

資料 5 テレビ受信障害

資料5 テレビ受信障害

資料5-1 テレビ受信障害調査

テレビ受信障害調査結果を表 5.1-1 に示す。

表 5.1-1(1) テレビ受信障害調査結果

測定日 6年 2月 29日 頁 1 / 3

調査 地点	調査 項目	受信局名（東京スカイツリー局）									県域局	備考 アンテナ高 (m) など
		NHK 総 合	NHK 教 育	日 本 テレビ	TBS テレビ	フ ジ テレビ	テレビ 朝 日	テレビ 東 京	M X テレビ		テレビ 神奈川	
		27ch	26ch	25ch	22ch	21ch	24ch	23ch	16ch		18ch	
1	端子電圧	55.6	57.2	56.0	56.4	54.6	57.2	60.2	45.9			10 m
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	3.4E-7	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0			
	品質評価	A	A	A	A	B	A	A	A			
2	端子電圧	66.0	63.1	64.2	67.1	67.7	64.5	68.6	53.2			#
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0			
	品質評価	A	A	A	A	A	A	A	A			
3	端子電圧	61.6	62.9	62.8	56.6	57.3	59.1	56.9	51.7			#
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.7E-7	0.0E+0			
	品質評価	A	A	A	A	A	A	B	A			
4	端子電圧	62.5	64.0	64.8	59.4	59.6	61.1	62.6	44.7			#
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	3.7E-7			
	品質評価	A	A	A	A	A	A	A	B			
5	端子電圧	57.3	58.7	59.5	54.4	51.5	56.2	57.6	43.6			#
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	5.6E-7	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	1.0E-7			
	品質評価	A	A	A	B	A	A	A	B			
6	端子電圧	71.9	70.4	71.3	67.6	68.5	68.1	71.1	52.8			#
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	B E R	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0			
	品質評価	A	A	A	A	A	A	A	A			
参考事項												
デジタル波の端子電圧（受信レベル）は75Ω終端値[dB(μV)]で表示。 画像評価は次の基準による評価です。 ○：正常に受信 △：ブロックノイズや画面フリーズあり ×：受信不能						品質評価は次の基準による評価です。 A：きわめて良好：画像評価○で、BER≤1E-8 B：良好：画像評価○で、1E-8<BER<1E-5 C：おおむね良好：画像評価○で、1E-5≤BER≤2E-4 D：不良：画像評価○ではあるがBER>2E-4、または画像評価△ E：受信不能：画像評価×						

表 5.1-1(2) テレビ受信障害調査結果

測定日 6 年 2 月 2 9 日 頁 2 / 3

調査 地点	調査 項目	受 信 局 名（東京スカイツリー局）									県域局	備考 アンテナ高 (m) など
		NHK 総 合	NHK 教 育	日 本 テレビ	TBS テレビ	フ ジ テレビ	テレビ 朝 日	テレビ 東 京	M X テレビ		テレビ 神奈川	
		27ch	26ch	25ch	22ch	21ch	24ch	23ch	16ch		18ch	
7	端子電圧	74.9	73.5	74.8	76.4	75.7	74.3	78.0	61.3			10 m
	画像評価	○	○	○	○	○	○	○	○			
	BER	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0	0.0E+0			
	品質評価	A	A	A	A	A	A	A	A			
8	端子電圧										66.1	#
	画像評価										○	
	BER										0.0E+0	
	品質評価										A	
9	端子電圧										65.4	#
	画像評価										○	
	BER										0.0E+0	
	品質評価										A	
10	端子電圧										74.2	#
	画像評価										○	
	BER										0.0E+0	
	品質評価										A	
11	端子電圧										63.0	#
	画像評価										○	
	BER										0.0E+0	
	品質評価										A	
12	端子電圧										76.4	#
	画像評価										○	
	BER										0.0E+0	
	品質評価										A	
参考事項												
デジタル波の端子電圧（受信レベル）は75Ω終端値[dB(μV)]で表示。 画像評価は次の基準による評価です。 ○：正常に受信 △：ブロックノイズや画面フリーズあり ×：受信不能						品質評価は次の基準による評価です。 A：きわめて良好：画像評価○で、BER≤1E-8 B：良好：画像評価○で、1E-8<BER<1E-5 C：おおむね良好：画像評価○で、1E-5≤BER≤2E-4 D：不良：画像評価○ではあるがBER>2E-4、または画像評価△ E：受信不能：画像評価×						

表 5.1-1(3) テレビ受信障害調査結果

測定日 6 年 2 月 2 9 日

頁 3 / 3

調査 地点	調査 項目	受信局名（東京スカイツリー局）									県域局	備考 アンテナ高 (m) など
		NHK 総 合	NHK 教 育	日 本 テレビ	TBS テレビ	フ ジ テレビ	テレビ 朝 日	テレビ 東 京	M X テレビ		テレビ 神奈川	
		27ch	26ch	25ch	22ch	21ch	24ch	23ch	16ch		18ch	
1 3	端子電圧										61.7	1 0 m
	画像評価										○	
	B E R										0. 0E+0	
	品質評価										A	
	端子電圧											
	画像評価											
	B E R											
	品質評価											
	端子電圧											
	画像評価											
	B E R											
	品質評価											
	端子電圧											
	画像評価											
	B E R											
	品質評価											
	端子電圧											
	画像評価											
	B E R											
	品質評価											
	端子電圧											
	画像評価											
	B E R											
	品質評価											
参考事項												
デジタル波の端子電圧（受信レベル）は75Ω終端値[dB(μV)]で表示。 画像評価は次の基準による評価です。 ○：正常に受信 △：ブロックノイズや画面フリーズあり ×：受信不能						品質評価は次の基準による評価です。 A：きわめて良好：画像評価○で、BER≤1E-8 B：良好：画像評価○で、1E-8<BER<1E-5 C：おおむね良好：画像評価○で、1E-5≤BER≤2E-4 D：不良：画像評価○ではあるがBER>2E-4、または画像評価△ E：受信不能：画像評価×						

資料 6 風害

資料6 風害

資料6-1 流体数値シミュレーションの精度

本検討に使用する流体数値シミュレーションは、株式会社環境シミュレーションに計算を委託し、当会社の『WindPerfect』により実施している。

流体数値シミュレーションの精度に関しては適切な計算領域の確保、メッシュ分割、境界条件、収束判定条件を与えれば風洞実験と同様の強風領域の判定は十分可能であると、『風環境（ビル風）評価の現状と課題』4.3 流体数値計算による風環境予測の現状・課題（2005年3月）で報告されている。

また、解析手法・評価手法に関して、日本建築学会から『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』（2007年7月）で解析手法・評価手法のガイドラインが示されており、当社の流体数値シミュレーションによる風環境解析『WindPerfect』はこのガイドラインにしたがって行っている。

WindPerfectの解析精度1 風環境解析ガイドラインとの比較

実測値とWindPerfectの結果はどこまで合うのだろうか。

比較がなされている論文は少ないが、弊社ソフトWindPerfectDXには幸いことに権威ある東京大学生産技術研究所の風洞での実測結果との比較がある。

比較は、風環境解析ガイドライン（2008、日本建築学会刊）に記載されている実験について行った。

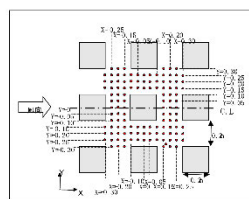
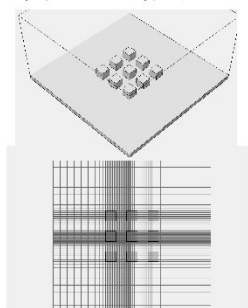


実測とWindPerfect解析の比較2

- ・ 検証では、境界条件を野々村ら(2003)が行った風洞実験の条件を踏襲。風環境解析ガイドラインに記載。
- ・ CFDの結果と風洞実験の結果を比較。
風洞の測定領域寸法: 3.0m×3.0m×1.8m
建物ブロック: 0.2m×0.2m×0.2mの立方体
9個の立方体/80個の立方体で市街地を模擬。
ブロックとブロックの間隔は0.2m。
その他の境界条件はすべて風洞実験の条件に準拠。
- ・ CFDの結果に120個のサンプリングポイントを抽出、風洞実験結果と比較を行った。

実測とWindPerfect解析の比較3

検証1 立方体9個



風洞実験測定ポイント

実測とWindPerfect解析の比較4

検証結果:

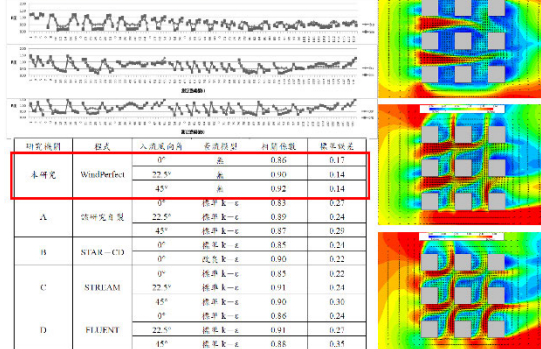
検証はCFD計算を開始し、流れ場が安定になった600秒後の結果を用いて、野々村ら(2003)の実験結果と比較した。

- ◆ 風向角0°、22.5°、45° ケースの流れ場を提示。
- ◆ 実験結果と解析結果とを比較を示す。EXPが風洞実験の結果で、DNSがWindPerfectDXでの解析結果である。
- ◆ 風環境解析ガイドライン(日本建築学会,2007)による乱流モデルの結果データと本研究の結果の比較に示す。

表1から分析すると、WindPerfectDXでの解析結果が実験値との相関が高く、他のCFDソフトの解析結果より精度が高いことが分かる。

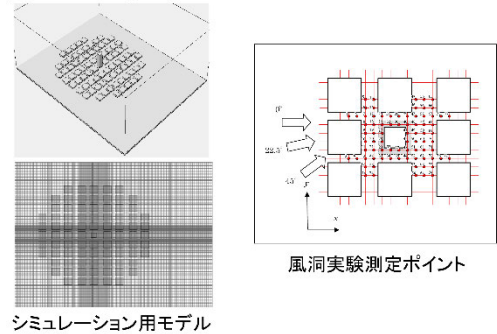
実測とWindPerfect解析の比較5

検証1 立方体9個



実測とWindPerfect解析の比較6

検証2 立方体80個



実測とWindPerfect解析の比較7

検証結果:

CFD計算を開始して、流れ場が安定になった1200秒後の瞬間値の結果を用い、持田らが行った実験の結果と比較した。

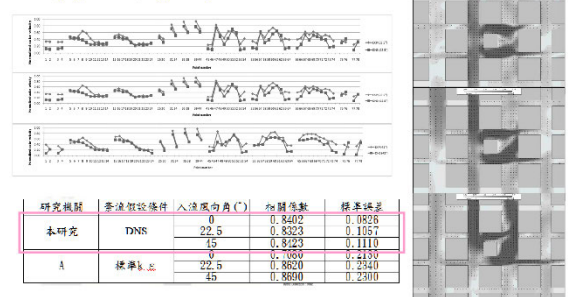
◆風向角0°、22.5°、45°の流れ場をそれぞれ提示。

◆実験の風速とCFD計算からの風速の比較を図示。
(EXPが風洞実験の結果で、DNSが解析の結果)

日本建築学会による乱流モデルでの結果データ(2007)とWindPerfectDXの結果の比較に示す。
WindPerfectDXの計算結果は、k-ε乱流モデルを使った他のCFDソフトより解析精度が高かった。

実測とWindPerfect解析の比較8

検証2 立方体80個

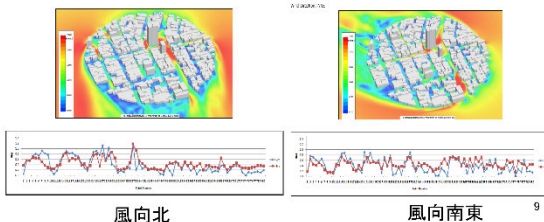


8

実測とWindPerfect解析の比較9

検証3 新潟市内解析結果

新潟市街区のCADデータを用いて、シミュレーション結果と風洞実験結果を比較
WindPerfectDXの計算結果は、k-ε乱流モデルを使った他のソフトより解析精度が高かった。



9

WindPerfectの解析精度1 まとめー風環境解析

実測値とWindPerfectの風環境解析結果の比較を行った。

1. 立方体9個の実験について
弊社ソフトウェアWindPerfectの結果は、風洞実験結果と非常に良く一致した。
2. 立方体80個の実験について
弊社ソフトウェアWindPerfectの結果は、風洞実験結果と非常に良く一致した。
3. 実在街区(新潟)の実験について
WindPerfectの結果は、やはり他のRANS系乱流モデルを用いたソフトの解析結果よりも精度が良かった。

資料 6－2 基礎方程式・数値解析法

(1) 基礎方程式

流体解析で取り扱う流体は、通常、水、油、溶融金属などの非圧縮粘性流体である。また、空気、水蒸気、ガスなどもマッハ数（音速との速度比）が 0.3 以下ならば非圧縮性流体として取り扱っても問題ないとされている。このような流体の挙動は、次のような物理方程式で記述される。

◆運動方程式（Navier-Stokes 方程式）：

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla(P/\rho) + (\mu/\rho)\nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad \dots \quad (\text{a})$$

◆連続の式：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots \quad (\text{b})$$

◆エネルギー方程式：

$$\partial E / \partial t + \nabla(E\mathbf{u}) = -(k/C\rho)\nabla^2 E + q \quad \dots \quad (\text{c})$$

ここで、

$\mathbf{u}$: 速度ベクトル, P : 圧力, ρ : 流体の密度,
 μ : 粘性係数, F : 体積力, E : エネルギー密度 (温度),
 k : 熱伝導率, C : 比熱, q : 発熱量
 $\partial/\partial t$: 時間に対する偏微分, ∇ : nabla ($\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$)

(a) 式で示される非定常 Navier-Stokes 方程式は、流体の移流項を含めた挙動（流速の時間的変動）が $D\mathbf{u}/Dt = \partial \mathbf{u} / \partial t + \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})$ なる実質微分(Substantial Derivative)で表され、また同時に圧力の勾配と、速度の発散に比例する粘性力に比例する事を示している。数学的な性質としては双曲型方程式と楕円型方程式の混合形であり、このことが双曲型方程式と放物型方程式の混合形である非定常圧縮性流体と分けて論議される所以である。(b) に示される連続の式は質量保存則を表現しており、Navier-Stokes 式と連成して解かれる。(c) 式のエネルギー方程式は、直接これら方程式の解法に影響する訳ではなく、例えば浮力項 ((a) の) F を介して温度分布の影響が流れ場の評価に反映される。

(2) 数値解析法

前頁で示した方程式の離散化は次のような手順で行われる。

先ず、(a)式の左辺を速度の時間変化項のみにする。

$$\partial u / \partial t = -\nabla(u \cdot u) - \nabla(P/\rho) + (\mu/\rho)\nabla^2 u + F \quad \dots \quad (d)$$

ここで、(d)式の右辺を u の関数なる $f(u)$ とすると、

$$\partial u / \partial t = f(u) \quad \dots \quad (e)$$

これを離散化（時間に関して前進差分）すると次の式を得る。

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t \cdot f^n \quad \dots \quad (f)$$

ここで、 $t = n + \Delta t$ ， $f^n = f(u^n, P^n)$ であり、この差分化はEuler法と呼ばれる。これは時間に対して1次精度の差分であり、また陽解法(Explicit Method)であるため、時間刻み Δt をCFL(Courant- Friedrichs-Levy)条件を満たすように十分小さくとる必要がある。

このように離散化したNavier-Stokes式を、連続の式と直接連成させて解く事は非常に困難である。

これはNavier-Stokes式の非線形性が強いと、連続の式との組み合わせではNavier-Stokesが剛な方程式になり、安定な収束が得られにくいためである。このため、Navier-Stokes式と連続の式を直接連成させるのではなく、弱い連成条件の下に解く手法が一般的となっている。その中の1つがここで採用するSMAC法(Simplified Marker And Cell Method)である。この方法は速度場を陽的に解いた後、得られた中間速度を予測子として、次の時間ステップで連続の式を満たすように圧力場を求めようとするものである。

SMAC法の手順を以下に示す。

$$\textcircled{1} \quad u' = u^n + \Delta t \cdot f(u^n, P^n)$$

により速度場の予測子 u' を求める。

$$\textcircled{2} \quad \nabla^2 \phi_s = -\nabla \cdot u'$$

よりスカラーポテンシャル $\phi_s (= P_s/\rho)$ を求める。

$$\textcircled{3} \quad u^{n+1} = u' + \nabla^2 \phi_s, \quad \phi^{n+1} = \phi^n - \phi_s/\Delta t$$

を用いて u^{n+1} ， ϕ^{n+1} を求める。①～③を繰り返す。

(3) 乱流モデル

5. 乱流の取り扱い

風の現象は、いわゆる乱流と呼ばれる空気の流れであり、微小地形の影響を受けた広域にわたる風の流れを再現するためには、DNS(Direct Numerical Simulation)と呼ばれる手法によって、連続の式と運動方程式を直接数値的に解き、流れに含まれる渦を完全に計算することが望ましい。しかし、高レイノルズ数の乱流現象を解析するには多くの計算格子が必要となり、一般に強い乱流の流れの場を対象に計算を行うには乱れをモデル化して取り扱う必要がある。これまで提案されている代表的な乱流モデルとしては、図-5. 1に示すように、平均操作を時間について行うものと空間的に行うものに大別できる。

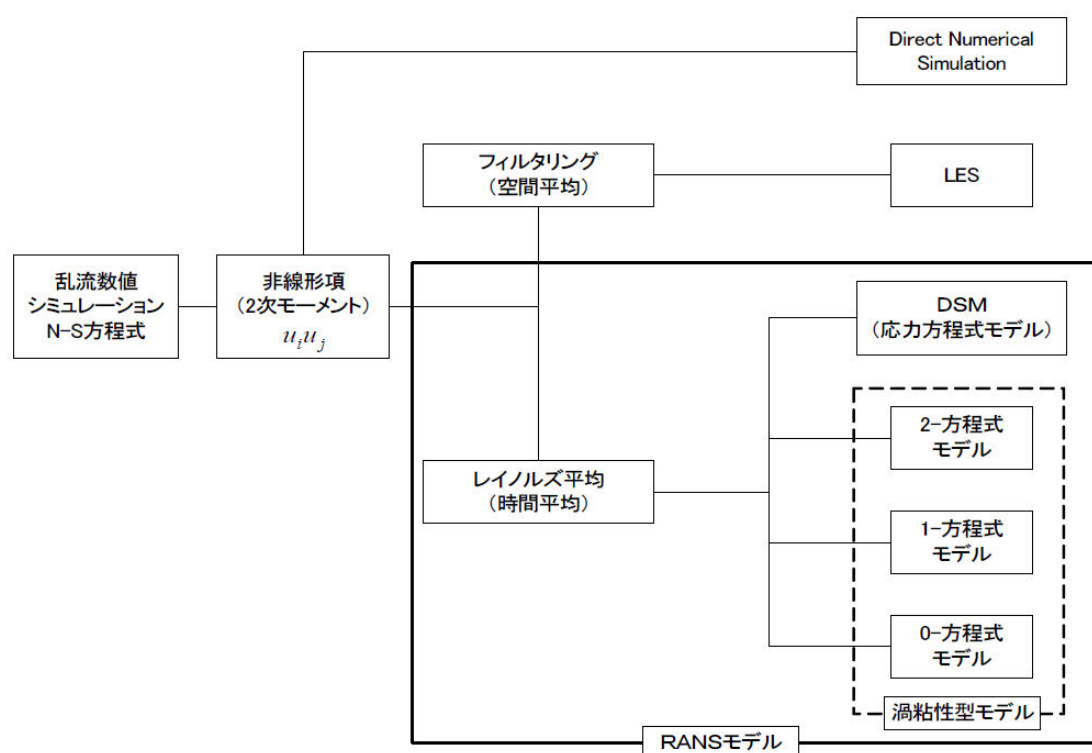


図 5 - 1 乱流モデルの分類

ここでは、普遍性が期待できるマイクロなスケール(格子スケール)以下の渦だけをモデル化し、流れの場の影響を強く受けるマクロなスケール以上の渦についてはモデルに頼らず直接計算することで、DNS より粗い格子でも理論的破綻が少ない LES を適用するのが最近の趨勢であるし、実用的には標準 $k-\varepsilon$ モデルのような RANS(レイノルズ平均ナビエーストークス)モデルが用いられる事も多い。但し、広域の風問題では、RANS より LES・DNS が優位である。

6. LES 乱流モデル

非圧縮性流体の流れの場を支配する基礎方程式は、以下に示す質量保存の連続式と運動量保存の Navier-Stokes の式である。

$$\text{連続の式} \quad \frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程式(等温状態)

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

ここで、 u_i は各軸方向速度、 x_i は座標位置、 ρ は密度、 P は圧力、 ν は分子動粘性係数(= μ/ρ : μ は粘性係数)である。

連続の式は流体中における質量保存則を表す。Navier-Stokes 方程式は非圧縮性流体の運動方程式であり、左辺第 1 項を時間変化項、第 2 項を移流(対流)項、右辺第 1 項を圧力項、第 2 項を粘性項と呼ぶ。速度の時間変化は圧力と粘性力に依存するというのがこの式の物理的意味であり、左辺第 2 項の移流項は流れ場を生成する項で流体の非線形性を表す。

マクロスケールの運動は、一般的にミクロスケールの運動よりもはるかに多くのエネルギーを保有しており、その大きさや強さは流体中の保存量の輸送に大きく影響する。一方、ミクロスケールの運動は通常、マクロスケールの運動に比べてはるかに弱く、物理量の輸送にはほとんど寄与しない。そこで、マクロスケールの渦をより正確に取り扱う手法である LES (Large Eddy Simulation) を採用し、全ての流れの運動の中で、マクロスケールの成分のみを含む速度場の解を計算対象とする。後述するように、流れの基礎方程式にフィルタリングを施した場合にも、SGS (Sub Grid Scale) の新たな未知数が現れ、方程式系がクローズしなくなる。この未知数を何らかの方法でモデル化して与える方法が LES のモデリングであり、この際に用いるモデルのことを SGS モデルと呼ぶ。

フィルタを施した速度場は次のように定義される。

$$\bar{u}_i(x) = \int G(x, x') u_i(x') dx' \quad (3)$$

ここで、フィルタ関数 $G(x, x')$ は局所的な関数とされ、ガウシアンフィルタ、矩形フィルタ、カットオフフィルタが多用される。いずれのフィルタも長さスケール Δ に対して定義され、 Δ よりも大きい渦が直接シミュレーションされるマクロスケール成分であり、 Δ よりも小さい渦がミ

クロススケール成分でありモデル化を必要とする。

式(1)と式(2)に示す連続式、Navier-Stokes 方程式に空間フィルタリングを施せば、フィルタリングされた連続式と運動方程式が得られる。

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

式(5)の右辺第3項の τ_{ij} はフィルタリングにより新たに現れる未知数であり、SGS レイノルズ応力と呼ばれる。SGS の乱れによる流れ場の影響は τ_{ij} を通じてフィルタリングされた運動方程式に組み込まれる。式(6)の右辺第1項の $\overline{u_i u_j}$ を $(\bar{u}_j + u_j'')(\bar{u}_i + u_i'')$ (u_i'' : 格子平均からのずれ)と表現して分解すれば、 τ_{ij} は次式のように表される。

$$\tau_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \quad (7)$$

$$L_{ij} = \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (8)$$

$$C_{ij} = \overline{\bar{u}_i u_j''} + \overline{u_i'' \bar{u}_j} \quad (9)$$

$$R_{ij} = \overline{u_i'' u_j''} \quad (10)$$

L_{ij} 、 C_{ij} および R_{ij} はそれぞれ、Leonard 項、Cross 項および Reynolds 項と呼ばれる SGS 項である。これらの量を $\bar{u}_i$ などの GS の量に結びつけ、式(4)、式(5)を閉じた方程式系にするための工夫が LES におけるモデリング (SGS モデリング) である。

SGS モデルとして最も歴史が古く、かつ一般的に使われているのは、スマゴリンスキー (Smagorinsky) が提案したスマゴリンスキーモデルである。スマゴリンスキーモデルでは、 τ_{ij} を構成する Leonard 項 L_{ij} 、Cross 項 C_{ij} 、Reynolds 項 R_{ij} のうち L_{ij} と C_{ij} はお互いにうち消し合う効果があり、両者を合わせると無視できる ($L_{ij} + C_{ij} \cong 0$) と考え、 τ_{ij} は R_{ij} のみで代表されると

仮定する。 R_{ij} は SGS の渦粘性係数 ν_{SGS} を導入し、フィルタリングされた運動方程式の変形速度テンソル(歪み率) S_{ij} に比例するものとして以下のようにモデル化する。

$$\tau_{ij} \approx R_{ij} = \overline{u_i'' u_j''} = -\nu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \delta_{ij} R_{kk} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \delta_{ij} R_{kk} \quad (11)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

SGS 渦粘性係数は次元解析より、次のように導かれる。

$$\nu_{SGS} = C_s^2 \Delta^2 |\bar{S}| \quad (13)$$

$$|\bar{S}| = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

C_s は Smagorinsky 定数と呼ばれ、スマゴリンスキーモデルで唯一のモデル定数であり、一般的には 0.10 である。また、 Δ はフィルタ幅のスケールで、一般に $\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$ (Δ_i ; i 方向の計算格子幅) である。

式(13)を用いて、式(11)により τ_{ij} を近似するのが、スマゴリンスキーモデルである。なお、式(11)に現れる R_{ij} の対角成分 R_{kk} は、 ν_{SGS} と Δ を用いて次元解析により代数的に与えることもできるが、通常は、式(5)の圧力項に含ませ、陽的に扱わないことが多く、ここでもその扱いに準じている。

資料6-3 ワイブル係数

ワイブル係数については、「都市の風環境評価と計画ービル風から適風環境までー」（日本建築学会）より設定している。

具体的な算出方法は、以下のとおりである。

4. 自然風の確率・統計的な取扱い

4.1 ワイブル分布と強風出現頻度

風速出現頻度分布は、ワイブル分布で近似されることが多い、ここではワイブル分布の基本的な性質と、風速出現頻度と発生回数の関連について整理を行った。

4.1.1 ワイブル分布の基本的な性質

(1) ワイブル分布の特性

ワイブル分布は理論的な裏づけをもたないが、実現象の出現確率（特に故障率に関するモデル）をよく近似する分布としてよく用いられる。

分布関数を $F(x)$ 、確率密度を $f(x)$ とすると

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-\epsilon}{x_0}\right)^m\right\} \quad (4-1-1)$$

$$f(x) = \frac{m}{x_0} (x-\epsilon)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-\epsilon}{x_0}\right)^m\right\} \quad (4-1-2)$$

ところで(4-1-1)式内の指数項に着目すると

$$\exp\left\{-\left(\frac{x-\epsilon}{x_0}\right)^m\right\} = \exp(-e^{-y}) \text{ とおくと}$$

$$e^{-y} = \left(\frac{x-\epsilon}{x_0}\right)^m \quad \text{これより}$$

$$y = m \ln(x_0/(x-\epsilon)) \quad (4-1-3)$$

となる。この形は対数極値分布B型（つまり極値のIII型分布）に相当する。

なお、慣例の記号に従って、(4-1-1)、(4-1-2)を改めてかき直すと

$$\text{分布関数 } F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\epsilon}{C}\right)^K\right] \quad (4-1-4)$$

$$\begin{aligned} \text{密度関数 } f(x) &= K \left(\frac{x-\epsilon}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\epsilon}{C}\right)^K\right] \\ &= K \left(\frac{x-\epsilon}{C}\right)^{K-1} \{1 - F(x)\} \end{aligned} \quad (4-1-5)$$

ただし、 $X \geq \epsilon$, $K > 0$, $C > 0$

(4-1-4)、(4-1-5)において、 K は形状パラメータ、 C は尺度パラメータ、 ϵ は位置パラメータと呼ばれ、おのの分布の形状、広がり、位置を決めるものである。

特に、 $K=1$ の時は 指数分布

$K=2$ の時は レーリ分布となる。

(2) ワイブル分布の特徴

ワイブル分布のモーメントは以下ようになる。

平均を μ とすると平均値まわりの n 次モーメントは

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^n \cdot f(x) dx$$

$$(i) \text{ 平均値 } m_1 = \varepsilon + C\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad (4-1-6)$$

$$(ii) \text{ 分散 } m_2 = \sigma^2 = C^2[\Gamma(1+2/K) - \Gamma^2(1+1/K)] \quad (4-1-7)$$

$$(iii) \text{ Skewness } m_3/\sigma^3 = \frac{[\Gamma(1+3/K) - 3\Gamma(1+2/K)\Gamma(1+1/K) + 2\Gamma^3(1+1/K)]}{[\Gamma(1+2/K) - \Gamma^2(1+1/K)]^{3/2}} \quad (4-1-8)$$

$$(iv) \text{ Kurtosis } m_4/\sigma^4 = \frac{[\Gamma(1+4/K) - 4\Gamma(1+3/K)\Gamma(1+1/K) + 6\Gamma(1+2/K)\Gamma^2(1+1/K) - 3\Gamma^4(1+1/K)]}{[\Gamma(1+2/K) - \Gamma^2(1+1/K)]^2} \quad (4-1-9)$$

(3) ワイブルパラメータの決定法

ワイブルパラメータを決める方法としては以下のようなものがある。

① モーメント法

ワイブル分布は3つのパラメータをもつため、3つのモーメントを求めることによりパラメータが決定できる。
すなわち、 $x_1, x_2, \dots, x_N$ を標本とすると

$$\text{平均 } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4-1-10)$$

$$\text{分散 } S^2 = \frac{N}{N-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2 \right) \quad (4-1-11)$$

3次モーメント

$$m_3/\sigma^3 = \frac{N}{N-3} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^3 - \frac{3\bar{x}}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 + 2\bar{x}^3 \right) \quad (4-1-12)$$

を求め、これからがのおの(4-1-6, 7, 8)に等しいとおくと、3つの未知数をもつ3つの方程式が得られるため、パラメータが求められる。

かりに $\varepsilon=0$ の2パラメータワイブル分布の場合には、(4-1-6, 7)式と(4-1-10, 11)式より方程式をたてること
ができる。

② 最小2乗法

この場合、 K と C は以下のように求められる。

$$K = \left\{ \sum_{i=1}^N x_i^K \ln(x_i) / \sum_{i=1}^N x_i^K - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i) \right\}^{-1} \quad (4-1-13)$$

$$C = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^K \right)^{\frac{1}{K}} \quad (4-1-14)$$

この場合、 K と C の分散の程度は次のようになる。

$$\sigma^2(\hat{K}) = 0.608K^2/N \quad (4-1-15)$$

$$\sigma^2(\hat{C}) = 1.108C^2/NK^2 \quad (4-1-16)$$

となる。

③ ワイブル確率紙を用いる方法

確率紙を用いるのは、 ε を試行錯誤して決定し、その後に K と C を決定することになる。

仮に ε が求まっていると仮定すると K, C は以下のように求められる。

$$p(\geq x) = 1 - F(x) = \exp[-(x/C)^K] \quad (4-1-17)$$

上式の対数を 2 回とると

$$\ln(-\ln p(\geq x)) = K \ln(x/C) \quad (4-1-18)$$

すなわち、 $\ln(-\ln p(\geq x))$ と $\ln(x/C)$ が比例関係になるように確率紙が作成されているため、プロットに近似するように直線を引けば、その直線の傾きより K が、 C は、 $F(C) = 1 - e^{-1} = 0.632$ となる値より求めることができる。

ただし、誤差論的にいえば、ワイブルプロットを直線にあてはめるときには、特に 50% 近傍でよく合うように留意する必要がある。

④ パーセント法

ワイブル分布において 100 p % を考えると

$$F(x_p) = p = 1 - \exp\{-(x_p/C)^K\} \quad (4-1-19)$$

となる。

したがって、2 つの点 (x_1, p_1) , (x_2, p_2) を求めると、 K と C は次のように求められる。

$$K = a / \{\ln(x_1) - \ln(x_2)\} \quad (4-1-20)$$

$$C = \exp[w \ln(x_1) + (1-w) \ln(x_2)] \quad (4-1-21)$$

ただし、 $a = \ln[-\ln(1-p_1)] - \ln[-\ln(1-p_2)]$

$$w = 1 - \frac{\ln(-\ln(1-p_1))}{a}$$

⑤ エネルギー法

$K_E = \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right) / \Gamma^3\left(1 + \frac{1}{K}\right)$ であるため、これを $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^3 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i\right)^3$ に等しいと置いて、 K を求める方法もある。ただし K_E はエネルギーパターンファクターと呼ばれる値である。

この場合、 C は、他の方法、たとえばモーメント法などより求める。

4.1.2 風速出現頻度と発生回数の関連

風速の頻度分布と発生回数の関連を調べておくことは、風速の統計処理という観点からも極めて重要である。

ここでは、まず発生回数を極値分布に関連させて整理する。

平均値 0 の不規則確率過程 $x(t)$ が微小時間 $(t, t+dt)$ において正勾配で $x=a$ を超過する確率 $\nu_a^+(t)dt$ を考える。 dt が微小であるため、 dt 間の交差は、たかだか 1 回起こるか、あるいは全くなしかのいずれかであると仮定できる。

したがって、 $\nu_a^+(t)$ は時刻 t における単位時間あたりの正勾配での $x=a$ との交差回数の期待値と考えることができる。

$$\nu_a^+(t)dt = P(x(t) < a \cdot x(t+dt) > a) \quad (4-1-22)$$

dt が微小であるため、

$$x(t+dt) \simeq x(t) + \dot{x}(t)dt \quad (4-1-23)$$

とおくことができる。ただし $x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ である。すると (4-1-22) は

$$\nu_a^+(t)dt = P(x(t) < a \cdot \dot{x}(t) > \frac{a-x(t)}{dt}) \quad (4-1-24)$$

$x(t)$ と $\dot{x}(t)$ の結合確率密度を $f_{x\dot{x}}(x, \dot{x}, t)$ とすると

$$\nu_a^+(t)dt = \int_0^\infty \int_{a-\dot{x}dt}^a f_{x\dot{x}}(x, \dot{x}, t) dx d\dot{x} \quad (4-1-25)$$

となる。 dt が微小時間であるため、内側の積分範囲において $f_{x\dot{x}}$ は一定と考えることができる。したがって

$$\nu_a^+(t) = \int_0^\infty \dot{x} f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, t) d\dot{x} \quad (4-1-26)$$

したがって

$$\nu_a^+(t)dt = dt \int_0^\infty \dot{x} f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, t) d\dot{x} \quad (4-1-27)$$

となる。

以上より、交差回数を求めるには、 $x(t)$ と $\dot{x}(t)$ の結合確率密度関数を求める必要があることになる。

さらに、 $x, \dot{x}$ が $f_{x\dot{x}}$ について独立であり、時間 t に依らないとすると (4-1-27) 式は次式となる

$$\nu_a^+ = f_x(a) \int_0^\infty f_{\dot{x}}(\dot{x}) d\dot{x} \quad (4-1-28)$$

ここで

$$\int_0^\infty f_{\dot{x}}(\dot{x}) d\dot{x} = C \sigma_x \quad (C: \text{定数}) \quad (4-1-29)$$

また、 $\nu = \frac{1}{2\pi} \sigma_{\dot{x}} / \sigma_x$ を上式に代入すると

$$\nu_a^+ = 2\pi C \nu \sigma_x f_x(a) \quad (4-1-30)$$

が得られる。

$\dot{x}$ が正規分布と過程すれば $C = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ である。

したがって

$$\nu_a^+ = \sqrt{2\pi} \nu \sigma_x f_x(a) \quad (4-1-31)$$

上式は単位時間についてのものであるため、 T 時間内で考えると $\nu_a^+ T = n(a)$ とおくと

$$n(a) = \sqrt{2\pi} \nu T \sigma_x f_x(a) \quad (4-1-32)$$

となる

次に、 $f_x(a)$ が (i) 正規分布の場合と、(ii) ワイブル分布の場合について検討する。

(i) 正規分布の場合

$$f_x(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} \quad (4-1-32) \text{ に代入して解くと}$$

$$a = \sigma_x \sqrt{2 \ln(\nu T / n(a))} \text{ が得られる。} \quad (4-1-33)$$

特に T 時間内に 1 回だけ超過するレベル a は

$$a = \sigma_x \sqrt{2 \ln \nu T} \text{ となる。} \quad (4-1-34)$$

さらに、 T 時間内に起こる a_n より大きな極大値の期待値 $a_{\max, n}$ は以下ようになる。

$$a_{\max, n} = a_n + \int_{a_n}^\infty f(a) da / f(a_n) \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$= \sigma \sqrt{2 \ln(\nu T / n)} + \int_{\sigma \sqrt{2 \ln(\nu T / n)}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-a^2/2\sigma^2} da / \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-a_n^2/2\sigma^2} \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$= \sigma \left\{ \sqrt{2 \ln(\nu T/n)} + \int_{\sqrt{2 \ln(\nu T/n)}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt \right\} / e^{-\ln(\nu T/n)} \dots \dots \dots (3)$$

$$\approx \sigma \left\{ \sqrt{2 \ln(\nu T/n)} + e^{-\ln(\nu T/n)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \ln(\nu T/n)}} \right\} / e^{-\ln(\nu T/n)} \dots \dots \dots (4)$$

$$= \sigma \left\{ \sqrt{2 \ln(\nu T/n)} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln(\nu T/n)}} \right\} \dots \dots \dots (4-1-35)$$

③から④への展開は

$$\int_{u_1}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du \approx e^{-\frac{u_1^2}{2}} \left[\frac{1}{u_1} \right] \text{ を利用した.}$$

(ii) ワイブル分布の場合

$$f(a) = K/C \left(\frac{a}{C} \right)^{K-1} \exp \left\{ - \left(\frac{a}{C} \right)^K \right\} \quad (4-1-36)$$

$$\sigma_x = C \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{K} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{K} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-1-37)$$

(4-1-37) を (4-1-32) に代入すると

$$n(a) = \sqrt{2\pi} \nu T C \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{K} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{K} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{K}{C} \left(\frac{a}{C} \right)^{K-1} \exp \left\{ - \left(\frac{a}{C} \right)^K \right\} \quad (4-1-38)$$

となる.

$$\ln P(a) = - \left(\frac{a}{C} \right)^K \text{ より } \left(\frac{a}{C} \right)^{K-1} = (-\ln P(a))^{K-1/K}$$

を代入して, C を消去すると

$$n(a) = \sqrt{2\pi} \nu T \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{K} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{K} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} K (-\ln P(a))^{K-1/K} \cdot P(a) \quad (4-1-39)$$

上式は解析的に解くことはできず, 近似解が用いられることが多い [386].

もし a_n が得られれば

$$B_n = a_n + P(\geq a_n) / f(a_n) = a_n + C^K / K a_n^{K-1} \quad (4-1-40)$$

となる [387].

ところで(4-1-32)式において ν の値が極めて重要である.

これは $\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{6_x}{6_x}$ として定義されるが, 近似的には以下のように算出することもできる.

σ_x は以下のようにパワースペクトルから算出することができる.

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} G(\omega) \cos \omega \tau d\omega \text{ より}$$

$$R''(\tau) = - \int_0^{\infty} \omega^2 G(\omega) \cos \omega \tau d\omega \text{ が得られる.}$$

$$R''(0) = - \int_0^{\infty} \omega^2 G(\omega) d\omega \quad (4-1-41)$$

$R(\tau) = E[x(t-\tau)x(t)]$ であるため

$$R''(\tau) = -E[\dot{x}(t-\tau)\dot{x}(t)]$$

$$R''(0) = -E[\dot{x}(t)^2] = -\sigma_{\dot{x}}^2 \quad (4-1-42)$$

となる.

(4-1-41), (4-1-42) より

$$\int_0^\infty \omega^2 G(\omega) d\omega = \sigma_{\dot{x}}^2 \text{ となる.}$$

したがって

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\sigma_x} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\int_0^\infty \omega^2 G(\omega) d\omega}{\int_0^\infty G(\omega) d\omega} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\int_0^\infty n^2 G(n) dn}{\int_0^\infty G(n) dn} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-1-43)$$

となり, パワースペクトルから算出することができる.

1. 市街地風とビル風の違い

私たちが普通住んでいる住宅地や市街地では、建物の高さや大きさはほぼ同じです。このような場所を吹く風は道路沿いで少々強いくらいで、どこへ行っても同じ程度の強さの風しか吹きません。住宅地や市街地では、上空の速い風はそのまま建物の上を素通りしてしまい、地上では多少乱れた、低風速の風が吹く程度です。

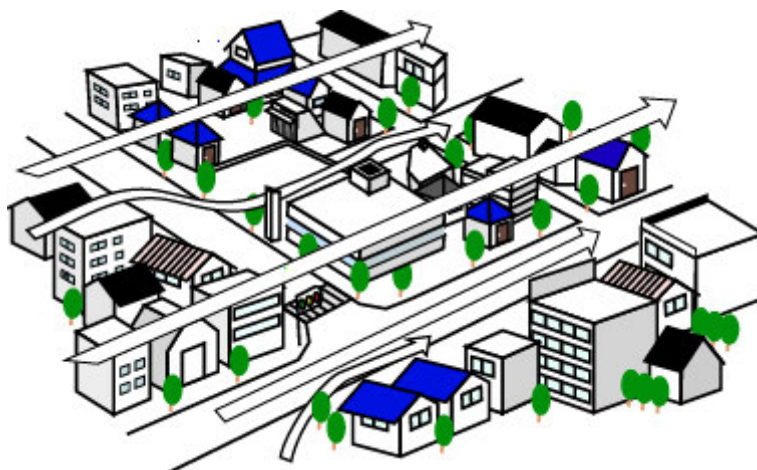


図 1 一般市街地の風

周囲の建物より目立って高い建物や大きい建物が建設されると、その周りでは局所的に強い風や乱れた風が吹くようになります。これが普通、ビル風と呼ばれる風です。

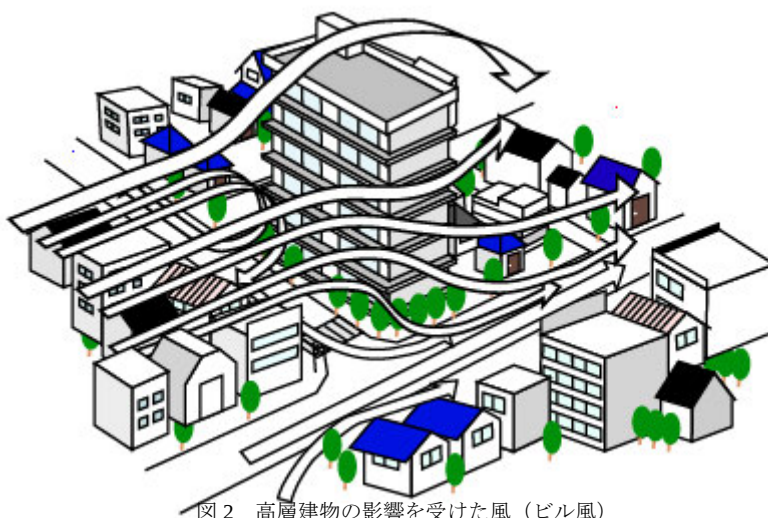


図 2 高層建物の影響を受けた風（ビル風）

2. ビル風の現象にはどんなものがあるのか

ビル風は建物の形状・配置や周辺の状況などにより、非常に複雑な風の流れになりますが、基本的には次のような流れに分けることができます。

- (1) はく離流
- (2) 吹き降ろし
- (3) 逆流
- (4) 谷間風
- (5) 開口部風
- (6) 街路風
- (7) 渦
- (8) 吹上げ

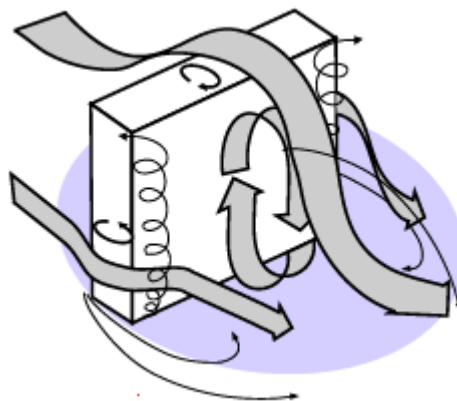


図3 建物周りの基本的な空気の流れ

(1) はく離流

風は建物に当たると、壁面に沿って流れて行きますが、建物の隅角部の所までくると、それ以上壁面に沿って流ることができなくなり、建物からはがれて流れ去って行きます。この建物隅角部からはがれた風はその周囲の風よりも速い流速をもちます。

これがはく離流とよばれるものです。

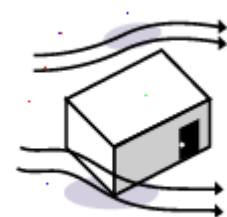


図4 はく離流

(2) 吹き降ろし

風は建物に当たると、建物高さの60～70%付近(分岐点とよびます)で上下、左右に分かれます。左右に分かれた風は、建物の背後に生じた低い圧力領域に吸い込まれるため、建物の側面を上方から下方に斜めに向かう速い流れとなります。これが吹き降ろしです。

吹き降ろしの現象は建物が高層であるほど顕著であり、それだけ上空の速い風を地上に引きずり降ろすことになります。高層建物の足下付近では吹き降ろしとはく離流が一緒になるために非常に速い風が吹くことになります。

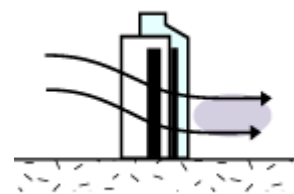


図5 吹き降ろし

(3) 逆流

分岐点より下方に向かう風は、壁面に沿って下降し(下降流)、地面に到達すると、一部分は小さな渦をつくりながら左右に流れ去って行きますが、一部分は地面に沿って上空の風とは反対の方向に向かいます。

この流れは逆流と呼ばれます。特に、高層建物の前面に低層建物があるような場合は、ますます速い流れとなります。

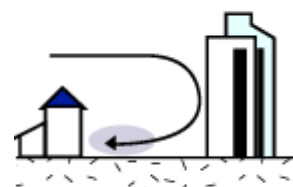


図 6 逆流

(4) 谷間風

計画建物に隣接して高層建物が存在していたり、計画建物が2棟以上の場合には、速い風が建物の間に生じることがあります。

これは、それぞれの建物からのはく離流、吹き降ろしが重ね合わさったために生じる現象で、谷間風と呼ばれます。

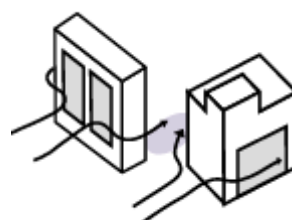


図 7 谷間風

(5) 開口部風(ピロティ風)

建物の下層部分にピロティのような開口部が設けられていると、建物の風上側と風下側が1つに結ばれることになります。

このため、この部分は風が吹き抜けやすくなり、速い風が吹きます。これを開口部風(ピロティ風)と呼ぶことがあります。

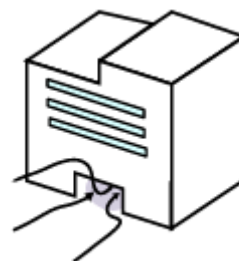


図 8 開口部風 (ピロティ風)

(6) 街路風

市街地では風は街路や路地に沿って吹こうとします。家並みや建物が規則正しく配置されていればいるほど、また、道路が広ければ広いほど風は街路に沿って吹きやすくなります。

このため、高層建物からのはく離流や吹き降ろしも街路に沿って吹くという現象が生じることがあります。

このような性質をもつ風を一般に街路風とか道路風とか呼んでいます。

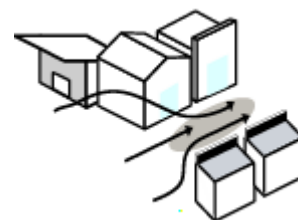


図 9 街路風

(7) 渦領域

建物の背後は風速が弱く、また風向がはっきりしない部分となります。この部分は大小様々な渦からなり、渦領域(wake: ウェーク)と呼ばれます。



図 10 渦領域

(8) 吹上げ

建物の風下隅角部付近で、紙くずなどがくるくる舞いながら上空へ飛散してゆく現象が見られることがあります。

これは吹上げと呼ばれる気流現象により生じるものです。

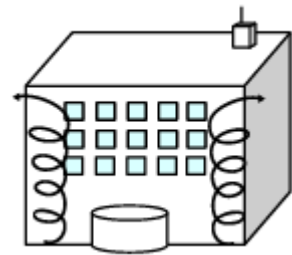


図 11 吹上げ