

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	屋外都市スケールモデル実験COSMOのねらいと成果
Title(English)	Comprehensive Outodoor Scale Model Experiments (COSMO)
著者(和文)	神田 学, 稲垣 厚至
Authors(English)	Manabu KANDA, Atsushi INAGAKI
出典(和文)	日本風工学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 299-306
Citation(English)	, Vol. 33, No. 4, pp. 299-306
発行日 / Pub. date	2008, 10



特集



都市の風通し

屋外都市スケールモデル実験 COSMO のねらいと成果 Comprehensive Outdoor Scale Model Experiments (COSMO)

神田 学*¹ 稲垣厚至*²

Manabu KANDA, Atsushi INAGAKI

1. はじめに

1.1. 建築（マイクロ）と気象（マクロ）の狭間

都市気象は、典型的な分野横断的な複合研究領域である。その学問的指向は様々であるが、建築・土木・気象における最大公約数的な共通関心事項とえば、「都市計画によって都市気象はどこまで制御可能か？」という興味深い問いが1つあろう。この問いに関する議論を横断分野的に開始する出発点として、建築と気象とは同じ命題に対して異なる現象を追いかけているかもしれない、ということ認識しておかなくてはならない。気象分野では、建物群による都市大気全体への影響を問題とし、建築分野では、街区の3次元幾何形状による地表レベルのローカルな人間環境への影響を問題としている。これは、熱帯林のように樹木群による森全体としての大気影響を見る立場なのか、林床部で木漏れ陽を受けて歩く人間の微気象を問題とする立場なのか、の違いに類似している。2つの立場は、単なるスケールの違いだけでなく、場合によっては、全く正反対の政策論につながる本質的な違いをもっている。例えば、建物の高層化は都市気象学的には是非か？という議論において、街路空間への影響（日陰の増加；平均風速の低下；間欠乱流の増加）と、都市全体への影響（抵抗の増加と海風進入の抑制；乱流拡散の増加；大気境界層の上昇）に着目するの

とでは、その価値判断も大きく変わってこよう。現在の都市計画は、経済・行政・主体などの様々な制約から、極めてローカルな建築・街区スケールの環境アセスメントのみで都市気象影響が論じられている。それも大切だが、もう1つの気象学的視点、すなわち、時間的にも空間的にも都市全体への影響を俯瞰するような環境アセスメントが欠落しているという問題点を指摘しておきたい。

1.2. 抵抗（風の通りやすさ）か、拡散か？

「風道」を確保した街が都市気象学的に良いとされる。これは本当であろうか？街全体としては抵抗が小さいということは、乱流による拡散が小さいことを意味する。これは、路面近くに存在する熱やスカラー（例えば交通起因の発生源）の鉛直拡散には不利に働くであろう。一方で、街全体の抵抗が低下することにより、海風の進入は容易になるであろう。抵抗の小さい街を良しとするならば、高層建造物は著しく抵抗を増加させるので、経済性や土地の有効利用は別として、都市の3次元化は環境的には問題であるといえる。

1.3. 都市計画と都市気象—その基礎理論構築へ向けて

「街」か「都市全体」か、「抵抗低減」か、「拡散促進」か、これらの問いに適切に答えるための基礎理論を科学者はまだ持ち合わせていない。都市の幾何形状・材質を大気影響へと一義的に結びつける、その学問体系が

*1 東京工業大学大学院国際開発工学専攻 准教授

Associate Professor, Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology

*2 東京工業大学大学院土木工学専攻 助教

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

必要である。物理的には、乱流過程・放射過程・熱収支過程、が関与するため、その包括化は容易ではない。数値モデルは様々なものが提案されて実用に供されているが、それらと比較しうる物理データが決定的に不足している。近年、実際の都市の接地境界層、いわゆる乱流相似則が近似的に成立するようなフェッチ・観測条件において、スイスのバーゼルと日本の久が原住宅街の2都市で、1年間に渡る、乱流・放射・熱収支の詳細な観測データが取得された。これらのデータセットは、気象学的視点とその基礎理論に立脚したものであり、数値モデルの検証データとして相互比較実験などに利用されようとしている。

よく建築分野から、土地利用や建物が非均一な都市において、たった1カ所のタワーのデータにどのような代表性があるのか、無意味だ、と一刀両断されることがあるが、これは、建築分野の気象分野のアプローチに対する理解不足である。そもそも、流体力学的粗面というのは、微視的には不均一・非一様なものなのである。礫河床の流れは、巨視的には乱流境界層の理論が適用できるわけであるが、礫は均一なビーズではなく、様々な粒径の砂礫が分布をもって混然と河床を形成しているわけである。それにも関わらず、非一様な礫床河川は、均一なビーズよりなる室内風洞実験で蓄積された粗面乱流の基礎理論が驚くほど適用できる。同様に、街区を抜け出して、遙か上空の飛行船から都市表面を眺めれば、礫河川と同様に、都市のインフラなどは粗度要素に過ぎないのである。

ただし、礫床河川と事情が異なるのは、その非一様の度合いが都市によっては著しく大きいこと、とりわけ、大気境界層の1/20以上に達する50m超の高層建物は、もはや、粗度としての取り扱いが不適切になる、という点である。しかし、そのようなエリアは関東全域ではわずかであり、ほとんどは既存の気象学的理論の延用が可能なのである。そのような状況下で、放射・乱流・熱収支の詳細なデータセットを獲得して、検証しているのが、先述した世界的な研究動向である。

1.4. 風洞実験と現地観測を埋める

3章で述べたとおり、実都市における放射・乱流・熱収支の観測データは、モデルの構築・検証において何にも代え難い材料ではあるが、データが不足しすぎている。既存理論の体系化においては、不確定要素（人間活動、幾何・材質の多様性、土地利用の混在）を取り除いた形でのシステムティックな実験が有効である。室内風洞実

験は、乱流場のモデル化には極めて有効であるが、放射・熱収支については適用が難しい。COSMOは、風洞実験と現地観測を埋める、第3の手法として構想・実現したものである。現在のところ、(1) 熱のスカラ輸送効率、(2) 無次元風速分散量、(3) 熱収支の構造、において、既存の室内・現地観測を包括的に体系化することに挑戦し、成功をおさめつつある。

2. 屋外模型都市実験 (COSMO) の紹介

通称 COSMO (= Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment for urban climate) と呼ばれるこの広大な実験施設は、科学技術事業団の創造的戦略研究 (CREST) の経済的支援を受け、都市気象のモデル精度向上のための包括的なデータセット取得を目的として建設された^{1),2)} (図1)。有毒ガスの拡散実態の解明を目的として、コンテナなどを並べた屋外実験はアメリカなどで数例あるが、気象学的関心から計画された大規模な屋外実験は世界で例がない。(1) エネルギー収支、(2) 乱流構造と統計量、(3) 各種地表面パラメータ、などについて詳細で膨大なデータを取得した。本論では、建物幾何形状の違いが運動量や物質の交換効率に及ぼす影響と、境界層中の乱流構造・統計量の成果を中心に紹介する。



図1 屋外都市模型実験施設 (通称 COSMO)

COSMOは、実際の気象条件下にありながら、粗度スケールが通常の日本の2階建て住宅の1/5程度となっており、外層と内層のスケール分離や、レイノルズ数依存性を検討する上で、従来の室内風洞実験と都市でのフィールド観測のギャップを埋める極めてユニークな乱流データを提供することになる。50m x 100mのコンクリート平板の上に1.5m角 (=H) のコンクリートキューブが25%の建坪率で規則正しく並べられている (図2)。

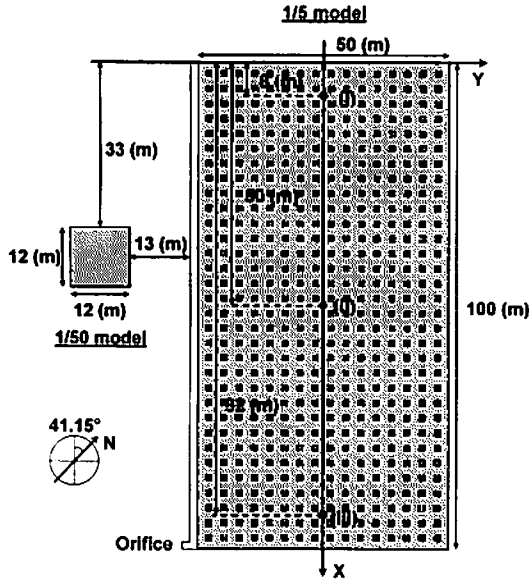


図2 COSMOの平面図

モデルの長手方向(100m)が、このサイト(日本工業大学の敷地内)の卓越季節風の方向にほぼ一致するように配列されている。約8mのタワーが中央線に沿って3カ所に設置されており、風下側のタワー地点では、内部境界層が屋根上空3H程度まで発達することが確認されている。乱流プロファイルの計測や、スパン方向に超音波風速計を並べた乱流組織構造の時空間計測は、主にこの風下地点で行われる。超音波風速計はKaijo(株)製の、cubeの作る細かい渦を捉えるため、50Hzサンプリング率で、センサースパン5cmの特別仕様である。熱慣性・放射・乱流などの物理相似性をチェックするために、この大型模型と幾何学的に相似な15cm角のコンクリートブロック配列が隣に作成されている。

3. 熱粗度の理論体系化

図3は熱輸送に関する流体力学的粗度を整理したものである。縦軸は κB^{-1} で定義され、運動量粗度 z_m に対する熱粗度 z_h を対数で表した。横軸はラフネスレイノルズ数を表す。熱粗度は、2Hレベルの超音波風速温度計による顕熱フラックスの計測値と完全表面温度(構成面の面積重み付き平均温度)の実測値、およびモニン・オブコフ則を仮定して、算定されている。熱粗度のデータは室内・屋外を問わず極めて少なく貴重である。熱粗度が屋

外環境においても粘性(レイノルズ数)に依存するのは極めて重要な点である。完全粗面の場合、運動量輸送は圧力抵抗が支配的なのでスケール効果をほとんど持たないが、スカラーは都市の構成材料の表面ごく近傍における分子粘性による輸送抵抗が支配的なのでこのようなスケール効果が働くのである。

COSMOや現地観測はそのスケールや幾何形状が大きく異なるものの、実線で表される同定曲線は、凸凹面の熱粗度を概ねよく表している。現地観測データは非常にばらつきが大きくなっているが、このばらつきは植生混在率の違いの影響であることがわかっている。縦軸はその定義からわかるように対数プロットであるから、例えばこれが10ということは、熱粗度が運動量粗度より10オーダー小さいと言うことである。繰り返すがこれは壁近傍の分子拡散に起因した輸送抵抗による。数値モデルを使って、熱粗度の設定値が顕熱フラックスおよび感度を調べると、かなり敏感である。気象モデルなどで運動量粗度と同様のスカラー粗度が使用されることは無くなってきたが、他の地表面と比べても都市表面のスカラー粗度は極めて小さく、これら観測によって得られた知識をモデルに適切に反映させていく必要があるであろう。COSMOのいかなる幾何配列でも、すべての図中の実験上にプロットされることが判明した。

4. 抵抗係数と熱交換係数の理論式

抵抗係数はスケール依存性が無視できるので、従来までの風洞実験の蓄積が利用可能である。例えば、Macdonald et al.³⁾(1989)により修正粗度長と運動量粗度の実験式が利用可能である。一方、熱の輸送についてはCOSMOで得られた図2の実験式が利用可能である。これらをMonin-Obukhovの相似理論に代入すると、都市の幾何形状(建坪率・フロントルエリア指数・建物高さ、など)を説明変数とした、運動量・熱の交換係数が与えられる。建物高さが非均一である場合は、第一次的な理論近似として、低い建物を無視したり、高い建物と低い建物の屋根面を地表面としての取り扱うことで理論式の提示が可能である。図4には、理論交換係数とCOSMOにおける様々な幾何形状(横軸は建坪率)に対する実験データが、スタガード配列の場合について、プロットされている。抵抗係数は建物配列密度に極めて敏感であるが、熱の輸送係数はそれほどでもない。これは、運動量輸送の場合においてのみ、圧力抵抗が作用することに対応している。一方、建物の高さを不均一にした場合は

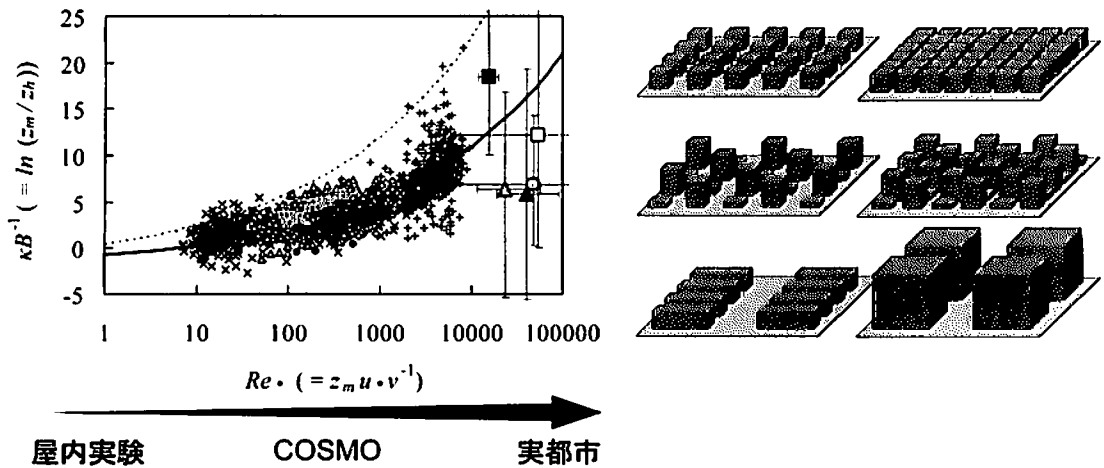


図3 熱粗度のスケール効果 (κB^{-1} と Re^* の関係) 植物を含まない都市形状はいかなる配列でも図中の実線上にプロットされる。植物影響についても補正式が提案されている。

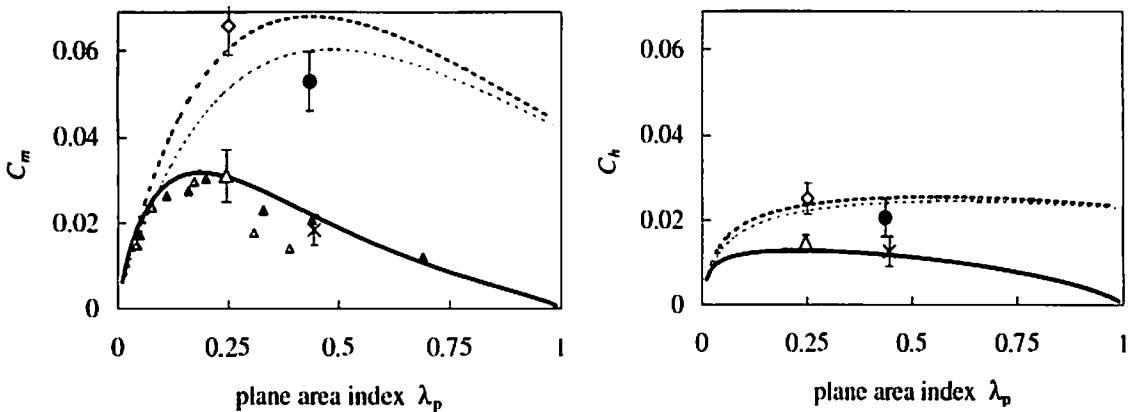


図4 抵抗係数(左図)および熱のバルク輸送係数(右図)に対する建坪率の理論関係。実線が様な建物高さの配列に対する理論関係式。点線・破線は、低層建物を無視した場合と、低層建物の屋根面を地表面と読み替えた場合の理論式。図中、誤差バー付きのプロットはCOSMOの実験データを示す。

均一な場合に比べて、運動量で2~3倍、熱で1.5~2倍程度に、交換係数が増加している。スカイラインを崩すことは美観上好ましくないが、運動量・熱・スカラーの鉛直拡散という点からは極めて効果的であると言える。

理論・実験では、建坪率20%近傍、建物高度に分散を持たせることが、乱流交換としては効果的であることが読みとれる。この基礎理論から直ちに都市計画に関する政策提言に結びつけることは難しいが、この理論を気象予測モデルや環境アセスメントモデルに導入すれば、都市計画による都市全体への影響を予測・定量化する上で有効であろう。COSMOはその体系化への一歩に貢献できたものと考えている。

ところで、都市の幾何構造の違いは、顕熱輸送量や抵抗(運動量フラックス)にどの程度影響を及ぼすであろうか? 図5に、COSMOの1/50モデルで得られた結果をまとめた。これは、図3右に示したような異なる幾何形状を有する1/50モデルを2つ隣接させて、XY軸に、それぞれのモデルの顕熱・運動量フラックスをプロットして、幾何形状の感度を調べたものである。1:1のラインは幾何形状によらずに同じフラックスを与えていることを意味している。

運動量フラックス(図5上)については、抵抗係数から予想されるように、幾何形状によって大きな差が生じている。とりわけ、建物高さに分散を持たせた場合は、

抵抗の増加が著しい。一方、顕熱フラックス(図5下)は、幾何形状の影響を抵抗ほどには受けない。これは、熱のバルク係数自体が幾何形状に敏感でないことに加え、乱流交換の促進により、顕熱フラックスが増加すると、地表面・キャノピー層の表面温度が低下するために、上空大気との温度差が小さくなり、顕熱フラックスの増加が抑制されるためである。すなわち、負のフィードバック効果が働いている。風速は地表面が常に0であるから、温度のようなスカラーと異なり、このようなフィードバック効果は働かない。

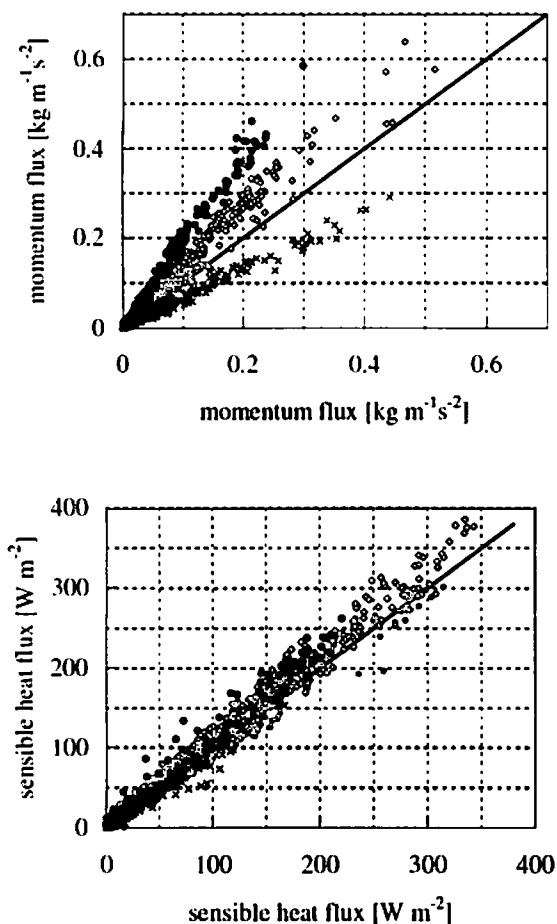


図5 隣接した2つの1/50スケールモデルの運動量フラックス(上図)および顕熱フラックス(下図)の結果。比較した1/50モデルは図3右のような様々な建坪率・高さ分散の組み合わせとなっている。1:1の直線は、2つのモデルの運動量あるいは顕熱フラックスが等しいこと、このラインから離れるほど、幾何形状の違いに応じて、異なる乱流フラックスとなっていることを意味している。

5. COSMOにおける乱流組織構造

都市境界層も植生境界層と同様に、屋根面近傍に水平平均風速の変曲点が存在するので、自由せん断乱流において観測される大規模なローラー構造が存在するものと予想していたが、結果は大きく異なり、平板境界層で盛んに研究されている乱流の階層構造と非常に近い構造が得られている。

COSMOにおける、風上(北西)・風下(南東)側において、スパン方向(高さ2H)に超音波風速計をそれぞれ15台ずつ並べて(図6)風速・温度変動を30分間にかけて記録した。このときの平均風速は4.4 m/s、水平風向偏差はCOSMOの北西-南東軸より5°以下であった。

乱流構造の抽出にあたっては内部スケールに関して自己相似な、それはつまりモニン・オブコフ相似則に従うような、地表面条件に対応した構造に着目するため、地表面起因ではない外層スケールのインアクティブな水平風速の変動成分は除去するのが望ましい。インアクティブな変動とはここでは大気境界層混合に起因した水平風速の低周波変動であり、それは鉛直風速分散や運動量輸送には影響を及ぼさないことがCOSMOにおいて確認されている(Inagaki and Kanda⁴⁾ 2008)。

そこで以下2つの仮定に基づいてアクティブな内部起因の乱流変動とインアクティブな外部起因の乱流変動の分離を試みる。まず内部と外部起因の変動が十分スケール分離されており相互作用しないと考え線形分離できるものとする。またCOSMOの水平スケール(幅50m)が大気境界層混合に起因する外層変動の水平スケール(約1000m)に比べ十分小さく、COSMO内で発達する内部スケールの乱流変動より十分大きいこと、幅約50mに渡って並べられた15点のスパン方向(空間)平均により、

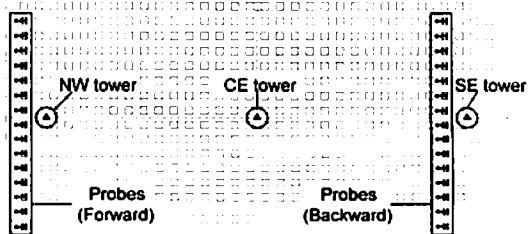


図6 水平分布計測のための風速計配置図
超音波風速計はCOSMOの風上、風下の位置に、高度3m、水平一列に配置されている。図の左(北西)からの風向のみ解析する。

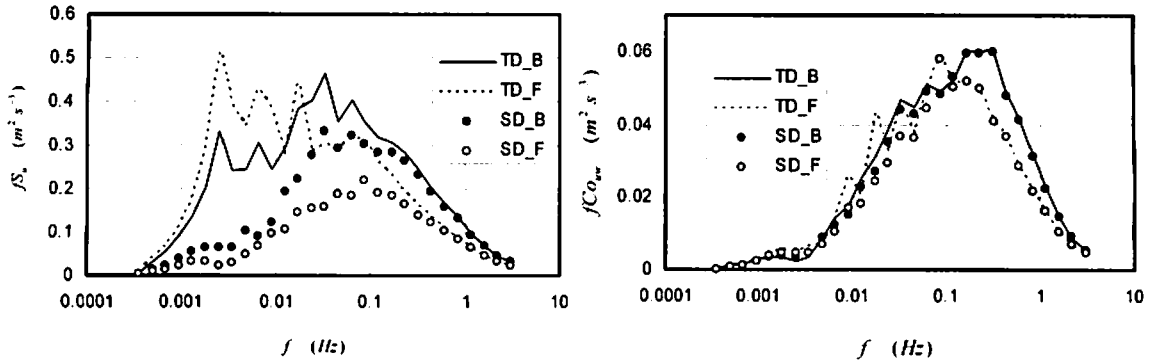


図7 プレマルチスペクトル (左図: 水平風速 右図: レイノルズ応力のスペクトル) TDは通常的时间変動, SDはスパン方向平均成分除去後のスペクトル。Fは風上側, Bは風下側の16台平均。スパン平均除去により水平風速スペクトルの低周波成分は大きく減少するが、レイノルズ応力のコスペクトルにはほとんど変化が無い。

内部変動成分は打ち消し合い、外部変動成分のみが残ると考える。これを瞬間値から差し引くことでインアクティブな変動成分が除去されると考える。

このスパン方向平均値の除去前と除去後で、スペクトル形状を比較すると(図7)、上記のような大胆な仮定にも関わらず、水平風速成分だけから外層乱れの影響が除

去され、レイノルズ応力のスペクトルには影響しないことが示された。図8は、COSMOの風下側で計測された主流水平風速のスパン方向(縦軸)と時間(横軸)のチャートを表している。図8(a)と図8(b)は、いずれも主流風速の擾乱を表しているが、擾乱成分の定義が異なる。上図(a)は通常の大気研究で用いられる30分間の時間平

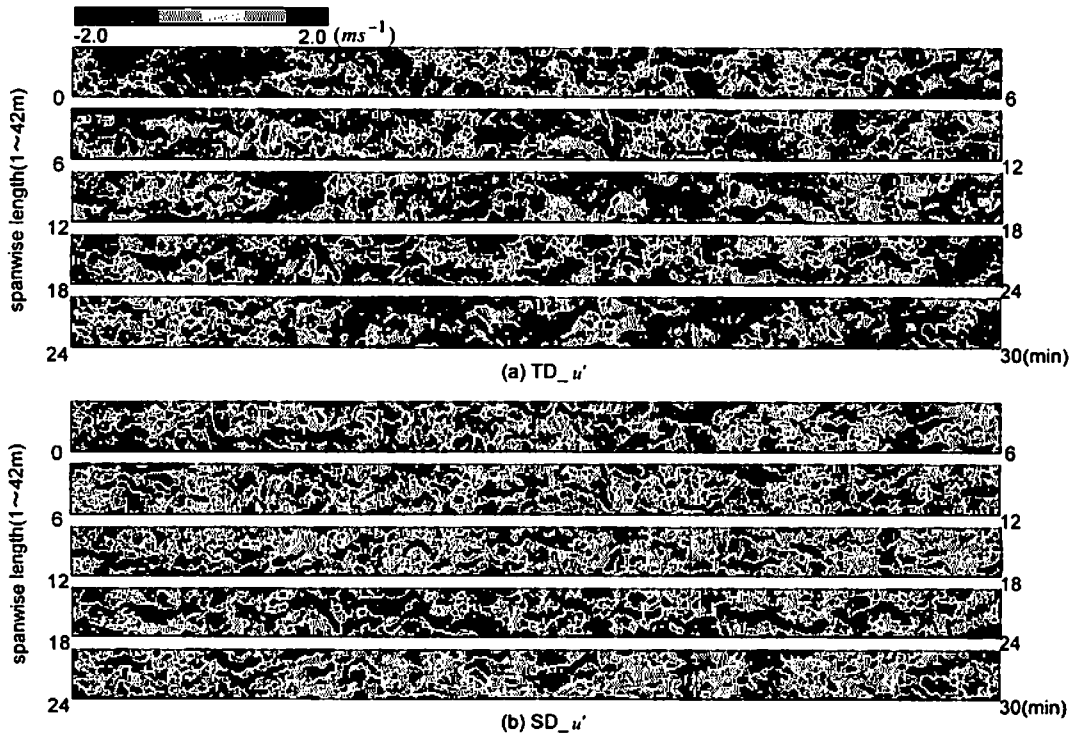


図8 主流水平風速のスパン方向(縦軸)と時間(横軸)のチャート(高さ2H) COSMO下流側
上図(a)と下図(b)は、いずれも主流風速の擾乱を表しているが、擾乱成分の定義が異なる。上図(a)は通常の大気研究で用いられる30分間の時間平均値を基準に擾乱風速成分を定義した場合で、外層スケールの乱れに依るものと考えられる大きなガスト成分が見られる。下図(b)は、15点のスパン方向平均値(瞬間値)から擾乱成分を定義した場合で、大規模なガストは消え、ストリークが明示されている。

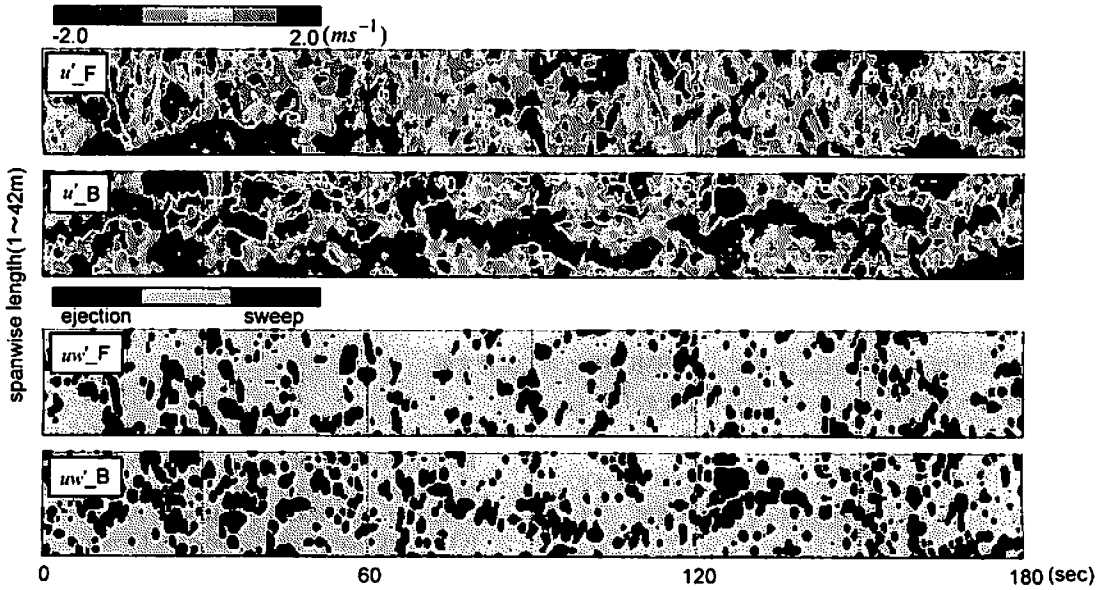


図9 低周波成分を除去した後の乱流組織構造 スパン方向(縦軸)と時間(横軸)のチャート
 上図は、COSMO 風上側 (u'_F) と風下側 (u'_B) の主流風速擾乱成分の比較。風下側で蛇行する低速ストリークが明示されている。下図は、CCOSMO 風上側 (uw'_F) と風下側 (uw'_B) のレイノルズ応力成分の比較。風下側では、低速ストリークに沿って、それよりスケールの小さい、レイノルズ応力(主にイジェクション)が生成されている。

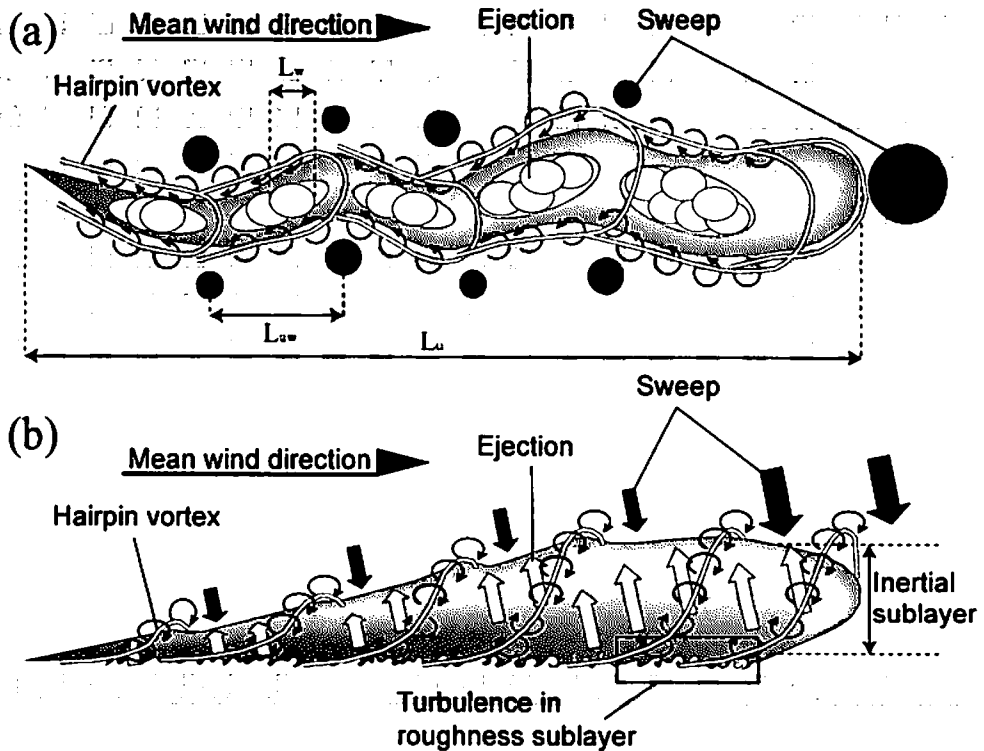


図10 内部境界層における乱流組織構造の概念図(上: xy 面, 下: xz 面)
 複数のヘアピン渦が流れ方向に連なり、一つの大きな構造を形成している。ヘアピン渦の内側では渦の巻き上げによるイジェクションが生じており、周囲に比べて低速の領域となっている。ヘアピンのヘッド部では上空空気の巻き込みによりスイープが生じる。

均値を基準に擾乱風速成分を定義した場合で、外層スケールの乱れに依るものと考えられる大きなガスト成分が見られる。下図(b)は、15点のスパン方向平均値(瞬間値)から擾乱成分を定義した場合で、大規模なガストは消え、ストリークが明示されていることが確認できる。

図9は、上記のスパン方向平均値を差し引く手法で低周波成分を除去した後の乱流組織構造を表している。上図は、COSMO 風上側と風下側の主流風速擾乱成分の比較である。風下側には、風上側で見られない蛇行する低速ストリークが明示されている。下図は、COSMO 風上側と風下側(uw'_B)でレイノルズ応力成分を比較したものである。風下側では、低速ストリークに沿って、それよりスケールの小さい、レイノルズ応力(主にスウィープ)が生成されている。四象限解析を行った結果、これらストリークに沿ったイジェクションとスウィープが全運動量輸送の7割近くを担っていることが分かった。

図10は、COSMOにおける一連の観測結果及び、Adrian et al. (2000)³⁾の乱流構造モデルを参考にして推定した、COSMOで発達している乱流構造の模式図である。複数のヘアピン渦が流れ方向に連なることで1つの大きな構造を形成している。ヘアピン渦の内側では渦の巻き上げによってイジェクションが生じており、低速領域となっている。一方ヘアピン渦の上端では上空空気の巻き込みによるスウィープが生じている。地表面凹凸が乱流構造の形状に及ぼす影響については、凹凸の近傍では

個々の凹凸に応じた流れ場が形成されるものの、それより上空では地表面条件に依らない普遍的な構造となっていることが予想される。

この概念図においてはヘアピン渦が重要な役割を果たしているが、対数層の中でその存在を直接的に観測した例はまだ無い。しかしながらこれまでの室内実験や数値解析においてその状況証拠は多数観測されており、これについては今後の課題とされる。

参考文献

- 1) Kawai, T., Kanda, M., Narita, K., and Hagishima, A., Evaluation of simple urban energy balance model for mesoscale simulation (SUMM) with comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate (COSMO), *International Journal of Climatology* 2007 (in press).
- 2) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Sugawara, H., and Moriwaki, R., Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46, 1067-1079.
- 3) Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, 1998, 32, 1857-1864.
- 4) Inagaki, A. and Kanda, M., Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow, *J. Fluid Mech.*, 2008 (in press).
- 5) Adrian, R. J., Meinhart, C. D. & Tomkins, C. D. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 2000, 422, 1-54.