

安定成層場で地形効果により発生する 局地強風の数値的検討

Numerical study of topographically-induced local severe winds in stably stratified fluid

内田孝紀*・大屋裕二**
Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

* 工博 九州大学非常勤研究員 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

** 正会員 工博 九州大学教授 応用力学研究所 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

Stably stratified flows past a two-dimensional hill in a channel of finite depth are analyzed numerically by using a Direct Numerical Simulation (DNS) with a third-order upwind difference scheme at $Re=2000$. To simulate the flow around the hill with high accuracy, a collocated grid in curvilinear coordinates is employed. Attention is focused on the occurrence of local severe winds which are induced downstream of the hill. A strong wind area with a wind speed greater than 1.29-2.21, which represents a ratio of the local streamwise wind speed to the uniform approaching one of $U=1$ in the non-dimensional unit, is caused by the downward flow in the lee wave motion and is located near the first trough behind the hill. A few factors which have an effect on the generation of local severe winds are also discussed.

Key Words : stably stratified flow, two-dimensional hill, local severe wind, DNS, finite-difference method, collocated grid

1. 序論

大気境界層では一般に鉛直方向に密度が変化する成層状態にあり、夜間などに現れる流れは上空にいくほど密度が小さくなる安定成層流である場合が多い。この安定成層した流れが地形を過ぎる場合には、負の浮力が作用し様々な波動現象や流動現象が出現する。特に地形上方に内部重力波を反射し得る大気層(蓋)が形成された状況では、地形により励起された内部重力波のエネルギーはこの大気層と地表面の間に捕捉されて地形周囲流に大きな影響を与える。

著者らはこれまで有限深さ流路内の2次元丘陵地形を過ぎる安定成層流に関して、差分法に基づいた直接数値シミュレーション(DNS)とラージ・エディ・シミュレーション(LES)を行ってきた¹⁻⁵⁾。これらの研究では丘陵地形周辺に出現する非定常流れと強弱の循環を有し地形上流へ伝播するじょう乱波動の挙動との関係を解明し¹⁻⁵⁾、地形背後の非定常な剥離・再付着流れに対する安定成層の効果をも明らかにした⁵⁾。また丘陵地形周辺の非定常流れ

に影響を与える諸要素の検討も行った¹⁻⁴⁾。

2次元的な丘陵地形や山脈地形の周辺に出現する波動現象や流動現象は強風時の風環境問題としても重要である。特に地形効果と安定成層した流れが重畳した状況において発生する局地的強風現象は、おろし風などがもたらす地形性強風災害に関連し、これまでに様々な方面から研究や報告が行われてきた⁶⁻⁸⁾。しかし、境界条件や成層度の変化を考慮した数値的研究はほとんど報告されていない。そこで本研究では安定成層場で地形効果により発生する局地的強風を種々の条件で精度良く予測し、こうした状況における強風特性を把握することを目的とした。この目的に対し、大気境界層中に現れる密度成層流の最も基本的な状況である2次元丘陵地形を過ぎる安定成層流のDNSを行った。特に強風域において丘陵地形への一様近寄り流れに対してどの程度流れが増速されるのかを調べ、また強風域が発生する成層度や地形周辺状況について検討した。

2. 流れの支配方程式と数値計算法

有限深さ流路内の2次元丘陵地形を過ぎる安定成層流を考える。但し、流れの非圧縮性と密度の非拡散を仮定し、またBoussinesq近似を用いる。計算領域は図-1に示すようにx-z平面とし、地形高さをhとして水平方向に $L_x=500h$ 、鉛直方向に $L_z=6h$ とする。ここで、xは主流方向、zは鉛直方向を意味する。特に地形上流へ伝播するじょう乱波動の流入境界への到達を遅らせるために、地形上流は420hと非常に長く設定する。地形形状は式(1)で記述されるコサイン形状とする。

$$h(x) = 0.5 \times \{1 + \cos(\pi x/a)\} \quad (1)$$

但し、その範囲は $|x| \leq a$ であり、パラメータaは1とする。丘陵地形から十分上流において鉛直方向に線形な勾配($d\rho_B/dz=-1$)を有する基本密度場 ρ_B を考え、これに静水圧平衡で対応する基本圧力場を p_B とする。

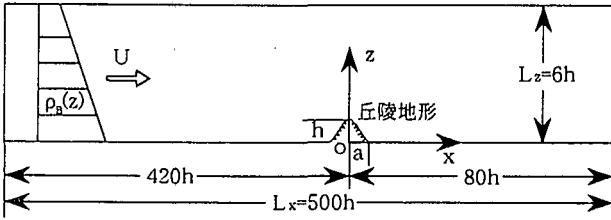


図-1 計算領域と座標系

本研究の未知数 u_i ($u_1=u$, $u_3=w$), $\rho' (= \rho - \rho_B)$, $p' (= p - p_B)$ に対する流れの支配方程式は、連続の式、Navier-Stokes方程式、密度方程式であり一般曲線座標系では以下のように記述される。但し、無次元形とし基本場からのずれを表すプライム(')は省略する。

$$\frac{1}{J} \left[\frac{\partial (JU^j)}{\partial \xi^j} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[(JU^j) \frac{\partial u_i}{\partial \xi^j} \right] = - \frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial \xi^j} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_i - \frac{\rho \delta_{i3}}{Fr^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[(JU^j) \frac{\partial \rho}{\partial \xi^j} \right] = w \quad (4)$$

物理速度成分 u_i と反変速度成分 U^j には以下の関係がある(重複する添字には総和規約が適用される)。

$$U^j = \frac{\partial \xi^j}{\partial x_i} u_i \quad (5)$$

座標変換のヤコビアンJは以下になる。

$$J = \left| \frac{\partial x_i}{\partial \xi^j} \right| \quad (6)$$

式(3)の無次元パラメータRe, FrはReynolds数($= \rho_0 U h / \mu$), Froude数($= U / N h$)である。ここで、 ρ_0 は参照密度、Nはプラントバイサラ振動数で $N^2 = -(g / \rho_0) (d\rho_B / dz)$, gは重力加速度、 μ は粘性係数である。また計算対象が有限な流路深さ L_z を有するので、 L_z を含む無次元成層パラメータ $K (= N L_z / \pi U)$ が境界条件を含んだ支配パラメータとして存在する。このKにより地形周囲流は特徴付けられるので、Kを用いて計算結果を整理する。

本研究では安定成層流に特有な数値的不安定を回避し、かつ高精度な数値解を得るためにコロケート格子を用いて差分解析を行った。なお、本解析手法は過去のもの¹⁻⁵⁾と比べて計算結果に違いはみられなかった。図-2に示すように、コロケート格子では物理速度成分 u, w 、圧力 p 、密度 ρ を計算格子のセル中心に定義し、反変速度成分 U, W にヤコビアンJを乗じた物理量 JU, JW をセル界面にスタッガード配置する。

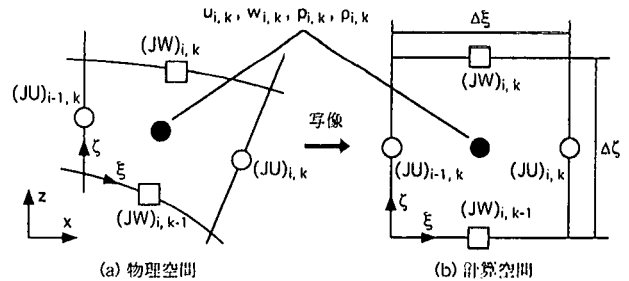


図-2 一般曲線座標系のコロケート格子

計算アルゴリズムはEulerの1次陽解法に基づいたFractional Step法⁹⁾である。圧力のPoisson方程式はSOR法により解き、空間項の離散化については式(3)、式(4)の対流項を除いてすべて2次精度中心差分とした。式(3)、式(4)の対流項については補間法¹⁰⁾に基づいた4次精度中心差分(4点差分、4点補間)にKawamura-Kuwaharaスキーム¹¹⁾タイプの4階微分の数値粘性項を付加した3次精度風上差分とした。計算手順は以下に示す通りである。

- 1) 式(3)を2つに分けてセル中心において対流項、粘性項、浮力項を求め、物理速度成分 u, w の中間値 u^*, w^* を予測する。
- 2) 式(5)を用いてセル中心における u^*, w^* を反変速度成分 U^*, W^* に変換する。式(6)で求めたヤコビアン J を乗じ、 JU^*, JW^* としてセル界面にスタガード配置する。
- 3) JU^*, JW^* が式(2)を満足するように新たな時間ステップ $n+1$ の圧力 p^{n+1} をPoisson方程式からSOR法で反復計算して求める。
- 4) 新たな時間ステップの $u^{n+1}, w^{n+1}, JU^{n+1}, JW^{n+1}$ は u^*, w^*, JU^*, JW^* を p^{n+1} によって修正する形として求める。
- 5) 最後に $w^{n+1}, JU^{n+1}, JW^{n+1}$ を用いて新たな時間ステップの密度 ρ^{n+1} を求める。

図-3に地形近傍の計算格子を示す。計算格子は主流方向(x)と鉛直方向(z)に 501×101 点の解像度を有し、地形頂部の格子幅は $0.003h$ である。

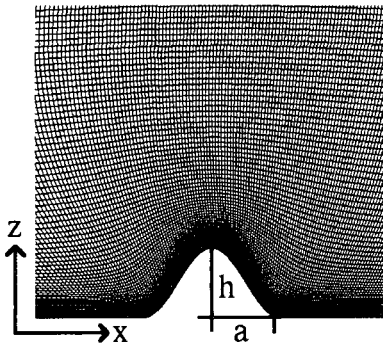


図-3 地形近傍の計算格子

図-4に境界条件を示す。まずより単純化した状況にある地形周辺流れを調べるために、丘陵地形の表面にのみ粘着条件を課し、地形を除く上流と下流の地面上には滑り条件を課す。以後、滑り条件ケースと称する。次により現実に近い状況を検討するために地面粘着条件を課して計算を行う。但し、この場合も地形上流には滑り条件を課し、そこに発達する境界層の影響は省略する。以後、粘着条件ケースと称する。計算は $Re=2000$ で非成層流の $K=0$ 、強安定成層流の $K=1.3, 1.5, 2.5$ に対して行う。無次元時間刻みは 0.002 である。

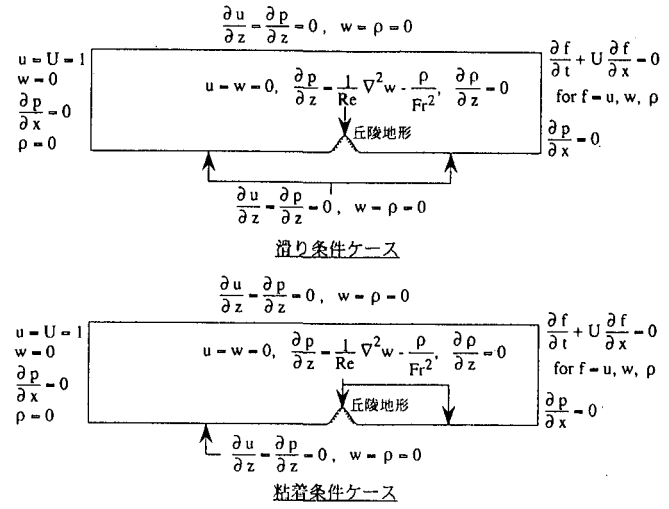


図-4 境界条件

3. 計算結果と考察

3.1 滑り条件ケース(図-5-図-8)

この節では滑り条件ケースの計算結果を示し、それらについて考察を行う。

地形周辺流れの挙動を示す物理量として丘陵地形の抗力係数 C_d を求め、これを図-5に示す。非成層流の $K=0$ では C_d はほぼ一定値を示している。これは地形周辺流れがほぼ定常であることに対応する。但し、地形背後の定在渦のゆっくりとした伸長に伴い C_d はある一定値には収束していない。強安定成層流の $K=1.3, 1.5$ では C_d に周期的振動がみられ、その振動は継続している。これは周期性を有する非定常流れが丘陵地形周辺に出現し、それが持続することを意味する。過去の研究¹⁻⁵⁾で議論したように、この非定常流れは強弱の循環を有し地形上流へ周期的に伝播するじょう乱波動に関連している。詳細な内容については文献¹⁻⁵⁾を参照していただきたい。また成層度 K の増加とともに C_d の振動周期は短くなっている。強安定成層流の $K=2.5$ においては C_d の周期的振動はみられず、複雑な様相を呈している。

図-6に各成層度 K において、地形下流に最も強風が発生する瞬間の地形周辺流れを流線図を用いて示す。但し、図-5に矢印で示した時刻であり、 $K=1.3, 1.5$ は丘陵地形の C_d 極大値に対応する。

K=0では地形背後に定在渦が形成され、それが地形下流へかなり伸長している(図中(ア))。K=1.3, 1.5, 2.5ではどのケースにおいても風下波が地形下流に形成され、成層度Kの増加とともに波長が短くなっている。地形背後の風下波の下降流(図中(*))に伴い定在渦はK=0と比較してかなり小さい。また同時にK=1.3, 1.5では剥離領域(ローター)が地形近傍で流路の上部境界付近に誘起され(図中(イ), (エ)), K=2.5では風下波の碎波領域が地形近傍で流路の中央付近に形成されている(図中(キ))。さらにK=1.3, 1.5, 2.5ともに風下波の上昇流に伴いローターが地形下流の地表面付近に誘起されている(図中(ウ), (オ), (カ), (ク))。K=1.3, 1.5の流路の上部境界付近におけるローターとK=1.3, 1.5, 2.5の地形下流の地表面付近におけるローターの形成位置は、成層度Kの増加、すなわち、風下波の波長が短くなるとともに丘陵地形に近づいている。K=2.5では風下波の碎波領域が地形からかなり下流で流路の中央付近にも明確にみられる(図中(ケ))。

図-7に図-6に対応した主流速度成分 u/U の等値

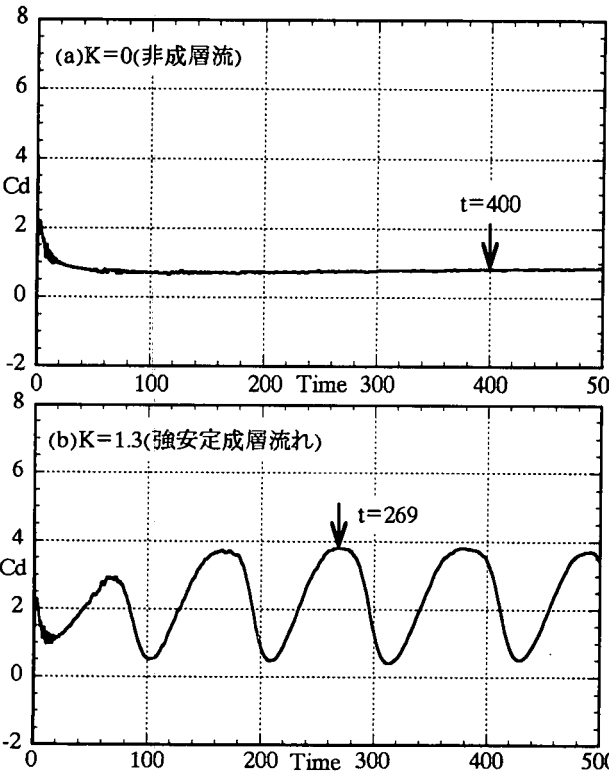
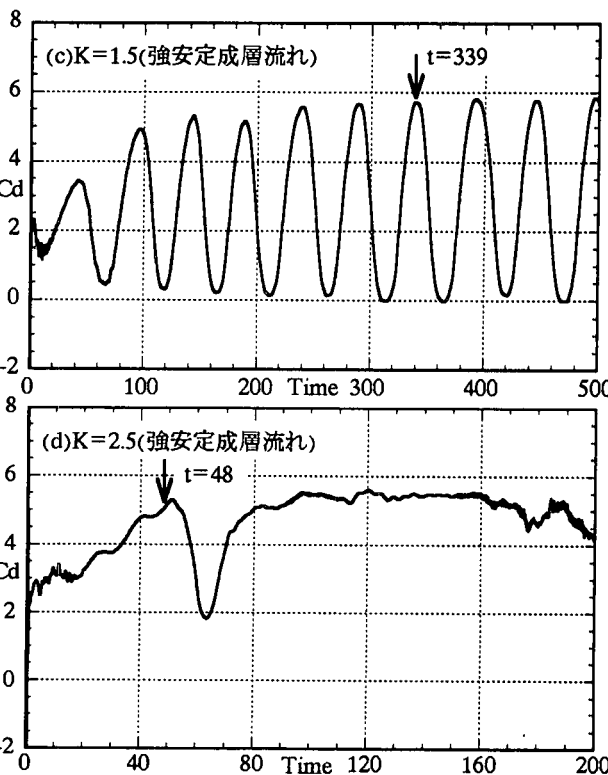


図-5 丘陵地形の抗力係数Cdの時間変化。Re=2000, 滑り条件ケース

線図とその分布を濃淡で示す。これにより丘陵地形下流における強風域の強さとその発生位置がより明確にわかる。ここで、 u と U はそれぞれ局所的な主流速度成分と丘陵地形への一様近寄り流速($U=1$)を意味する。非成層流のK=0では地形背後に形成された定在渦と流路の上部境界の間において流れの増速域($u/U \geq 1.93$)がみられる(図-6(A)に対応)。強安定成層流れのK=1.3, 1.5, 2.5ではどの成層度Kにおいても風下波の下降流に伴い丘陵地形背後の流れは強く加速されている(図-6(*)に対応)。結果としてどの成層度Kにおいても丘陵地形への一様近寄り流速 U の2倍以上の強風域が地形下流の地表面付近に発生している(図-6(B), (C), (D)に対応)。その発生位置はK=1.3, 1.5では地形近傍で流路の上部境界付近に誘起されたローター(図-6(イ), (エ))の下方であり、K=2.5では地形近傍で流路の中央付近に形成された風下波の碎波領域(図-6(キ))の下方である。K=2.5では地形からかなり下流で流路の中央付近に形成された風下波の碎波領域(図-6(ケ))の下方にも強風域($u/U \geq 2.21$)がみられる(図-6(E)に対応)。



強風域の発生位置付近の流速変化を調べるために、強安定成層流れの $K=1.5$ を例にとり地形下流のA点における主流速度成分 u/U の時間変化を図-8に示す。但し、丘陵地形の抗力係数 C_d の時間変化も同図に示す。なお、A点は丘陵地形の中心から下流に $5h$ 、地表面から $0.5h$ の場所であり、地形近傍で流路の上部境界付近に誘起されたローター(図-6(エ))の下方に対応する。図-8において最も注目すべきことは、 C_d の変動と u/U の変動がほぼ同期しているということである。言い換えると、丘陵地形周辺に出現する非定常流れの周期的変化に伴い、地形下流の地表面付近にも流れの周期的変動が生じるということである。特に C_d 極大値では丘陵地形への一様近寄り流速 U の2.5倍以上の強風域が発生している。

以上述べてきた滑り条件ケースに関して、強安定成層流れの $K=1.3, 1.5, 2.5$ における地形周辺流れと地形下流の地表面付近に発生する強風域との関係をまとめると以下になる。どの成層度 K においても風下波の下降流に伴い丘陵地形背後の流れは強く加速される。これに伴い $K=1.3, 1.5$ では地形近傍で流路の上部境界付近にローターが誘起され、 $K=2.5$ では流路の中央付近に風下波の碎波領域が形成される。結果としてどの成層度 K においても丘陵地形への一様近寄り流速 U の2倍以上の強風域が地形下流の地表面付近、すなわち、ローター($K=1.3, 1.5$)や碎波領域($K=2.5$)の下方に発生する。 $K=1.5$ では丘陵地形周辺に出現する非定常流れの周期的変化に伴い、地形下流の地表面付近にも流れの周期的変動が生じる。

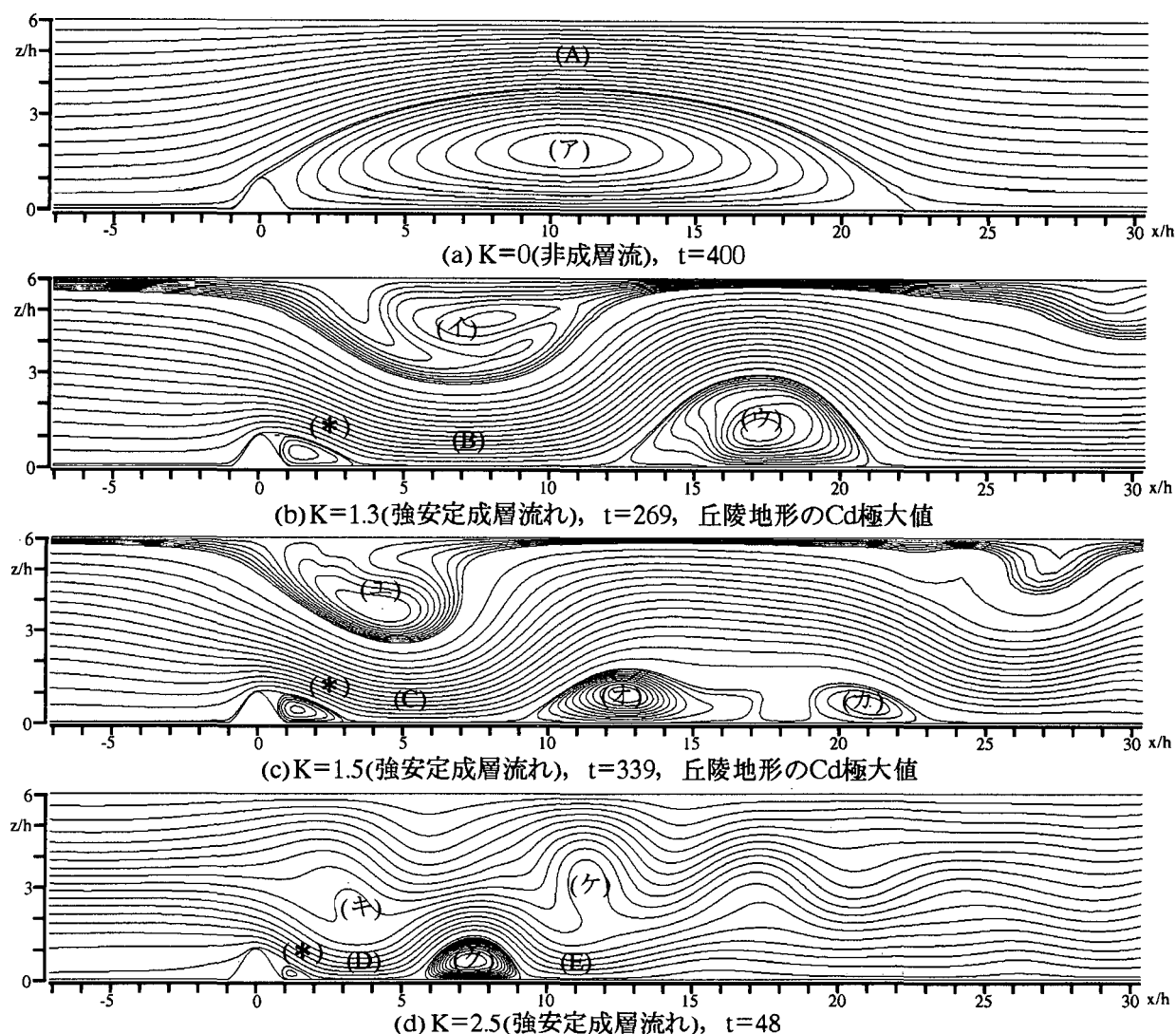


図-6 地形周辺流れ(流線図). $Re=2000$, 滑り条件ケース

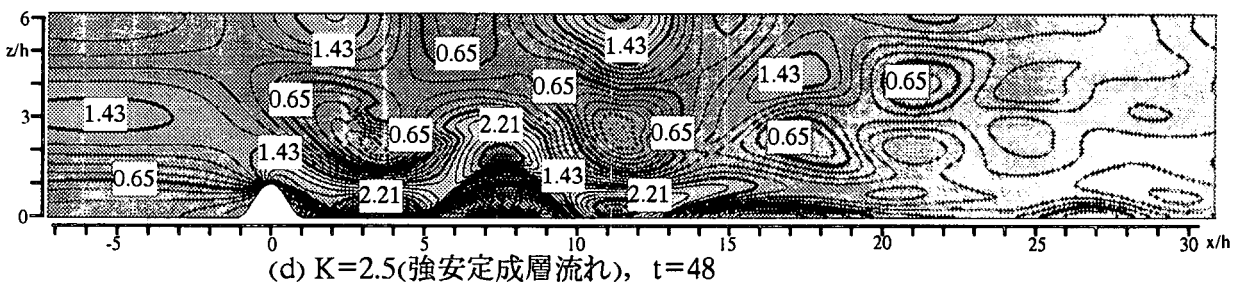
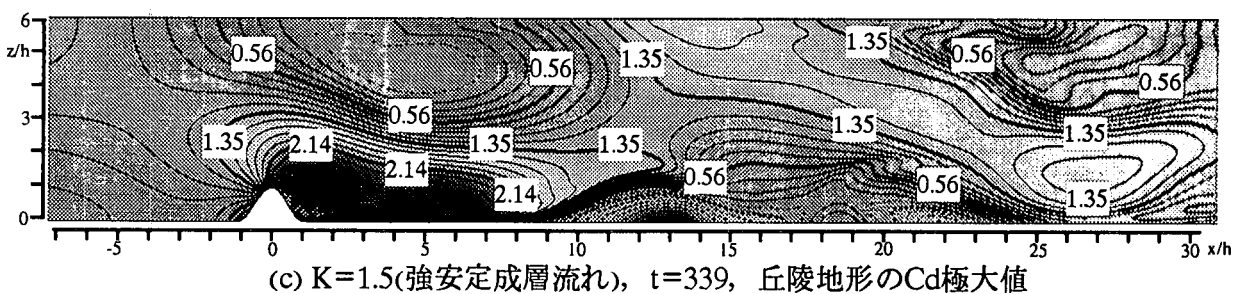
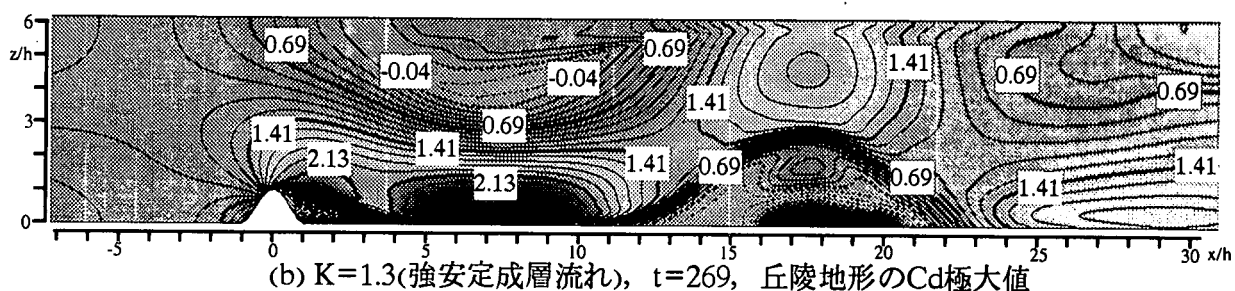
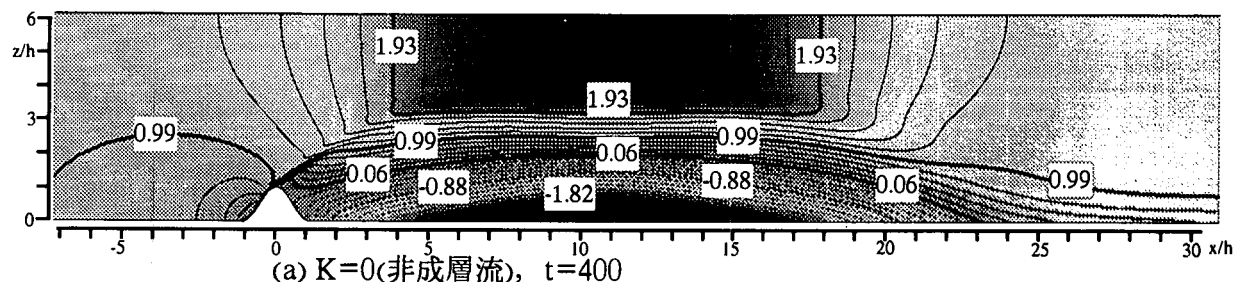


図-7 図-6に対応した主流速度成分 u/U の等値線図とその分布. $Re=2000$, 滑り条件ケース

3.2 粘着条件ケース(図-9-図-12)

この節では粘着条件ケースの計算結果を示し、それらについて考察を行う。

滑り条件ケースと同様、丘陵地形の抗力係数 C_d を図-9に示し、地形周辺流れを概観する。非成層流の $K=0$ では滑り条件ケース(図-5(a))と違って C_d に短周期振動が継続してみられる。これは地形背後に形成された再循環領域(剥離バブル)から大規模渦が周期的に地形下流に放出され、その渦放出が持続することを意味する。また C_d 変動にみられる歪は地形背後の剥離バブルの中に誘起された2次渦の影響である⁵⁾。強不安定成層流れの $K=1.3, 1.5$ においても $K=0$ と同様な短周期の C_d 振動が継続してみ

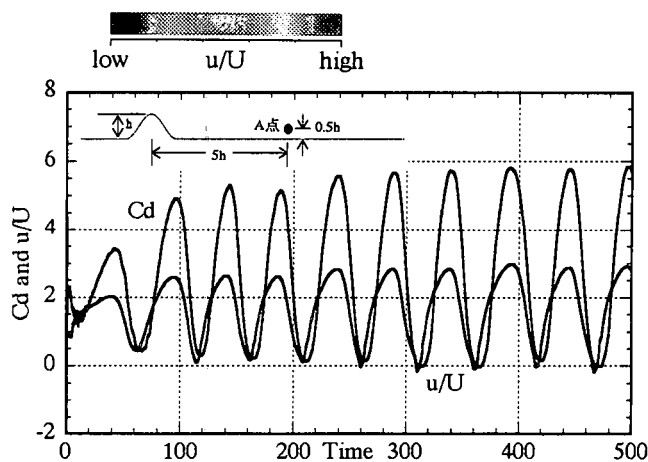


図-8 丘陵地形の抗力係数 C_d とA点における主流速度成分 u/U の時間変化. $Re=2000$, $K=1.5$ (強不安定成層流れ), 滑り条件ケース

られる。但し、その変動振幅は $K=0$ よりもかなり小さい。これは地形背後に形成された剥離バブルから放出される渦が、 $K=0$ よりもかなり小さいことを意味する。さらに $K=1.3$ では滑り条件ケース(図-5(b))で観察された長周期の C_d 振動は出現していない。これは長波長の風下波がほぼ定在波的に存在するためである^{5, 12)}。これに対し $K=1.5$ においては滑り条件ケース(図-5(c))と類似な長周期の C_d 振動が継続して観察される。この非定常流れのメカニズムも滑り条件ケースと同様で、強弱の循環を有し地形上流へほぼ周期的に伝播するじょう乱波動に起因している。強安定成層流れの $K=2.5$ では $K=0, 1.3, 1.5$ と違って C_d に短周期振動はみられず、地形背後に形成された剥離バブルからの渦放出は抑制されている。また滑り条件ケース(図-5(d))と同様、 C_d 変動は複雑な様相を呈している。

図-10に各成層度 K において、地形下流に最も強風が発生する瞬間の地形周辺流れを流線図を用いて示す。但し、図-9に矢印で示した時刻であり、 $K=1.5$ は丘陵地形の C_d 極大値に対応する。非成層流の $K=0$ では地形背後に形成された剥離バブルか

ら大規模渦が地形下流に放出されている(図中(ア), (イ), (ウ))。強安定成層流れの $K=1.3, 1.5, 2.5$ ではローターや碎波領域が出現し(図10-(エ)~(シ))、どの成層度 K においても滑り条件ケース(図-6(b), (c), (d))とほぼ類似な流れパターンを呈している。但し、 $K=1.3, 1.5$ では滑り条件ケースで観察された地形近傍で流路の上部境界付近のローターは誘起されていない。

図-11に図-10に対応した主流速度成分 u/U の等値線図とその分布を濃淡で示す。非成層流の $K=0$ では丘陵地形の頂部付近と地形背後の剥離バブルから放出された大規模渦のすぐ上方において流れの増速域($u/U \geq 1.54$)がみられる(図-10(A), (B), (C), (D))に対応)。強安定成層流れの $K=1.3, 1.5, 2.5$ ではどの成層度 K においても滑り条件ケースと同様、風下波の下降流に伴い丘陵地形背後の流れは強く加速されている(図-10(*)に対応)。結果として丘陵地形への一様近寄り流速 U のおよそ1.29倍($K=1.3$), 1.41倍($K=1.5$), 1.78倍($K=2.5$)の強風域が滑り条件ケースとほぼ同様な位置に発生している(図-10(E), (F), (G))に対応)。但し、地形下

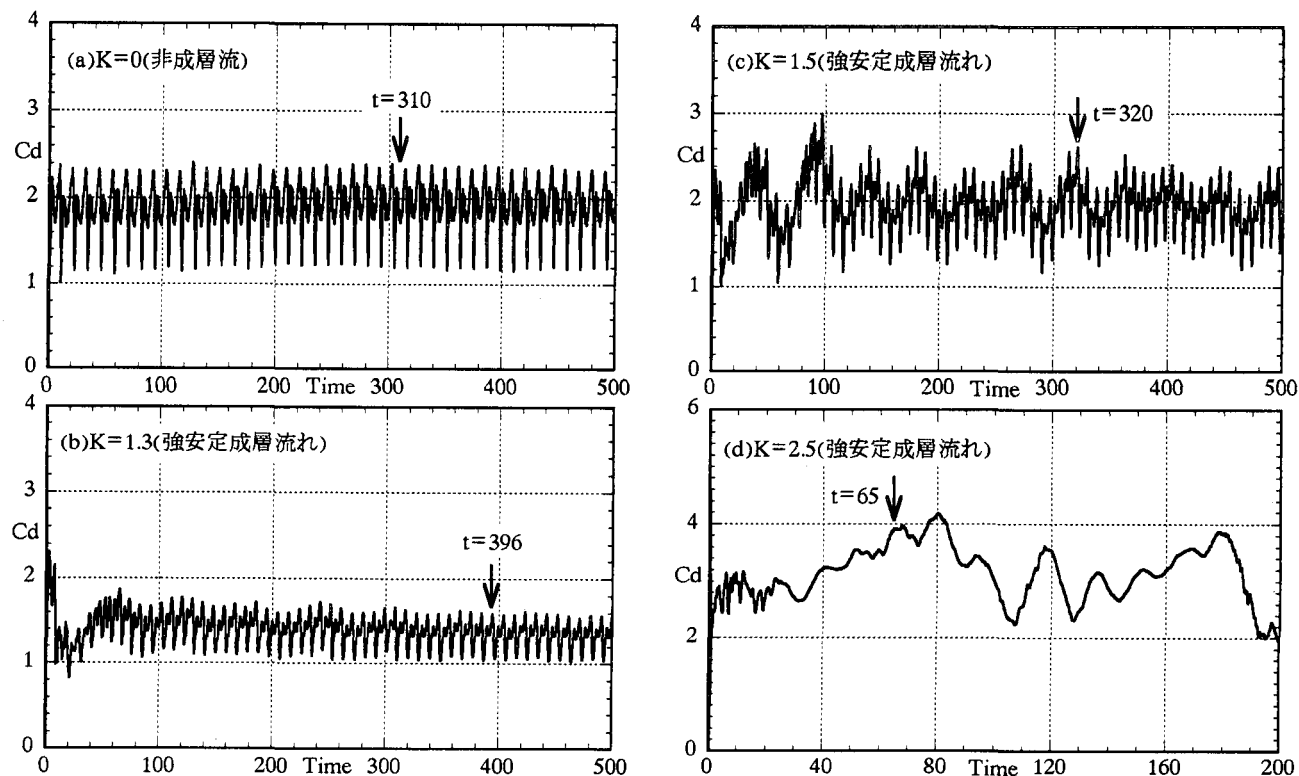


図-9 丘陵地形の抗力係数 C_d の時間変化。Re=2000, 粘着条件ケース

流の地面粘着条件の影響により強風域の強さは滑り条件ケースよりも1割から3割程度弱い。特に $K=1.3$, 1.5 においては地形近傍で流路の上部境界付近にローターが誘起されないため、その傾向が強い。

滑り条件ケース(図-8)と同様、強安定成層流れの $K=1.5$ を例にとり丘陵地形の抗力係数 C_d と地形下流のA点における主流速度成分 u/U の時間変化を図-12に示す。滑り条件ケースで観察されたように、 C_d の長周期変動にほぼ同期して u/U が変動している。よって滑り条件ケースと同様、丘陵地形周辺に出現する非定常流れに伴い地形下流の地表面付近の流速がほぼ周期的に強弱の変動を示す。特に C_d 極大値では丘陵地形への一様近寄り流速 U

のおよそ1.4倍の強風域が発生している。なお、 u/U の短周期変動はローターの変動を示す。

以上述べてきた粘着条件ケースに関して、強安定成層流れの $K=1.3$, 1.5 , 2.5 における地形周辺流れと地形下流の地表面付近に発生する強風域との関係をまとめると以下になる。滑り条件ケースと同様、どの成層度 K においても風下波の下降流に伴い丘陵地形背後の流れは強く加速される。結果として丘陵地形への一様近寄り流速 U のおよそ1.29倍($K=1.3$), 1.41倍($K=1.5$), 1.78倍($K=2.5$)の強風域が滑り条件ケースとほぼ同様な位置に発生する。但し、その強さは滑り条件ケースよりも1割から3割程度弱い。これは地形下流の地面粘着条件の影響である。特に $K=1.3$, 1.5 におい

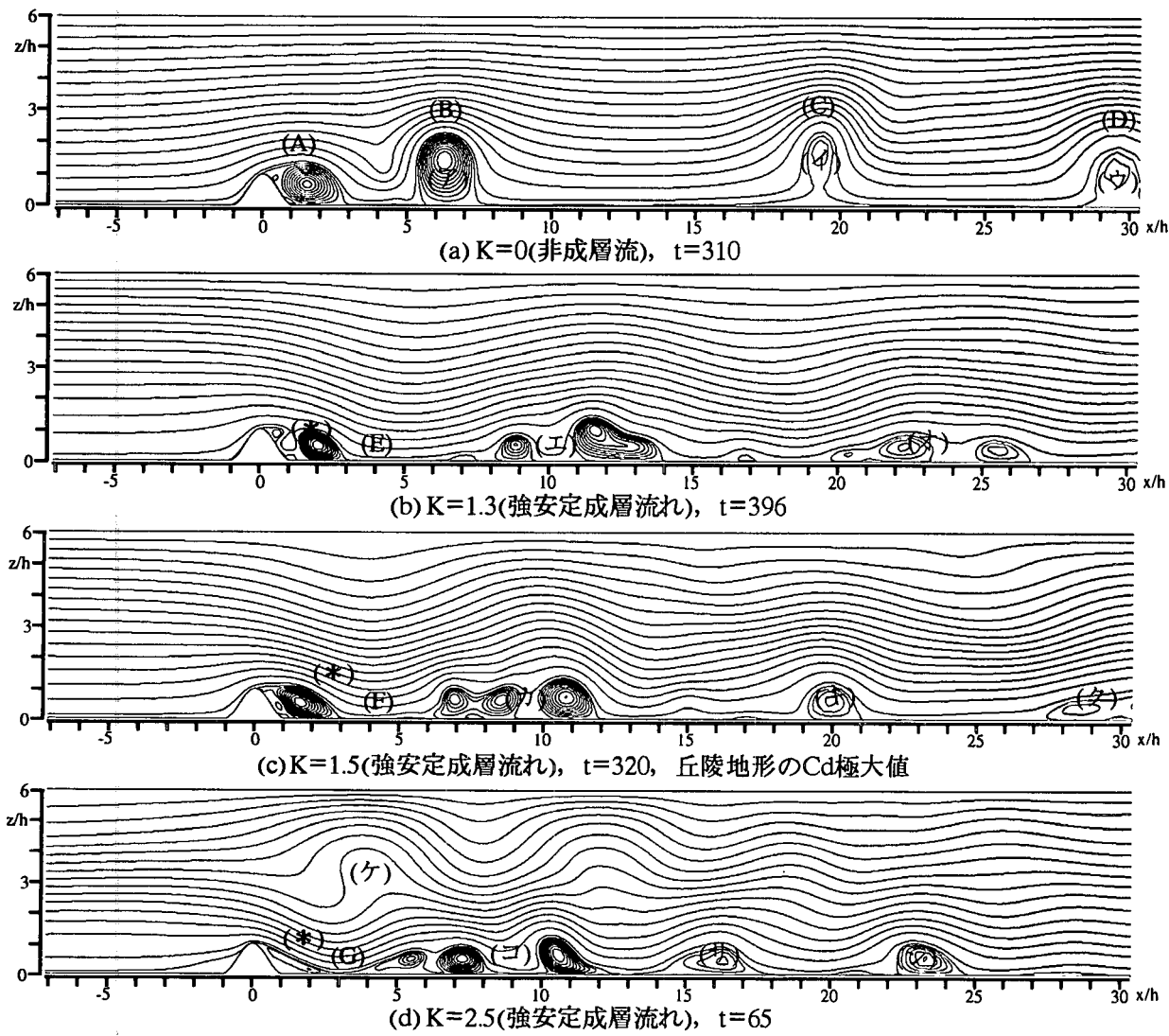
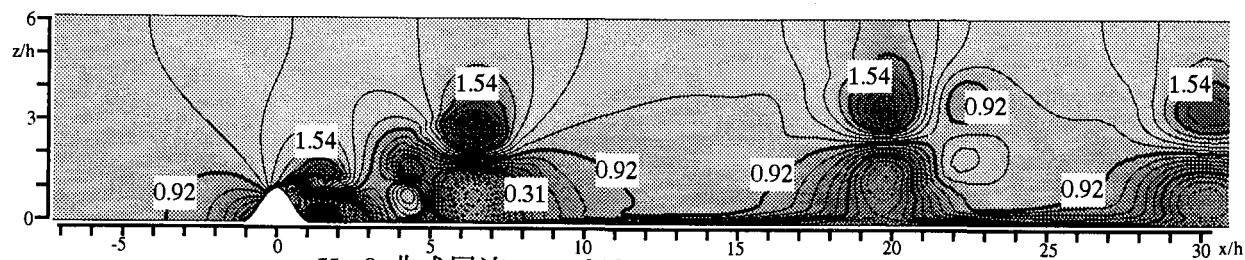
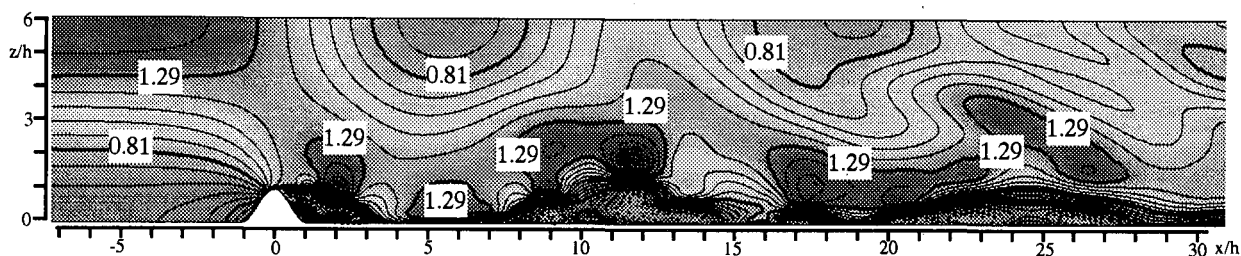


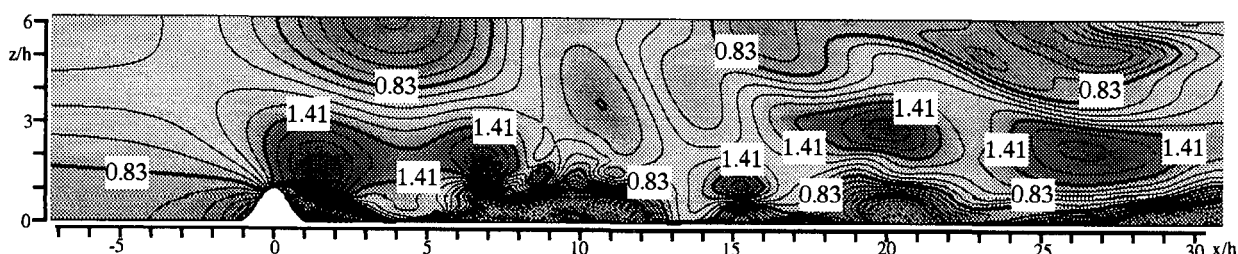
図-10 地形周辺流れ(流線図). $Re=2000$, 粘着条件ケース



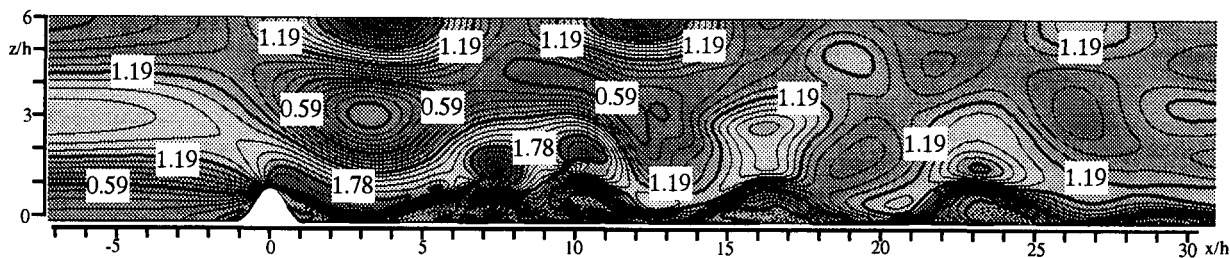
(a) $K=0$ (非成層流), $t=310$



(b) $K=1.3$ (強安定成層流れ), $t=396$



(c) $K=1.5$ (強安定成層流れ), $t=320$, 丘陵地形のCd極大値



(d) $K=2.5$ (強安定成層流れ), $t=65$

図-11 図-10に対応した主流速度成分 u/U の等値線図とその分布. $Re=2000$, 粘着条件ケース

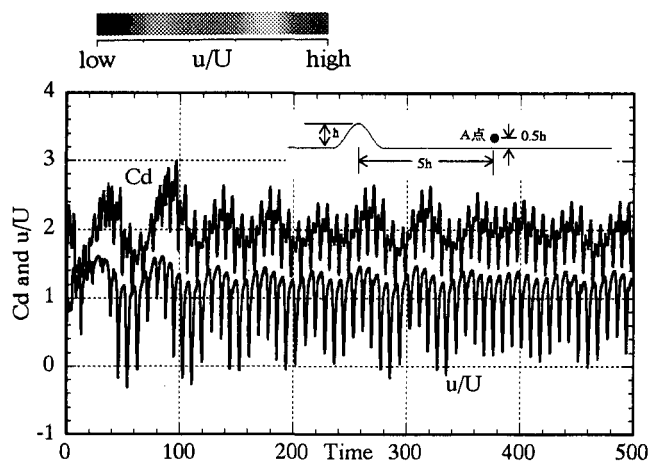


図-12 丘陵地形の抗力係数 C_d とA点における主流速度成分 u/U の時間変化. $Re=2000$, $K=1.5$ (強安定成層流れ), 粘着条件ケース

ては地形近傍で流路の上部境界付近にローターが誘起されないため、その傾向が強い。 $K=1.5$ では滑り条件ケースと同様、丘陵地形周辺に出現する非定常流れに伴い地形下流の地表面付近の流速がほぼ周期的に強弱の変動を示す。

3.3 3次元DNSの結果(図-13)

最後に強安定成層流れの $K=1.3$ ($Re=2000$, 粘着条件ケース)に関して、3次元DNSの結果を図-13に示す。計算領域は地形高さを h として主流方向(x)に $L_x=200h$ (地形上流に $120h$, 地形下流に $80h$)、スパン方向(y)に $L_y=10h$, 鉛直方向(z)に $L_z=6h$ の空間を有する。格子点数は $301(x) \times$

101(y)×51(z)点である。その他の条件は先に述べた通りである。図-10(b)の2次元DNSの結果と同様、図-13に示す地形下流の風下波はほぼ定在波的に存在する。また注目すべき点は、丘陵地形表面から剥離したせん断層の挙動や地形下流の流れはスパン方向(y)にほとんどそろっているということである。これはスパン方向に十分な長さを有する地形の周囲流(強安定成層流れ)はほぼ2次元流れであることを示唆するものである。但し、ここで得られた結果は非常に単純化された地形におけるものであり、実地形への適用についてはさらに詳細な検討が必要である。

4. 結論

一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた差分法により、有限深さ流路内の2次元丘陵地形を過ぎる非成層流の $K=0$ と強安定成層流れの $K=1.3$, 1.5 , 2.5 に対して $Re=2000$ でDNSを行った。滑り条件ケースと粘着条件ケースにおいて地形周辺流れを調べ、強風特性に関する以下の知見を得た。

1)強安定成層流れの $K=1.3$, 1.5 , 2.5 では滑り条件ケース、粘着条件ケースともに風下波の下降流に伴い丘陵地形背後の流れは強く加速される。結果として丘陵地形への一様近寄り流速 U に対し、滑り条件ケースでは流れが2.13~2.21倍程度増速され、粘着条件ケースでは流れが1.29~1.78倍程度

増速される。またその発生位置も両ケースともに同様に風下波の最初の谷である。但し、粘着条件ケースでは地形下流の地面粘着条件の影響により強風域の強さは滑り条件ケースよりも1割から3割程度弱い。特に $K=1.3$, 1.5 においては地形近傍で流路の上部境界付近にローターが誘起されないため、その傾向が強い。

2)最も強く安定成層した $K=2.5$ では両ケースともに地形近傍で流路の中央付近に風下波の碎波領域が形成される。その結果、この碎波領域下方に最も強い強風域が発生する。

3)両ケースともに $K=1.5$ では丘陵地形周辺に出現する非定常流れに伴い地形下流の地表面付近の流速が強弱の変動を示す。

参考文献

- 1)内田孝紀他, ながれ, 17, pp. 45-56, 1998.
- 2)内田孝紀他, 応用力学論文集, vol. 1, pp. 615-624, 1998.
- 3)内田孝紀他, 九大応力研所報, 第85号, pp. 1-12, 1999.
- 4)内田孝紀他, 九大応力研所報, 第85号, pp. 13-22, 1999.
- 5)内田孝紀他, ながれ(submitted).
- 6)斉藤和雄, 日本風工学会誌, 第75号, pp. 79-84, 1998.
- 7)光田寧, 突発災害調査研究成果報告, 1992.
- 8)桂順治, 日本風工学会誌, 第78号, pp. 63-66, 1999.
- 9)J. Kim et al., J. Comput. Phys., 59, pp. 308-323, 1985.
- 10)梶島岳夫他, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, pp. 3247-3254, 1997.
- 11)T. Kawamura et al., Fluid Dyn. Res., 1, pp. 145-162, 1986.
- 12)大屋裕二他, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp. 13-18, 1992 (1999年4月23日受付)

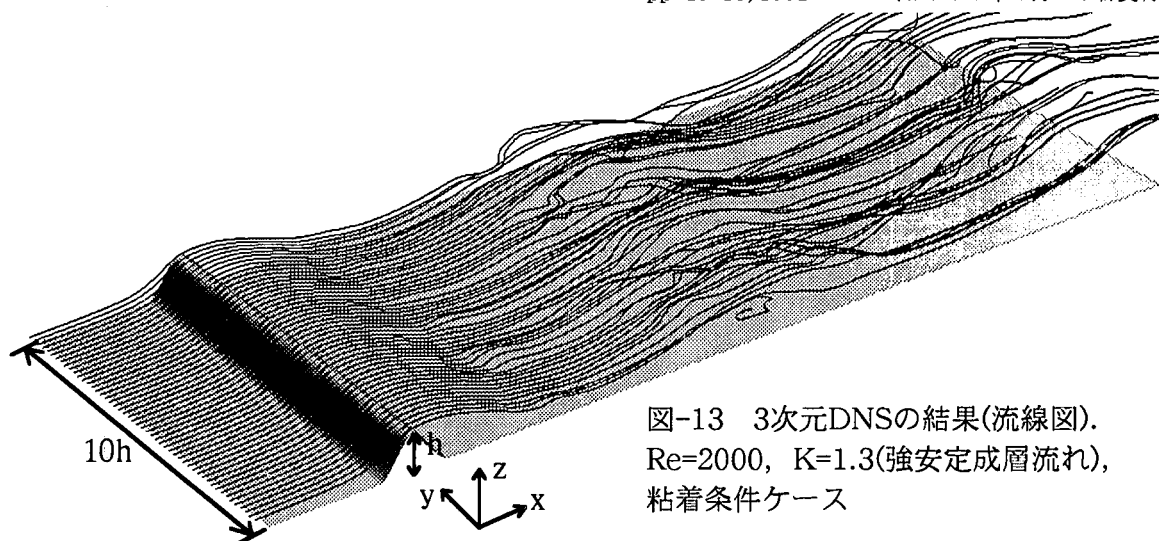


図-13 3次元DNSの結果(流線図).
 $Re=2000$, $K=1.3$ (強安定成層流れ),
 粘着条件ケース