盛土上の横風のシミュレーション

中出　孝次
環境工学研究部（空気力学　副主任研究員）
なかで　こうじ

はじめに

計算機を利用して仮想的な流れを机上に実現する方法，つまり，流れの数値シミュレーションが，近年，さまざまな流体力学に関する研究開発に用いられるようになってきています。計算機および計算方法が飛躍的に発展している現在，いくつかの基礎的な流れについては，実験に匹敵する信頼性が得られているものもあります。そこでは，実験では測定することが難しい流れ場の全情報（時間・空間的な情報）が得られる長所を生かして，詳細な流れ場の解明に，数値シミュレーションが積極的に利用されています。一方，鉄道分野などで見られるような応用分野の流れの数値シミュレーションは，現状，計算規模が過大となり，計算機負荷を緩和するためのモデルの併用が必要になります。計算結果の信頼性は，このモデルの妥当性に依存します。従来より，利用できる計算機の制限に応じたモデルが開発および利用されてきました。本稿では，現時点で，最も信頼性の高いモデルである大規模渦のシミュレーション（LES）という方法を，強風時の鉄道車両の安全性に関する研究へ適用した例を紹介します。

強風時の安全問題の研究は，従来より，「強風特性の把握」・「車両の空力特性の把握」・「車両の運動力学的特性の把握」の三分野の研究により行われています。「車両の空力特性の把握」では風洞実験が用いられ，様々な地上構造物と車両形状に対する空気力の関係が調べられていますが，さらに詳細な現象の知見を得る手段として，流れの数値シミュレーションが期待されています。本稿では，車両の空力特性に対して重要な影響を及ぼす地上構造物の特性を把握するための研究例として，盛土上の流れの数値シミュレーションについて紹介します。

乱流の数値シミュレーション

流体力学に関する現象は，他の多くの分野と同様，理論解析・数値解析・実験により研究されています。しかし，乱流現象については，現時点では，理論的扱いが大変困難であり（現状，乱流理論が未完成），風洞実験と数値解析が主な研究手段となります。ここで，乱流とは，大小さまざまな渦が混在し，それぞれの渦が相互作用するという特徴を有する流れのことをいいます。乱流の反対語は層流であり，流れに乱れが存在しない，きれいな流れを指します。

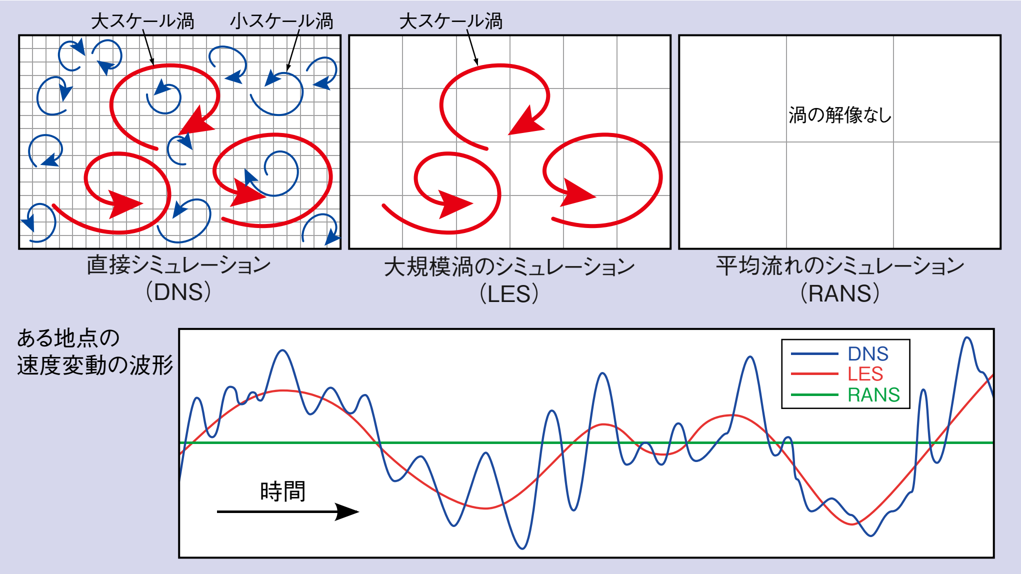


図１　乱流の数値シミュレーション方法の比較
（計算格子と解像する乱流スケールのイメージ）

一般的に，流れの数値シミュレーションは，ある計算領域を設定し，領域内を計算格子で分割し，その計算格子点に対して基礎方程式を満たす量を算出することにより行われます。乱流の数値シミュレーションの方法には，大小さまざまな渦に対してどのスケールの渦までを計算対象とするか，つまり，最小格子間隔をどの程度小さくするかに応じて，「直接シミュレーション（DNS）」・「大規模渦のシミュレーション（LES）」・「平均流れのシミュレーション（RANS）」の主に3種類があります（図1）。

直接シミュレーション（DNS）では，最小格子間隔を最小渦のスケールを解像できるほど細かく設定し，流れの基礎方程式に対して何のモデルも仮定せずに計算を行います（図1左）。モデルが利用されないことにより，最も信頼性の高い数値シミュレーションが実現されます。しかし，実用問題で対象となる乱流では，この最小渦のスケールが非常に小さくなるために，非常に細かな計算格子が必要となります。つまり，膨大な数の計算格子が必要であり，計算機負荷は過大となります。そのため，現時点および近い将来においても実用問題の乱流に対するDNSの実施は困難であり，現在のDNSの対象は基礎的な特定の乱流に限定され，乱流の基礎研究のツールとして利用されています。

そこで，実用問題の乱流を対象とした数値シミュレーションでは，乱流の全ての渦を直接の計算対象にすることをあきらめ，乱流ををモデル化することになります。このモデルを乱流モデルと呼びます。乱流モデルを用いたシミュレーション方法としては，主に，「大規模渦のシミュレーション（LES）」と「平均流れのシミュレーション（RANS）」の2種類があります。LESでは，乱流の渦のスケールの大きなもののみを直接の計算対象とする方法で，小スケールの渦をモデル化する方法です。小スケールは直接の計算対象としないために，DNSよりも粗い計算格子で計算が実行されます（図1中央）。RANSは，乱流の渦の全て（小スケールから大スケールまで）をモデル化の対象とし，乱れのない平均流れのみを直接の計算対象とする方法です。RANSでは，LESよりもさらに粗い計算格子を用いて計算を実行することができます（計算機負荷が最も小）（図1右）。

LESの特徴は，小スケール渦のみをモデル化し，大スケール渦は直接シミュレーションするところにあります。小スケール渦は，さまざまな乱流場に対して概ね普遍的な性質をもつため，構成される乱流モデルの適応範囲は広くなります。つまり，解析対象の乱流場に特有な経験定数のようなものに依存しない方法が構築されます。したがって，未知の現象に対して，DNSに次いで安心して適用することができます。ただし，LESは，DNSに次いで計算機負荷が大きいことに注意する必要があります。

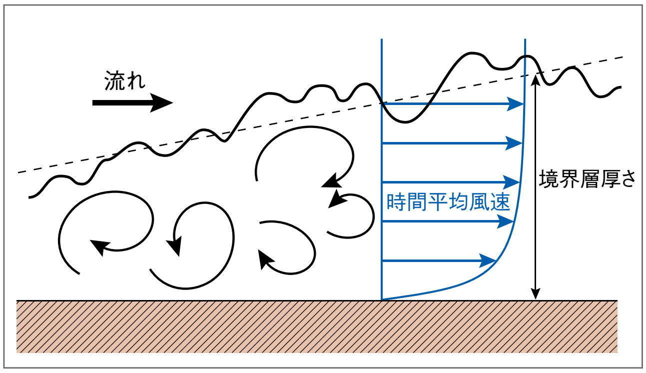


図2　乱流境界層

本稿における盛土上の流れの数値シミュレーションでは，計算精度を重視し，乱流の数値シミュレーション方法はLESを採用しました。

乱流境界層の生成

盛土上の流れの特徴として，盛土に流入する流れが一様流（地上高さ方向に速度分布をもたず，時間・空間的に一定速度の流れ）ではないことが挙げられます。流入する流れの時間平均速度分布は，地面付近では遅く（地面ではゼロ），高さとともに速くなります。このような流れを境界層流れと呼びます。この境界層流れには層流と乱流の2種類がありますが，盛土に流入する流れは高レイノルズ数流れ（レイノルズ数が10の7～8乗のオーダー）であるとともに地表面に凹凸（地表面粗度）を含むため，一般的には乱流になります（乱流境界層，図2）。さらに，自然に存在する風には，この乱流境界層を基本として，さまざまな気象現象（例えば突風・竜巻など）が加わる複雑な流れになる場合もあります。以上より，盛土上の流れを調べるためには，まず始めに盛土に流入する乱流境界層を再現する必要があることがわかります。

このように盛土上の流れのシミュレーションでは，計算領域の流入面に乱流境界層の流れ場が必要になりますが，残念ながら，いきなり乱流境界層の流れ場を与えることはできません。というのも，乱流境界層の流れ場（もちろん非定常流れ）を与える式が分からないからです。つまり，乱流理論が完成していない現在，解析解および満足できる近次解は存在しません。そこで，盛土上の流れの数値シミュレーションとともに，その流入境界条件となる乱流境界層そのものも数値シミュレーションの対象にします。つまり，

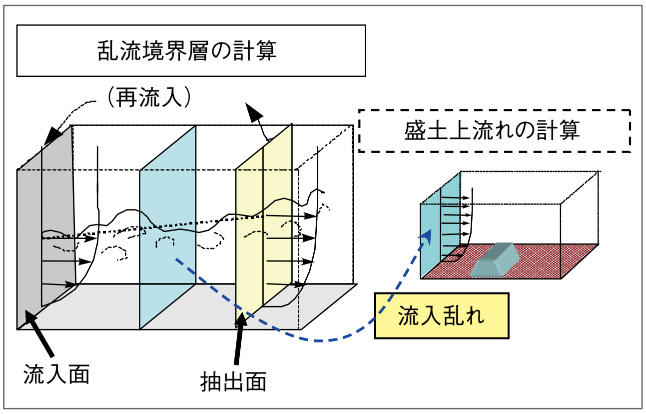


図３　乱流境界層と盛土上流れの数値シミュレーション

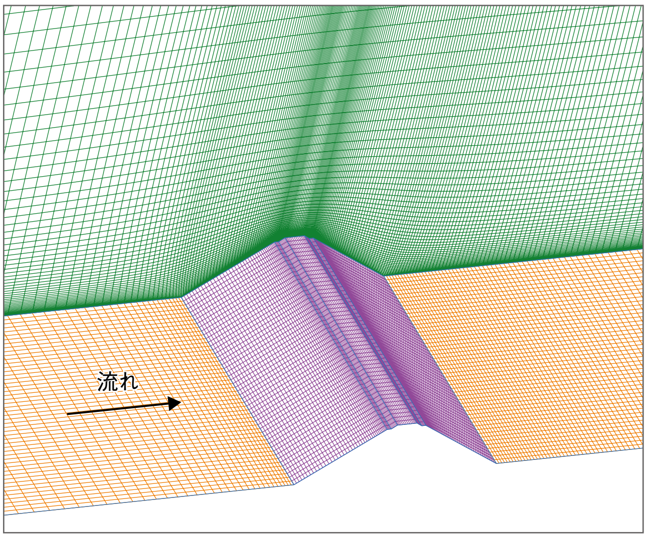


図４　計算格子（盛土付近を拡大）

2つのシミュレーションを並行に実行することになります（図3）。

乱流境界層の数値シミュレーション方法の概要を説明します。実際の乱流境界層は流れ方向に境界層厚さが大きくなる空間的に発達する流れですが（図2），ここでは，この境界層厚さの増加はあまり大きくないことにより，流れを平行流として近似します。そうして，計算領域下流側に設定した断面を速度場の抽出断面とし，その速度場を計算領域の流入境界面に再流入させます。時々刻々と速度場の抽出・再流入を繰り返し，計算領域の流れの時間をすすめていくと，やがて乱流境界層が生成できます。このような平行流近似を用いない方法のほかに，境界層厚さの増加を考慮して正確な乱流境界層をシミュレーションする方法も存在します。しかし，乱流境界層そのものが解析対象ではなく流入風として利用するだけならば，平行流近似による簡易な方法は，任意の平均速度場の乱流境界層を生成する手法として有効な方法だと考えられます。本稿で示す計算例では，この平行流近似を用いた方法により乱流境界層の数値シミュレーションを行っています。

盛土上の流れの数値シミュレーション

計算対象の盛土は，鉄道総研の大型低騒音風洞で過去に実施された単線盛土（実寸高さ8mの1/40スケールモデル）の風洞実験に相当するものとします。また，盛土に流入する風の向きは盛土に対して垂直とします。盛土付近の計算格子を図4に示します。

数値シミュレーションの妥当性を検証するために，大型低騒音風洞の実験結果との比較を行いました。まず，乱流境界層の数値シミュレーション（盛土上流れの流入部分）の平均風速と風速変動（風速の標準偏差）を図5に示します。概ね良好な結果が得られていることが分かります。次に，盛土上流れのシミュレーションにおける，盛土上の上流側・中心・下流側の3つの測定線上の主流方向の平均速度分布を図6に示します。実験結果との良好な一致が観察されます。以上より，本数値シミュレーションは妥当な結果を与えていると考えられます。

盛土周りの流れについて，ある断面内のある瞬間の速度

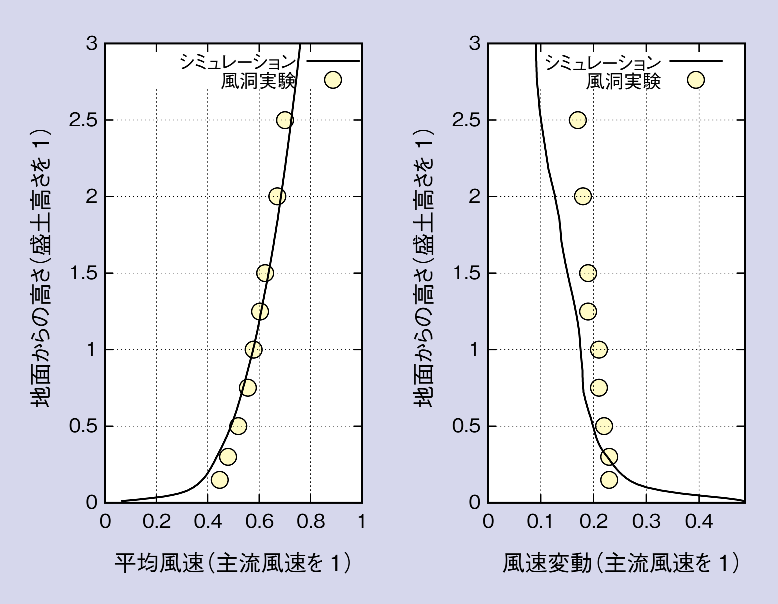


図５　流入境界層（図３の乱流境界層）の平均風速と風速変動の分布

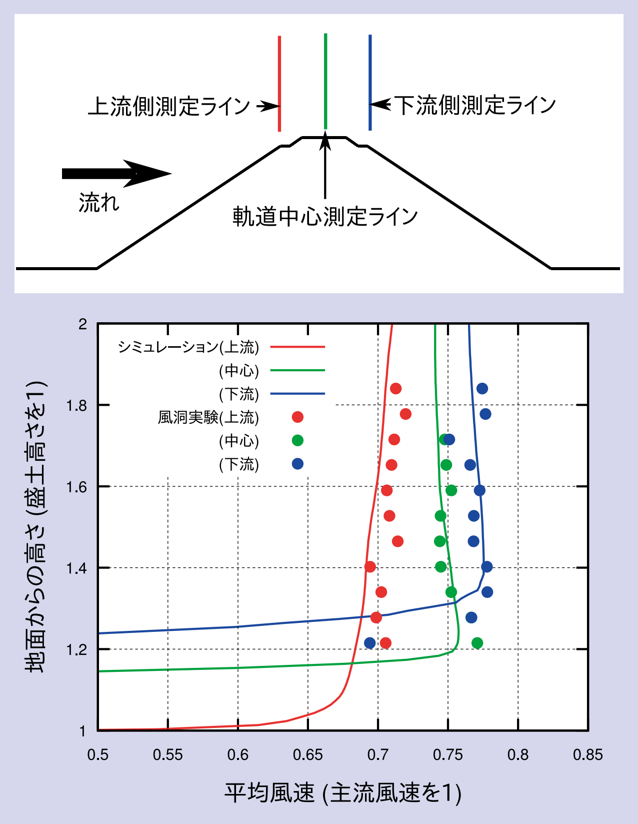
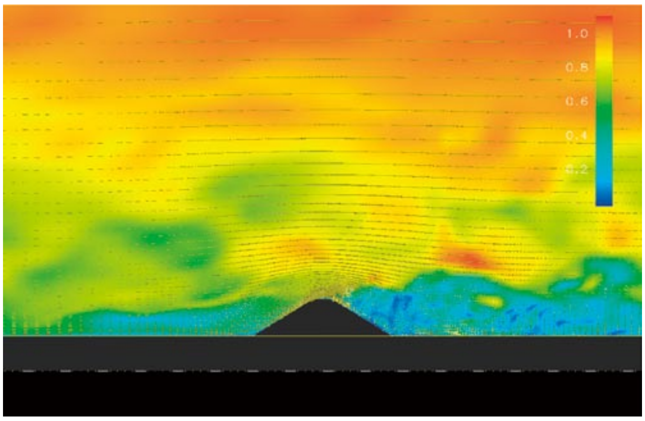


図６　盛土上の平均風速分布

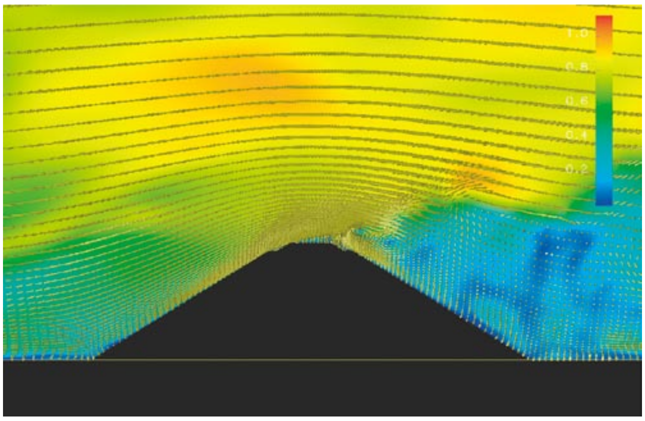
ベクトルを図7に示します。乱流の特徴の一つである，大小さまざまなスケールの乱れが観察されます。時間平均流れの流線を図8に示します。盛土の上流側からは，乱流境界層が流入している様子が観察されます。この乱流境界層の流れが盛土にあたり，盛土の上流側の角部から流れが剥離します。この剥離により，盛土の風下側に低速領域が形成されます。剥離線上では，高速流れと低速流れの境界となり（剥離せん断層），渦が発生する不安定な流れになる様子が観察されます（図7（b））。

おわりに

本稿では，強風時の鉄道車両の安全問題に関する研究に流れの数値シミュレーションを適用した例として，盛土上流れの数値シミュレーションの概要を示しました。この数値シミュレーションにより，強風時の鉄道車両の安全性を監視するための風速計の設置位置の検討に，有効な情報が提供できることが期待されます。今後，盛土以外の他の地上構造物や車両を含めた数値シミュレーションの検証を行い，数値シミュレーションの適用範囲の把握をすすめていきます。さらには，風洞実験で再現することが難しい現象（例えば，列車走行の影響，突風の模擬など）の適用へと進めていく計画です。そして，風洞実験と数値シミュレーションの併用をすすめることにより，現象把握の深度化および研究開発の効率化をすすめていきたいと考えています。 RRR



(a)盛土周りの流れの様子



(b)盛土付近((a)の拡大図)

図７　ある瞬間の速度ベクトル
（色は速度の大きさ；　赤：高速，青：低速）

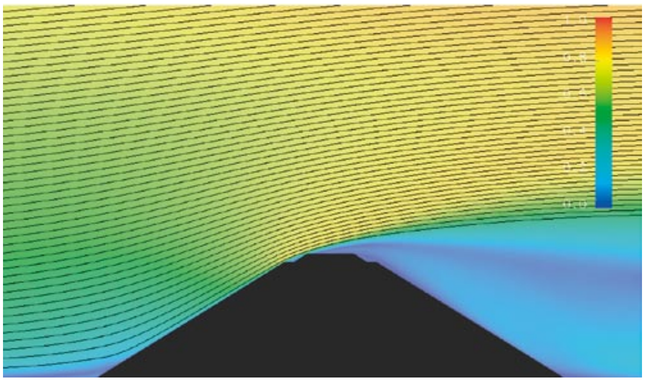


図８　時間平均流れの流線
（色は速度の大きさ；　赤：高速，青：低速）