^* = u^* - \alpha \Delta t g \frac{\partial \xi^*}{\partial x} \quad (10)$$

$$v^* = v^* - \alpha \Delta t g \frac{\partial \xi^*}{\partial y} \quad (11)$$

より、流速を補正する。ここで、 α は修正係数である。 $\alpha = 1$ のとき、これは浮体下面での圧力が、 $p_a^{(n)} + \rho_0 g \xi^*$ であるとして、式(1)、(2)を解きなおしたことになる。これを

再び式(9)に代入して ζ^* を求めるという繰り返し計算を行い、浮体構造物のある海域における残差の最大値 $\zeta_{\max}^*$ が $\zeta_{\max}^* < \varepsilon$ となったところで、次のタイムステップの流速 $u^{(n+1)}$, $v^{(n+1)}$ を

$$u^{(n+1)} = u^* \quad (12)$$

$$v^{(n+1)} = v^* \quad (13)$$

とする。これによって、浮体構造物がない場合の計算のアルゴリズムを大きくかえることなく、浮体下部の流れが計算できる。本計算では、 $\alpha=1.6$, $\varepsilon=10^{-6}$ [m]を用いた。

また浮体構造物の側面及び下面ではno-slipの条件を用いている。

Fig. 2 Horizontal velocity of the top level at flood tide in the rectangular basin

3. 数値計算と考察

3.1 矩形湾内の海上空港による海水流動変化

まず簡単な矩形湾で、湾内に埋立式の海上空港、浮体式の海上空港を設置したときに、湾内の潮流にそれぞれの程度の影響があるかを検討した。長さ 30 km, 幅 15 km, 水深は一定で 20 m の矩形湾で、湾のほぼ中央に海上空港を設置した。海上空港のモデルとしては長さ 3000 m, 幅 1000 m, 喫水 2 m のものを想定した。入力潮汐としては、開境界で振幅 0.5 m で 12 時間周期の入射波を与えた。水平方向のメッシュサイズは 1000 m, 鉛直には 5 層とし、コリオリの力は考慮しなかった。

Fig. 2 はそれぞれ海上空港がないとき (NO ISLAND)、埋立式の海上空港を設置したとき (RECLAIMED ISLAND)、浮体式の海上空港を設置したとき (FLOATING ISLAND) の最上層での上げ潮時の水平流速である。埋立式のときには海上空港の周りを流れが迂回するが、浮体式にしたときには流れは浮体構造物の横を回り込まずに浮体の下を通過しているようである。Fig. 3 は、海上空港の下部の湾の長手軸方向の水平流速の鉛直分布で、流速は湾の奥に向かう方向が正である。図中には海上空港がないときの同じ位置での流速も示した。大規模な浮体構造物を設置した場合に、浮体の下の海水がよどんで環境に悪影響を及ぼすのではないかと懸念がしばしば指摘されているが、この計算では海上空港がないときに比べて海上空港を設置した場合に浮体下部の流れはむしろ速くなっている。これは、想定した海上空港が非常に薄いため、流れが浮体構造物の横を回り込まずに、浮体の下を通過するためであると考えられる。海上空港の下で線流量 (流速の鉛直積分値) は、海上空港がないときの約 97% になっており、ほとんどの流れが浮体の下を通過していることがわかる。した

Fig. 3 Vertical distribution of horizontal current under the floating island

Fig. 4 Tidal residual current of the top level in the rectangular basin

がって海上空港の周囲の海域の流れに及ぼす影響は埋立式のときよりかなり小さい。

Fig. 4 は海上空港がないとき、埋立式、浮体式の海上空港を設置したときの最上層での潮汐残差流（流れの潮汐周期平均）である。海上空港の位置の影響を調べるために、湾のほぼ中央（CENTER）の他に湾奥の陸岸に近いところ（INNER）に浮体式の海上空港を設置したときの流れも示してある。単純な矩形湾なので、海上空港がないときの潮汐残差流は非常に小さいが、海上空港を設置したことによって渦が生じ、残差流のパターンが大きく変化している。埋立式に比べて浮体式は海上空港を設置したときの流れの変化が小さいことがわかる。特に、流れがあまり大きくない湾奥に海上空港を設置したときには、湾全体の流れのパターンはほとんど変化しない。

3.2 大阪湾の海上空港による海水流動変化

関西国際空港 2 期工事を想定して、大阪湾に海上空港を設置したときの潮流の変化を計算した。海上空港のモデルとしては矩形湾のときと同様のものを用いた。水平方向のメッシュサイズは 1000 m、鉛直方向には 7 層モデルを用いた。また、外力としては M_2 潮汐のみを考慮し、2 つの開境界でそれぞれ潮汐の入射成分を与えた⁶⁾。

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 はそれぞれ海上空港増設前、海上空港を埋立式で増設したとき、浮体式で増設したときの潮汐残差流である。埋立式の海上空港を増設したときには、海上空港設置前と比べて海上空港の西側の海域の流れのパターンが変化している。一方、浮体式の海上空港を増設したときには流れのパターンの変化は小さい。海上空港の下の流れも設置前と比較して大きな変化はない。また、埋立式、浮体式とも海上空港の近傍を除いては影響はほとんどない。これは、海上空港の付近は比較的に流れが弱く、今回増設した海上空港の大きさが湾のスケールに比べてあまり大きくないためであると考えられる。しかし、陸岸から流入する淡水や物質等の拡散などを考えたときには、湾全体に影響を及ぼす可能性もあり、検討が必要である。

3.3 東京湾内の海上空港による海水流動変化

最後に東京湾内に横浜川崎空港を設置した場合について検討した。海上空港のモデルとしては、山田¹⁾が提案している横浜川崎空港 T・WAX を想定した。これは、横浜と川崎の臨海工業地区に面する海域に設置する総面積 2100 ヘクタールの海上空港である。水平方向のメッシュサイズは 1000 m、鉛直方向には 6 層で計算した。外力としては、 M_2 潮汐及び主な河川からの流入を考慮した。また、この場合

Fig. 5 Tidal residual current of Osaka Bay without airport at the depth of 1 m and 10 m

Fig. 6 Tidal residual current of Osaka Bay with a reclaimed airport at the depth of 1 m and 10 m

Fig. 7 Tidal residual current of Osaka Bay with a floating airport at the depth of 1 m and 10 m

Fig. 8 Tidal residual current of Tokyo Bay without airport at the depth of 1 m and 5 m

Fig. 9 Tidal residual current of Tokyo Bay with a reclaimed airport at the depth of 1 m and 5 m

は開境界で潮汐の観測値を与えている（無反射境界は用いていない）。

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 は、それぞれ海上空港がないとき、埋立式の海上空港を設置したとき、浮体式の海上空港を設置したときの潮汐残差流である。埋立式の場合には、湾の中央付近の流れがかなり広い範囲で変化している。浮体式の場合には、やはり埋立式よりも流れに対する影響は少な

い。また、矩形湾や大阪湾の計算では海上空港の下の流れは設置前と設置後でほとんど変化しなかったが、この場合には海上空港がある場合にはない場合に比べて浮体下部の流れがかなり小さくなっている。これは海上空港の規模が矩形湾や大阪湾のときに比べてかなり大きいためであると考えられる。つまり、海上空港を設置することによる流れの変化は、地形や設置場所、海上空港の規模等によって大

Fig. 10 Tidal residual current of Tokyo Bay with a floating airport at the depth of 1 m and 5 m

きく異なってくるといえよう。

4. 結 言

本研究では、湾内に海上空港を建設した場合に、埋立式と浮体式の海水流動へ及ぼす影響の差違を多層モデルによる数値計算によって検討した結果、以下のようなことがわかった。

- 埋立式海上空港に比べて浮体式海上空港は流れに対する影響が少ない。
- 海上空港を湾内の潮流が弱い場所に設置したときには、潮流に対する影響は局所的なものを除いてそれほど大きくない。
- 海上空港を浮体式にしたときにその下の流れがよどむかどうかは、地形や設置場所、海上空港の規模によ

て異なるので、個々の場合に検討が必要である。

本研究では、主に潮流の変化に注目して検討を行ったが、湾の環境への影響という観点からみると、吹送流や密度流、さらには物質の拡散の仕方の変化等も調べる必要がある。また、海上空港のモデル化が適当であるかの検証も実海域での観測と合わせて行う必要がある。特に浮体の下面の摩擦の影響や、係留施設などの影響をどのように評価するかは今後の検討すべき課題である。

本研究に際して、東京大学大学院の濱田孝治君に貴重なデータを頂いたことを記して感謝します。おわりに、本研究は文部省科学研究費補助金（試験研究 B）を受けて行われたことを申し添えます。

参 考 文 献

- 1) 山田弘康：横浜川崎空港（T・WAX）、横浜市政調査会、新しい横浜、Vol. 5（1991）
- 2) 日本造船工業会 海上空港対策特別委員会 技術部会：関西国際空港計画に関わる浮体工法の安全性と経済性について、1979
- 3) 宝田直之助：超大型海洋構造物のテクノロジー・アセスメントの一例（その 1～10）、日本造船学会誌、昭和 57 年 8 月～58 年 10 月
- 4) 安藤定雄、大川豊、上野勲：浮体工法による海上空港建設に係わる評価のための技術調査研究、船舶技術研究所報告別冊、第 4 号、昭和 58 年 3 月
- 5) 日本海難防止協会：浮体構造物に係る環境影響評価技術指針に関する調査研究、平成 3 年 3 月
- 6) 藤野正隆、影本浩、多部田茂、濱田孝治：潮汐潮流シミュレーションにおける無反射境界の有効性について、日本造船学会論文集、第 175 号、（1994）、pp 161-169
- 7) 藤野正隆、多部田茂：多層モデルによる海水流動の数値解析、日本造船学会論文集、第 170 号、（1991）、pp 379-393