建物周辺気流の数値シミュレーション

東京大学教授 村上 周三

Shuzo Murakami

昭和60年5月23日、国立教育会館で行なわれた年次学術講演合特別講演の録音をもとに誌上再録したものです。活字への再現に際しての編集・構成は講演担当委員が行ないました。K.T

1 はじめに

ただいまご紹介にあずかりました村上でございます。今日は写真測量学会にお招きいただき、どうも有難うございます。私は村井先生と同じ東大生研におります関係から、この集りで何か話しをするようにという依頼を受けました。お話する内容は私が日頃から研究していることが一番よいと思いますので、最近力を入れてやっております「建物周辺気流の数値シミュレーション」についてお話しします。村井先生より、この集りには流体力学の専門家は少ないので、数式はできるだけ使わず、なるべく画像を多くして話をするようにというご指示を得ました。できるだけこのご指示に沿うように努めたいと思い、OHPとビデオを用意しました。

このビデオは建物周辺の気流を見るために、レーザーを用いて流れを可視化したものです。これを御覧いただくとわかりますように、建物のまわりは極めて乱れが強いわけでございます。例えば、飛行機の周りの流れなどは、流線形をした物体が静止した流れの中を移動しますので、「流れ場」は比較的きれいでありますが、建物の周りは主風向もわからない程、複雑な流れになります。

建物周辺の風というのは、皆さんも既にご存知のように、過去15年くらい超高層ビルの建設があいつぎ、いわゆる「ビル風」による突風が発生するようになり、大きな社会問題として取り上げられるようになりました。私の研究室もこのテーマの解明に携わってきました。研究の手段としては、風洞実験による方法が世界

的にみて主流となっております。但し、将来の姿としては、私どもは大型コンピュータによる数値シミュレーションという方法も、この問題のある部分の解析・予測に使い得る可能性があるというように考えまして、ここ数年精力的にとりくんでいるわけです。今日はこれについてご紹介したいと思います。

2 風洞実験と流れの可視化

まず、ビル風に関する典型的な風洞実験の話をしてします。建物周辺の流れの解析を風洞で実験するにはどうするかと申しますと、教室の廊下のようなばかでない風洞に、超高層ビルと周辺の低層市街地—これをラフネスと呼んでいます—の模型を作って、これに風を送って流れを見るわけです。大変な手間と費用がかかるわけでありまして、模型だけで数100万円も必要となることがあります。ところで、この風洞の中の風の流れを見たいと考えるわけですが、従来は、風に煙のようなトレーサーを出し、可視光線を照射して見ておりました。可視光線の場合光が弱いものですから、非常にたくさんのトレーサーを出さなければならぬ。た

写真1 レーザーライトシートによる
建物周辺気流の可視化

くさんトレーサーを出すと、全体がモヤモヤと煙みたいになってしまっ、1個1個の粒子が見えなくなってしまう。そこで、我々の研究室ではレーザーを使いました。風洞の中の建物の周りの流れに対して、レーザーライトシート、つまり、レーザービームを膜状に照射するわけです。こうすると1個1個のトレーサー粒子の動きを見ることが出来ます。このように粒子の動きが可視化されますことは、我々乱流の研究者にとって示唆を得ることが多く、この分野の研究に大いに貢献する可視化手法となりました。ビデオによる可視化の映像を御覧になっていただきます。(ビデオ放映)

御覧いただいている映像でおわかりのように、平均流では表現されていない渦(乱流)の発生、消滅の状況がよくわかると思います。ここで用いているトレーサー粒子は炭酸マグネシウムで、大きさは $5 \sim 10 \mu$ です。炭酸マグネシウムというのは、鉄棒の選手が滑り止めに手につける、あの白い粉です。レーザーはアルゴンイオンレーザーで、4 W ぐらいのものです。それをシリンドリカルレンズを通して非常に薄い $5 \text{ mm} \sim 1 \text{ cm}$ の膜状の光のシートにして、上から照らしております。風速は $1 \sim 2 \text{ m/sec}$ ぐらいです。ほんとうはもっと風速を大きくしたいのですが、あまり速すると粒子の拡散が早くなって見えなくなります。従来の可視光線の場合、風速は数 10 cm/sec 位までしか上げられなかったのですから、それに較べれば改良されていると言えます。

ところで、風害というものが発生する主要な原因の1つとして、気流の流れ、つまり渦が発生したり移動したり消滅したりする現象に関連して、瞬間的に強い風が吹いたり、風向が変化したりすることを指摘する

図1 横長の高層建物周辺の流れのパターン

図2 縦長の高層建物周辺の流れパターン

図3 風上に低層物がある高層建物周辺の流れパターン

図4 建物に当たった風の流れ方

ことができます。単に強い風が吹いているだけの場合に比べ、風向風速の変動がありますと、風害は一段と生じやすくなります。例えばヒマラヤ登山などの場合、4～50m/secの風の中を歩くこともあるそうですが、一様の風であれば、人間は体を風の方向に傾けて巧みにバランスをとって歩いていきます。ところが、風が強かったり弱かったり、風向きが変わったりすると、人間はたちまちバランスを失ってしまいます。山の歌に『山で吹かれりゃ～よ～』というのがありますが、これは山の陸線などで強弱のある風に吹かれて、登山者がバランスを失ってけがを踏みはず状況を唱ったものだと解釈しております。

それでは次に、流れの典型的な例をいくつかお見せします。まず図1は、建物が横長の例です。この場合流れは主に建物の上を越えて流れ、反対側に逆流が生じます。図2は建物が高い場合です。この時は建物の

両側から建物をまわりこんで流れます。いずれの場合も図の中の角の所に剥離流を生じ、こういう部分の近くでしばしば強い流れが生じ、風害が起きるわけです。また、高層建造物と低層の建物が2棟並んだ場合にも、高層にぶつかった流れが低層棟の風下壁面に向う非常に強い逆流となり、風害問題を起すことがあります。(図3)このように、風害を起す典型的な流れは、①逆流、②角部に生じる縮流、③狭い場所を通過する縮流の3つに整理することができます。

風の流れを別の表現で模式的に示したものが図4です。この図からわかるように、風が建物にぶつかりとプラス圧の領域ができます。単純にいうと、このプラスからマイナスに向かって流れが生じ、この時に強い流れになります。このように建物周辺の流れは、平均的な流れ場として表示しますと割合単純な流れに見えるのですが、実際の流れは非常に大きな変動を伴って

います。しかも我々人間や建物が被害を受けるのは、変動に伴う『突風』つまり最大瞬間風速であります。従って、平均流の研究と同時にこの瞬間風速の研究がされなければなりません。風害の解明に流れの変動—つまり乱流現象—の解明が必要な由縁でもあり、また大変むづかしい問題でもあるのです。そしてこのような複雑な流れの現象を数式を用いて解析的に解くというようなことは不可能でありますから、もっぱら風洞実験に頼って解析していたわけです。余談になりますが、大きなビルを建設する時には、アセスメント条例に従って、ビル風が発生しないかどうかを風洞実験によってチェックするのが慣例になっています。

複雑な流れの方程式を解析的に解くことは、現在は勿論、将来も不可能でありましょうが、最近、コンピュータの発達で、これらの方程式を数値シミュレーションにより解くことができるという可能性が出てきました。この可能性は日毎に現実味を増しております。では次にこの内容について御説明します。

3 数値シミュレーションの方法

さて、数式はなるべく使わないで話をするようにという指示をいただいている訳ですが、少しだけ使わせていただきます。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad \dots\dots\dots ①$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots ②$$

ここで U_i ($i = 1, 2, 3$) : 速度ベクトルの各成分
 P : 流体密度 ρ で割った圧力
 ν : 分子動粘性係数

①は運動量保存の方程式で通常ナヴィエ・ストークスの方程式といわれています。②は質量保存の方程式で通常連続式といわれているものです。つまり、この①式と②式で乱流現象も記述できるわけです。ところがこのナヴィエ・ストークスの方程式は、数学的に大変性質の悪い非線形の方程式でありますから、解析的な方法では、現在は勿論将来においても絶対に解けないものと考えられます。そこで、数値計算の手法により解を求めざるを得ません。幸に、最近ではスーパーコンピュータが出現したので、乱流の統計理論とスーパーコンピュータの組合せで、数値シミュレーションにより乱流を正しく解析することが現実味を帯びてきたわけです。

さて①式ですが、ここでは U, V, W の3方向と圧力 P の4つが場の変数で、時空間におけるこの4つの変数の値がすべてわかれば流体の状況が全部わかったことになります。それでは具体的に数値シミュレーションを行う場合にどうするかといいますと、流れの場を細く分割して、分割されたメッシュ毎に方程式を考えます。このようにすると、もともと偏微分方程式で表わされていたものが、足し算と引き算を中心とした代数方程式の集合で表わされるようになり、解析するこ

図5 室内に存在する様々なスケールの乱流渦

とが可能になる訳です。例えば我々のやっている建物周辺気流の場合でありますと、建物の周りを細かい直方体のメッシュに分割するわけです。直方体の数は3万くらいになります。この3万というメッシュ数は、一昔まえには考えられない位大きいものでしたが、計算機の進歩でこのように大きな数のメッシュを用いることができるようになりました。数値計算の場合、このメッシュの間隔はできるだけ細かい方がいいわけです。細かいほど、先程のナビエ・ストークスの偏微分方程式を、メッシュ間の微小部分について差分で代替した場合の精度がよくなります。つまり数学的に性質の悪いナビエ・ストークスの方程式をかなり精度よく代数方程式で解くことができることになります。しかし、メッシュの数だけ差分方程式が出てくるわけですから、計算量が増加します。又計算に伴う誤差の問題も無視できません。差分の方法に従って、中心差分とか前進差分とか後退差分とか、又その差分誤差についても、1次精度、2次精度といろいろあるわけでありまして、一口に数値積分といいましても、多くの内容を含んだ大きな研究分野となっているわけです。従って、やり方次第でうまくいったりいかなかったりします。

一方、流体力学的にもメッシュは細かい方がよいわけです。その理由は、流体というのは非常に大きな渦から小さな渦までが重なった構造になっておりまして、なるべくメッシュを小さくして細い渦まで捉えた方が、正しい流れが予測されたことになるからです。例えば大きな方の渦は、台風とか大平洋の高気圧というようなものが考えられます。小さな方の渦では、我々が街で遭う突風などがあります。さらに小さなものとすると煙草の煙のゆらぎなどです。図5は室内気流を例として考えたものです。一番大きな渦は部屋と同じスケールの渦です。小さな渦は数ミリ、あるいはもっと小さなものもあります。これらが総体として乱流を構成している訳です。ですから理想的なのは、一番細かい渦—これを最小渦といいます—まで解くことです。それらは気体の分子よりわずか3桁くらい大きなだけのサイズですが、大変小さいものです。ですから、このような小さな渦まで捉えるように細かくメッシュを分割することは不可能です。何故かといいますと、部屋の一边を1/30に分割しても、メッシュ数は30×30×30で約3万くらいになります。部屋の大きさを、例えば一边を10mとしても、メッシュの長さはその

1/30ですから約30cmの大きさです。このことから直感的に、1mmより小さいような最小渦のサイズに空間を分割することは不可能であるという事がおわかりいただけるでしょう。従ってどうしても、粗いメッシュで計算したことによる誤差が発生するのを避けることはできません。つまり、この数値シミュレーションというのは一種のローパスフィルターになっているわけで、メッシュより細かい乱流現象はカットされてしまいます。そこが大変重要な点でありまして、メッシュより小さい現象、つまりローパスフィルターで落ちてしまうものを何等かの方法で拾ってやって、正しい答えにしなければならない。これが乱流のモデル化というものでありまして、シミュレーションの難しいところであります。

では理想的には細かいメッシュ分割はどの程度になるかということについて説明します。その場合にはメッシュ分割幅hを、少くとも最小渦 ℓ 程度に小さくしなければなりません。やや専門になりますが、流体の統計理論によれば、最小渦はコロモゴロフのマイクロスケールと呼ばれているもので、 ℓ と表現されます。一方シミュレーションの対象エリアの大きさと最小渦 ℓ の比は、レイノルズ数Reの $^{-3/4}$ 乗に比例するといわれています。これらを式に表現しますと下のようになります。

$$h \sim \ell$$
$$\frac{h}{L} \sim Re^{-4/3}$$

この場合必要なメッシュ分割数は、一辺で h/L になります。これが一方向のメッシュ分割数ですから、3次元ですとこの3乗のメッシュ分割数が必要となります。上に示した両式からレイノルズ数との対応で必要なメッシュ分割数の値を計算すれば表1のようになります。

表 1

Re数	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸
N	10 ⁹	10 ¹³	10 ¹⁸

表1中のNの値は、Reに対応して必要とされる格子分割の総数です。土木工学の分野で扱う現象の場合、しばしばレイノルズ数は約10⁸くらい、建築の場合でも10⁶くらいになります。10⁶にしても10¹³という途方もないメッシュ分割が必要とされることになります。東大のスーパーコンピューターを使いましても、せい

ぜい 10^5 くらいのメッシュ分割数が計算に供し得る最大値です。従って、コンピュータの発達がいくら急速でも、表1に示すような最小渦まで捉えるような細かいメッシュを用いるシミュレーションは不可能であるということが、よくお判りいただけると思います。従って、最小渦まで解析できないとなれば、メッシュ分割というローパスフィルターによりカットされる部分を取り込むため、何等かのモデル化が必要になります。そのためにいろいろなモデルが提案されています。乱流のシミュレーションモデルには、代数モデル、1方程式モデル、2方程式モデル、応力方程式モデル或いは Large Eddy Simulation 等いろいろなものがあります。代表的なものは2方程式モデルです。これらのモデルの詳しい内容が必要でしたら、私の論文⁽¹⁾を御覧になってください。繰り返しますが、メッシュ分割幅 h を最小渦の大きさ ℓ と同じくらいまで小さくすることができれば、ほぼ完全に乱流の運動を記述することができるようになります。従って、さきほどのナビエ・ストークスの方程式を、モデル化することなしにそのまま解けばよいことになる。つまり、元の方程式を近似化しないで解くことから、この方法をダイレクト・シミュレーションと呼んでいます。

それでは、このようなシミュレーションモデルを使って乱流を解くと計算量はどのくらいになるかということの説明します。我々が行っているメッシュ分割は 3×10^4 ですが、これは現在日本で行われているシミュレーションの中では相当大きな部類に属します。このメッシュ分割によりさきほど述べました2方程式モデルを用いて解きますと、1つのメッシュにつき、未知数は風速の3成分 U, V, W の他に圧力 P 、乱流エネルギー k とエネルギー散逸率 ϵ の6つになります。従って、ある時点の流れ場で3万メッシュ $\times$ 6 $\approx$ 20万ぐらいの未知数になります。これを多元の連立方程式で解くわけです。方程式は連続式(質量保存の式)、ナビエ・ストークスの運動量保存の方程式(3成分について)、運動エネルギーの輸送方程式、エネルギー散逸の方程式の6つで未知数の数と同じになります。これらの方程式の多くは非線形の難しい方程式ですから、逐次近似を行わないと解くことができません。従って一つの流れ場を解くだけでも莫大な量の計算になります。このようなシミュレーションでは定常状態になるまで約3万ステップを必要としますから、計算は(未知数20万) $\times$ (3万) で約60億ぐらいの計算量になり

ます。先程もいいましたように各時間ステップに逐次近似が含まれますから、実際はこれの何十倍もの計算量になります。これをスーパーコンピュータ HITAC S810-20でやると、早くて1時間、大きいものと10時間というような計算時間となります。このようなわけですから工学的実用性ということになりますとやや問題がありまして、現状では大学などでなければ行えないというのが実情です。もっとも我々の研究は、計算時間にとらわれず、どこまで物理現象に近づくことができるかということを問題にして、なるべく厳密にシミュレーションをしようという立場でやっています。従って、工学的な立場から、多少誤差が入ってもいいという考え方で誤差の許容範囲をゆるめれば、計算時間の点でもっと楽な方法を考えることは可能だと思います。

4 数値シミュレーションと実験の対応

次に具体的なシミュレーションをお見せします。図6の上段はレーザーライトシートで可視化した風洞実験の結果です。下段は数値シミュレーションの結果です。建物のリーディングエッジで発生する剥離や、建物の背後の大きな wake とか、下向きのダウンフローなど、部分的に一致してないところもありますが、全体としてはかなりよく再現されています。建物周辺の流れの場合、剥離等の複雑な現象が生じるのは建物の周辺です。ですからメッシュ分割もなるべく建物周辺は細かくしています。この様子を図7に示します。全て乱流現象というのは、風速勾配の大きい所でいろいろ難しい問題が生じます。従って、これを捉えることのできるようなメッシュ分割を考慮する必要があります。建物から離れた空間では、ほぼ一様に流れていますので、大きなメッシュでも流れの構造を十分捉えることができます。ところが建物周辺では、風速勾配が大きいので、細かいメッシュ分割をしておかないと乱流現象は捉えることができません。そこで図7のようなメッシュ分割をするわけです。

図8は、やはり数値シミュレーションと風洞実験の結果です。これは先ほどのものと違って、水平断面を示しています。これも両者を比較して、まあ一致しているといえるでしょう。特に数値シミュレーションの方は、結果をかなり間引いて表現しています。すなわち、風洞実験に較べ相当に細かい流れ場まで予測され

レーザーライトシートによる可視化

風洞実験 ($Re \approx 1 \times 10^4$)

数値シミュレーション

図6 平均風速ベクトル ($\langle \bar{U} \rangle + \langle \bar{W} \rangle$) の比較 (中心軸上)

図7 不等間隔メッシュによる計算領域 (鉛直断面)

ています。

図9は建物の壁面の風圧です。上段が建物の中心における鉛直断面で、下段が水平断面を示したものです。結果は●●が風洞実験、○—, □—が数値シミュレーションであります。また、境界条件を変えてシミュレーションを行ったものも示しています。風上側ではよく一致していますが、角の部分と風下側では一致の

風速分布—数値シミュレーション

(水平断面・ $Z = Hb/2$) (模型壁面付近で $1/4$ 乗の風速分布を用いた場合)

風速分布—風洞実験

(水平断面・ $Z = Hb/2$) ($U_b = 5.6 \text{ m/s}$ $Re = 4 \times 10^4$)

図8 風速分布の比較

(1) 鉛直断面 ($Y = 0$)

(2) 鉛直断面 ($Y = 0.75Hb$)

図9 風圧係数の比較 ($U_b = 5.6 \text{ m/s}$ $Re = 4 \times 10^4$)

程度がよくありません。壁面風圧というのは、流体と固体の接する所での値を予測する訳でありまして、シミュレーションの対象として最もやっかいな部分です。こういう所では境界条件の選び方の影響が結果に強く現れます。そういう意味で、風圧の予測などはまだまだうまくいっておりません。今後数値シミュレーションが進歩しても解決しにくい問題として、最後まで残るものだと思います。

図10 C/C_0 の分布の比較 (中心軸上の鉛直断面)

図10は煙突からの煙の拡散の数値シミュレーションの例です。やはり煙突周辺は細かくメッシュ分割を行っています。風洞実験の結果と比較しますと、数値シミュレーションの方がやや拡散の幅が広がっています。これは拡散係数がやや大きくなっているということですが、我々が知りたい濃度の高い部分はかなりよく一致しているといつてよいと思います。このようなシミュレーションは、工場の煙突の煙やビルのクーリングタワーの水蒸気の拡散のような、建物近傍の小スケールの拡散に関連した問題の環境予測には有望ではないかと考えています。

いままでお話したのは平均流を予測するシミュレーション方法で、2方程式モデルというものを用いています。時間的に変動する現象を予測する方法もあります。それは Large Eddy Simulation (LES) という手法です。図11は建物の風上の点からマーカーを飛ばしていくとどのような拡散するかということを調べたものです。15秒後、20秒後、30秒後の状態を示していま

図11 ストリークラインの時間的变化

す。次に、このように数値シミュレーションで予測された変動現象が、どこまで自然現象を再現しているかということ調べてみます。図12は風速の時系列変動を波形としてみたものです。①は風洞実験の結果であり、②③は数値シミュレーションです。この結果からわかりますように、数値シミュレーションでは定数の値によって高周波成分の変動が見られなくなる、つまりローパスフィルターがかかった状況になることがわかります。しかし全体の波形はよく似ています。両者の波形から乱れの強さやスペクトルも計算してみましたが、よく一致しておりまして、波形の変動もある程度再現されているのだということが確認できました。つまり、マーカーを飛ばした軌跡を観察しておりますと、普通のマーカーとはかなり異った飛び方をしているものもありますが、これは間違つてシミュレーションされた訳ではなく、きちんとした意味を持っており、統計的には稀にこういうマーカーもあるのだと理解してよいということです。

図11のアニメーションでは、マーカーが15秒後に消

図12 平板境界層内の u 成分の変動 ($Z=Hb$)

写真2 ストリークライン

えるようにプログラムされてありましたが、写真2ではマーカの軌跡が消えないようにプログラムして示しています。

5 これからの研究の方向と課題

以上御覧いただきましたように、数値シミュレーションは建物周辺の流れの場を時刻各に順次計算してゆくことができるということを示しております。図11も写真2も、ある瞬間の流れの場を示しています。これは実験では絶対に得られない情報です。例えば、これらの図のどこか1点に風速計を設置しておけば、ある1点における風速の情報を得ることはできますが、シミュレーションのように場全体の風速を知ることはできません。また、数値シミュレーションでは、実験では得にくい空間相関の資料も容易に得ることができます。これは、今まで実験や観測のみに頼って仕事を進めてきた研究者にとっては夢のような状況です。またシミュレーションの技術が今後どこまで進歩するのか、予測がつかないという興味もあります。このように数値シミュレーションは無限の可能性を持っています。これはもう理論でも実験でもない新しい研究の分野、すなわち Computational Engineering ということができます。例えばパイプの中に物体があって、その物体により発生した乱れの減衰の状況を調べたいというような場合、減衰がゆっくりですから、実験で調べようとするとものすごく長いパイプが必要になり実際には不可能です。しかし数値シミュレーションにはそのような制約はありません。シミュレーションが威力を発揮する一つの例です。

しかしながら、今までは比較的うまくいったシミュレーションの例を中心に話して来ましたが、うまくいく場合ばかりではありません。特に、境界条件の与え方は大変難しい問題です。固体と流体の接する場合、ミクロに見ますと流体は止まっています。我々はこれを No Slip とよんでいます。マクロに見ますと緩い速度勾配をもって表面を滑っているように見えます。これを Free Slip とよんでいます。工学的には後者の見方でモデル化した方が正しい場合も多いようです。特に、細かいメッシュ分割の場合は No Slip のモデルでもよいのですが、建物を対象とするような場合はどうしても大きなメッシュ分割にならざるを得ず、このよ

うな場合には Free Slip のモデルの方が正しいということもあります。どちらの条件を与えるかによって答がかなり違ってきてしまいます。(図13) また上空面の境界条件についても同じような事態が発生します。例えば、図14の上の図の上空と側面の境界では圧力が一定というモデルを、下の図の上空と側面の境界では流れは一樣で面を横切る流れはないというモデルを用いています。シミュレーションの慣例からみてどちらもおかしいモデルではないのですが、どちらを選ぶかで建物側壁の剝離の大きさは全く異ってきます。このように、ちょっとした境界条件の選び方で結果が大きく変わってしまうという難しさがあります。数値シミュレーションですから答は出てきますが、これが正しいかどうか常に実験と照合させて、正しいモデルを選んでシミュレーションを進める態度が必要です。最近私は、「数値シミュレーションの診断システム」という考え方を導入するようにしています。これは、どういうステップを追って診断していけば正しい解が得られるかとか、また、どこに数値誤差が含まれるかという事などを見つけてシステムの研究です。

これで私の話は終らせていただきますが、つたない話を長時間ご清聴ありがとうございました。

参 考 文 献

- 1) 村上周三『風工学における乱流の数値シミュレーション』日本風工学会誌 第20号 昭和59年6月 P.P.51~79

図13 壁面境界条件の違いに基く周辺風速分布の差
(風上側角の剝離領域附近における顕著な差異に注目されたい。)

図14 上空、側面の境界条件の違いに基く水平風速分布の差
($Z = \frac{1}{2} Hb$ の水平面上)