

複雑粗度上の乱流境界層の数値シミュレーション Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer over Complex Rough Surfaces

丸山 敬

Takashi Maruyama

Abstract

The simulation method of numerical calculation of turbulent boundary layer over complex rough surfaces was reviewed. Turbulent boundary flows over rough surfaces calculated by different methods were examined. Firstly, the handling of roughness as a surface boundary condition and the modeling of roughness effect were discussed. Secondly, the generation methods of turbulent fields at the inflow boundary were presented and the effect of the inflow boundary condition was discussed.

1. はじめに

大気境界層中の気流性状を数値シミュレーションによって解析しようとする場合、対象となる流れは地表面上の複雑な粗度上に発達した乱流場であることが多い。このとき、気流性状を決定する要因としては温度、圧力、コリオリ力、風速、粗度形状等種々挙げられるが、地面付近の接地境界層内の気流性状を考える場合、温度の影響を除けば粗度形状の影響がもっとも大きいとみなせる。したがって、解析領域の地面境界条件として粗度の影響をいかに取り込むかは重要な課題となり、解析の成否を左右する場合もでてくる。また、上流側に存在する地表面粗度は解析領域の流入気流性状に影響を及ぼし、流入境界条件の与え方を左右する。

このように、粗度上に発達した乱流境界層を数値計算によって解析する場合、地表面粗度の取り扱いと流入境界条件の与え方が重要となる。地表面粗度については、粗度長やべき指数等の粗度パラメータを用いて地面境界条件に取り込む方法、および、流れの支配方程式中に粗度の影響をモデル化して直接取り込む方法が挙げられる。さらに、流入境界面の気流性状も計算結果を左右するので、その与え方が問題となる。とくに、直接法やLESを用いて乱流場の計算を行う場合には、流入境界面における風速の時刻歴が必要となり、希望する気流性状をもった変動風速波形を与えてやらなければならない。

以下では複雑粗度上の乱流境界層の数値シミュレーションに関して、地表面粗度の取り扱いおよび、流入境界面における気流性状の与え方に関して具体的な計算例を挙げて検討を加える。

2. 地表面粗度の取り扱い

ここでは地表面に近い大気境界層内の気流性状を数値計算でシミュレートすることを考え、地表面粗度の取り扱いについて考察する。その際、強風中立状態を

仮定し、温度、圧力勾配、コリオリ力の影響は無視する。また、ここで粗度として扱うのは地表面に存在する凹凸で、森や林、農作物等、植物によるもの、他、住宅やビル等の建物によるものを対象とする。

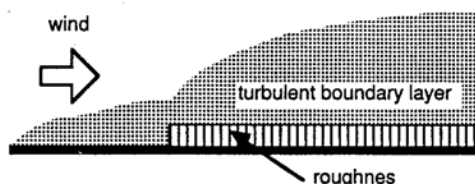


図1 粗度上に発達した乱流境界層

2.1 境界条件としての粗度の取り込み

地表面粗度を計算に取り込む方法としてまず挙げられるのが、境界条件としての取り込みである。粗面上に発達する乱流境界層内の平均風速の鉛直分布が、対数法則やべき法則によって近似できることから、境界条件を対数法則やべき法則を満たすように設定する。その際、粗度形状は粗度長や零面変位、べき指数等の粗度パラメータとして計算に取り込まれるが、その値は実験や観測等により事前に知っておく必要がある。粗度形状と粗度パラメータの関係を調べる風洞実験は、通常図1に示すように、粗度上に乱流境界層を発達させて行われることが多い。図2に風洞内の粗度上に発達した乱流境界層を例にとり、境界条件として地表面粗度を計算に取り込んだ場合の計算結果¹⁾を実験結果と比較する。計算は $k-\epsilon$ 2方程式乱流モデルを用い、床面境界における粗度の影響は粗度長 z_0 として与えている。図に示すとおり、計算結果は平均風速、乱流エネルギー共に実験結果をほぼ再現しているが、床面付近に差が見られる。実際、風洞床面付近には粗度要素(1辺3cmの立方体)が敷き詰められているが、計算ではそれを直接計算領域に再現しているわけではないので、粗度要素周りの局所的な気流性状を再現することはで

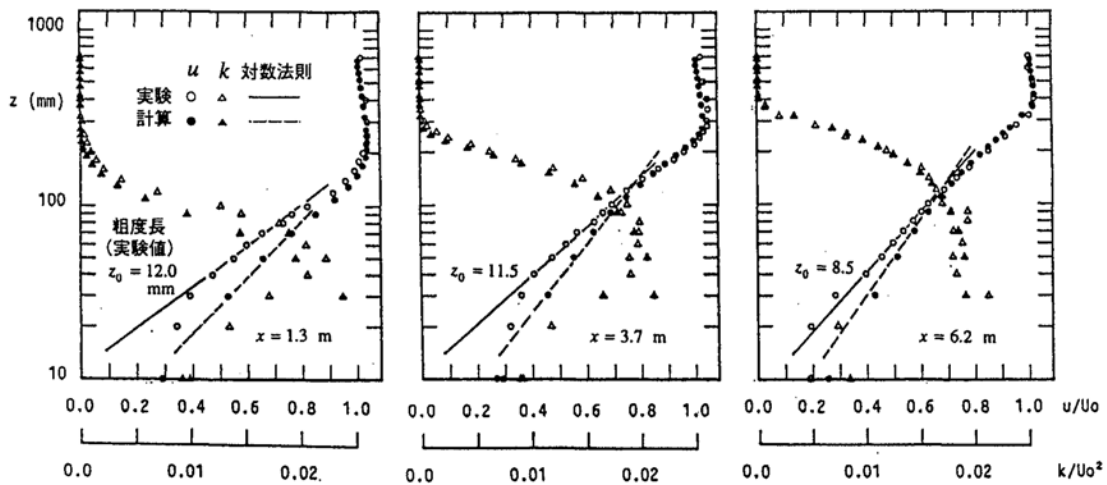


図2 風洞内の粗面上に発達した乱流境界層内の平均風速 u および乱流エネルギー k の吹送距離 x 方向の変化, U_0 は乱流境界層上部の基準風速

きていない。ここで用いた粗度長は、境界層内の平均風速分布が実験結果と最も良く合うように最適化した値を計算領域全体に用いており、剪断応力（図2では乱流エネルギー k の値に対応している）一定、すなわち対数法則が成り立つ領域の平均風速分布（図2中の破線）から求めた粗度長は流れ方向に一定である。一方、実験結果（図2中の実線）から求めた粗度長は図中に示すように変化し、流れ方向に減少する。

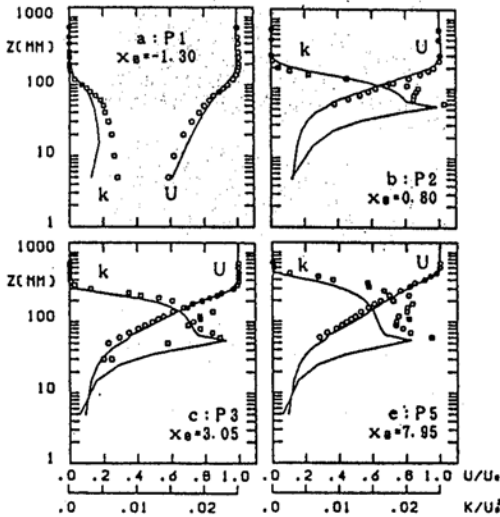
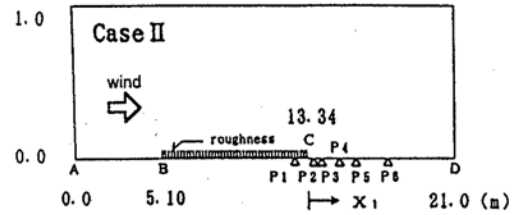
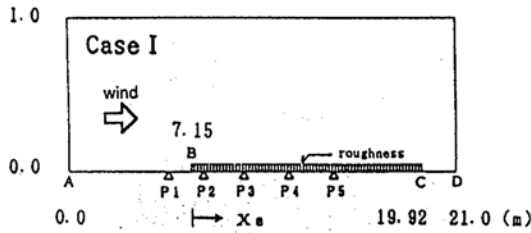
粗度の影響を粗度長やベキ指数等の粗度パラメータによって評価する場合、ある粗度形状に対応する粗度パラメータの値は乱流境界層が十分に発達し、平均速度分布が吹送距離によらず相似で、かつ風速と長さスケールだけで決まるような平衡状態に近似的になったとみなせるときの値として求められることが多い。平衡状態になった乱流境界層では、粗度パラメータと粗度要素の代表長さとの比は吹送距離によらず一定となるが、このような性質を備えた平衡境界層は特殊な場合に限られる。文献²⁾によると、境界層厚が吹送距離とともに変化するとき、平衡境界層が存在するためには粗度要素の形状や大きさも吹送距離とともに変化しなければならない。したがって、一様な形状をもつ粗面を用いた場合には、流れ方向に境界層が発達し、境界層厚が変化するので、粗度パラメータと粗度要素の代表長さとの比も変化し、その割合は吹送距離が短いときに大きい。Counihan³⁾によると、この変化が無視できるようになるためには粗度高さの1000倍以上の吹送距離が必要となる。このように、たとえ粗面形状が流れ方向に一様とみなせる場合でも、粗度要素が大きくなると近似的な平衡状態に達する距離も長くなるため、その間の変化を正確に計算するには、吹送距離方向に粗度パラメータの値を変化させる必要がある。一方、

実際の地表面粗度形状は一様でない場合が多く、粗度パラメータの与え方はさらに複雑になる。

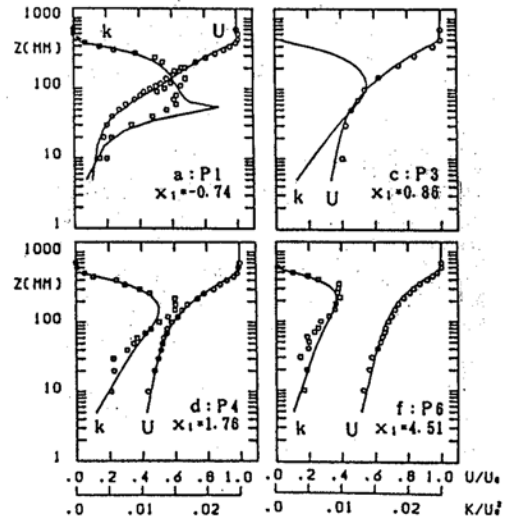
2.2 モデル化による粗度の取り込み

地面近くの気流性状は粗度要素の影響を直接受けて3次元的に大きく変化するが、一般にこの領域をキャノピーと呼んでいる。キャノピーについて植物を対象とした研究は盛んで、実験や観測例、解析的な研究や数値計算も数多くなされている。植物の場合には空間内に占める粗度要素の体積の割合が小さいので、通常体積変化は無視されるが、市街地の建物のように空間に対して粗度要素の占める割合が大きく、形状や体積変化が大きい場合にはそれを無視することができない。種々の粗度形状に対する測定結果をみると、気流性状の空間的な変化は粗度高さの約2倍にまで及び、その中では乱れが大きく計測も難しい。また、粗度形状に関して気流性状を左右するパラメータは、密度、配列等種々考えられ、その扱いが複雑である。このことは多くの場合、新たな粗度形状に対する気流性状を、風洞実験等事前の測定を行わずに予測するのが困難であることを意味している。さらに、キャノピー内では一般に対数法則やベキ法則が成り立たないので、粗度の影響を地面境界条件として取り込むことができない。そのため、粗度パラメータの吹送距離による変化そのものを求めたり、市街地のように粗度要素が大きい場合の気流性状を、キャノピー内も含めて求めるためには、粗度要素の影響を何らかの方法でモデル化して計算に取り込む必要がある。

キャノピー内の粗度の扱いについては、植物に関してWilson⁴⁾が長さスケールを既知とした多方程式モデルを、Yamada⁵⁾が長さスケールの方程式を用いた2方程式乱流モデルを示した。また、鶴野⁶⁾はYamadaの



ケース 1：滑面から粗面へ



ケース 2：粗面から滑面へ

図3 粗度を取り込んだ $k-\epsilon$ 2 方程式型乱流モデルを用いて風洞内の粗面上に発達した乱流境界層を計算した結果、平均風速 U , $\circ$; 乱流エネルギー k , $\square$; 計算値, —

モデルを $k-\epsilon$ 2 方程式型乱流モデルに変換し、市街地キャノピーに適用した。これらの方法では方程式系を流体部分についてのみ解いており、粗度要素である植物や建物の体積変化が考慮されていない。植物キャノピーのように単位空間の固体部分の割合が小さい場合には、粗度要素の体積変化による影響は少ないが、市街地のように粗度要素の占める割合が大きくなると粗度要素の体積変化の影響が出てくると考えられるので、それを取り扱える形で方程式系を与えた方がよい。

植物および都市キャノピー内で粗度形状を体積変化の影響を含めてモデル化した例としては平岡ら⁷⁾の方法が挙げられる。そこではナビエ・ストークス方程式に粗度要素の体積変化を考慮した時空間平均操作を行い、植物および都市キャノピー内で $k-\epsilon$ 2 方程式型の乱流モデルを導出している。このモデルでは、粗度形状の影響は粗度の体積密度、表面積密度、抵抗係数および乱れの長さスケールにより支配方程式中に取り込まれている。このうち、体積密度および表面積密度は粗度形状が決まれば確定する量であるが、抵抗係数および乱れの長さスケールはモデル化により現れた定数で、実験結果との比較等による最適化等を行って、各粗度形状に対して経験的に求められる。この方法を用いて

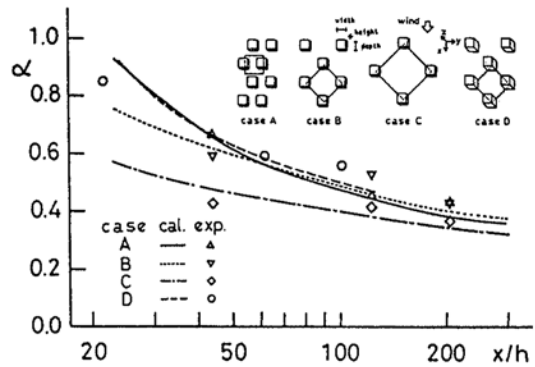
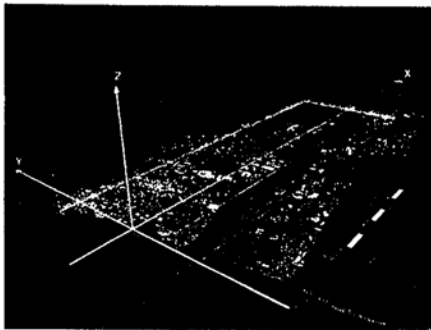


図4 べき指数 α の吹送距離 x 方向の変化

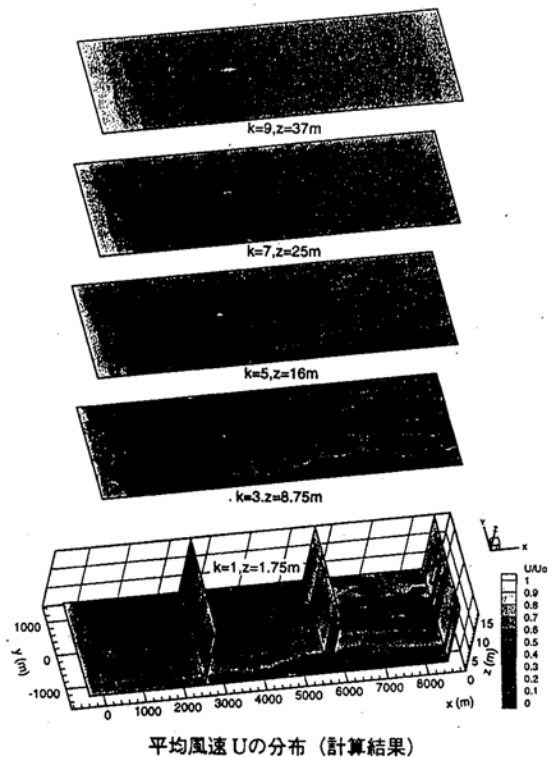
風洞内の粗面上に発達した乱流境界層を計算した例⁸⁾を図3に示す。計算結果は粗度形状が吹送距離方向に変化する領域を含めて実験結果を良く再現しており、キャノピー内の時空間平均値を計算することができる。また、図4に示すように、種々の粗度形状に対して行った計算結果⁹⁾を見ても風速分布の変化を良く再現し、べき指数の流れ方向の変化も再現することが可能となっている。さらに、丸山¹⁰⁾は単純な形状をもつ粗度ブロックに対して求められた粗度パラメータを市街地のような複雑な形状をもつ粗面へ適応して、実在する市街地上空の気流性状を計算している。図5に同様の手法で



計算領域を南側（海側）から眺める



計算範囲および計算格子形状



平均風速 U の分布（計算結果）

図5 粗度の影響を取り込んだ k - ϵ 2 方程式型乱流モデルを用いて実際の市街地（平塚市）上空に発達した乱流境界層を計算した結果

計算した市街地上空の計算例を示す。計算に際しては地図や航空写真から建物の形状データを読み込み、各計算格子内の粗度形状を計算して、抵抗係数および乱れの長さスケールを求めている。計算結果には建物が密集している地域での風速の減少と乱れの増加、川筋にそった強風域が再現されている。

3. 流入境界条件の与え方

前節で概観した地表面粗度の取り扱いと並んで、流入境界面における気流性状の与え方も解析結果を左右するので重要となる。流入境界における物理量は、できるだけ実際の乱流性状を再現するように、計算や観測結果、あるいは実験結果をもとに与えるのが望ましい。計算を行おうとする領域の上流の形状が単純な場合には、上流域を直接計算するか、周期境界条件を用いて所定の乱流場が発達するまで計算を行った結果を流入境界条件として用いることができる。図6には風洞内のラフネス上に発達した乱流境界層を前述の k - ϵ 2 方程式型乱流モデルを用いて計算で再現し、種々のラフネス後縁の気流性状を求めた結果¹¹⁾を示す。図7には図6に示した3種類の気流性状を流入境界条件として与えたときの直方体正面に加わる圧力分布を示す。計算結果は、流入気流の風速勾配が大きくなるほ

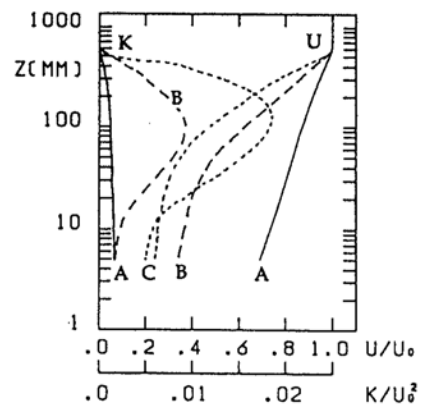


図6 3種類 (A, B, C) の異なるラフネス上に発達した乱流境界層を計算で再現し、ラフネス後縁の流入気流性状を求めた結果、平均風速 U ；乱流エネルギー K の分布

ど正圧の強い範囲が狭くなって、上部に偏る傾向を捉えている。このように粗度パラメータを変化させることにより、種々のラフネスに対応する気流性状を人工的に生成し、流入境界条件として用いることができる。

上述の例は定常流れ場に対する平均値の計算例であるが、直接法やLESのように流れの時間変動を計算する場合には、流入境界面における風速の時刻歴が各

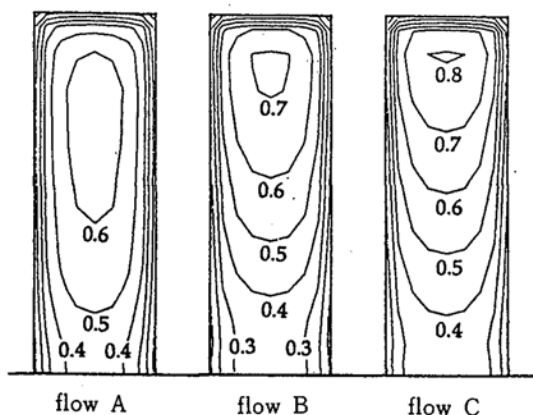


図7 図6に示す気流性状の異なる接近流を流入境界条件として用いた場合の、直方体風上側壁面における平均風圧係数の分布（数値計算結果）

計算点に対して必要となる。このとき、複雑な粗度形状をもつ市街地等では、接地境界層内の乱流場を再現しようとすると、多大な計算が必要で目標となる乱流性状が得られなかったり、計算そのものが不可能な場合が多い。そこで、何らかのモデリングや補間方法を導入して流入境界における乱流場を発生させることができれば、実用上非常に便利である。このとき、生成する乱流場は物理的な構造までも再現できていることが理想であるが、現実にはほとんど不可能なので、平均、分散等の統計量を再現することが目標となる。さらに、できるだけ物理的に適切な風速変動を生成するため、乱流構造の情報を空間相関として取り込むことが考えられる。このような例としては、岩谷¹²⁾による風速変動の生成が挙げられる。岩谷は風速変動を多次元の確率場とみなし、自己回帰式による方法を用いて乱流境界層内の主流方向の風速変動を生成した。計算には平均、分散、パワースペクトルだけでなく、空間相関を相互スペクトルの形で取り入れている。同様な風速変動の生成は星谷¹³⁾により周波数空間において、Leeら¹⁴⁾により波数空間においても行われており、計算結果は目標とする統計量をよく再現することが示されている。

さて、以上のような方法で二次の統計量までを再現することができるが、観測や実験による測定結果がある場合、乱流場の物理的情報をより多く取り入れるために、風速変動の時系列データを既知波として用いることが考えられる。このような空間内の離散点において与えられた既知波を含む条件付確率場の性質は、Kamedaら¹⁵⁾によって解析的に検討され、その統計的性質が周波数空間において理論的に記述された。丸山ら¹⁶⁾はその結果を用いて乱流境界層内の実測データを条件とする風速変動の生成を行った。また、既知波形を含む条件付確率場の同様な解析は、星谷¹⁷⁾が時間領域

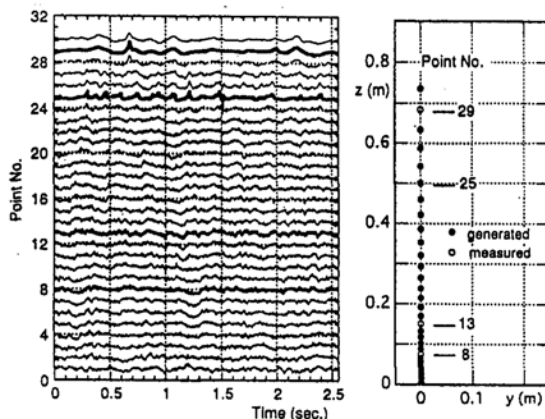
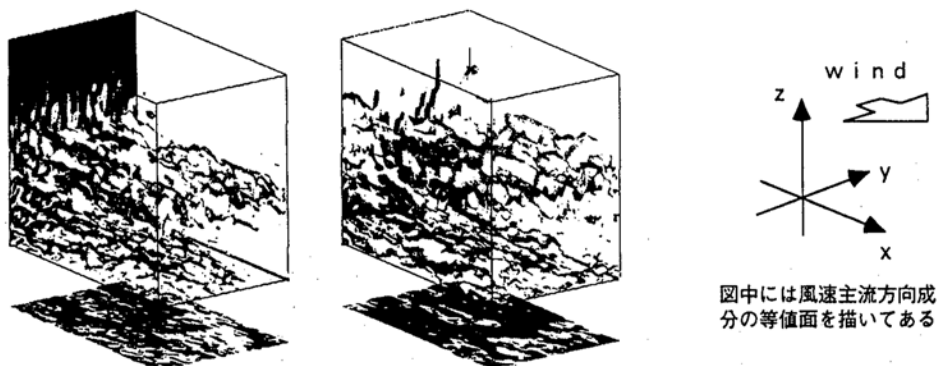


図8 乱流境界層内の風向直角鉛直面内における風速変動の生成例、図中風速は標準偏差で無次元化して (u'/σ_u) 示してある；太線は測定値を示す

において、岩谷¹⁸⁾が自己回帰式を用いて行っている。図8に示す乱流境界層内の風向直角鉛直面内における風速変動の計算例をみると、生成された風速変動の波形は測定値との間を滑らかに補間されており、平均、分散およびパワースペクトルも実験値と一致するように計算される。

以上、できるだけ現実に近い乱流場を発生させることを目標に、統計量が等価な変動風速場を生成する方法として、二次の相関までを一致させる方法を紹介した。生成する風速変動は対象となる乱流場の物理的な構造を再現していることが理想であるので、さらに高次の統計量を一致させることも考えられる。しかし、流れの物理的な構造を取り込んだ方法でない限り、生成された変動風速場は、あくまでも“擬似的な”乱流場でしかない。したがって、実用的な見地からすれば、この人工的につくり出された擬似乱流場を流入条件として用い、下流の計算領域で流れが物理的に適切な構造をもつようになったところで、対象となる問題の計算を行えばよいという考え方ができる。このとき、流入条件となる風速変動は、できるだけ生成が簡単なほうがよいので、流入条件として、どのような性状が下流の計算結果に影響を及ぼすかをしておくのは有用である。統計的性状が異なる変動風速場を用いた計算²⁰⁾によると、LES解析で平均風速場に関して妥当な計算結果を得るためには、少なくとも流入境界条件として用いる変動風速場の平均、分散、パワースペクトルを再現する必要がある。さらに空間相関も再現することによって、変動場に関してもより妥当な計算結果が得られることが示されている。

最後に、ここで示したような風速変動の人工的な生成方法を用いると、研究者の望む統計量を任意に設定することにより、異なる統計量をもつ乱流場を作り出すことができ、種々の検討が行える（図9）。これは、



a ; 空間方向に無相関

b ; 空間方向の相関を再現

流入境界面内の空間相関を考慮しないで生成した風速変動を用いた場合 (a) には、下流の計算領域で等風速面の凸凹が細かく風速変動の構造が小さいが、空間相関を再現した場合 (b) には大きな構造が現れる。

図9 流入気流の乱流統計量の違いが下流の流れ場に及ぼす影響

流入境界条件としての乱流場を生成するだけでなく、実験室では作り出せないような、あるいは現実には存在しないような乱流場をも生成することができることを意味し、乱流現象解明のための道具として大いに期待できる。

4. まとめ

大気境界層中の気流性状を数値計算によって解析しようとする場合、対象となる流れは地表面上の複雑な粗度上に発達した乱流場であることが多い。ここでは、そのような複雑粗度上の乱流境界層の数値シミュレーションに際して、地表面粗度の取り扱いと流入境界条件の与え方を概観した。

地表面粗度に関しては、粗度長やベキ指数等の粗度パラメータを用いて地面境界条件として取り込む方法と、流れの支配方程式中に粗度の影響をモデル化して直接取り込む方法を挙げて、それぞれの特徴を検討した。また、流入境界面の気流性状の与え方に関しては、定常流れ場の計算に用いる平均流速場と、非定常な流れ場の計算に用いる変動風速場の生成例を示した。

参考文献

- 丸山 敬：粗面上に発達する乱流境界層の $k-\epsilon$ モデルによるシミュレーション，第3回生研 N S T シンポジウム講演論文集，1988.2，pp.79-85.
- J. C. ロッタ著，大路道雄訳：乱流，岩波書店，1975，4.4章.
- Counihan, J. : Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, Atmospheric environment pergamon press, Vol.5, 1971, pp.637-642.
- Wilson, N. H. and R. H. Shaw : A higher order closure model for canopy flow, Journal of Applied Meteorology, Vol.16, 1977, pp.1197-1205.
- Yamada, T. : A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.60, No.1, 1982, pp.439-454.
- 鶴野伊津志・植田洋匡・若松伸司・中村 晃：乱流モデルによる夜間都市境界層の形成機構の検討，衛生工学研究論文集，Vol.24, 1988, pp.125-137.
- 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治：植物群落 内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その1）乱流モデルの作成，日本建築学会計画系論文報告集第406号，1989.12，pp.1-8.
- 丸山 敬：粗面上に発達する乱流境界層の数値シミュレーション（流れ方向に粗度が変化する場合），第11回風工学シンポジウム，1990.12，pp.203-208.
- 丸山 敬：粗度要素の抵抗および体積変化を考慮したモデルによる乱流境界層の数値計算，日本建築学会構造系論文報告集，第404号，1989.10，pp.75-81.
- 丸山 敬：市街地上空における気流性状の数値計算，日本建築学会構造系論文報告集，第474号，1995.8 pp.49-58.
- 丸山 敬：乱流境界層風洞の数値シミュレーション，日本建築学会構造系論文報告集，第437号，1992.7，pp.135-141.
- 岩谷裕美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション，日本風工学研究会誌，第11号，1982，pp.5-18.
- 星谷勝 (1979)；確立論手法による構造解析，鹿島出版会，pp.87-98.
- Lee, S., Lele, S.K., Moin, P. (1992) : Simulation of spatially evolving turbulence and the applicability of Taylor's hypothesis in compressible flow, Phys. Fluid , A4(7), pp.1521-1530.
- Kameda, H., Morikawa, H. (1992) : An interpolating stochastic process for simulation of conditional random fields, Probabilistic Eng. Mech., Vol. 7, pp. 243-254.
- 丸山敬・盛川仁 (1994)：乱流境界層内の実測データを条件とする風速変動の数値シミュレーション，第13回風工学シンポジウム，573-578.
- 星谷勝：条件付き確率場のシミュレーション理論，土木学会論文集，No.459/I-22, 1993, pp. 113-118.
- 岩谷裕美 (1996)：実測データを組み込んだ多次元風速変動のシミュレーション，日本風工学誌，第69号，1-13.
- 丸山敬・丸山勇祐・W.ロディ・平岡久司：人工的に発生させた流入気流を用いた L E S による乱流境界層の計算，第14回風工学シンポジウム，1996，pp. 217-222.
- 丸山敬 (1998)：流入境界面における乱流統計量の違いが L E S による乱流境界層の計算に及ぼす影響について，日本風工学誌，第74号，35-45.