

3次元境界要素法による地面上を移動する物体周りの流れ解析

菊地勝浩* 元栄文則** 柳澤三憲***

Analysis of Flow-field around a Moving Body on the Ground using the Boundary Element Method

by

Katsuhiko KIKUCHI, Fuminori MOTOE, Mitsunori YANAGIZAWA
Science University of Tokyo

ABSTRACT

Analysis of pressure change generated by an object passing over the ground was made using the three-dimensional boundary element method. At first, a simple fluid dynamic model is conceived to understand the characteristics of the pressure change. Numerical results are compared with the results of simulation using the simple dynamic model to confirm the validity of the numerical simulation. At the next stage with an aim of grasping the influence of the physiognomy exercised on the pressure change at the passage of the body, calculation was made with respect to four types of physiognomy, i.e. level land, fill-up ground, half-fill-up ground, and cutting. Thus qualitative characteristics have been obtained.

1. はじめに

最近の地上交通機関の速度向上にともない、これまであまり問題とならなかった空力的な現象が、いろいろ研究されている。その一つに、列車が高速で明かり区間（トンネル以外の区間）を通過する時に生じる、圧力変動が注目されている^[1]。物体が移動するとその周りには圧力場が発生するが、この圧力場は物体とともに移動するため、地上で観測していると圧力変動として観測される（図1）。この圧力変動は、付近の家屋の建具を振動させるなどの環境問題を引き起こしつつある。

地面上を物体が移動すると、物体周りに生じる流れは地面の影響を受ける。航空機の場合この現象は、地面効果としてよく知られており、これまでも広く研究されている。また、自動車の分野でも、粘性抵抗低減の観点から地面効果を入れた研究が行われている。しかし、物体通過時の圧力変動の解析例はほとんど見あたらない。そこで、本報告では、地面上を通過する物体によって生じる圧力変動を、3次元境界要素法を用いて解析を行った。数値計算を行うに先立って、数値計算結果の妥当性を判断するため、流体力学モデルの定式化を行い、これと数値計算結果との比較を行った。このときの地面は、無限に広がる平面を仮定した。

* 東京理科大学大学院

** 東京理科大学元卒研究生

*** 東京理科大学理学部

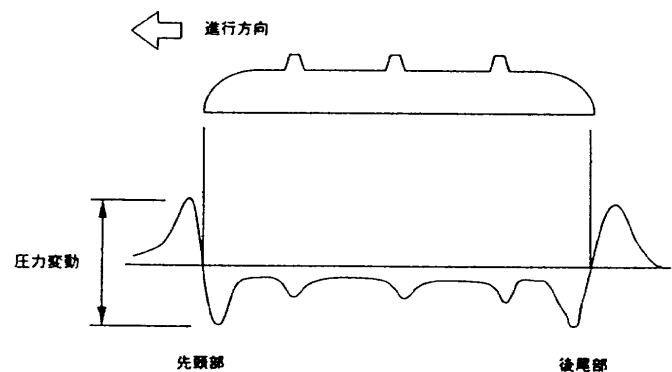
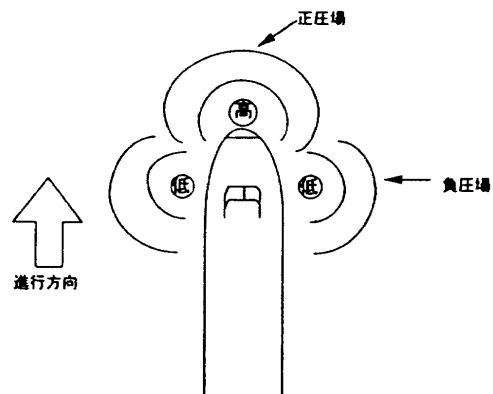


図1 移動物体周りの圧力分布と物体通過時の圧力変動

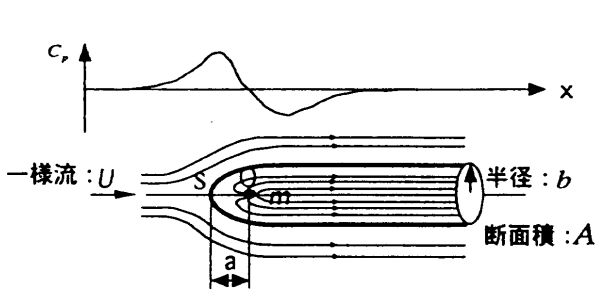


図2 一様流中にあるわき出しによる流体力学モデル

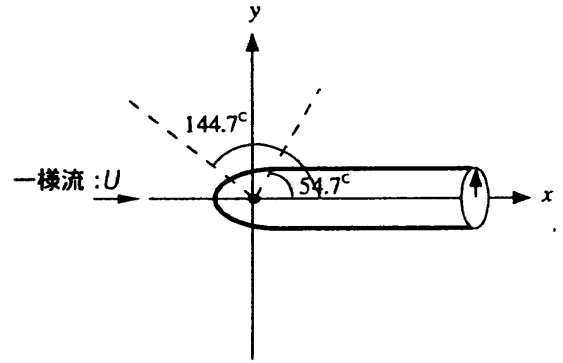


図4 圧力変動波形が最大となる位置

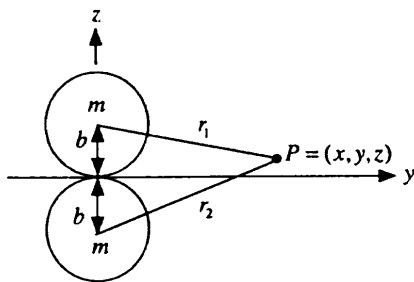


図3 鏡像法による地面効果の表現

航空機の地面効果を解析する場合、地面とはおもに滑走路などの平面に近い形状の地形であるが、地上を移動する交通手段の場合、平面地形だけではなく、盛土、切土、高架橋など様々な地形上を移動することになる。この地形によって、物体周りの圧力場も影響を受けるであろうことは、容易に予想される。そこで、地面上を移動する物体周りの流れに対する、地形の影響に関して計算を行い、その定性的特性を明らかにした。

2. 物体通過時の圧力変動の流体力学モデル

初めに数値計算の妥当性を確認するため、流体力学モデルを考え、数値計算結果とこの流体力学モデルとの比較を行う。そこで、ここではまず流体力学モデルの定式化を行う。細長い物体が移動するときの流れは、流体力学的には図2に示すように一様流中にある一点のわき出しによって近似的に表現できる。また、地面の効果を取り入れるには、鏡像法を用いればよい(図3)。すなわち、原点Oから高さ b 、 $-b$ の位置にわき出しがあり、一様流は x 軸に平行で速度が U であるとすると、流れを表す速度ポテ

ンシャル Φ は

$$\Phi = Ux - \frac{m}{r_1} - \frac{m}{r_2} \tag{1}$$

によって表される[2]。第1項が一様流を、第2項がわき出し、第3項がわき出しの鏡像である。ここで、 m : わき出しの強さ、 r_1, r_2 : それぞれのわき出しが置かれている位置と流れを求めると点Pを結んだ距離である。流速 $u = (u, v, w)$ は速度ポテンシャルを空間に関して微分することで得られる。また、圧力係数 C_p はBernoulliの式から求められる。ただし、 b は移動物体の最大断面積 A より $b = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ とする。また、わき出しの強さ m と、わき出し点とよどみ点の距離 a はそれぞれ、

$$m = \frac{b^2 U}{4}, \quad a = \frac{b}{2} \tag{2}$$

となる。

物体から横方向に y だけ離れた位置での、 x 方向の圧力分布を考える。この圧力分布は、移動する物体から見ると一様流中を移動する物体周りに出来る圧力分布であるが、地上から見ると静止流体中を物体が移動するときを観測される圧力変動となる。地面上 ($z=0$) でこの圧力変動波形を考えると

$$C_p = -\frac{4mx}{U} \frac{1}{r_1^3} \tag{3}$$

となる。この式より $x < 0$ の領域で正圧が、 $x > 0$ の領域で負圧が生じ、 $x=0$ の位置で圧力が0となることが分かる。圧力変動波形の最大振幅の発生する位置は、

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{y^2 + b^2}}{x} = \pm \sqrt{2} \tag{4}$$

となり、図4の $\theta = 54.7^\circ$ の線上に負圧のピークが、また $\theta = 144.7^\circ$ の線上に正圧のピークが来ることがわかる。すなわち、圧力変動の正圧と負圧のピーク

の間隔は、物体から離れるにつれて広がっていく。圧力変動の最大値は最大振幅の発生する位置の座標を式(3)に代入して、

$$(C_p)_{\max} = \mp \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{b^2}{y^2 + b^2} \quad (5)$$

となる。通常考える範囲内では $(b/y)^2 \ll 1$ なので、圧力変動の最大値は物体からの距離の2乗に反比例して小さくなる。

圧力は圧力係数に動圧をかけて、

$$p = \mp \frac{\rho A U^2 \cos \theta}{2\pi r_1^2} \quad (6)$$

となる。移動物体によって生じる圧力は、一様流中のわき出しで近似出来る場合、移動する物体の最大断面積に比例し、物体の移動速度の2乗に比例することが分かる。逆に言うと、地面上で観測される圧力は物体の移動速度が決まると、移動する物体の最大断面積だけで決定されることになる。

3. 数値計算法

実際に地面上を移動する細長い物体周りの流れは、図5のように大きく3つに分けられる。すなわち、先頭部付近のわき出し流、中間部の境界層流、後尾部の後流である。物体通過時の圧力変動は、おもに先頭部と後尾部で観測される。しかし、後尾部の圧力変動は、はく離の影響を受けて先頭部でのそれより小さな値となる。したがって、物体通過時の圧力変動の最大値は、先頭部が通過するとき観測される。この部分の流れは、ポテンシャル流として近似出来る。2ではこの部分の流れを一様流中にあるわき出しで近似した。しかし、わき出しだけでは実際の物体の形状の効果は取り入れることが難しい。そこで、この部分の流れがポテンシャル流として扱えること、さらに物体の形状を忠実に表現することができること等を考慮に入れ、ここでは3次元境界要素法を用いて解析を行うことにした。

流れを、非圧縮、非粘性、非回転とする。流れは非圧縮であるから、連続の式は擾乱速度ポテンシャル ϕ に対して Laplace の方程式となる。

$$\Delta \phi = 0 \quad (7)$$

式(7)に次のGreen関数を適用する。

$$\Delta G = -\delta(x-x_1, y-y_1, z-z_1) \quad (8)$$

ここで、 δ は Dirac の δ 関数である。式(7)と式(8)を組み合わせ、さらに Green の公式を用い若干の変形を行った後、式(8)の解である $G = \frac{1}{4\pi r}$

を代入する。擾乱速度ポテンシャル ϕ に対する内部積分方程式は

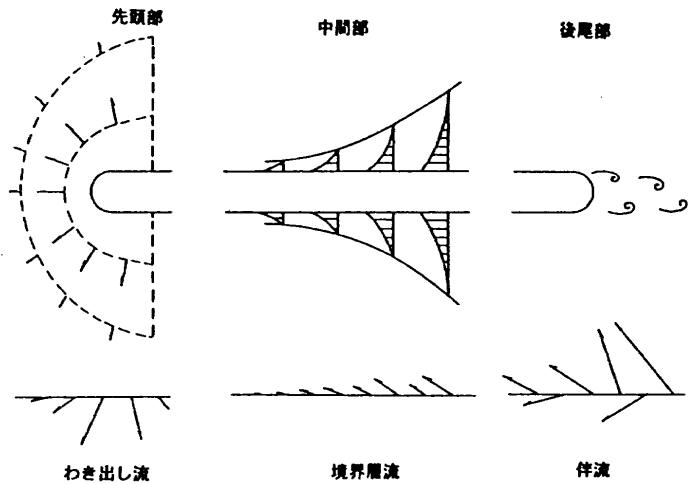


図5 細長い移動物体周りの流れの様子

$$\begin{aligned} \phi(P) - \frac{1}{2\pi} \int_{S_b} \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n(Q)} \frac{1}{r(P,Q)} dS \\ = -\frac{1}{2\pi} \int_{S_b} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n(Q)} \frac{1}{r(P,Q)} dS \end{aligned} \quad (9)$$

$$r(P,Q) = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$$

で与えられる。ここで、 r は選点 $P(x_1, y_1, z_1)$ と積分点 $Q(x, y, z)$ との間の距離、 S_b は物体表面を表す。

境界条件として次式を課す。

B.C.1: 流れは物体表面 S_b に沿って流れる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{U \cdot n}{U} \quad (10)$$

B.C.2: 流れは無遠点で一様流と等しくなる。

$$\phi = 0 \quad (11)$$

ここで、 U は一様流の速度ベクトル、 n は物体表面に立てた外向きの法線ベクトルである。

擾乱速度ポテンシャル ϕ を未知数としてこの積分方程式を解けば流れ場が決定される。ここでは、Morinoの方法^[3]にしたがい、物体表面を四角形要素で分割し、各要素上の変数 ϕ 、 n は要素の中心における値で代表させ、要素内での分布は一定と仮定し、離散化を行う。この方法により物体表面 S_b 上の擾乱速度ポテンシャル ϕ は要素の分割数 N に分割されて、次の連立一次方程式が得られる。

$$[\delta_{nk} - C_{nk}] \{\phi_k\} = -[B_{nk}] \left\{ -\frac{U \cdot n_k}{U} \right\} \quad (12)$$

ここで、 δ_{nk} は Kronecker のデルタである。空力的影響係数 C_{nk} と B_{nk} は Morino によって解析的に求められている^[3]。

こうして得られた擾乱速度ポテンシャル ϕ を空間に関して微分し、速度を求め、さらに Bernoulli の定理から圧力を計算する。物体上での微分は柳澤の方法^[4]を用い、空間上での微分は Suciu の方法^[5]で行う。

4. 計算結果

4.1 流体力学モデルとの比較

はじめに数値計算の妥当性を確認するため、流体力学モデルとの比較を行う。比較は図6に示す3種類のモデルに関して行った。無次元化は次のようにしている。

$$\text{時間} : \frac{t}{(L/U)}$$

$$\text{圧力} : C_p = \frac{p - p_{atm}}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

ここで、 t : 時間、 L : 代表的長さ1m (通常、環境問題では代表的長さとして地上構造物に関する量をとるが、ここでは、地上側に適当な代表的長さが無いので L として1mとした)、 U : 一様流速、 C_p : 圧力係数、 p : 圧力、 p_{atm} : 大気圧、 ρ : 密度である。

モデルの全長は400とした。流体力学モデルとの比較を行うとき、数値計算での地面の効果は鏡像法を用いることで取り入れた。各モデルの最大断面積 A 、およびこれから計算される半径 b 、よどみ点位置 a 、わき出し強さ m は表1のとおりである。

表1 流体力学モデルの各値

	A	b	a	m
Model 1	13.2	2.05	1.03	1.05
Model 2	11.5	1.91	0.955	0.912
Model 3	10.9	1.86	0.930	0.865

図7に圧力変動の最大値の距離減衰を示す。Model 2とModel 3については流体力学モデルの結果と数値計算の結果が良く一致している。Model 1に関しては、物体から離れている部分では両者はよく一致しているが、物体に近づくと数値計算結果が流体力学モデルの値より小さくなっている。これは、Model 1の先頭部形状がほかのModel 2やModel 3と比較して、横方向からの絞りが小さく、くさび形の形状となっており、流れが上方に跳ね上げられ横方向への流れが少なくなっているためと考えられる。このことから、物体から離れた位置での圧力変動を検討の対象にする場合は、流体力学モデルで評価が可能であるが、物体に近い部分での圧力変動を考慮する場合は、物体の形状を正確に取り込める手法で解析する必要があると言える。

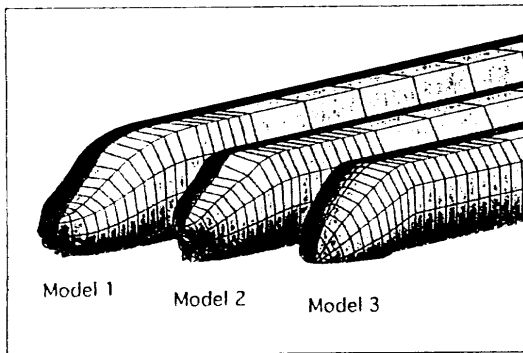


図6 流体力学モデルと数値計算結果の比較用の数値モデル

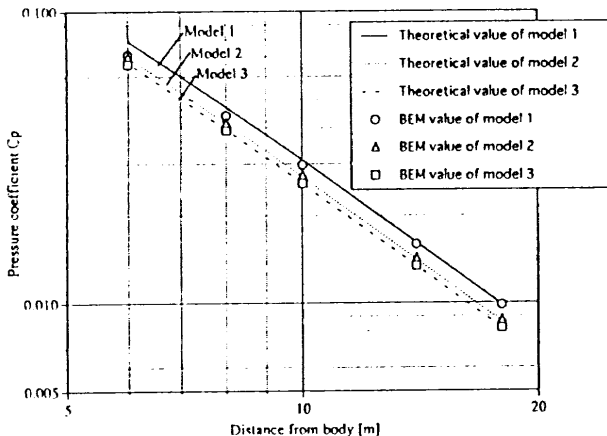


図7 流体力学モデルと数値計算による圧力変動の最大振幅の距離減衰

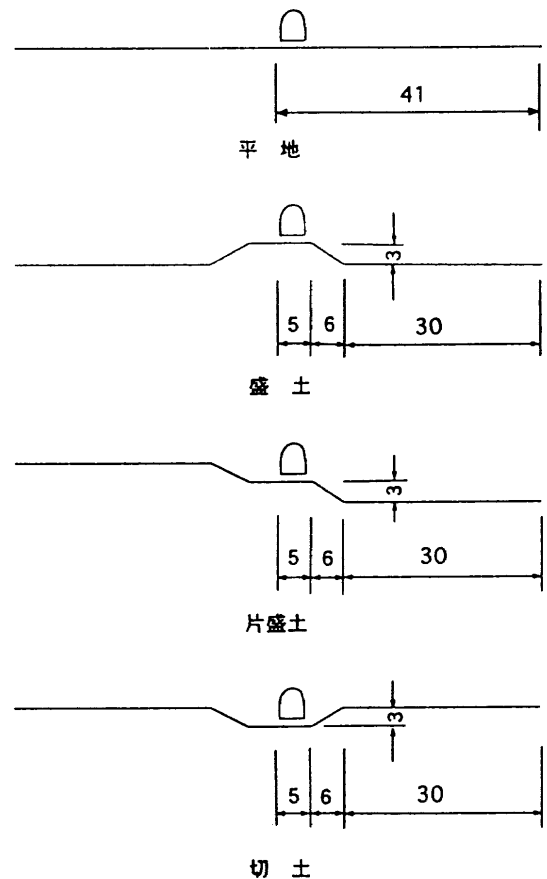


図8 計算に用いた地形

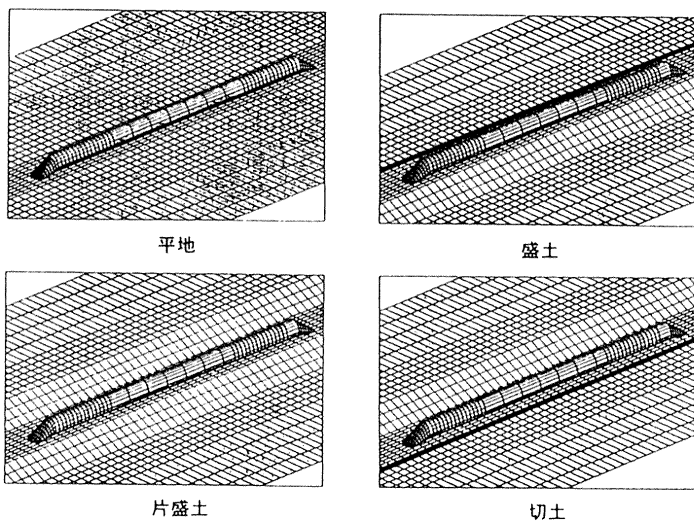


図9 地形を考慮に入れた数値モデル

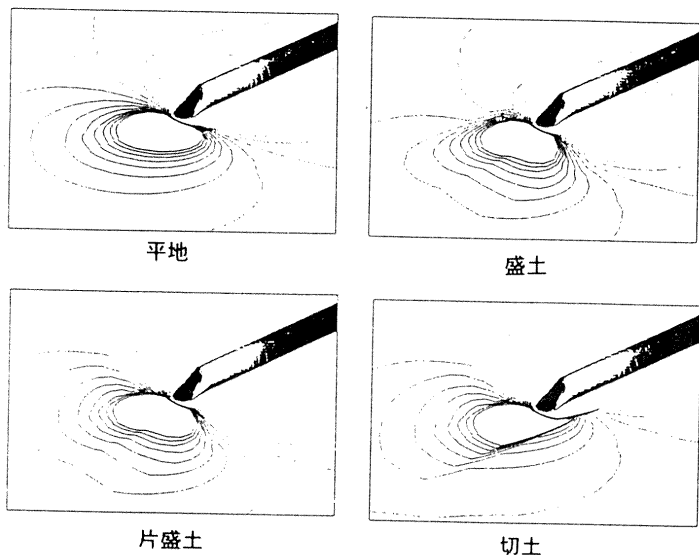


図10 物体上および地面上の圧力分布

4.2 地形の効果

次に、物体通過時の圧力変動に対する、地形の効果について検討する。地面の効果を取り入れるとき、無限に広い平地を表す場合には、鏡像法を用いればよいが、他の地形については鏡像法では難しい。そこで、ここでは地面の効果を取り入れるため、地面上にもパネルを張った。

地形は図8に示すように、平地、盛土、片盛土、切土の4種類について計算を行った。圧力の測定点は、切土以外は施工基面（モデルが置かれている平面）を基準に、また切土はのり面を上がった位置での平面を基準とした。

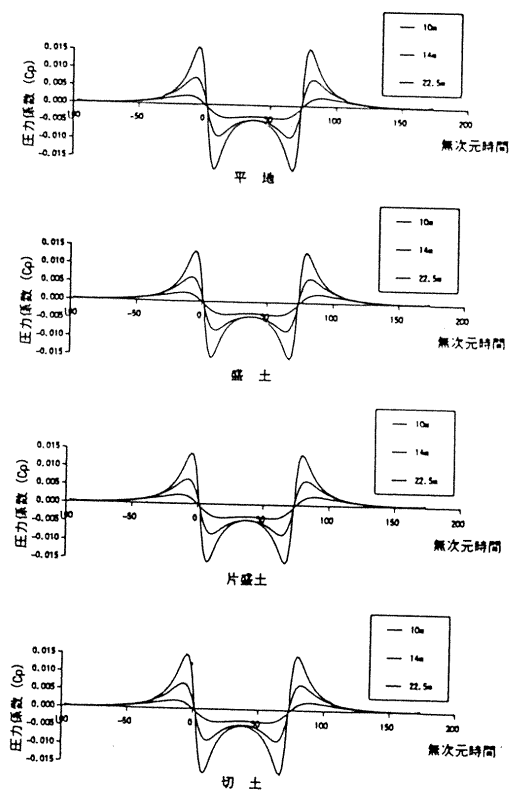


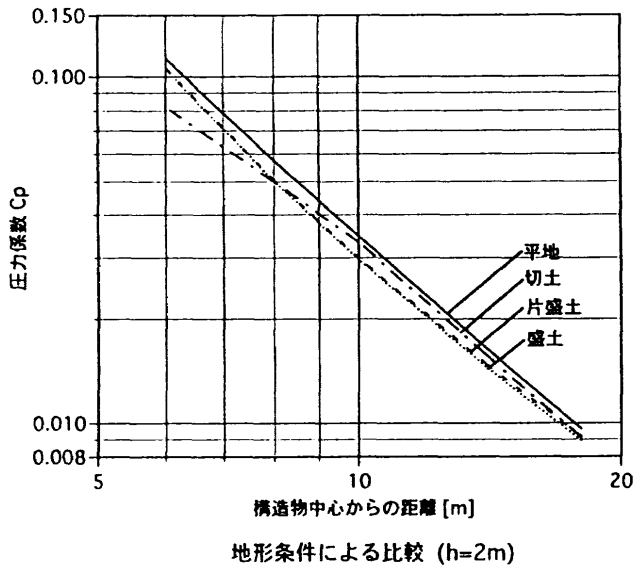
図11 各地形における圧力変動波形

数値モデルを図9に示す。物体先端部の断面積変化部分の長さは5、全長は75、地面板は物体の先端部と後尾部にそれぞれ100つけ加えている。地面板の横方向の長さは片側41とした。

物体上および地面上での圧力分布を図10に示す。物体先端部で正圧が、また物体の肩部で負圧が生じているのが分かる。この先端部の場合、正圧場と負圧場の境はほぼ物体の先端部から左右に伸びている。

地面板中心からの距離が、10、14、22.5の位置での圧力変動波形を図11に示す。どの地形でも先端部で正・負圧が、後尾部で負・正圧が生じている。正圧と負圧のピークを比較すると負圧のピークがやや大きい。中間部は先端部と後尾部がもっと離れていると0に近づくが、今回のモデルの長さでは0とはなっていない。また、当然ではあるが、どの地形でも物体から離れるにつれて圧力変動のピーク値が小さくなっている。

圧力係数最大振幅（p-p値）の距離減衰を図12に示す。前に述べた流体力学モデルを使うと、圧力係数最大振幅の距離減衰は距離のほぼ2乗で減衰する。図を見ると平地の場合、約2乗で減衰していることがわかる。それに対して、平地以外の地形の場合は、物体から離れた位置では平地の曲線と同じ傾きとなっているが、物体に近づくにしたがい、盛土や片盛土では、圧力の測定点に地面が近づいて来るため圧力



地形条件による比較 (h=2m)

図12 各地形における圧力係数最大振幅の距離減衰

係数が大きくなり、逆に切土では圧力の測定点から地面が遠ざかるため圧力係数が小さくなり、距離減衰が2乗に従わなくなっている。地形中心から10より離れた位置での最大振幅の大きさは、地面の効果により、平地、切土、片盛土、盛土の順番になっている。切土では物体が置かれている部分がチャンネル状になっているため、流れが他の地形より早くなり一番大きな圧力係数が得られるとの予想があったが、計算結果を見るとそのような状況にはなっていない。

次に各位置での高さ方向の圧力係数の分布を図13に示す。移動物体は約4の高さを持ち、高さ2付近で横方向に一番大きな膨らみを持っている。圧力係数の分布を見ると、物体に近い地面中心から6の位置では、物体形状のような圧力分布となり、高さ2の辺りで一番大きな値となり、それより低いところや高いところでは圧力係数が小さくなっていく。それに対して、地面中心から14離れた位置での分布を見ると、ほぼ高さ方向に一定の圧力係数の分布となっている様子が見られる。分布の様子は、平地、盛土、片盛土はほぼ同様の分布となっている。それに対して、切土は物体に近い位置で、他の3つの地形とは異なった分布となっているように見える。しかしこれは、切土の場合高さを測っている基準が3だけ高い位置からとっているため、このことを考慮すると図のような傾向を示すのもうなづける。切土の場合も物体から離れた位置では、高さ方向にほぼ一定の分布となっている。

5. まとめ

以上、物体通過時の圧力変動を3次元境界要素法を用いて解析した。解析を行うに際して、はじめに、

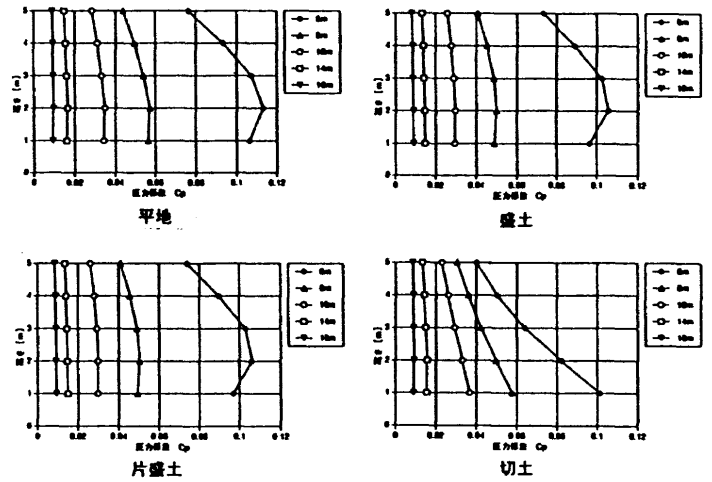


図13 高さ方向の最大振幅の分布

数値解析法の妥当性を確認するため、流体力学モデルの定式化を行い、これとの比較を行った。その結果、物体から離れた位置では流体力学モデルと数値解析結果がよく一致した。また、物体に近いところでは、数値解析では物体の形状による効果も捕らえられていることが分かった。

つぎに、物体通過時の圧力変動に対する地形の効果を見るため、平地、盛土、片盛土、切土の4種類の地形に関して解析を行った。その結果、物体通過時の圧力変動に対する、地形の効果の特性が明らかとなった。

最後に本研究を進めるにあたり、(財)鉄道総合技術研究所空力・騒音のみなさまから貴重な助言と示唆を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]前田達夫、鉄道総研報告 Vol.10 No.2、1996
- [2]今井功、流体力学(前編)、裳華房(1973)
- [3]L.Morino, L.T.Chen and E.O.Suciu, AIAA Journal Vol.13 No.3 March (1975)
- [4]柳澤三憲、菊地一雄、航空宇宙技術研究所報告、TR-724(1982)
- [5]E.O.Suciu and L.Morino, AIAA Paper 76-64, 1976