

## 数値流体解析による風環境評価について

Evaluation of wind environment using computational fluid dynamics

村上 剛士\*1、中川 尚大\*2、完山 利行\*3

### 1. はじめに

当法人では、30年以上前から市街地の縮小模型を用いた風洞実験による高層建築物の風環境評価（ビル風予測）を行っており、これまで多くの実験を行っている。一方、数値流体解析による風環境評価についても以前から導入の検討を進めていたが、最近のコンピュータの高性能化および数値流体解析ソフトの高機能化により、風洞実験と同等の市街地モデルを再現できることや、実用性、経済性が見込まれると判断し、数値流体解析による風環境評価業務を開始した。数値流体解析ソフトはソフトウェアトレイドル社のSTREAMを導入した（図-1）。

本稿では、数値流体解析による風環境評価について、風洞実験との違いや解析事例を紹介する。

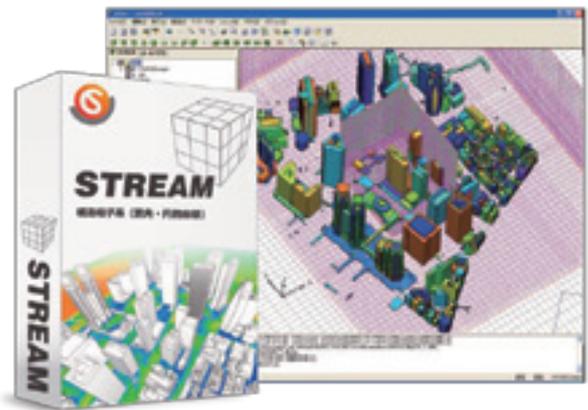


図-1 数値流体解析ソフト

### 2. 風洞実験による風環境評価

#### 2.1 実験方法の概要

当法人ではエッフェル型吹出式境界層風洞を用いて風環境評価の実験を行っている。同実験では、調査対象建物およびその周辺市街地の形状を忠実に再現した1/400スケール程度の模型を作成し、風洞の中に設置する（写真-1）。

風洞の風を模型に当て、風速計を各評価点位置へ順次移動させ風速を測定する。通常、評価点は調査対象建物から同建物高さの2倍程度以内の範囲に代表的な位置を60～80点程度選定する。なお、風速計の移動はトラバース装置を用いることで、コンピュータ制御で自動的に行うことができる。



写真-1 風洞実験（風環境評価）

\*1 MURAKAMI Tsuyoshi : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 環境部 耐風試験室 室長代理  
\*2 NAKAGAWA Naohiro : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 環境部 耐風試験室  
\*3 KANYAMA Toshiyuki : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 環境部 耐風試験室 室長

風の向きについては、模型をターンテーブル上に設置しておき、回転させることで制御を行っている。風環境の評価に用いる気象データは22.5°ごとの16風向で整理されていることから、風洞実験においてもターンテーブルを22.5°ごとに回転させ、16風向分の実験を行う。

また、自然風は風速や乱れ強さに鉛直分布があるため、風洞実験においても自然風と同様に鉛直分布をもった風を再現している。風洞内の床にはラフネスブロックという市街地の建物を模擬したブロックが設けてあり、そこを風が通り抜けることにより、地表面近くの鉛直分布をもった風が風洞内に再現される。風の鉛直分布は、立ち並ぶ建物の規模や密度によって変化するため、建築物荷重指針・同解説<sup>1)</sup>では建設地点における地表面粗度区分を周辺地域の地表面の状態に応じて表-1に示す5つに区分しており、それぞれ風速と乱れの鉛直分布が規定されている。風洞実験では、調査対象の建物が建つ周辺の状況から、該当する粗度区分を選択し、風洞内のラフネスブロックの高さなどを設定する。

## 2.2 風環境評価

市街地の風環境評価は、村上周三博士らにより提案された方法と、風工学研究所により提案された方法の2つの評価方法が国内で広く用いられている<sup>2)</sup>。いずれも、各評価点ごとにその点で生じる風速の発生確率を求め、その発生確率に基づいてランク評価を行う方法である。各ランクは具体的な空間用途の例と結び付けられており、日常体験と比較しやすくなっている。いずれの評価方法を用いる場合にも、対象地域の最寄りの観測所で測定された風向および風速のデータと風洞実験や数値流体解析で求めた各評価点の風速比データとを用いて、各評価点において生じる風速の発生確率を求める必要がある。以下に、各評価方法の概要を示す。

### 2.2.1 村上らの風環境評価

村上らの風環境評価は、東京大学生産技術研究所（当時）の村上周三博士らにより提案された、強風の出現頻度に基づいた評価尺度である。

この評価尺度は風の実測と住民の意識調査結果を分析して作成されたものであり、地上1.5mの高さにおける日最大瞬間風速の発生頻度を10m/s、15m/s、20m/sの3風速段階において求め、その結果から風環境を3つのランクに分ける方法である。なお、ランク3にも上限値が設定されているため、当法人ではランク3の上限値を超える風環境をランク4と称し、「好ましくない風環境」として評価している。村上らによる風環境評価尺度を表-2に示す。

表-1 地表面粗度区分

地表面粗度区分		周辺地域の地表面の状況	代表例
I	( $a=0.10$ ) ( $Z_G=250\text{m}$ )	海上のような障害物のほとんどない平坦地	海岸、海上
II	( $a=0.15$ ) ( $Z_G=350\text{m}$ )	田園地帯や草原のような、農作物程度の障害物がある平坦地、樹木・低層建築物などが散在している平坦地	沿岸地帯 田園地帯
III	( $a=0.20$ ) ( $Z_G=450\text{m}$ )	樹木・低層建築物などが密集している地域、あるいは中層建築物（4～9階）が散在している地域	都市周辺の住宅地、工場地帯、森林地帯
IV	( $a=0.27$ ) ( $Z_G=550\text{m}$ )	中層建築物（4～9階）が主となる市街地	中小都市
V	( $a=0.35$ ) ( $Z_G=650\text{m}$ )	高層建築物（10階以上）が密集する市街地	大都市の中心

表-2 村上らによる風環境評価尺度

ランク1	風の影響を受けやすい野外レストラン等がある地域でも許容できる風環境
ランク2	一般的な住宅街として許容できる風環境
ランク3	風による影響を比較的受けにくい事務所街として許容できる風環境
ランク4	好ましくない風環境

表-3 風工学研究所による風環境評価指標

領域A	住宅地相当、住宅地で見られる風環境
領域B	低層市街地相当、領域AとCの中間的な街区で見られる風環境
領域C	中高層市街地相当、オフィス街で見られる風環境
領域D	強風地域相当、好ましくない風環境

### 2.2.2 風工学研究所の風環境評価

風工学研究所の風環境評価は、風工学研究所により提案された、地上5mでの平均風速の発生確率に基づいた評価指標である。

累積頻度55%および95%での風速を求め、その結果から、領域A～領域Dの4つのランクに分けて評価を行う。風工学研究所による風環境評価指標を表-3に示す。

### 3. 数値流体解析による風環境評価

#### 3.1 解析方法の概要

市街地の風の流れは、物理的には流体の流れの一種として取り扱われる。流体の流れは、ナビエーストークスの方程式（式（1）～（3））を解くことで予測することができる。この方程式をコンピュータで数値的に解くのが数値流体解析である。数値流体解析を行うことで、市街地の風の流れの挙動を予測することができる。

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots(1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots(2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots\dots(3)$$

ここで、  $u$  : x方向の流速

$v$  : y方向の流速

$w$  : z方向の流速

$p$  : 圧力

$\rho$  : 流体の密度

$\mu$  : 流体の粘性係数

数値流体解析では、図-2のように空間を細かく分割し、流速や圧力といった変数を分割された空間に設定する。そして、各変数の値を調整しながらナビエーストークスの方程式の近似解を求める。メッシュ分割には構造格子と非構造格子の2種類の方法があり、当法人が導入したSTREAMは構造格子を用いるソフトである。

数値流体解析の計算負荷が大きくなる要因として乱流現象がある。乱流現象とは、非常に細かな渦が無数に発生し流れが乱れる現象のことをいい、非常に小さな渦が大きな流れにも影響を及ぼすため、小さな現象であっても無視することができない。しかし、小さな渦を十分に分解できるだけの細かなメッシュ分割をして市街地の風の解析を実施することは、計算負荷が大きくなりすぎるため、現在のコンピュータでは事実上不可能である。

このため数値流体解析では、小さい渦をモデル化して扱うことで計算負荷を低減する手法が用いられている。乱流モデルには、大きく分けてRANSモデルとLESモデルの2つの方式がある。RANSモデルは比較的小さい計算負荷による解析が可能である。LESモデルはより高い精度の解析が可能であるが、計算負荷がRANSモデルよりかなり大きいため市街地の風環境評価への適用は現時点では経済的であるとは言えない。当法人では、主にRANSモデルを用いた解析を行っている。

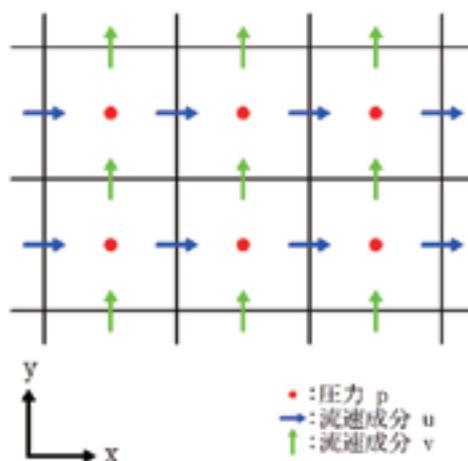


図-2 空間分割と変数の設定

#### 3.2 風環境評価

市街地の風環境評価を対象として数値流体解析を行う場合には、建物の立体形状を数値流体解析ソフト上で再現する必要がある。建物の立体形状は、CADソフトで作成したデータを数値流体解析ソフトで読み込むことができる。

数値流体解析ソフト上ではメッシュ分割によって生成された立方体形状の格子によって建物などの障害物の形状が再現される。風洞実験の模型と同様に周辺市街地も含めて建物形状を再現する場合、再現範囲内には多くの建物が存在する。また、評価点が建物間の道路上に設定されるため、道路を十分に再現できるよう細かくメッシュ分割を行う必要がある。

解析領域の風上端部境界には、境界条件として自然風と同様の風速および乱れの鉛直分布を与える。

風洞実験と同様に16風向について解析を行えば、風速の発生確率に基づいた風環境評価を行うことが可能である。

### 4. 解析事例

#### 4.1 解析対象の概要

数値流体解析により市街地の風環境評価を行おうとする機関が、用いる解析方法の妥当性を検証できるよう日本建築学会がベンチマークテストを数種類用意しており、建物形状のCADデータや風洞実験結果が一般に公開されている<sup>3)</sup>。ベンチマークテストの中から当法人において解析を行った結果について紹介する。

解析対象としたベンチマークテストは、新潟市内に実在する平坦な地形上に2階建ての低層建物が密集した市街地に新たに高さ60mの建物1棟と高さ18mの建物2棟

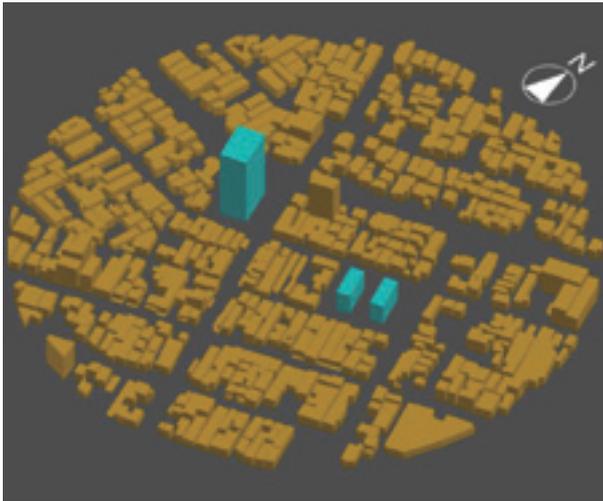


図-3 建物形状のCADデータ

が建設されることを想定したものである。建物形状のCADデータは、半径200mの範囲にわたって再現されており、これは風洞実験で模型として再現された範囲と同じである。また、新たに建設される建物の周辺に評価点が80点設定されており、風洞実験による測定結果が公開されている。建物形状および市街地のCADデータを図-3に示す。

対象市街地に近い新潟地方気象台における風の観測データの特性は、北北東から吹く頻度が最も高く、次に西から吹く頻度が高い特性である。

#### 4.2 解析方法

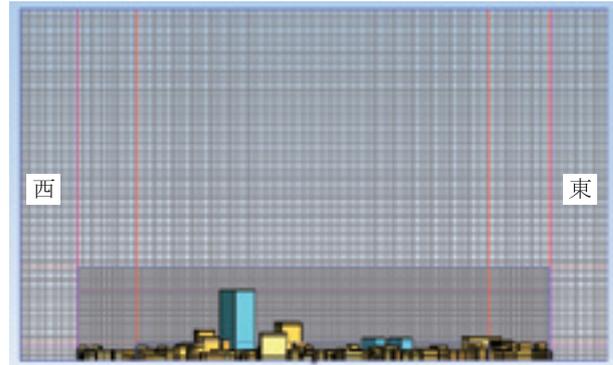
解析領域の大きさや境界条件は、ベンチマークテストが指定している計算要領に従って設定した。メッシュ分割は、建物の位置や評価点の位置を考慮し、鉛直方向は、地表面付近は細かく、上空は粗く分割した。また、水平方向は、再現範囲の中心付近は細かく、中心から遠い位置は粗く分割した。メッシュ分割の状況を図-4に示す。

風向は流入境界において流入風の角度を変更することにより設定し、22.5°ごとの16風向について解析を行った。解析条件の概要を表-4に示す。

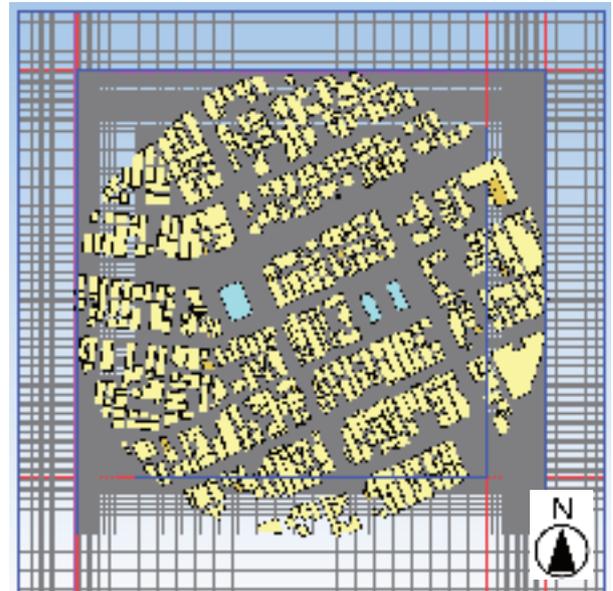
#### 4.3 解析結果

16風向について行った解析のうち、風環境評価ランクへの影響の大きい、北北東と西からの風向について、地上2mにおける風速比のコンター図を図-5に示す。風速比のコンター図より、新たに建設される高さ60mの建物の近傍において、同建物からの吹き降ろしの影響とみられる強風域が発生することが判る。

数値流体解析結果および風洞実験結果を用いた村上らの風環境評価尺度による評価結果（ランク評価）を図-6に示す。数値流体解析の結果から求めた評価結果を



(a) 鉛直断面

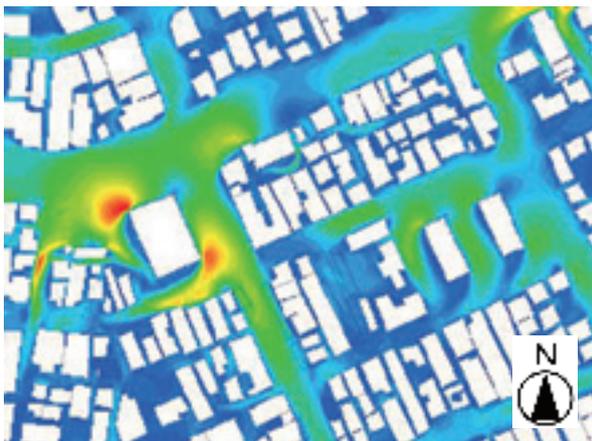


(b) 水平断面

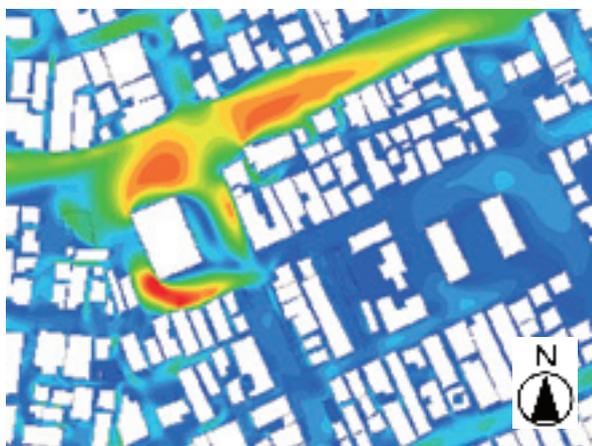
図-4 メッシュ分割の状況

表-4 解析条件の概要

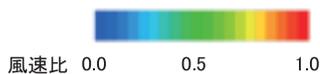
解析コード	STREAM (ソフトウェアクレイドル社製)
離散化手法	構造格子
乱流モデル	標準 k-ε モデル
解析領域	500m × 500m × 300m (高さ)
メッシュ分割	水平方向：0.8～3.2 m 鉛直方向：0.8～3.2 m 分割数：約800万要素
流入境界条件	べき乗則風速分布 (べき指数1/4)
流出境界条件	表面圧力規定
壁面境界条件	対数則



(a) 風向NNE



(b) 風向W



風速比 0.0 0.5 1.0

図-5 風速比コンター図



(a) 数値流体解析



(b) 風洞実験

図-6 風環境評価(ランク評価)

みると、風向NNEやWにおいて風速比の大きい評価点でランク3やランク4などの評価となっていることが判る。また、風洞実験結果から求めた評価結果と比較すると、完全には一致しないものの、新たに建設される高さ60mの建物の近傍においてランク3や4が現れるという傾向は一致していることが判る。

### 5. 数値流体解析の長所および短所

数値流体解析により風洞実験の結果と概ね同様の結果が得られることが確認できた。しかし、完全な一致とは言えず、数値流体解析の特性や限界を考慮して利用する必要がある。そこで、当法人が考える数値流体解析による風環境評価の長所および短所を風洞実験との比較で表-5に示す。

表-5 数値流体解析の長所および短所

項目	長所	短所
風洞実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>実際の物理現象を測定するため信頼性が高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>模型製作費が高額で製作に時間がかかる。</li> <li>設計変更に対応できない。</li> <li>測定点の追加や変更に手間がかかる。</li> </ul>
数値流体解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析用データは模型製作より安価で短期間に作成可能である。</li> <li>設計変更に対応可能である。</li> <li>測定点の追加や変更が容易である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析対象のモデル化や乱流のモデル化による誤差が含まれるため、流れを完全には再現できない。</li> </ul>

## 6. まとめ

本稿では、数値流体解析による風環境評価について、風洞実験と同様に市街地の形状を再現して行うことができることを示した。現状では信頼性は風洞実験に比べてやや劣るものの、市街地モデルの作成コストを低く抑えられることや建物形状変更への対応が容易であることなどのメリットも大きい。よって、要求精度に応じて風洞実験と使い分ける必要があるが、利用できる技術の選択肢が広がったといえる。当法人では、風洞実験と数値流体解析を使い分け、或いはそれらを組み合わせて依頼者の多様なニーズに応じられると考えている。

例えば、数値流体解析は設計変更へ短時間で対応できることを利用し、建設プロジェクトの初期段階では数値流体解析による風環境評価を行って建物の基本形状や配置を検討し、詳細設計が決まった最終段階で風洞実験による風環境評価を行うなどの利用方法が考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2015），日本建築学会，2015年2月
- 2) 風工学研究所：ビル風の基礎知識，風工学研究所，2005年12月
- 3) 日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー，日本建築学会，2007年7月

### 【執筆者】



\*1 村上 剛士  
(MURAKAMI Tsuyoshi)



\*2 中川 尚大  
(NAKAGAWA Naohiro)



\*3 完山 利行  
(KANYAMA Toshiyuki)