

# 建物外壁面における風騒音評価システム TSounds<sup>®</sup>-Wind の開発

吉川 優\*<sup>1</sup>・富高 隆\*<sup>2</sup>・中村 良平\*<sup>2</sup>

Keywords : aerodynamic noise, wind tunnel experiment, CFD, AI

風騒音, 風洞実験, CFD, AI

## 1. はじめに

微細な形状や空間を有する外装部材に強風が作用すると、条件に応じて様々な騒音が発生する場合があります、一般に風騒音、風鳴り音、風切り音等と呼ばれている。風騒音が問題となる部材としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・ベランダにおける縦格子手摺
- ・水平ルーバー（日射遮蔽、目隠し等）
- ・鉛直フィン、ゴンドラレール
- ・各種化粧部材（パンチングパネル等）

近年では、多くの案件で風騒音の事前予測と評価が要請されており、対象とする部材ごとに実物ユニットを試験体とした風洞実験が行われている。風洞実験では、対象部材に対して風速および風向角をパラメータとして騒音計測が行われ、その発音性状に応じて部材の仕様変更や騒音対策が検討される<sup>1)</sup> (図-1)。

一方、建物周囲の風の流れは複雑であり、建物に対する風向き、周囲の市街地密度、建物自体の規模・形状の影響を受けた結果、壁面の部位により気流性状が大きく異なる (図-2)。したがって、部材の風洞実験結果から障害となり得る風騒音の発生条件（風速・風向）が特定できても、実際に建物に設置された際にそれに合致するか否かを精度よく推定するのは困難である。

以上より、建物の外壁面上における風騒音発生リスクを定量的に評価することを目的とし、風洞実験に基づく部材の風騒音評価結果に、建物周囲における風速分布の予測結果をリンクさせ、建物外壁面における風

騒音の発生部位を可視化するシステム「TSounds<sup>®</sup>-Wind」を構築した。



図-1 風洞実験

Fig.1 Wind tunnel experiment

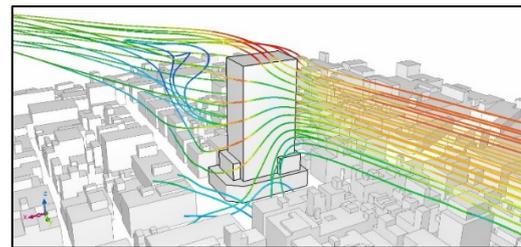


図-2 建物周囲の風の流れ

Fig.2 Air flows around a building

## 2. システム概要

本システムのフローを図-3 に示す。入力データは部材の発音特性（風洞実験に基づく風騒音評価ランク）と建物まわりの風況（シミュレーション等に基づく建物周囲の風速分布）である。本システムでは、これら

\*1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

\*2 技術センター 先進技術開発部 AI連携技術開発室

から必要なデータを抽出した上で演算・照合を行い、建物3Dモデル上に風騒音評価ランクをマッピングする。

本システムの特徴として、各入力データ（部材の発音特性、建物周囲の風速分布）について、要求精度や検討コストに応じて選択肢が設けられている。

部材の発音特性については、個別に実施される風洞実験に基づく評価結果が高精度なデータと位置付けられるが、外装部材には汎用品が採用される事が多く且つ当社では長年に渡って蓄積された風騒音実験データがデータベース化（200種、20,000データ以上）されているため、同等の形状を有する部材であれば実験を行わずにデータベースから参照することも可能である。

建物周囲の風速分布については、建物形状や敷地ごとに風況が異なることからデータベース化は困難であるため、個別のデータが必須となる。近年ではCFD（Computational Fluid Dynamics、流体解析）技術が普及しており、建築分野においても多くの分野で活用されている。CFDは市街地を含む解析空間内における風速分布を高解像度で得ることができるが、解析コスト（特に膨大な演算処理に伴う計算時間）に課題がある。そこで、当社が近年開発を進めているAI技術（深層学習に基づく風況予測技術）を風速データを得るための選択肢として実装した。当社のAI技術<sup>2)</sup>は、膨大なCFD結果を画像として学習し構築されたものであり、CFDと同等の風速場をわずか数分で予測可能である（CFDでは数十時間を要する）。

次章より、アルミ製縦格子手摺が高層集合住宅のベランダに設置される場合の評価事例を示す。

### 3. 風洞実験に基づく部材の風騒音評価

#### 3.1 風騒音の計測と分析

集合住宅のベランダ等で一般に使用されるアルミ製縦格子手摺（実物1ユニット）を対象とした風洞実験事例を図-4に示す。治具に固定された試験体は回転架台により風向角を0°（面正対風向）から90°（面平行風向）まで変化させるものとし、風洞気流の風速は0m/s~20m/sとした。各風向角・風速ごとにマイクロフォンで騒音計測を行い、スペクトル分析に基づいて風騒音の周波数特性を確認する。

住環境障害となり得るレベルで風騒音が発生する場合のパワースペクトルの例を図-5に示す。図中、青のグラフは試験体なし（暗騒音）、赤のグラフは試験体あり（縦格子から発生する風騒音）である。同図(a)のようにピークが多数出現するパターンは、部材の空力振動を伴う発音（主に0°近傍で発生）であり、一方(b)のように特定の周波数に明瞭なピークが出現するパターンは部材まわりに形成される渦音（およびそれに起因する共鳴音）を主とする流体音（主に70°近傍で発生）であると推察される。

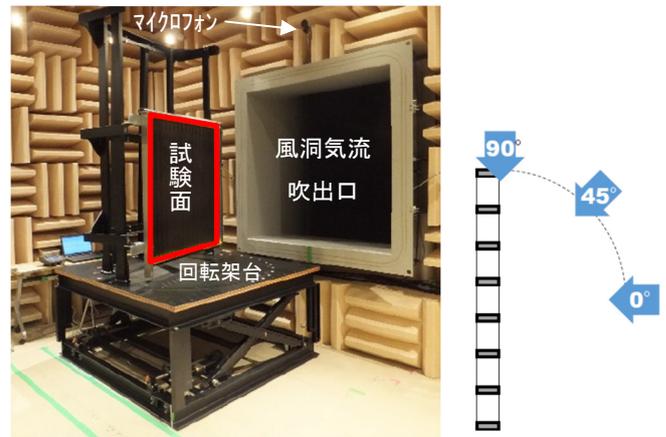


図-4 風洞実験  
Fig.4 Wind tunnel experiment

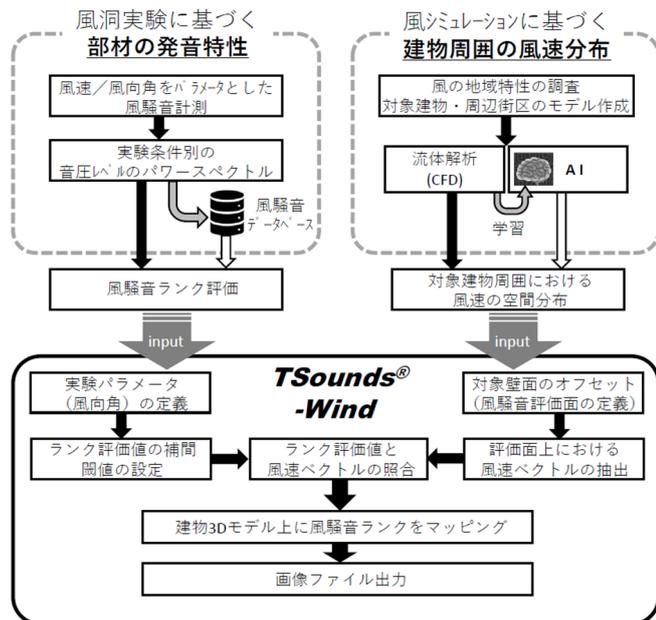


図-3 TSounds®-Windのシステムフロー  
Fig.3 Flow diagram in TSounds®-Wind

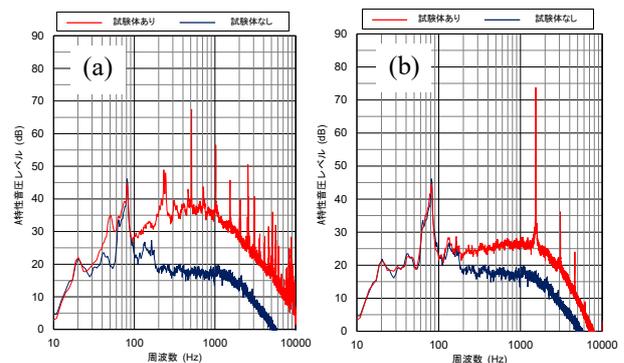


図-5 風騒音データの例  
Fig.5 Examples of aerodynamic noise

### 3.2 風騒音の評価

実験条件に応じて様々な機構で発生する風騒音に対し、騒音対策の可否を判断する上では、騒音の程度を定量的に評価する必要がある。2018年以前は実験者の聴感に基づく評価を行ってきたが、その後当社では、計測データに含まれる物理量を用いて風騒音の「わずらわしさ」を5段階に分類する評価尺度が開発され、研究および実務に活用されている<sup>3)~5)</sup>。この風騒音評価尺度に基づく風騒音ランク値の算定例を表-1に示す。本評価尺度においては、各ランクが以下のように定義されている。本評価結果が TSounds®-Wind の入力データとなる。

- ランク0：発音なし
- ランク1：注意深く聴けば確認できるわずかな発音
- ランク2：かすかに聴こえる発音
- ランク3：明瞭に聴こえる発音
- ランク4：明瞭かつ障害となる可能性が高い発音
- ランク5：非常にうるさく明らかに障害となる発音

表-1 風騒音評価結果  
Table 1 Evaluation ranks of aerodynamic noises

		水平風向角[°]						
		0	15	30	45	60	75	90
風速 [m/s]	5	2	1	0	0	0	0	0
	7.5	2	0	0	0	0	2	0
	10	3	1	0	0	0	3	0
	12.5	5	1	1	0	2	5	0
	15	5	5	0	0	2	5	0
	17.5	5	5	0	0	1	5	5
	20	5	1	0	0	2	5	5

## 4. 建物周囲における風速分布の予測

### 4.1 CFDによる風況予測

建物周囲に吹く風は、気象条件、地理的条件、敷地周囲の市街地密度、建物本体の規模・形状等、多くの要素に影響を受け複雑に変化する(図-2)。ここでは、高さ約150mの高層集合住宅を対象とし、その周囲の風速分布をCFDにより求める。

CFDでは、対象建物および周辺市街地を含む空間を解析領域とし、その内部(空気の領域)で離散化された要素ごとに風速ベクトルや圧力等を求めることができる。CFDは模型を用いた風洞実験に比べ、センサー

等の物理的制約を受けることなく広範囲かつ高解像度に風速分布を得ることができるため、建物壁面近傍における複雑な風況を予測するのに適している。

### 4.2 解析モデルおよび解析結果

解析モデルとして、評価対象とする高層建物(高さ約150m)を中心として半径約600mの模擬市街地形状を再現し、解析メッシュ(約900万要素)を作成した(図-6)。解析風向は東京で発生頻度の高いN,NNW,SWの3ケースとした(図-7)。乱流モデルにはRANSモデル(改良k-εモデル)を使用し、風速分布の定常解(時間平均値の近似解)を得た。解析結果の例として、風向NNWにおける風速ベクトル分布を図-8に示す。建物に吹く気流が、建物中央の壁近傍で減速すると同時に左右に分かれ、増速しながら端部で剥離し、背後へ流下する様子が確認できる。

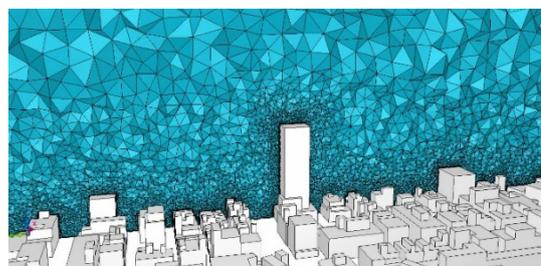


図-6 風況予測のための解析メッシュ  
Fig.6 Grid system for prediction of flow field

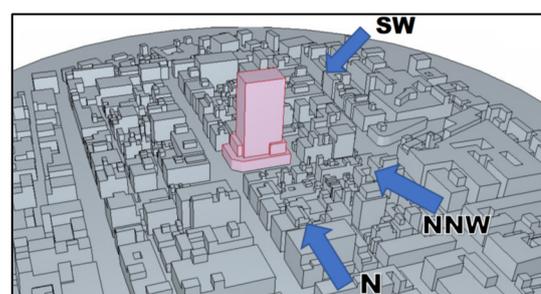


図-7 解析風向  
Fig.7 Computed wind directions

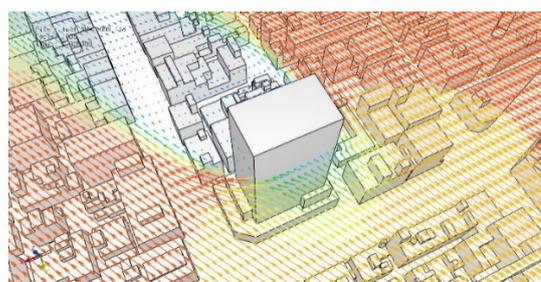


図-8 建物まわりの風の流れ  
Fig.8 Flow field around the building

## 5. 建物壁面における風騒音ランクの可視化

### 5.1 風騒音評価面の作成と風速データの抽出

風騒音評価のためには、風洞実験で対象とした部材が実際に設置される位置における風速データを用いる必要があるため、前章の解析結果から部材設置位置（建物壁面近傍）における風速ベクトルを抽出する。風速ベクトルの抽出面は、建物外壁面から所定の間隔を設けて新たに生成される仮想面であり、これが風騒音の評価面となる。ここでは、対象部材（ベランダ格子手摺）と建物外壁面との距離に、実験における風洞吹出口（実験風速定義位置）から試験体までの距離を加算するものとし、解析モデルの建物外形面から外部空間側に3m オフセットさせた仮想面において風速ベクトルを抽出した（図-9、図-10）。

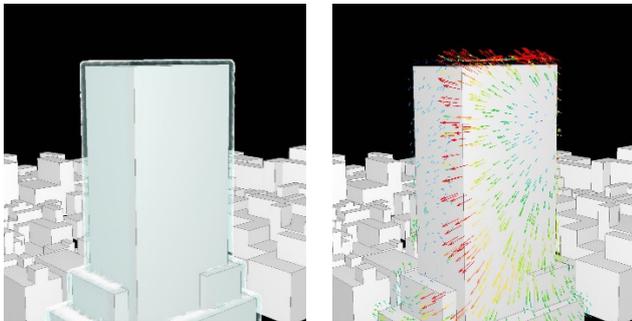


図-9 評価面の生成      図-10 評価面上の風速ベクトル  
Fig.9 Evaluation surface      Fig.10 Vectors on the surface

### 5.2 風騒音評価ランクのマッピング

前節で示した評価面上の風速ベクトルについて、風速値および評価面との角度を表-1 の風騒音評価結果と照合し、同面上に風騒音ランクをカラーコンターでマッピングする。

CFD の解析風向（N,NNW,SW）ごとに出力された風騒音ランクの分布画像を図-11 に示す。解析風向に対し風下側壁面における風速は極めて小さいため、同図では主に壁面近傍の風速が大きくなる（風騒音の発生可能性が高い）風上側壁面について示す。ここで、CFD に基づく風速値が3次元ベクトルである一方、風洞実験の風向角パラメータは水平方向角度のみであるため、鉛直方向の風向角については $\pm 45^\circ$ を有効範囲と仮定した。

同図より、本建物において風騒音が問題となり得る領域は、比較的上部（建物高さの約3/4）でかつ隅角部を中心に分布する傾向がみられる。これは主に、風が建物の風上壁面に当たって壁面上を広がりながら増速

する過程で、特に外壁面に沿って水平に風が流れる領域において発音条件（実験風向角  $75\sim 90^\circ$ ）と合致するためであると判断される。

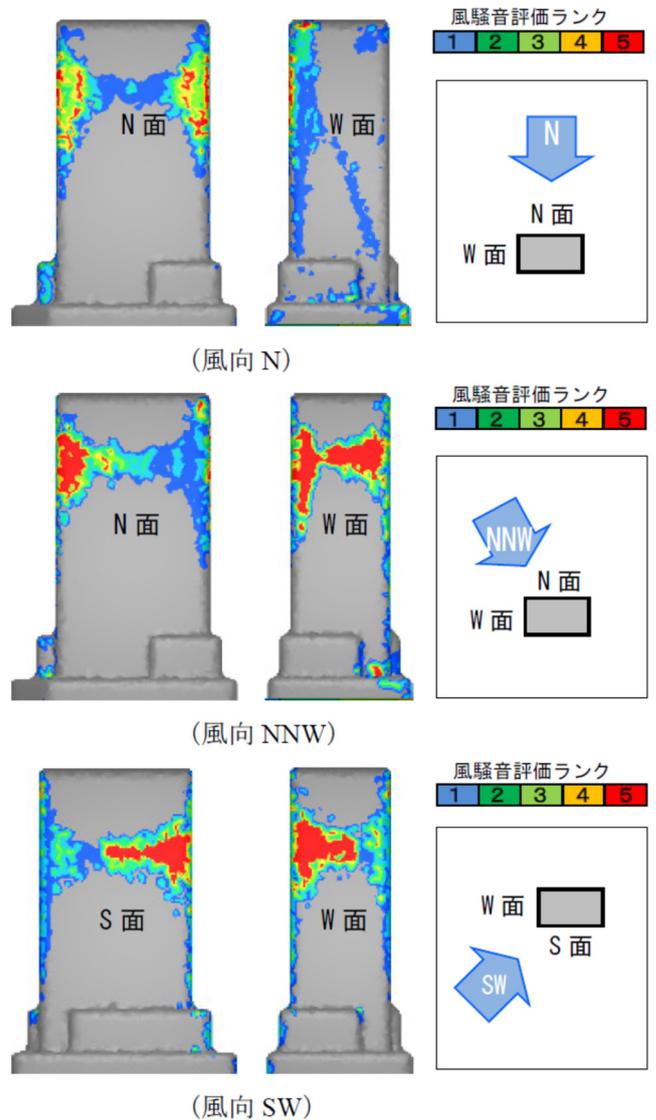


図-11 風騒音ランク分布の可視化  
Fig.11 Visualization of aerodynamic noise rank

### 5.3 AIによる風況予測の精度検証

建物周囲の風速分布に関しては、CFDの他に選択肢としてAIに基づく予測も可能である（図-3）。ここでは、同モデルに対し、AIによる風況予測結果を採用した場合の出力結果を比較し、その妥当性を精査する。

AIに基づく出力結果を図-12に示す。ここで、AI風況予測については、空間解像度が4mであることから、評価面のオフセット距離は4mとした。また、CFDとは異なり主建物/周辺建物の区別がないため、本システムによるマッピングは周辺市街地を含んだものとな

る。同図について CFD に基づく図-11 と比較すると、高いランクの出現位置が概ね対応していることが確認できる。これは、「周囲よりも高い矩形の高層建物」に関する学習データパターンが充実していたため、風速ベクトル分布の再現性が高かったものと推察される。本結果より、建物周囲の風速分布を得るための簡易予測メニューとして AI 技術が十分に適用可能であることが確認された。

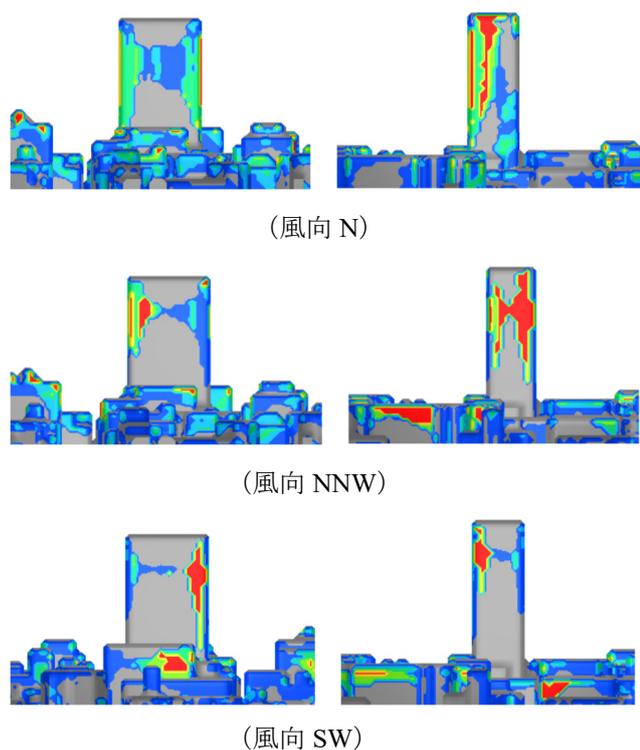


図-12 AIに基づく出力結果  
Fig.12 Results using AI data

## 6. まとめ

実大部材を対象とした風洞実験に基づく風騒音評価結果と、数値シミュレーションに基づく風況予測結果とをリンクさせることにより、建物壁面近傍における風騒音発生部位を可視化するシステムを開発した。本技術は、風騒音に対し留意すべき箇所や対策を検討すべき部位を合理的に特定できるため、外装計画の最適化に有効であると考えられる。

なお、部材形態については、建物壁面近傍の風速ベクトルに照合できる発音条件（実験風速・風向角）が定義できればよいため、例えば水平ルーバー（実験風向角は鉛直方向となる）等に対しても同様の手法で評価可能である。

今後も、実験データベースの拡充や解析精度の向上により本システムの高度化を図り、音環境保全に配慮した外装計画技術として展開してゆく予定である。

## 参考文献

- 1) 吉川, 富高: 建物外装部材から発生する風騒音の予測・評価技術, 大成建設技術センター報, 第 42 号, 2009.
- 2) 中村, 吉川: AI 技術を用いた建物周辺の風速・風圧分布予測に関する研究, 大成建設技術センター報, 第 55 号, 2022.
- 3) 浜田, 富高, 増田: 外装材から発生する風騒音の評価手法, 大成建設技術センター報, 第 53 号, 2020.
- 4) 富高, 浜田, 増田: 風騒音評価手法に関する検討 (その 1 聴感実験方法の概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021.
- 5) 浜田, 富高, 増田: 風騒音評価手法に関する検討 (その 2 風騒音の評価尺度の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021.