

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
幸いな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。

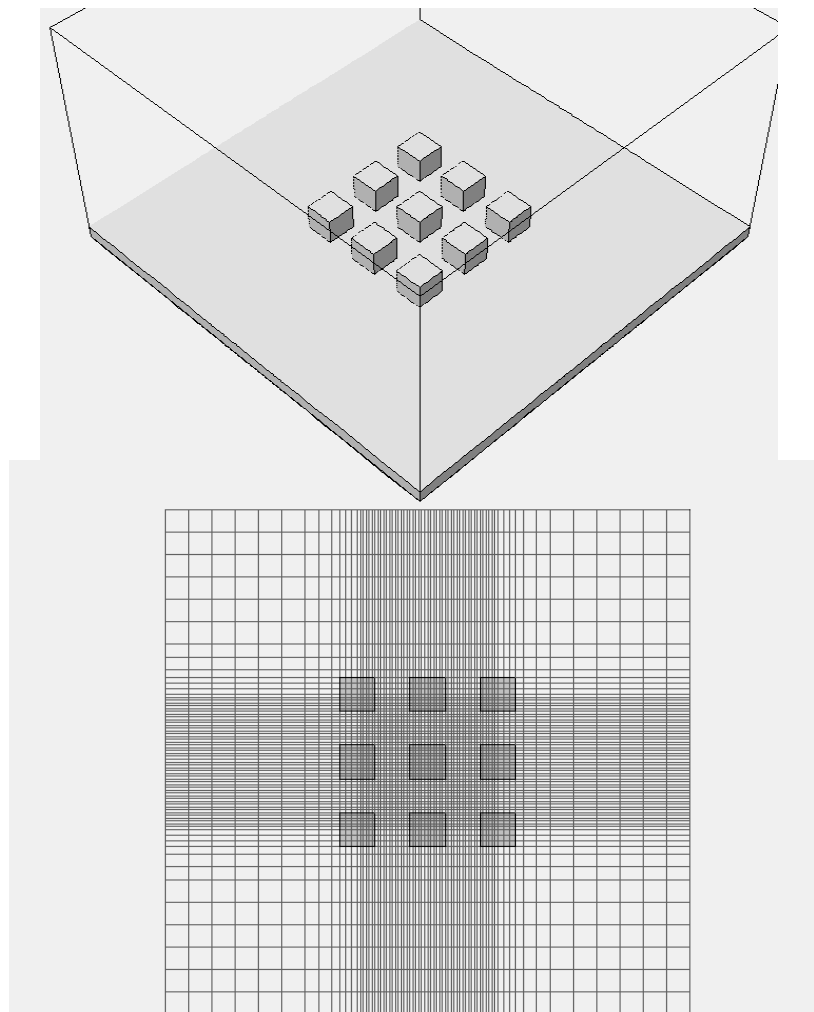


実測とWindPerfect解析の比較2

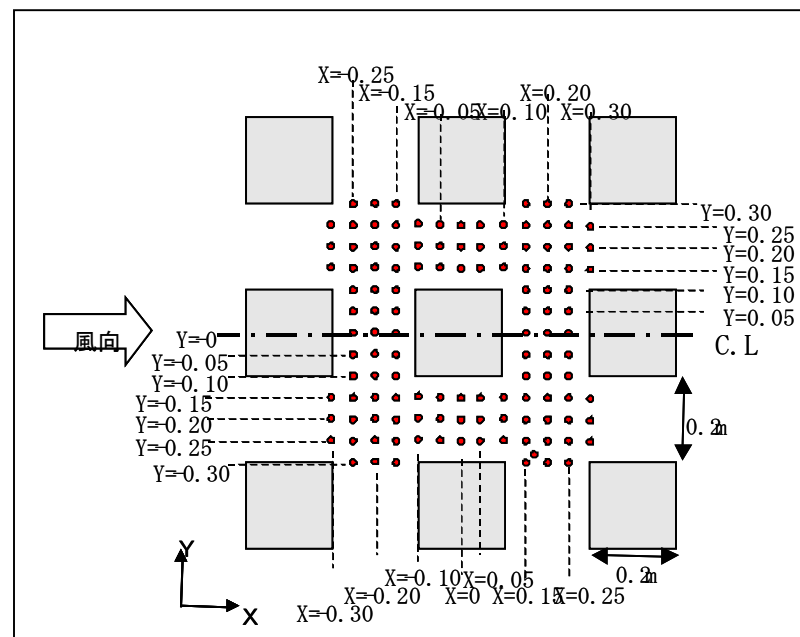
- ・ 検証では、境界条件を野々村ら(2003)が行った風洞実験の条件を踏襲。 風環境解析ガイドラインに記載。
- ・ CFDの結果と風洞実験の結果を比較。
風洞の測定領域寸法: 3.0m×3.0m×1.8m
建物ブロック: 0.2m×0.2m×0.2mの立方体
9個の立方体/80個の立方体で市街地を模擬。
ブロックとブロックの間隔は0.2m。
その他の境界条件はすべて風洞実験の条件に準拠。
- ・ CFDの結果に120個のサンプリングポイントを抽出、風洞実験結果と比較を行った。

実測とWindPerfect解析の比較3

検証1 立方体9個



シミュレーション用モデル



風洞実験測定ポイント

実測とWindPerfect解析の比較4

検証結果：

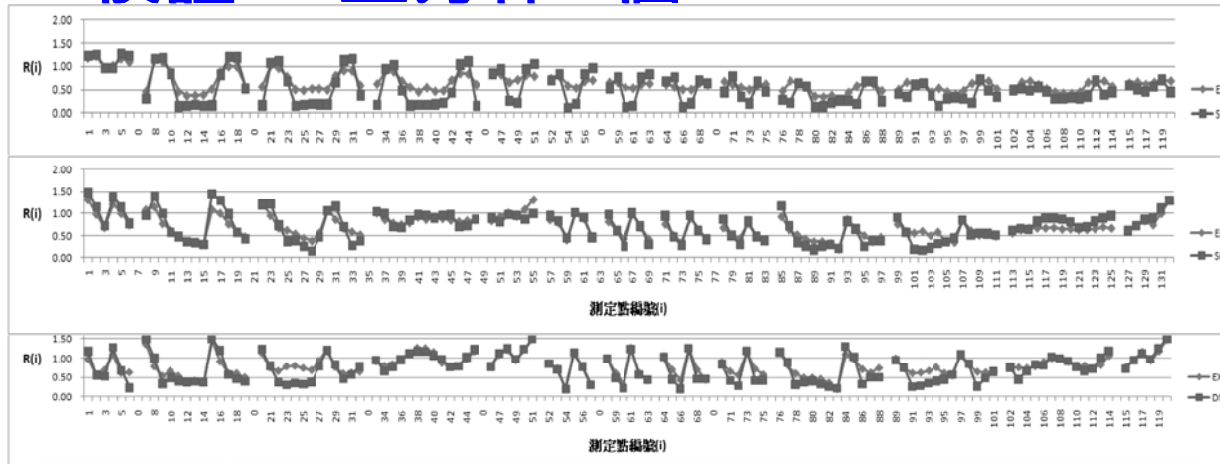
検証はCFD計算を開始し、流れ場が安定になった600秒後の結果を用いて、野々村ら(2003)の実験結果と比較した。

- ◆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。

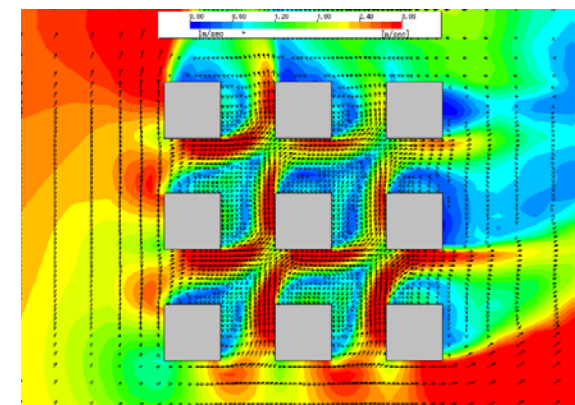
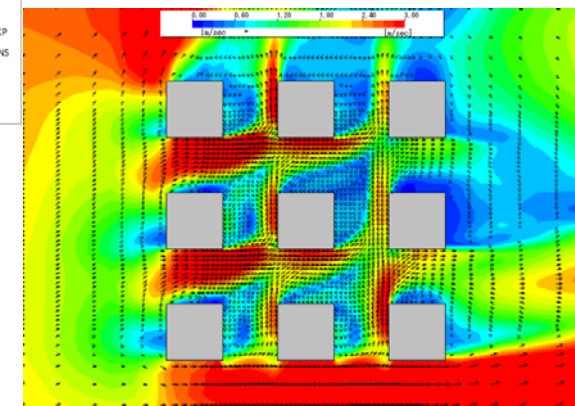
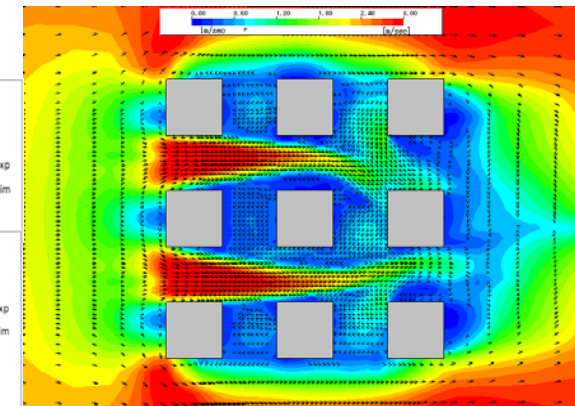
表1から分析すると、WindPerfectDXでの解析結果が実験値との相関が高く、他のCFDソフトの解析結果より精度が高いことが分かる。

実測とWindPerfect解析の比較5

検証1 立方体9個

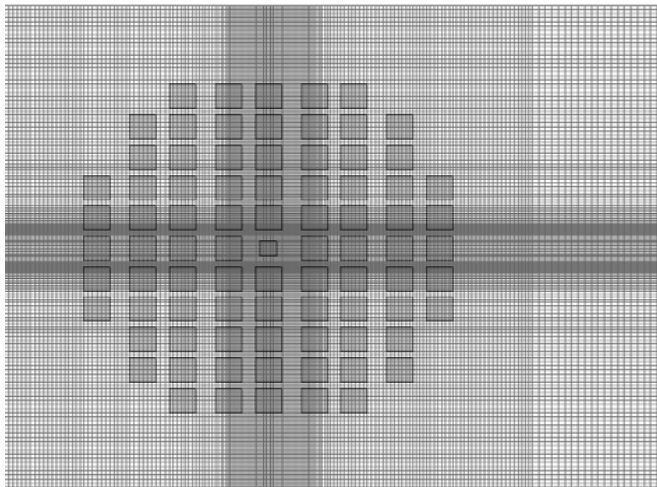
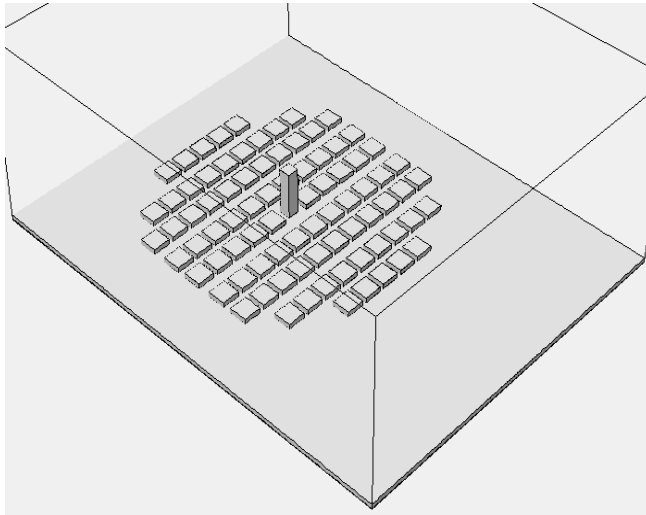


研究機関	程式	入流風向角	紊流模型	相関係数	標準誤差
本研究	WindPerfect	0°	無	0.86	0.17
		22.5°	無	0.90	0.14
		45°	無	0.92	0.14
A	該研究自製	0°	標準 k-ε	0.83	0.27
		22.5°	標準 k-ε	0.89	0.24
		45°	標準 k-ε	0.87	0.29
B	STAR-CD	0°	標準 k-ε	0.85	0.24
		0°	改良 k-ε	0.90	0.22
C	STREAM	0°	標準 k-ε	0.85	0.22
		22.5°	標準 k-ε	0.91	0.24
		45°	標準 k-ε	0.90	0.30
D	FLUENT	0°	標準 k-ε	0.86	0.24
		22.5°	標準 k-ε	0.91	0.27
		45°	標準 k-ε	0.88	0.35

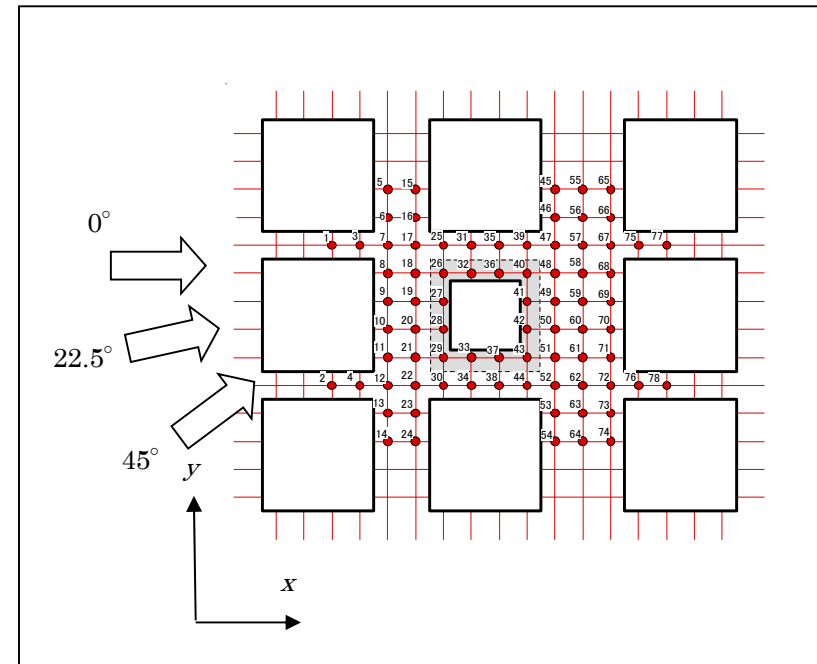


実測とWindPerfect解析の比較6

検証2 立方体80個



シミュレーション用モデル



風洞実験測定ポイント

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。

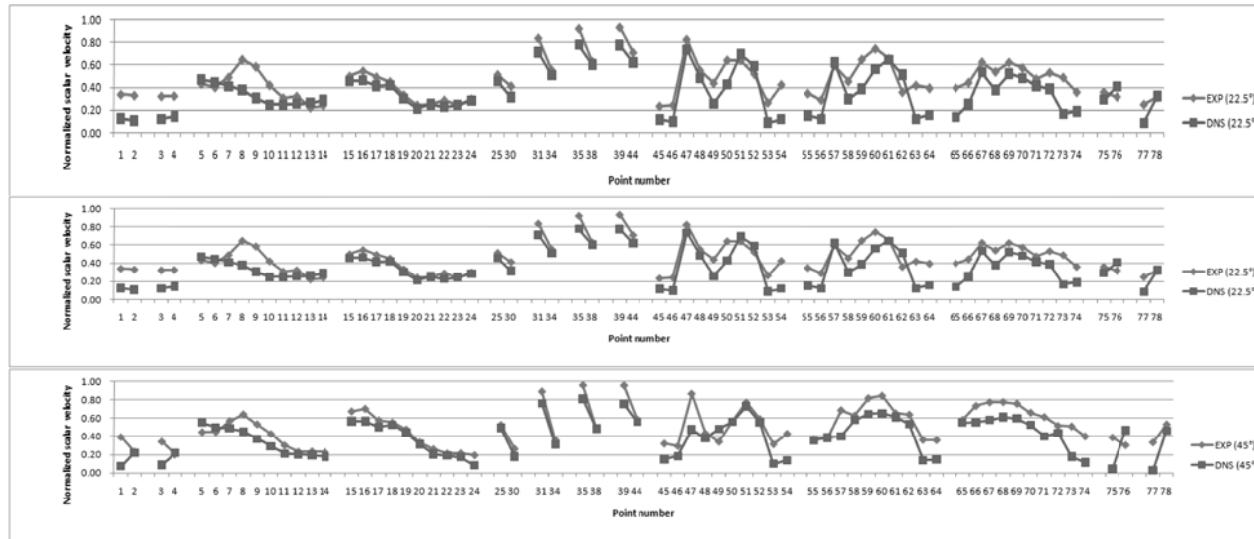
◆風向角 0° 、 22.5° 、 45° の流れ場をそれぞれ提示。

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

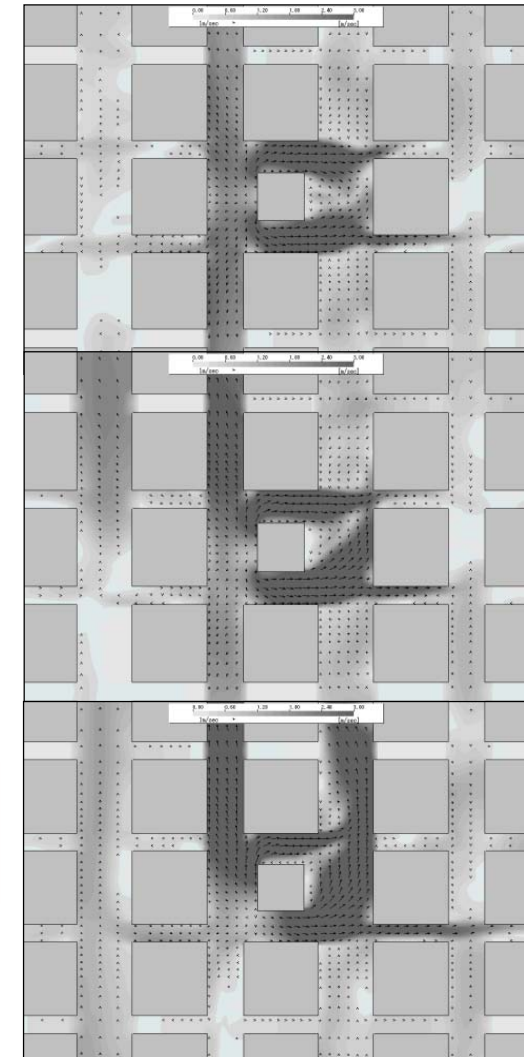
日本建築学会による乱流モデルでの結果データ(2007)とWindPerfectDXの結果の比較に示す。
WindPerfectDXの計算結果は、k- ε 乱流モデルを使った他のCFDソフトより解析精度が高かった。

実測とWindPerfect解析の比較8

検証2 立方体80個



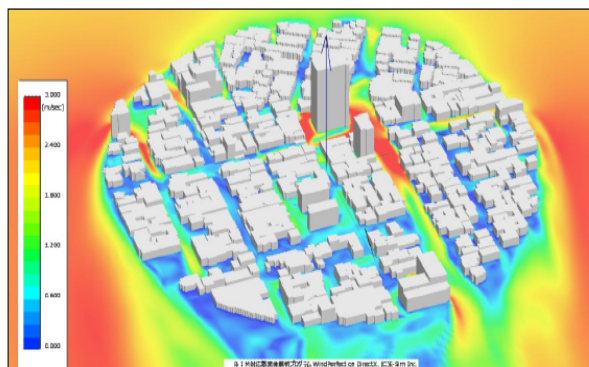
研究機関	紊流仮設条件	入流風向角(°)	相関係数	標準誤差
本研究	DNS	0	0.8402	0.0826
		22.5	0.8323	0.1057
		45	0.8423	0.1110
A	標準k-ε	0	0.7080	0.2130
		22.5	0.8620	0.2340
		45	0.8690	0.2300



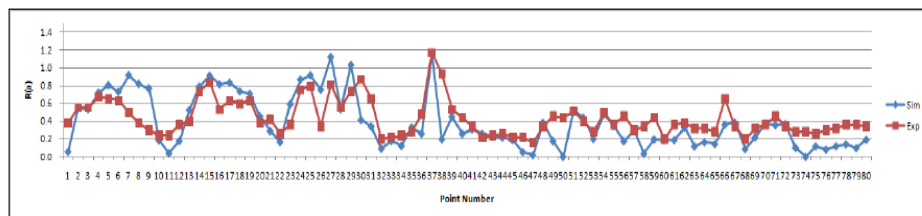
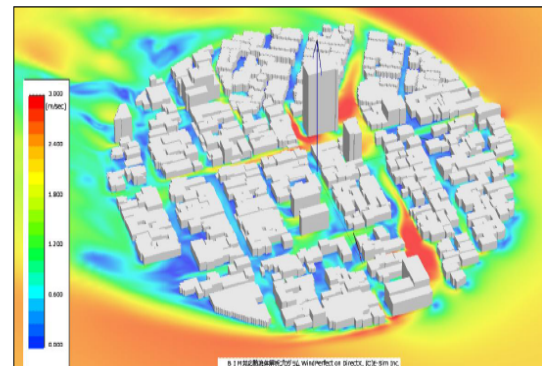
実測とWindPerfect解析の比較9

検証3 新潟市内解析結果

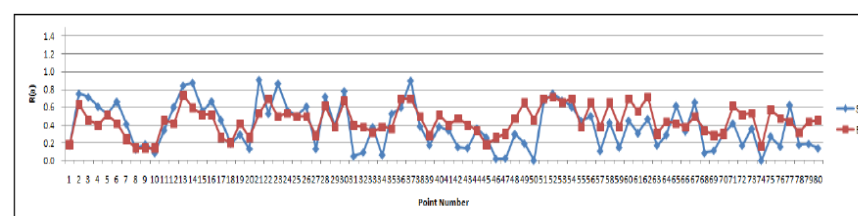
新潟市街区のCADデータを用いて、
シミュレーション結果と風洞実験結果を比較
WindPerfectDXの計算結果は、k- ϵ 乱流モデルを使った他の
ソフトより解析精度が高かった。



Wind Direction : NNE



風向北



風向南東

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。

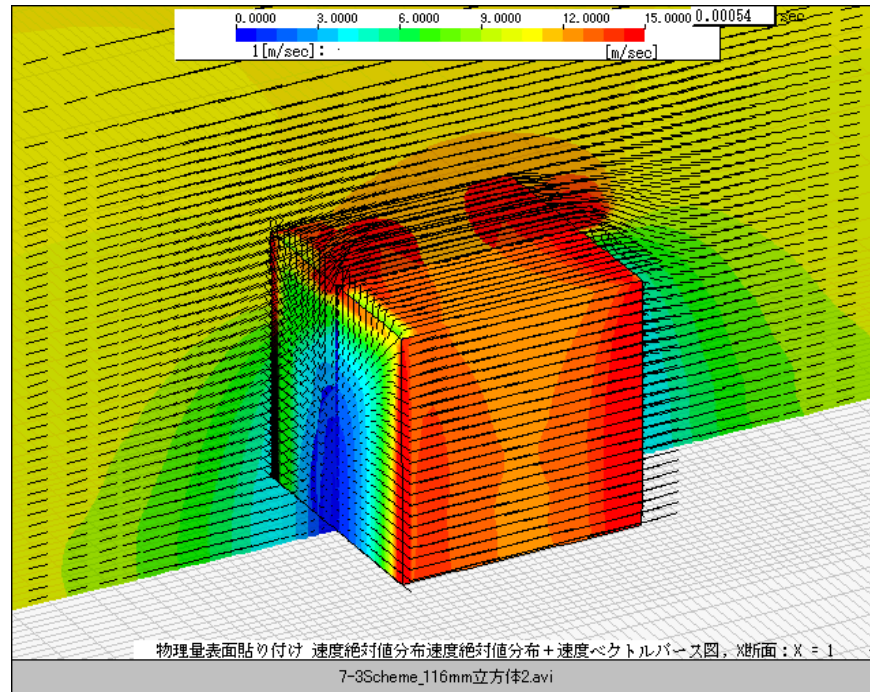
3. 実在街区(新潟)の実験について

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。

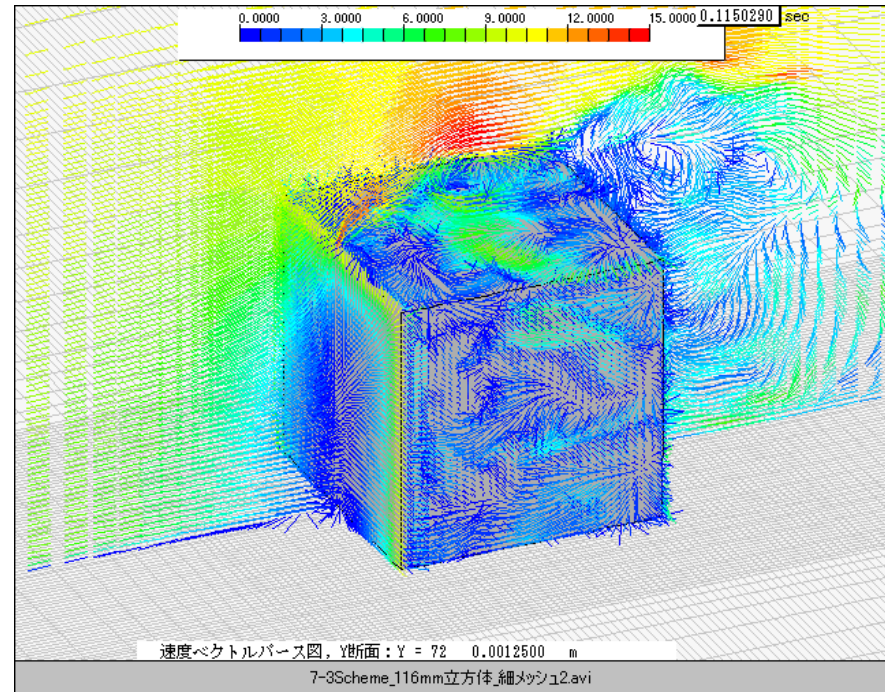
WindPerfectの解析精度2

立方体風圧シミュレーション1

角部で間歇的な大きな流れの剥離があり、
1mm秒オーダーの周期で強い負圧を伴う渦が発生



表面風速分布



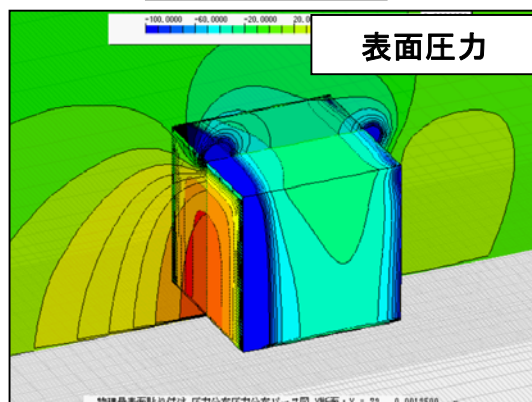
表面風速ベクトル(色は圧力)

立方体風圧シミュレーション2

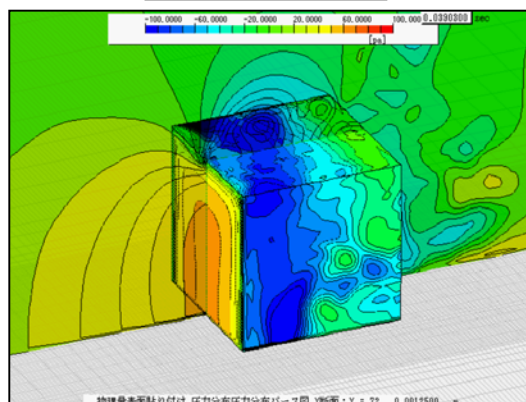
立方体周りの圧力の時間経過を追跡

表面圧力分布

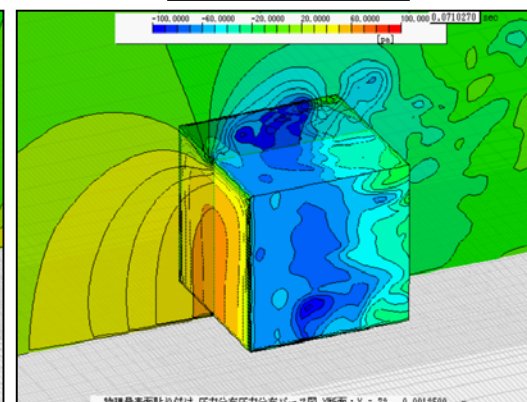
0.01秒



0.04秒

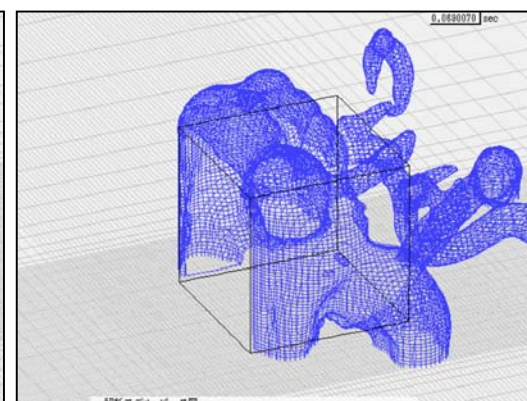
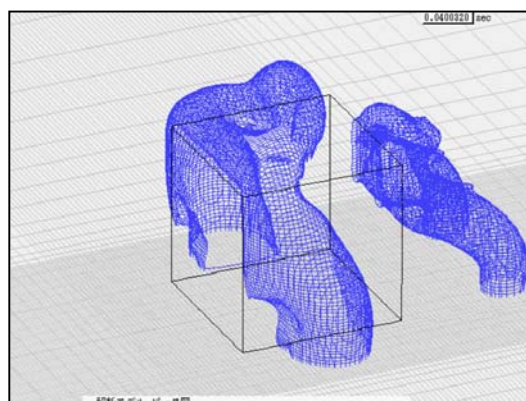
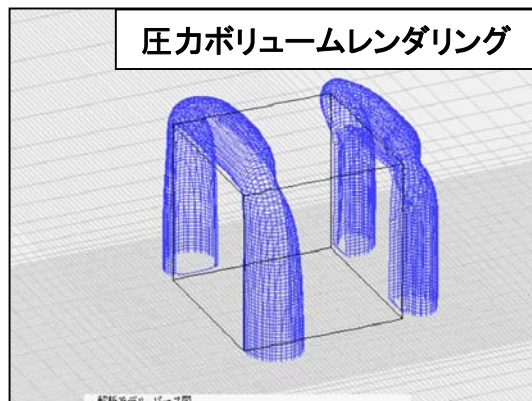


0.07秒



等圧力面

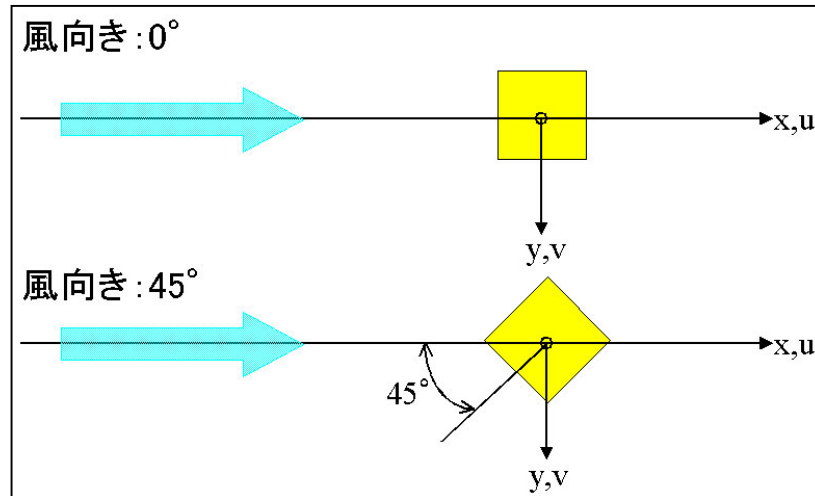
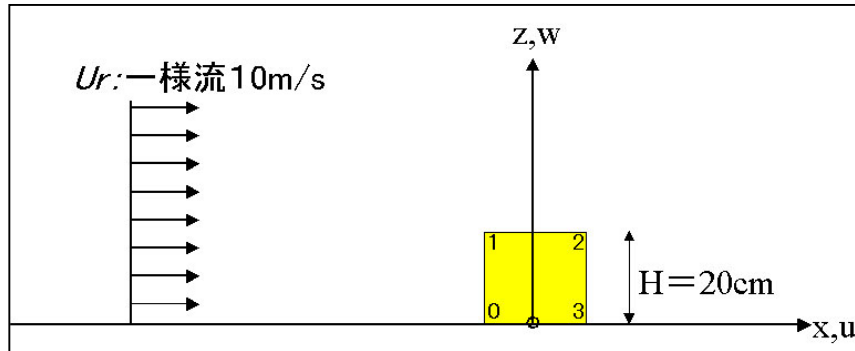
圧力ボリュームレンダリング



剥離した渦が立方体側面・上面に強い負圧を生成するのに注目

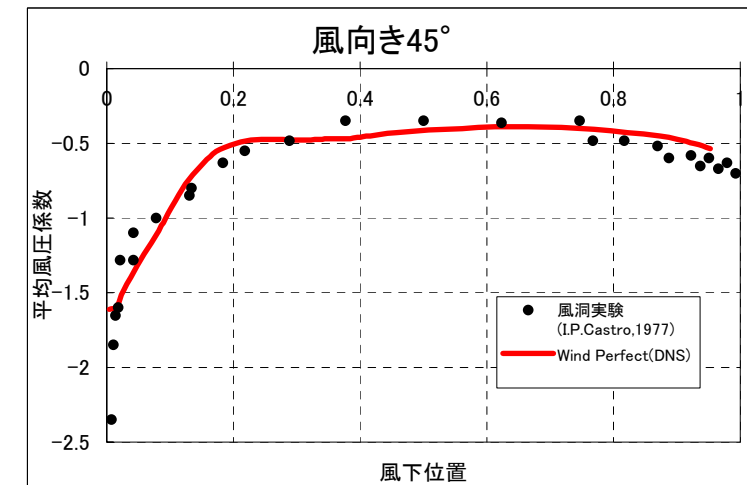
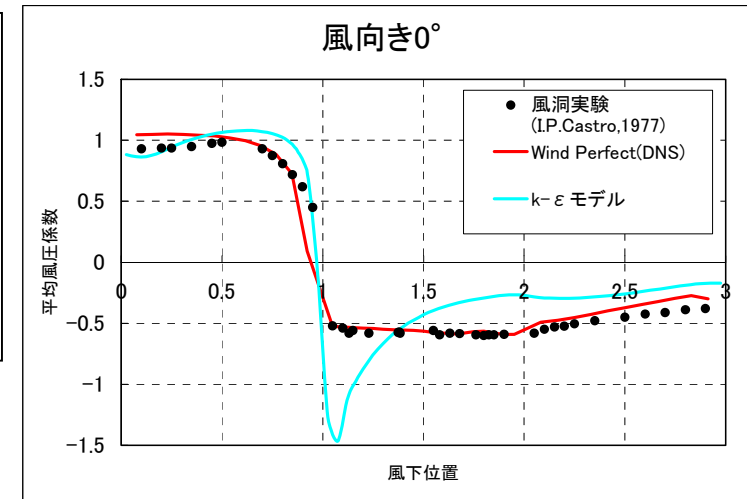
立方体風圧シミュレーション3

風洞実験とシミュレーションの結果比較



風洞実験の模式図

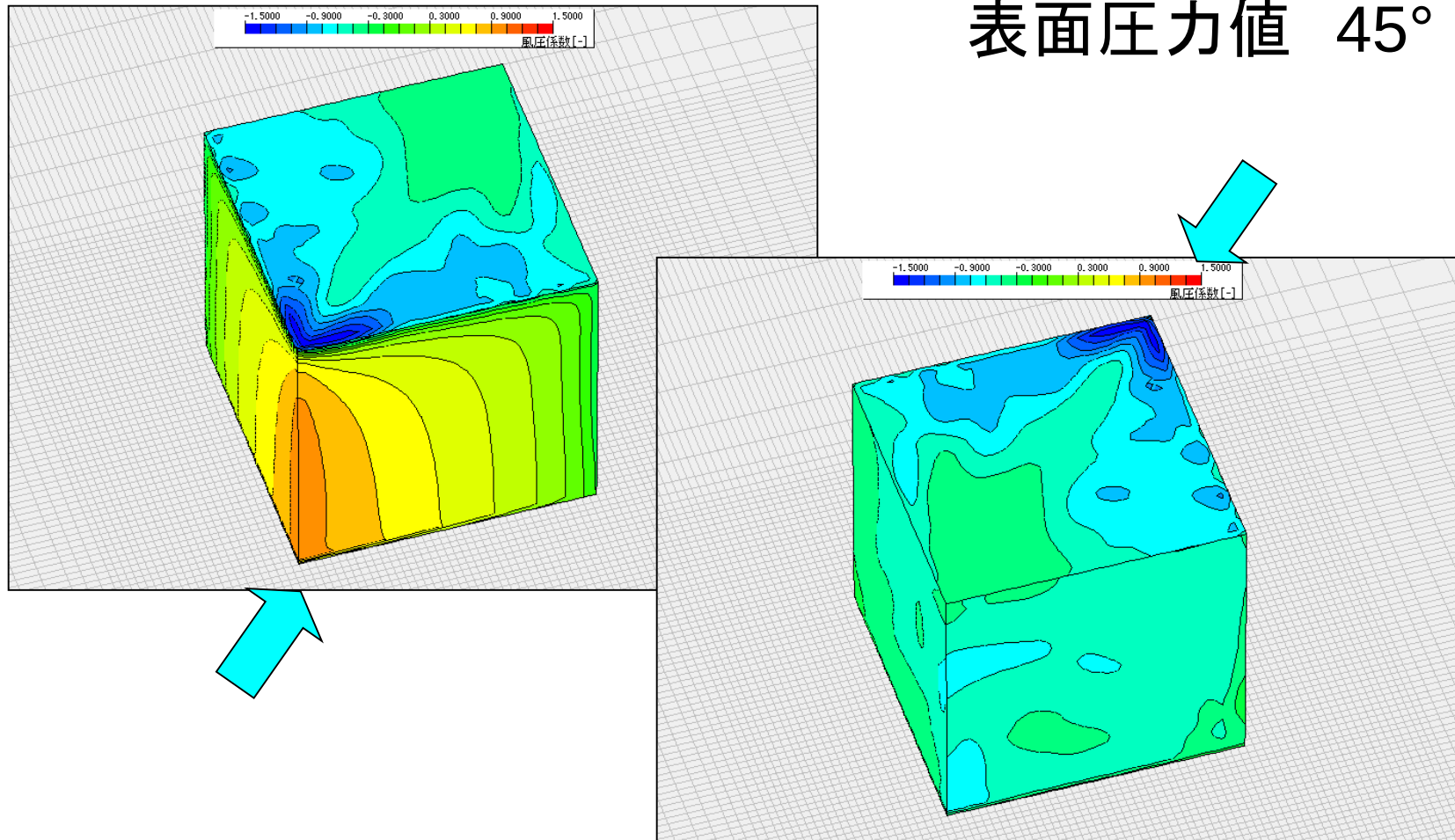
(I.P.Castro, J.Fluid Mech, 1977)



風向 0° ・ 45° の両方で風洞実験値とよく一致

立方体風圧シミュレーション4

表面圧力値 45°



斜めに立方体に衝突した風が角部で剥離して2つのコニカル渦を形成

WindPerfectの解析精度2

まとめー立方体風圧解析

文献値とWindPerfectの立方体風圧解析結果の比較を行った。

1. 風向0° について

弊社ソフトWindPerfectの結果は松木らの実測値と非常に良く一致した。

2. 風向45° について

弊社ソフトWindPerfectの結果は、酒井らの実測結果と良く一致した。

WindPerfectの解析精度3

スタジアム屋根風圧シミュレーション1

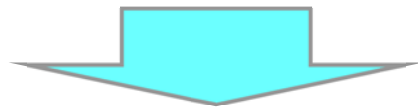
スタジアム屋根のような大規模片持式架構では風荷重が支配的となる。

◆風洞試験

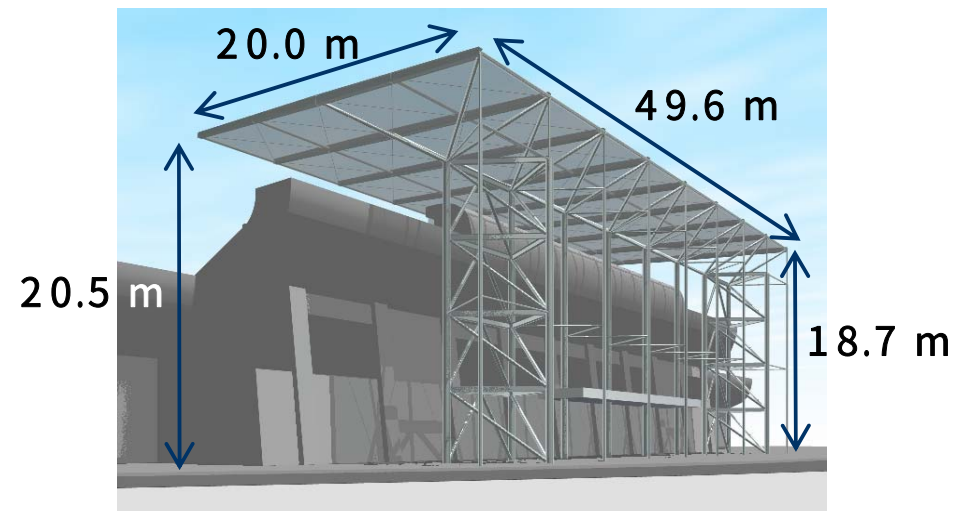
比較的小規模な風洞を用いて、屋根勾配、背面開口率、観客席勾配などを合わせた部分模型による一様流下での風洞試験を通じて、構造設計初期段階に適用可能な風力特性を得ることが可能である。

◆流体計算

一様流中に限れば、経験的な数値粘性を導入した計算手法により、空気力特性が高い精度で予測可能である。



大規模片持式屋根に対して、一様流の流体計算を実施し、その適用性を把握した。



スタジアム屋根風圧シミュレーション2

◆風洞実験試験体

試験体は、屋根勾配、背面開口率、観客席勾配を合わせ、スタジアム断面全体を囲った剛模型(模型スケール1/90)とし、周辺建物及び対面スタジアムは再現しない。

◆流入条件・風向

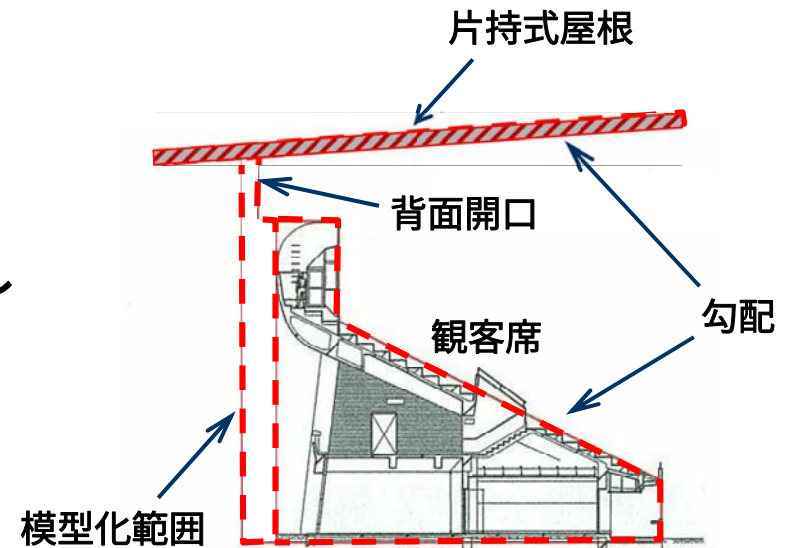
流入風は勾配のない一様流(風速10.0m/sec)とし、風向は観客席側からと観客席後方側からの2方向とした。

◆風洞設備・風圧力測定

日大所有のゲッチンゲン型風洞を用い、屋根上下面それぞれ別々に風圧力を測定した。

風洞測定部断面寸法:

幅 × 高さ = 900mm × 1230mm



スタジアム屋根風圧シミュレーション3

◆計算領域 : $X \times Y \times Z = 4.0\text{m} \times 4.0\text{m} \times 1.2\text{m}$

メッシュ数: 約200万メッシュ ($N_x \times N_y \times N_z = 159 \times 126 \times 101$)

格子分割 : 不等間隔直交格子 (最小メッシュ幅: 3mm)

◆プログラム: WindPerfectV3.5 (株)環境シミュレーション製)

時間積分法: SMAC法

空間差分法 粘性項: 2次精度の中心差分

対流項: 中心差分 + 数値粘性 (ハイブリッドスキーム)

◆流入境界 : 勾配のない一様流 (風速10.0m/s)

流出境界 : 移流流出条件

地表面・構造物表面境界: すべり無し条件

側面・上面境界: すべり条件

◆時間刻み : 0.00005秒

計算時間 : 1.2秒 (24000ステップ)

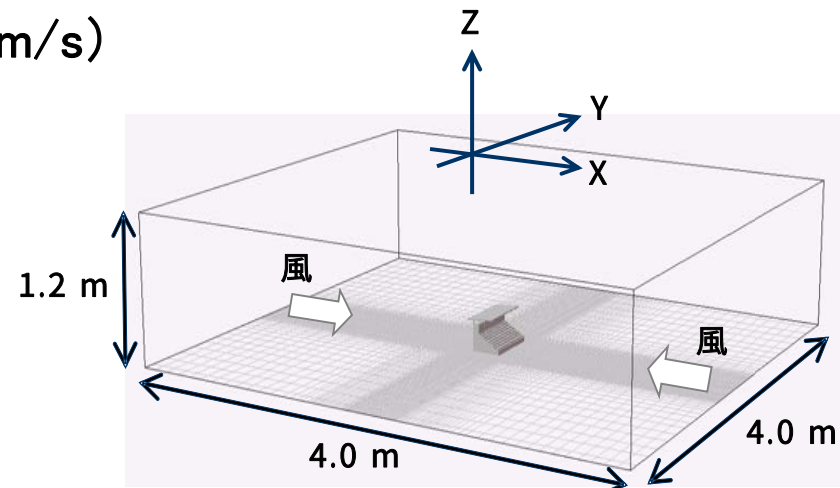
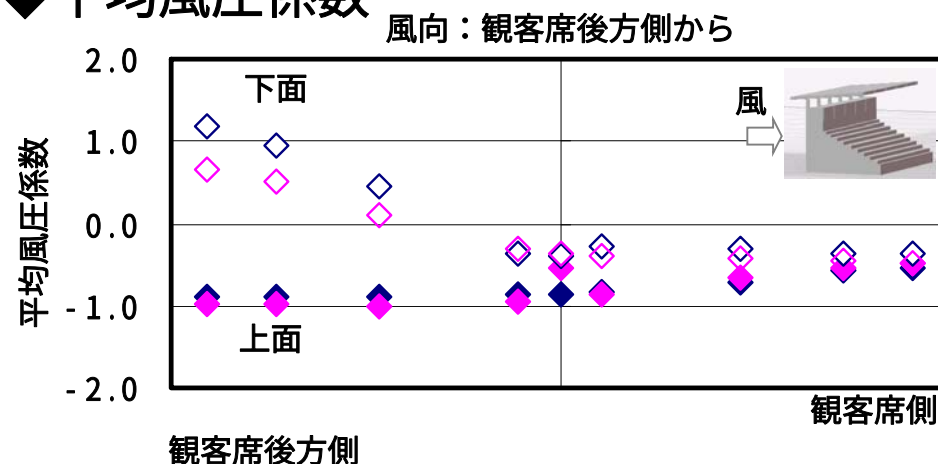
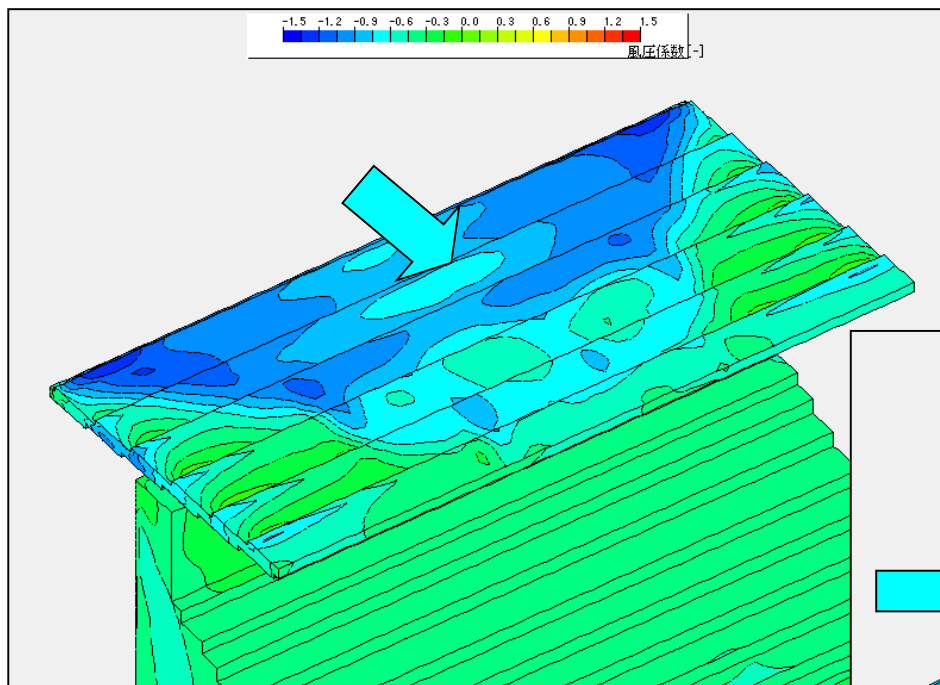


Figure 1: Wind flow simulation around the stadium. The diagram shows wind flow (風) coming from the left, passing over the stadium roof, and creating high-pressure zones (blue) behind the seating areas. The stadium is shown in cross-section with the seating area (観客席) and the roof structure. The wind flow is indicated by arrows and color-coded pressure zones.

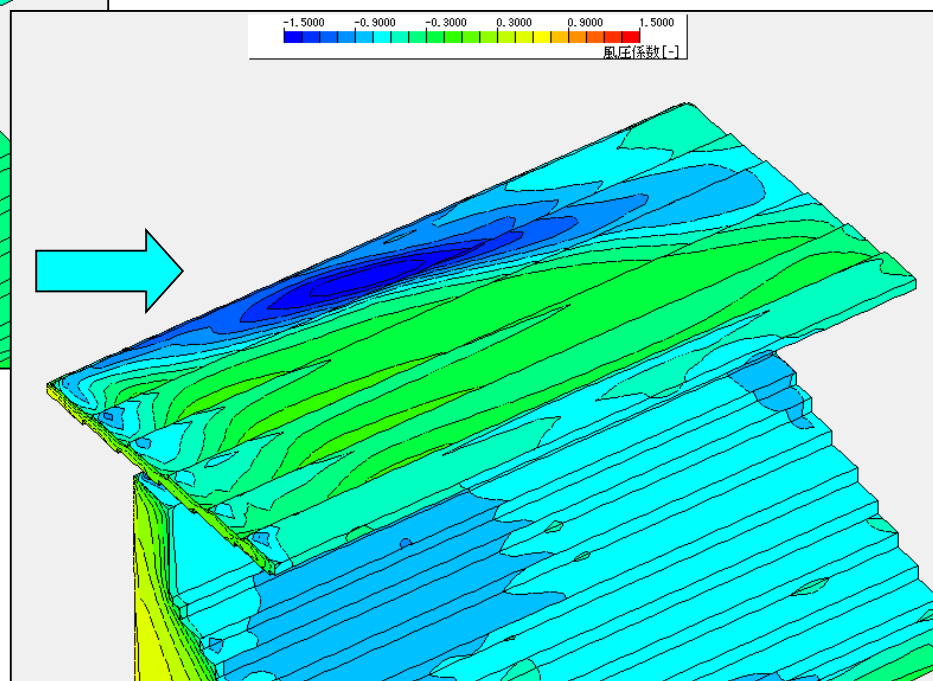


スタジアム屋根風圧シミュレーション5



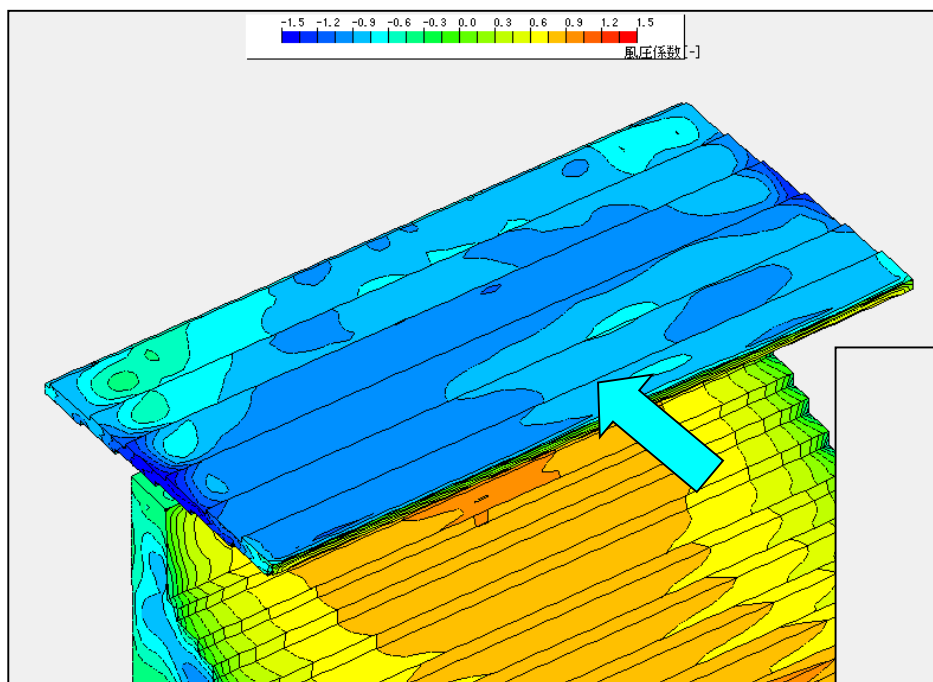
表面風速値 0°

表面風速値 45°



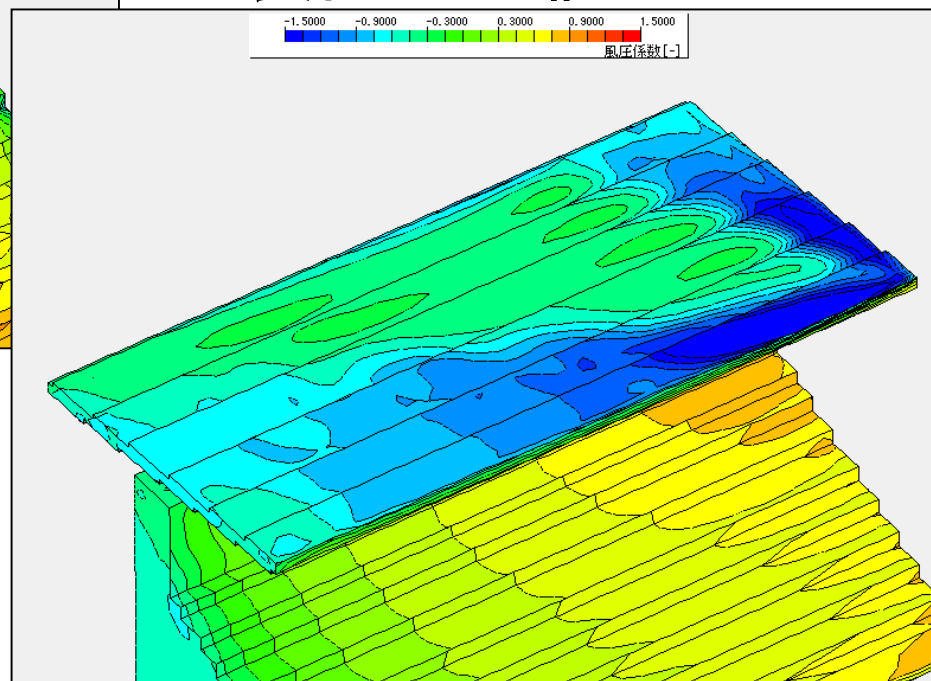
風向によって表面に風速の緩急が生じている

スタジアム屋根風圧シミュレーション6



表面圧力値 0°

表面圧力値 45°



表面圧力は風向45°が0°よりも負圧の生じる領域が少ない

WindPerfectの解析精度3

まとめースタジアム屋根風圧解析

実測値とWindPerfectのスタジアム屋根風圧解析結果の比較を行った。

1. 弊社ソフトWindPerfectの風圧解析結果は、風洞実験の結果と非常に良く一致した。
2. 表面風圧で風向を変えた場合などもコニカル渦生成など、負圧域形成の特徴をWindPerfectの風圧解析はよく捉えていることが分かった。

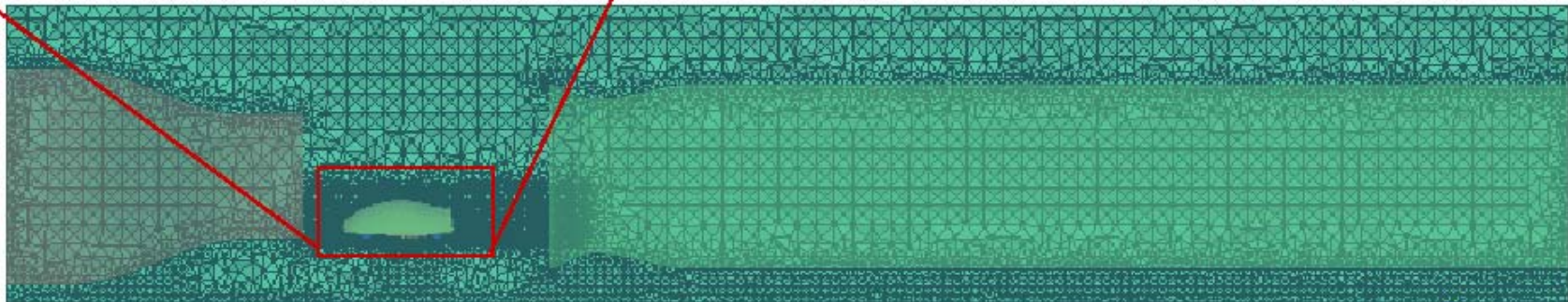
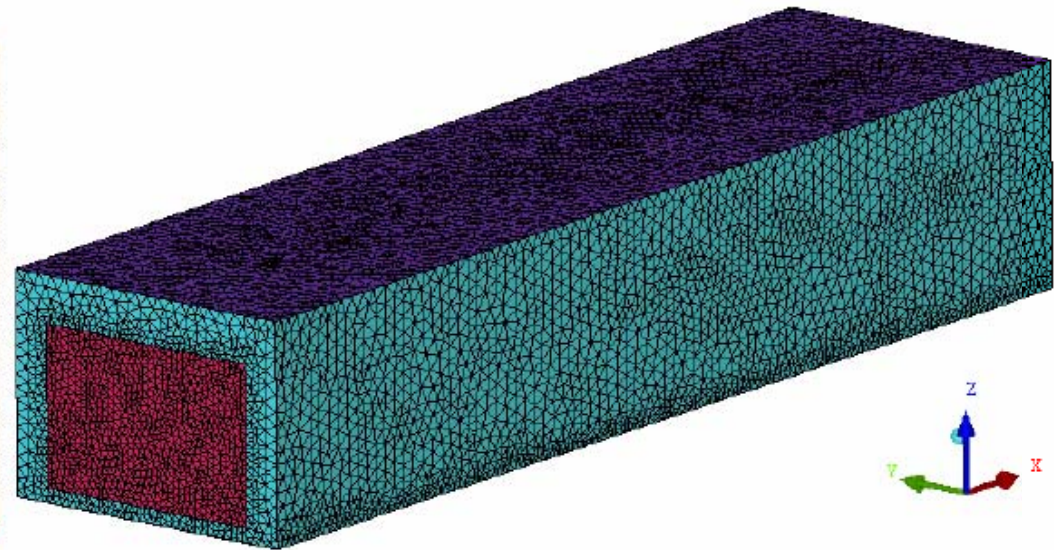
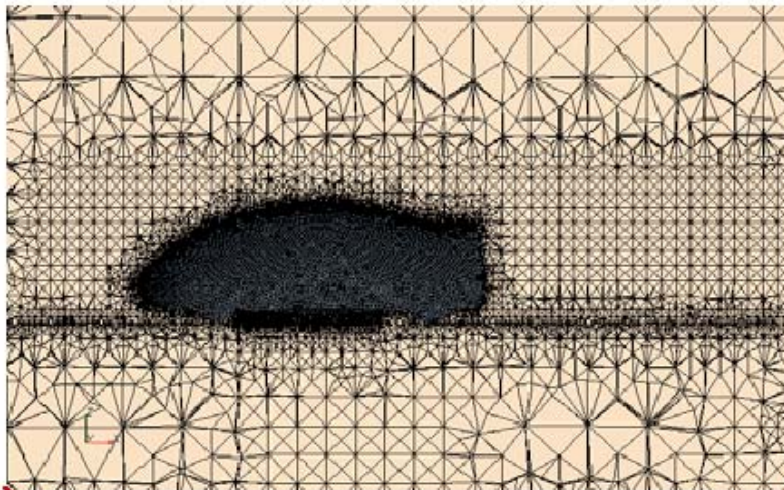
WindPerfectの解析精度4

12

自動車技術会ベンチマーク

計算格子

- 標準メッシュを提供するが、独自メッシュでの参加も可とする.



計算格子(続き)

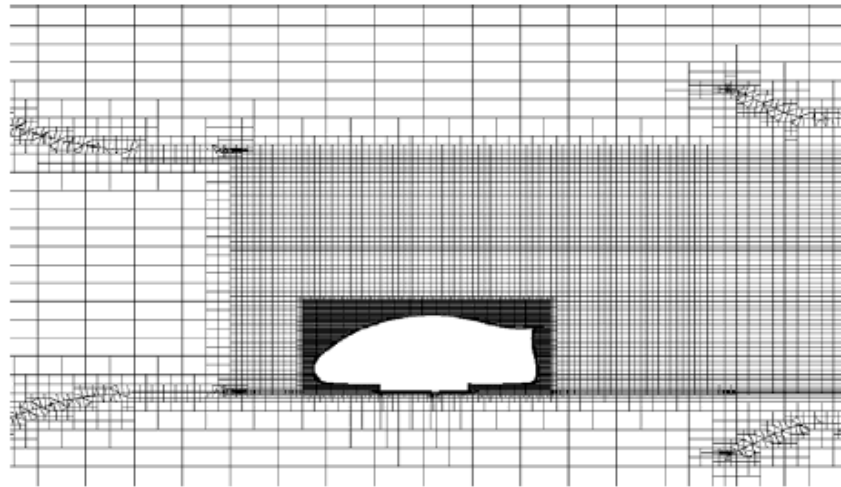
- 標準メッシュが最もメッシュ数が少なく, 最小格子間隔も粗い.
- Esperanza は空間メッシュが不要.

ソフト	格子系	最小格子間隔	要素数	節点数
ACE	Hexa(階層)	0.275mm	1930万	2940万
Esper	サーフェスのみ		13,548	
CFX	T+P(20層)	0.03mm	440万	120万
Fluent (提供メッシュ)	T+P(1層)	5mm	183万	37万
SCT	T+P(2層)+Py	1mm	326万	73万
STAR	T+P(3層)	0.1mm	481万	110万
CFD++	T+P(25~30層)	0.01mm	870万 (ハーフ)	245万
Nagare	Hexa(構造)	3mm		182万
FFR	T	5mm	248万	48万
e-flow	Hexa(構造)	5mm		176万

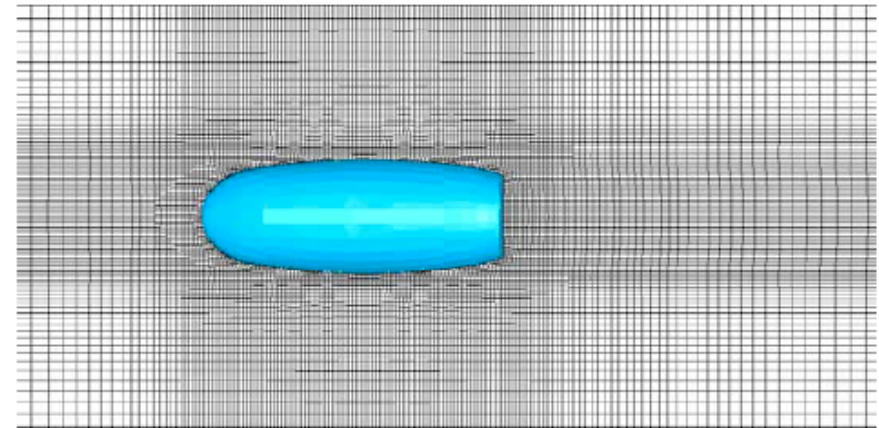
T: テトラ, P: プリズム, Py: ピラミッド

計算格子(続き)

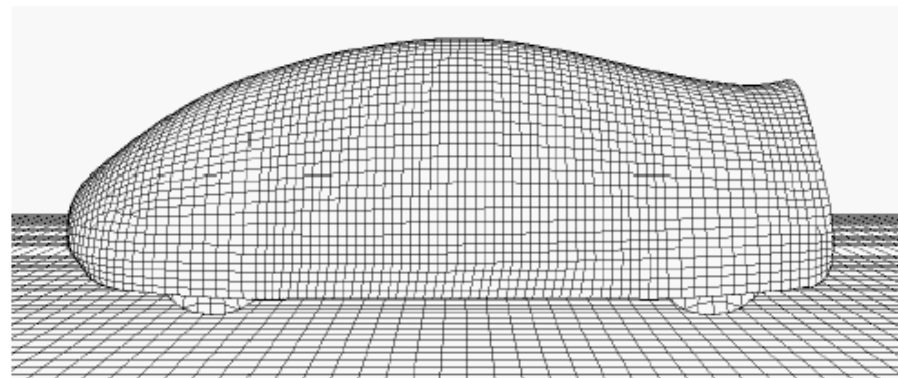
■ Hexa系のメッシュの様子



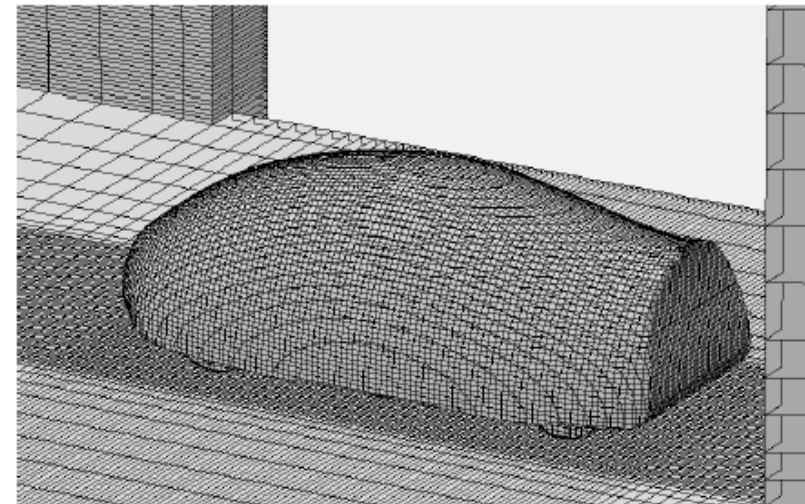
CFD-ACE+



Nagare



Esperanza (サーフェスのみ)



e-flow

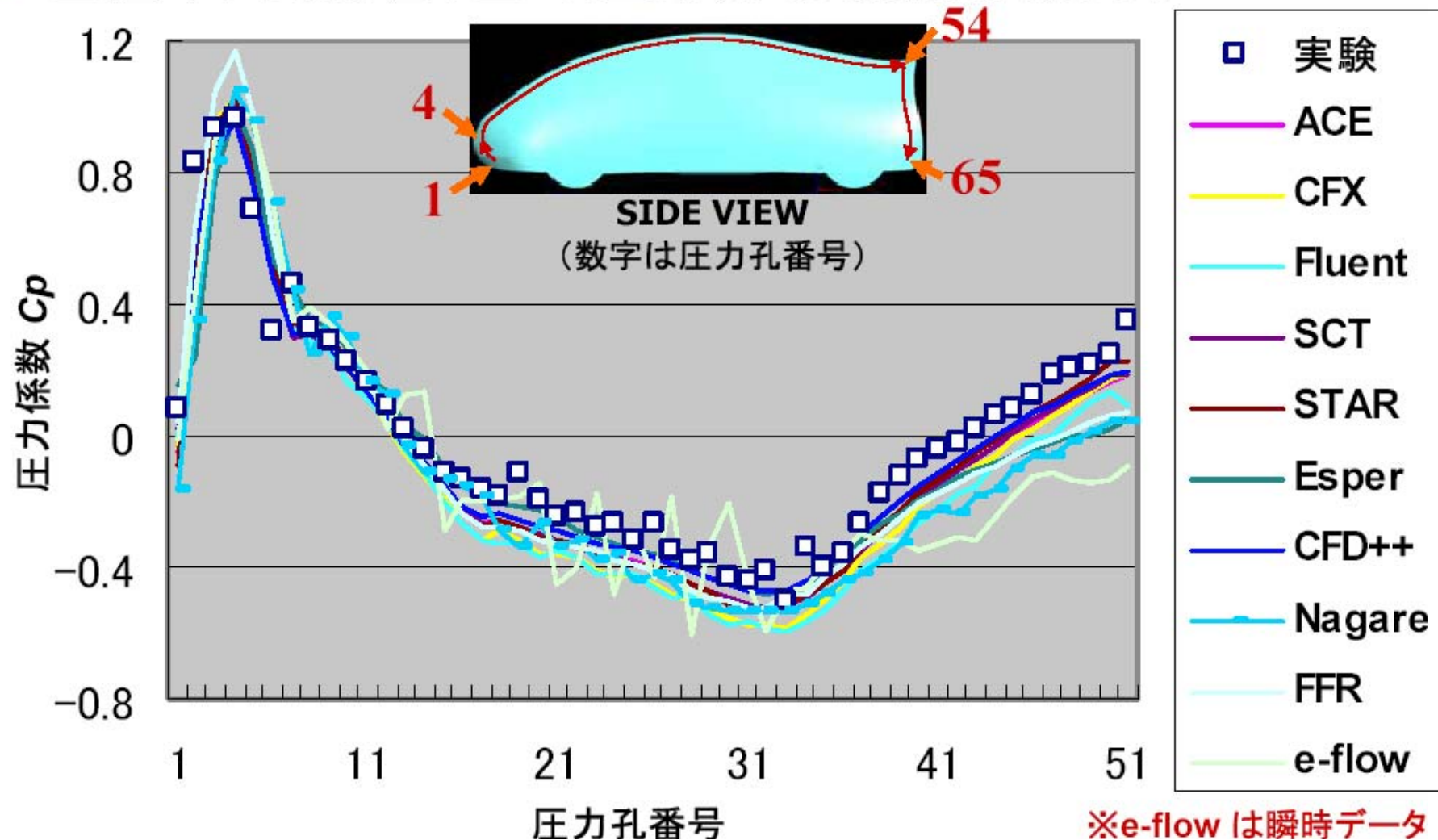
乱流モデル, 離散化スキーム

ソフト	乱流モデル	モデル定数	空間離散化
ACE	RNG k-ε	$C_\mu = 0.085$, $C_{\epsilon 2} = 1.68$, $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 0.7179$	流れ: 2次精度, 乱流: 1次風上
Esper	無し	—	Vortex Method (数値粘性無し)
CFX	SST	$A1=0.31$, Compressible Production=3.0, Production Clip Factor=10.0, $\beta_{star}=0.09$, 等	1次-2次精度 カップリング
Fluent	Realizable k-ε	$C1\epsilon = 1.42$, $C2\epsilon = 1.68$	2次風上
SCT	標準k-ε	$\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C1=1.44$, $C2=1.92$, $C3=0$, $Ct=0.09$, $\sigma_t=0.9$	2次風上 (TVD化)
STAR	Realizable k-ε	$C_\mu=0.09$, $C_{\epsilon 2}=1.9$, $\sigma_\epsilon=1.2$, $\sigma_k=1.0$	2次風上
CFD++	Cubic k-ε	$C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\epsilon 1} = 1.3$, $A_\mu = 0.01$, $A_E = 0.15$	Total Variation Diminishing (TVD)
Nagare	無し	—	多方向差分法 対流項: 3次風上, その他: 2次中心
FFR	標準k-ε	$C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$	対流項: 3次風上, その他: 中心差分
e-flow	DNS	—	ハイブリッド中心差分

- Esperanza, Nagare, e-flow は乱流モデル不要.
また, いずれも非定常計算.
- Esperanza と e-flow は数値粘性も不要

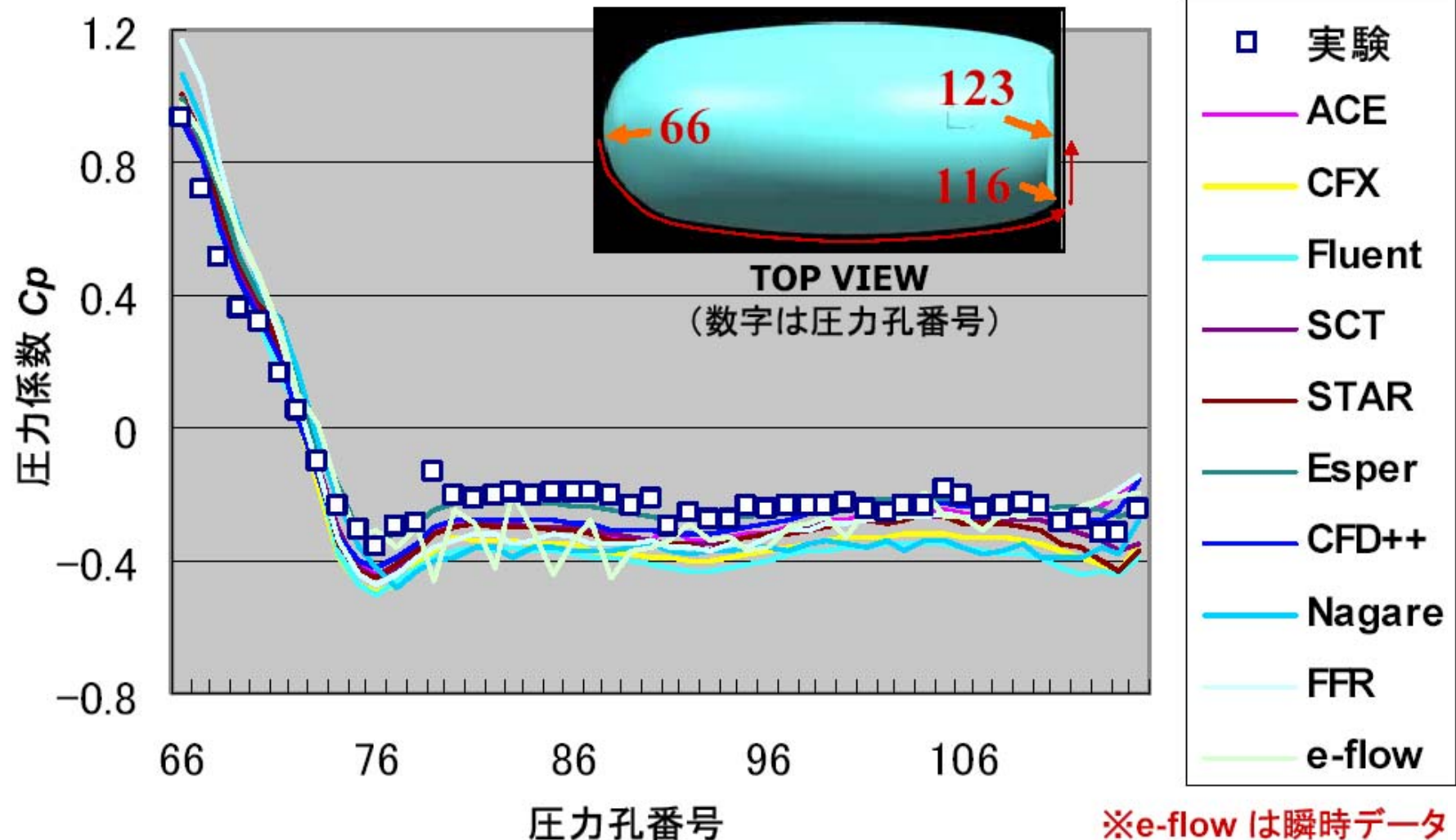
表面圧力(C_p)分布

■ 上面(中央断面)上の圧力分布(偏揺角無し)



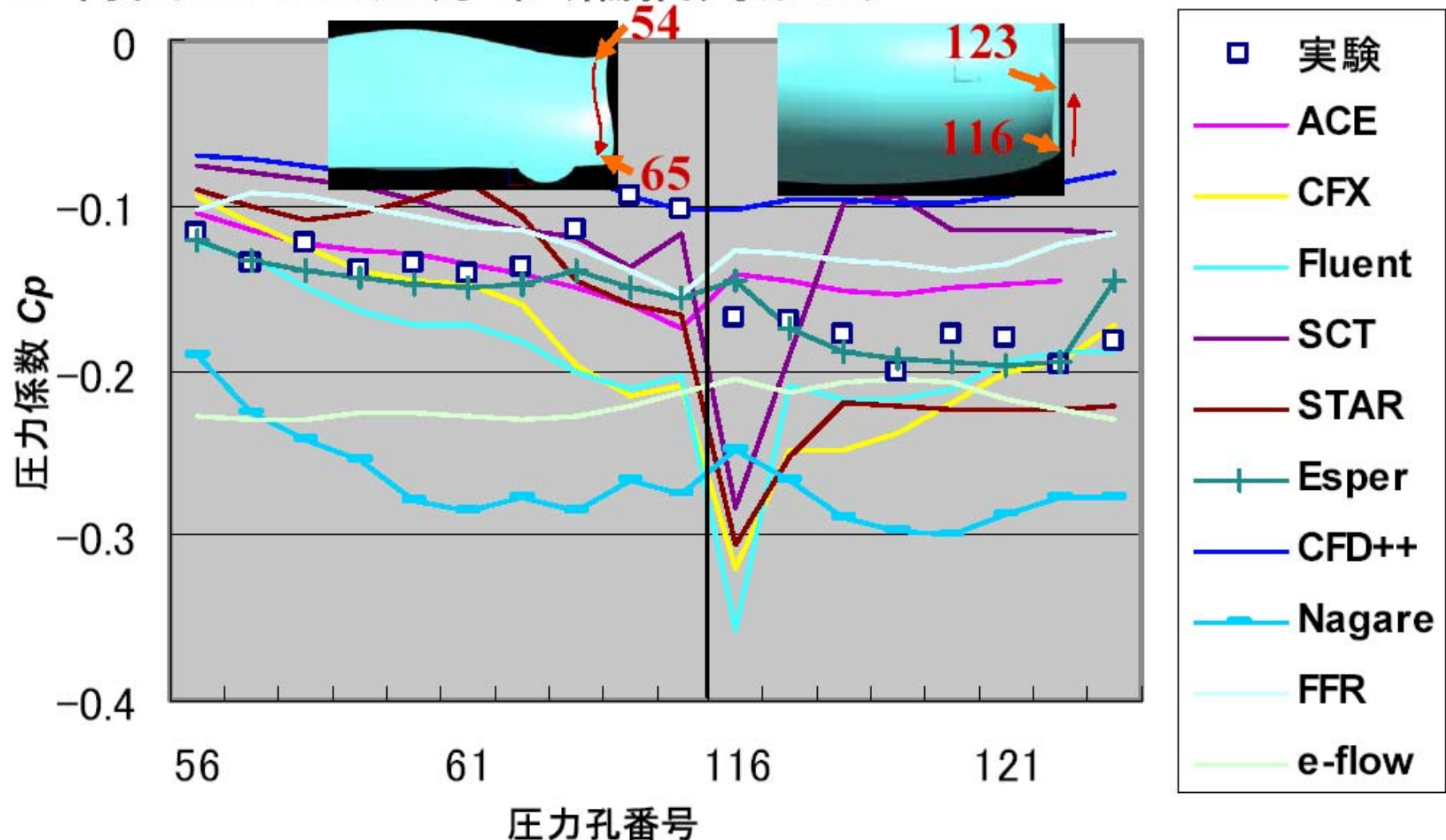
表面圧力(C_p)分布(続き)

■ 側面上の圧力分布(偏揺角無し)



表面圧力(C_p)分布(続き)

■ 背面上の圧力分布(偏揺角無し)



表面圧力(Cp)分布(続き)

- いずれのソフトにおいても、上面と側面の圧力分布については実験と概ね一致しており、大きな差がない。
- 偏揺角無しの場合に、背面センターラインでの下方に向けて(圧力孔63～65番)の圧力上昇を再現できるものはなかった。また、背面のサイド部(同116番)でも実験値との差が大きいものが多い。
- 背面センターの上方から中央部にかけては、良い一致を示すものが幾つか見られる。
- 偏揺角20° の場合は、0° の場合ほど実験との差が見られず、比較的良い一致を示すものが多い。

計算時間

ソフト	要素数 (節点数)	マシン,CPUスペック	CPU 数	計算 時間	総計算時間 /100万要素
ACE	1930万	Opteron model252 / 2.6GHz	16	47.0	39
Esper (非定常)	13,548	Xeon / 2.8GHz	6	72.0	31887
CFX	440万	Itanium2 / 1.3GHz	4	13.0	12
Fluent	183万	Xeon / 3.06GHz	1	36.0	20
SCT	326万	Pentium 4 / 3.2GHz	1	35.0	11
STAR	481万	Cray XD1/ 2.193GHz	12	5.8	14
CFD++	870万	Xeon / 2.4GHz	16	7.0	13
Nagare (非定常)	182万	Pentium 4 / 3.8GHz	1	142.0	78
FFR	248万	Opteron model850 / 2.4GHz	1	155.0	63
e-flow	176万	Pentium 4 / 3.2GHz	1	12.0	7

- 定常計算に関しては、5百万前後のメッシュでも数日で計算可能。
(4CPU程度の並列計算を行えば1日以内)
- Esperanza と Nagare は非定常計算だが、これも並列化により2, 3日での計算が可能になってきた。

WindPerfectの解析精度4

まとめ 自動車技術会ベンチマーク

- ブラインドベンチマークという試みにも関わらず、多くのソフトウェアで比較的良好な結果が得られた.
- メッシュについては、標準メッシュも用意したが、ほとんどのソフトで独自のメッシュが用いられた.
- ボディ上面や側面に関しては、圧力分布や表面流線など、流れ場をよく再現できることがわかった.
- 背面の圧力分布に関しては、特にサイドエッジ、あるいは下端において実験との差が見られた.
- 空力係数、特に C_D 値と C_S 値は、比較的良好な精度で算出された.
- 偏揺角 0° と 20° の相対的な変化量についても、概ね良好な一致が見られ、実験と傾向が逆転するようなことはなかった.

WindPerfectの解析精度5

空調解析での文献との比較

実測値・実験値とWindPerfectの結果はどこまで合うのだろうか。

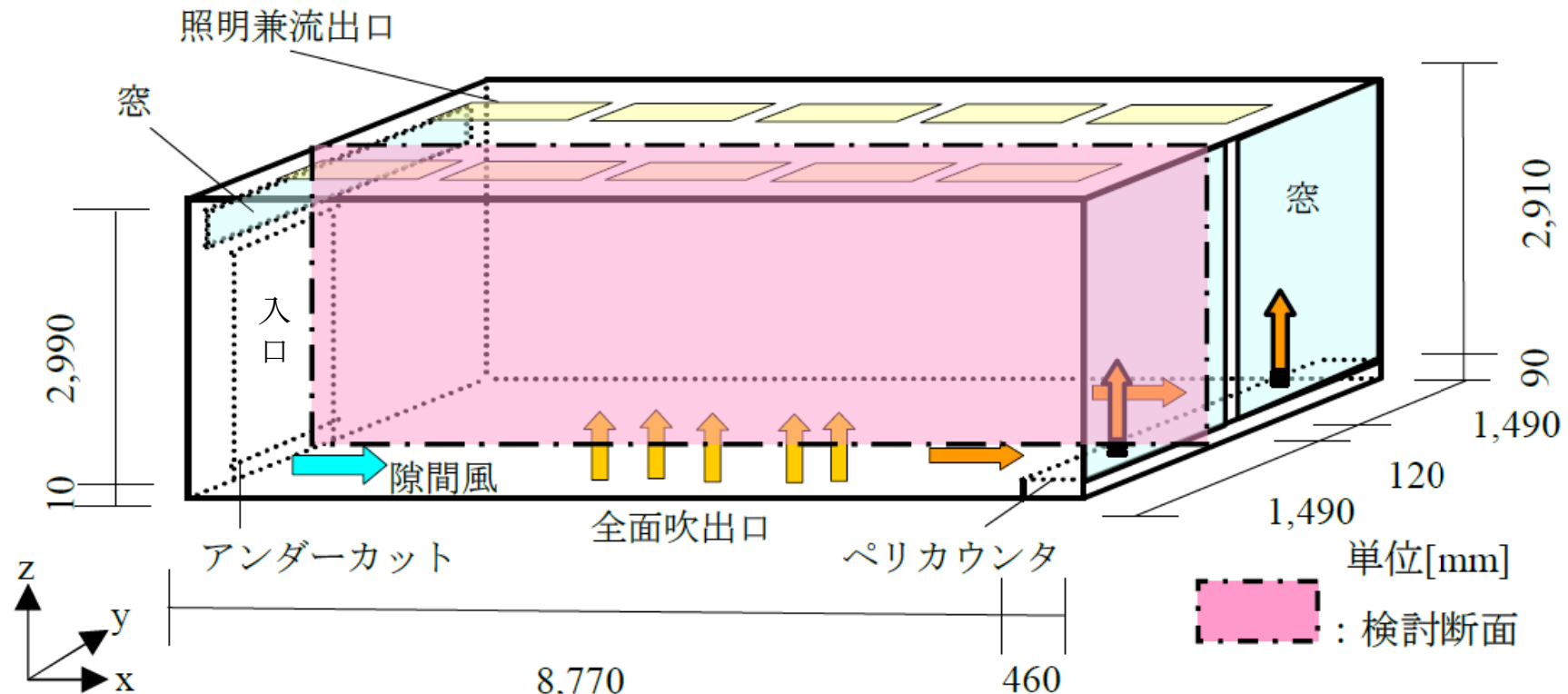
これら比較がなされている論文は少ない。ここでは、実測と数値流体解析の比較がされていて、解析に使用出来る条件を明示している資料を探し、弊社ソフトウェアとの比較を試みた。

比較は先ず、夏季解析を行っている松木らの論文で実施し、次に冬季解析を行っている酒井らの資料のデータを元に実施した。夏季・冬季ともに比較を行ったのは、一般的に気流の性状は季節で大きく異なるからである。

WindPerfectの解析精度5

実測とWindPerfectの比較1—1

講義室空間での夏季空調で、床吹出し・天井吸い込み。
窓辺でエアーフローウィンドウを採用している。



解析対象空間の概要

松木ら,「全面床吹出しとペリメータレス空調を採用した室内の気流温度分布に関する研究(第2報)夏期・冬期測定実験とCFD 解析の比較」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集{2009.9.15 ~17(熊本)}より

実測とWindPerfectの比較1—2

現論文では、各壁面の温度を計測しているので、これを数値流体解析の境界条件とした。

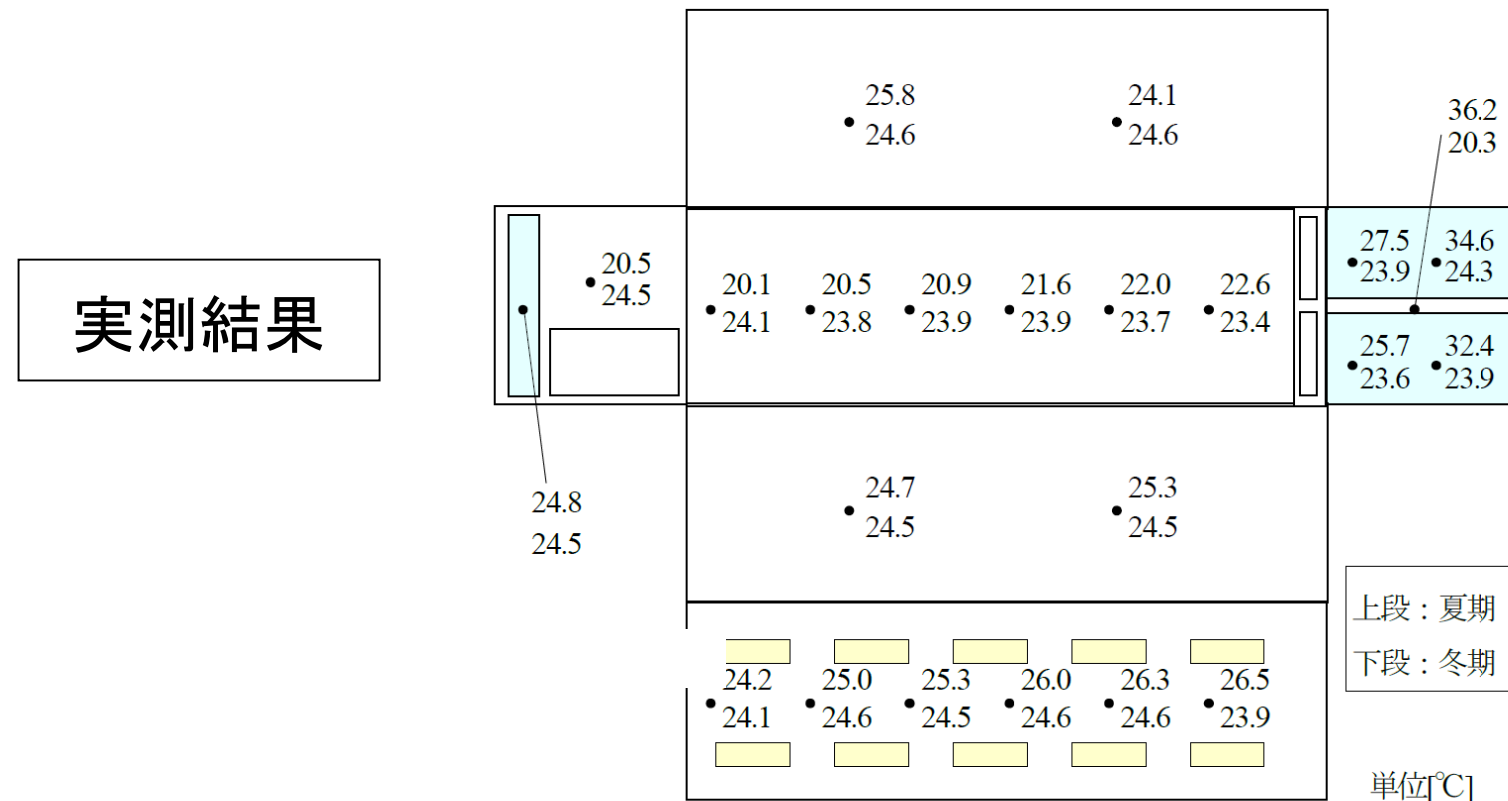
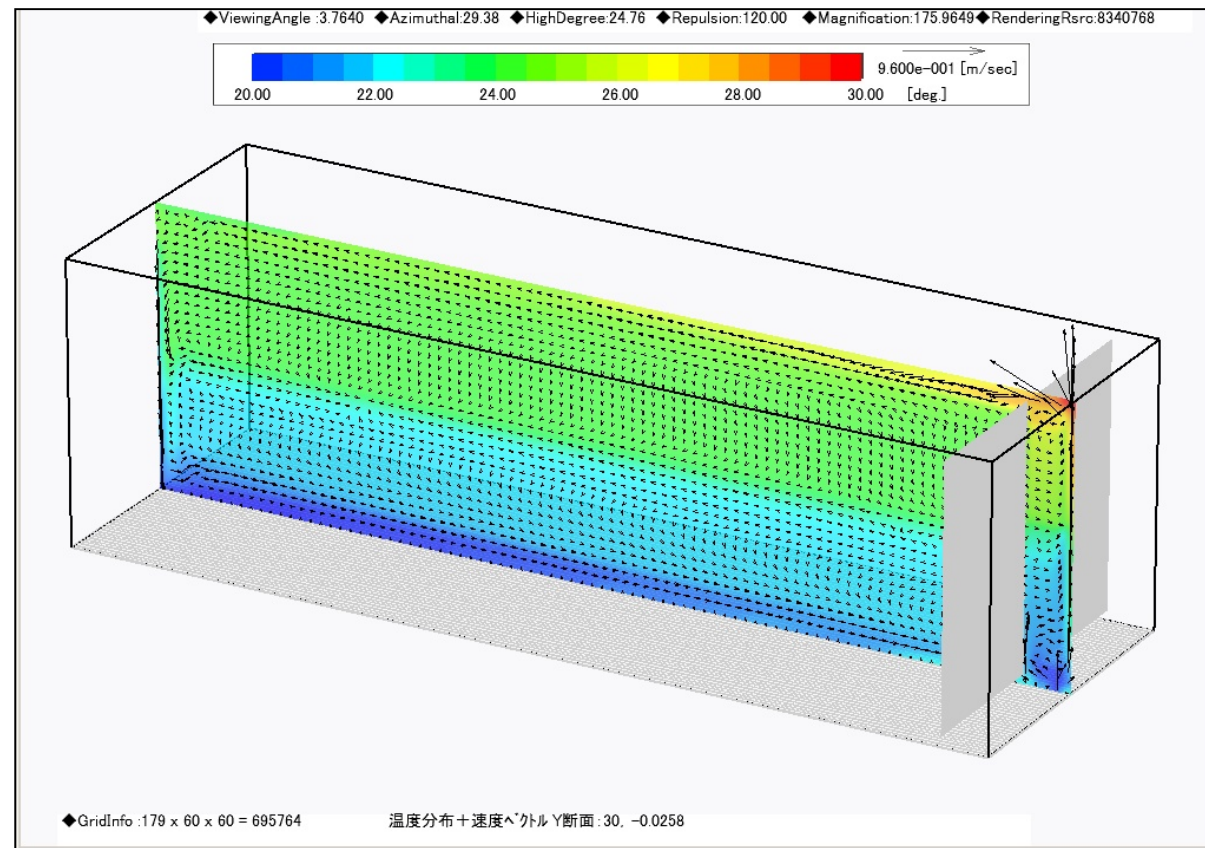


図-2 壁面表面温度 : 照明兼流出口

松木ら,「全面床吹出しとペリメータレス空調を採用した室内の気流温度分布に関する研究(第2報)夏期・冬期測定実験とCFD 解析の比較」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集{2009.9.15 ~17(熊本)}より

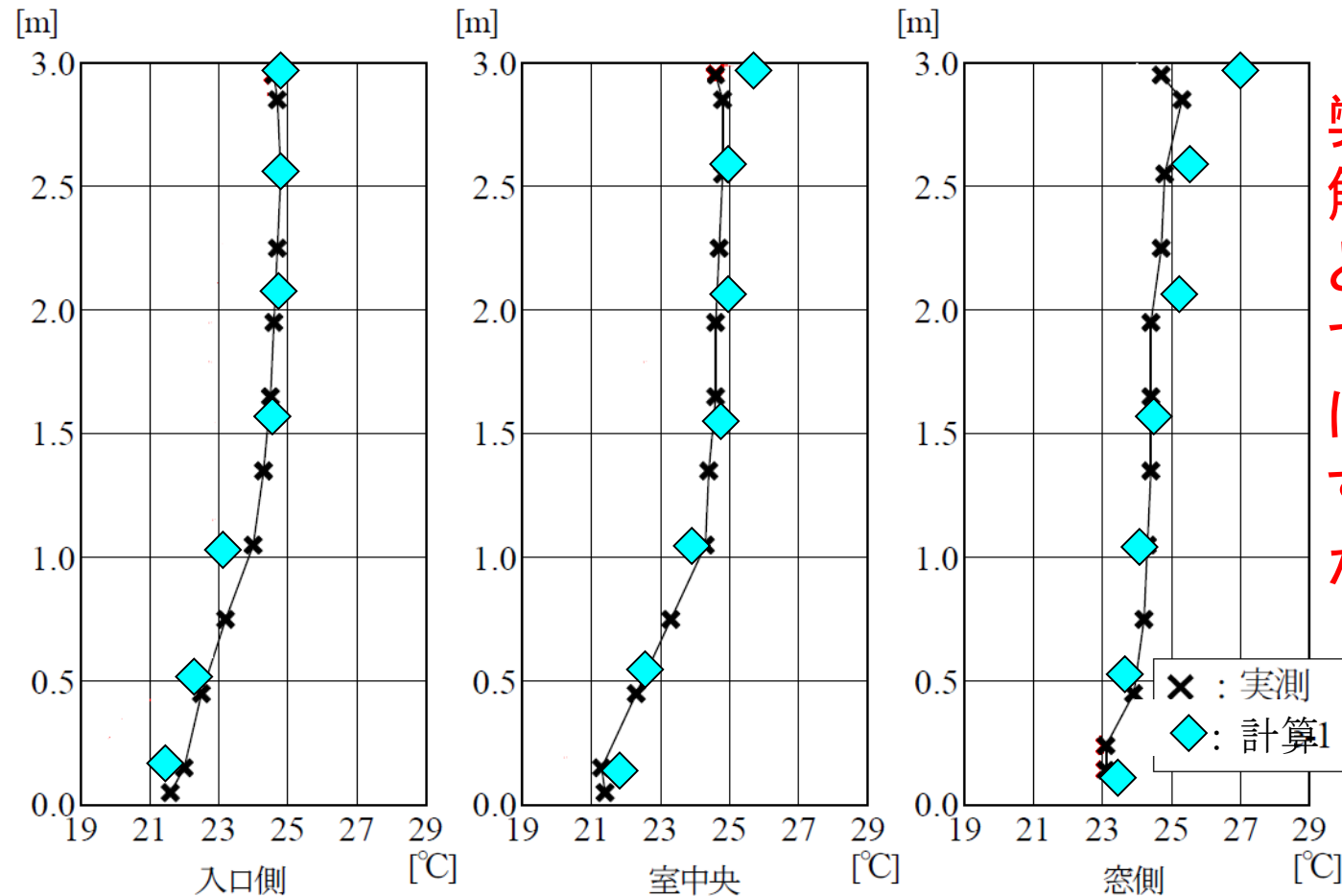
実測とWindPerfectの比較1—3

弊社ソフトウェアWindPerfectDXでのシミュレーション結果色は温度を表し、ベクトルは気流を表す。床から吹き出した冷気が、天井に向かうにつれて昇温する様子が分かる。



WindPerfectDX解析結果（断面温度分布）

実測とWindPerfectの比較1—4



弊社ソフトの
解析結果は、
どの測定箇所
でも実測と非常
に良い一致を
する事が分
かった。

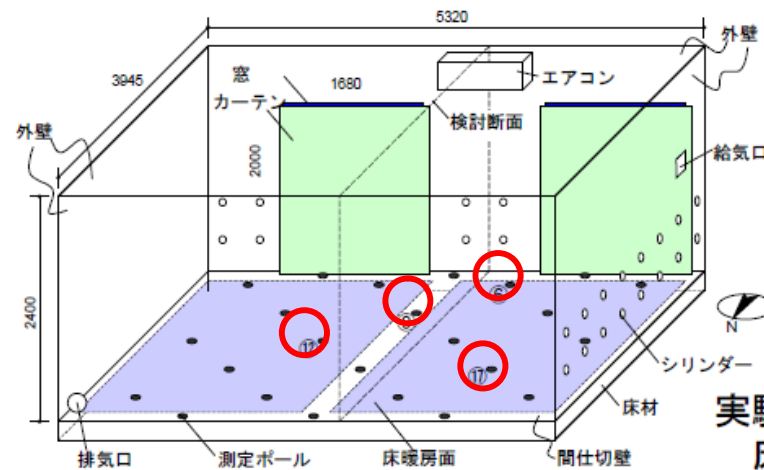
実測結果とWindPerfect解析結果の比較 (鉛直方向温度分布)

松木ら,「全面床吹出しとペリメータレス空調を採用した室内の気流温度分布に関する研究(第2報)夏期・冬期測定実験とCFD 解析の比較」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集{2009.9.15 ~17(熊本)}より

実測とWindPerfectの比較2—1

マンション個室を想定した窓が2つある居住空間. 床暖房とエアコンのいずれかで冬季空調を行う.

計算対象領域



解析対象
空間の概要

○ 測定箇所

模擬居室

床面積 : 20.8m²

室容積 : 50.0m³

Q値 : 2.04W/m²K

換気回数 : 0.5回/h

エアコン : 4kW

床暖房 : 温水式(ガス)

外気温 : 5°C一定

実験

床暖房

PMV=-1, 0, +1 角型給気口(3種)

PMV=0 全熱交換型

PMV=0 スリット型

PMV=0 ミックスフロー

エアコン

PMV=-1, 0, +1 角型給気口(3種)



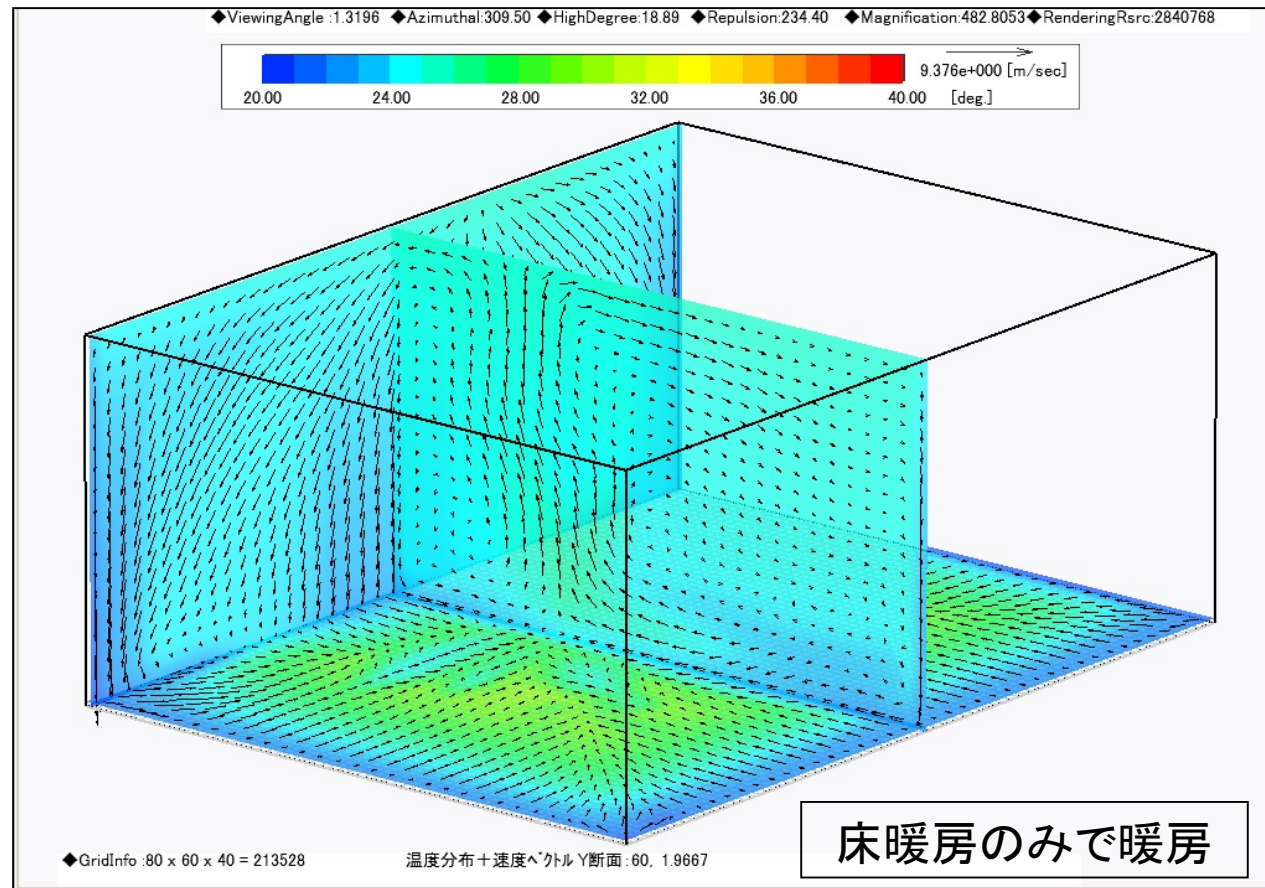
大島, 倉淵, 他: 異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境評価に関する研究(その1~4),

日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2007.8.

酒井孝司, 「CFDによる異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境解析」, 伝熱+熱環境
シミュレーション合同小委員会・合同WG, 熱環境シミュレーション小委員会資料 より

実測とWindPerfectの比較2—2

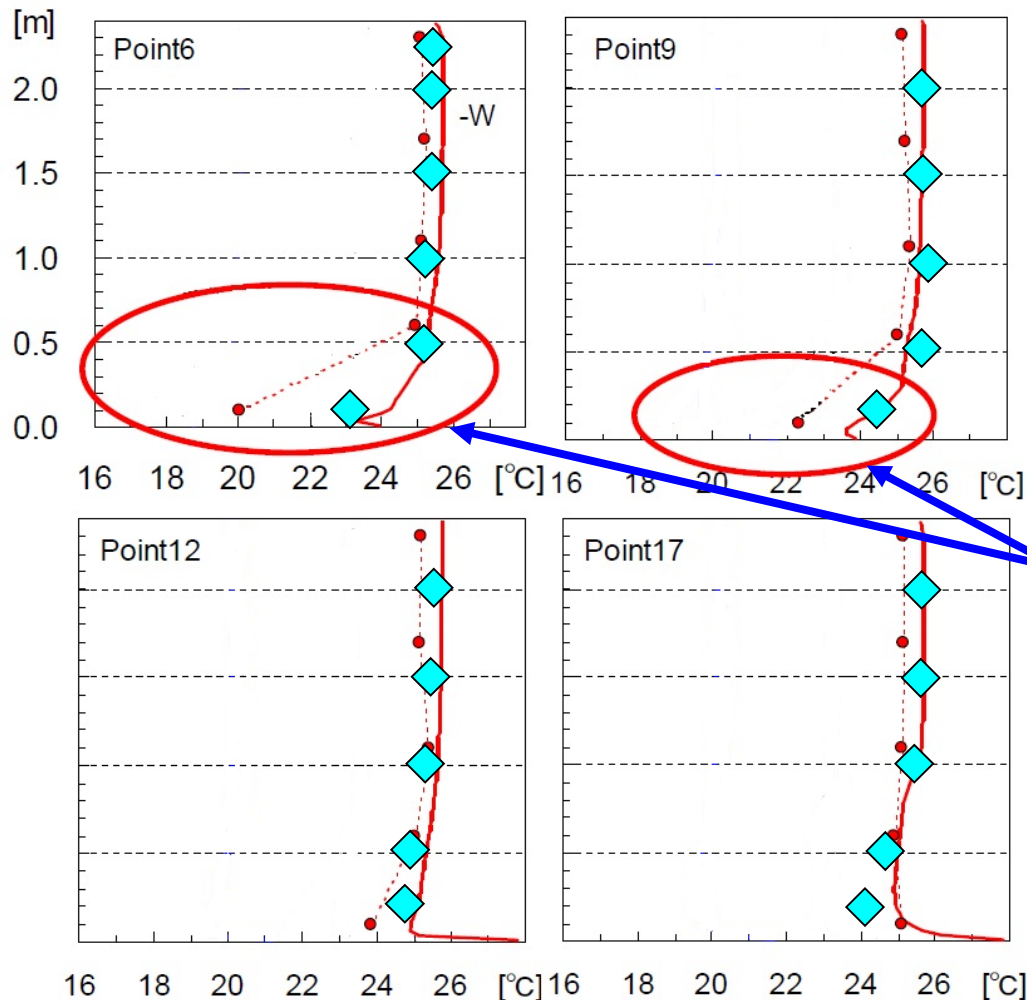
床からの暖気で部屋は温まるが、壁際は壁貫流の影響で寒い。



WindPerfect解析結果（断面温度分布）

酒井孝司,「CFDによる異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境解析」, 伝熱+熱環境シミュレーション合同小委員会・合同WG, 熱環境シミュレーション小委員会資料 より

実測とWindPerfectの比較2—3



床暖房のみ：
弊社ソフト解析は、
原論文よりも実測と
良い一致をする事が
分かった

原論文で実測と解析が
結果で食い違う事を自
ら明示している箇所

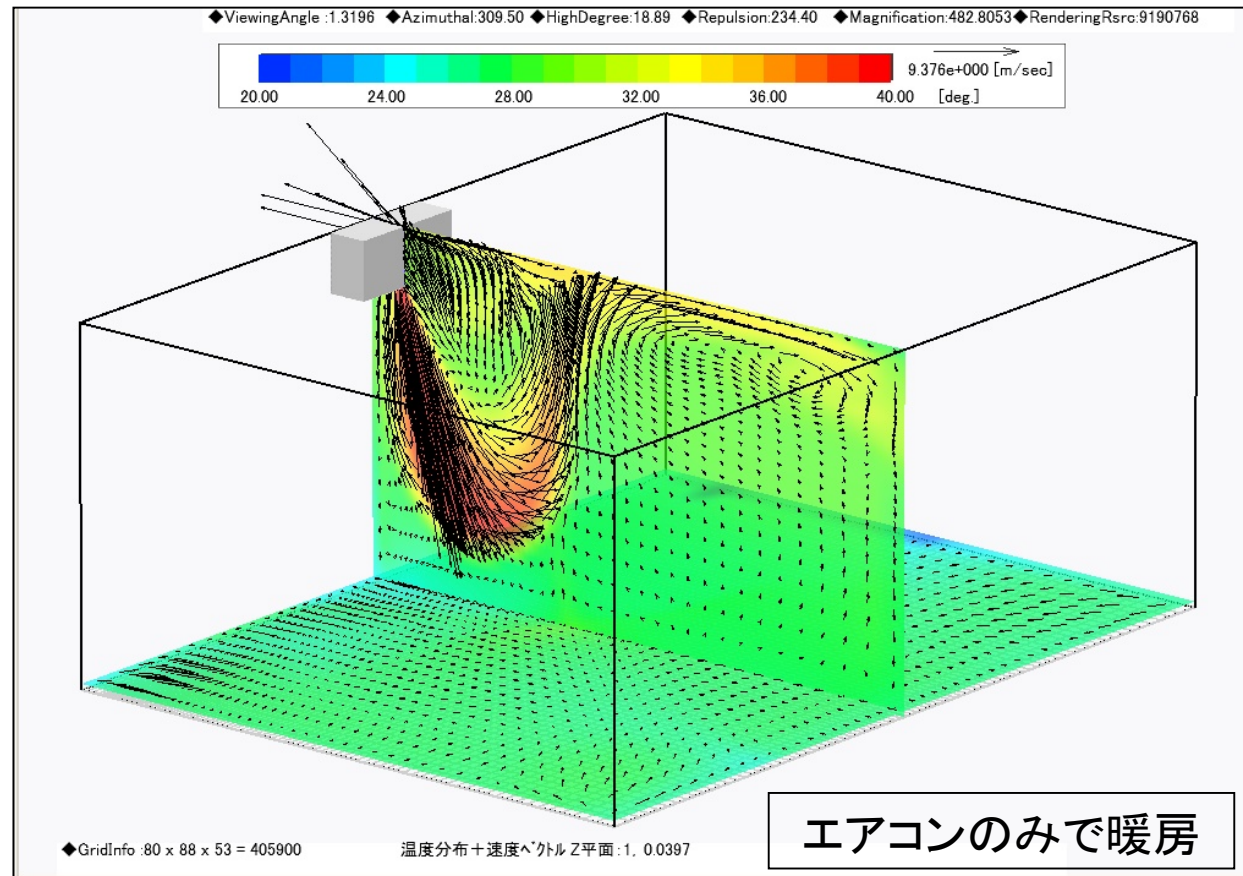
- ・実測：
- ・原論文解析： —
- ・WPDx解析： ◆

実測結果とWindPerfect解析結果の比較 (鉛直方向温度分布)

酒井孝司, 「CFDによる異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境解析」, 伝熱+熱環境
シミュレーション合同小委員会・合同WG, 熱環境シミュレーション小委員会資料 より

実測と数値流体解析の比較2ー4

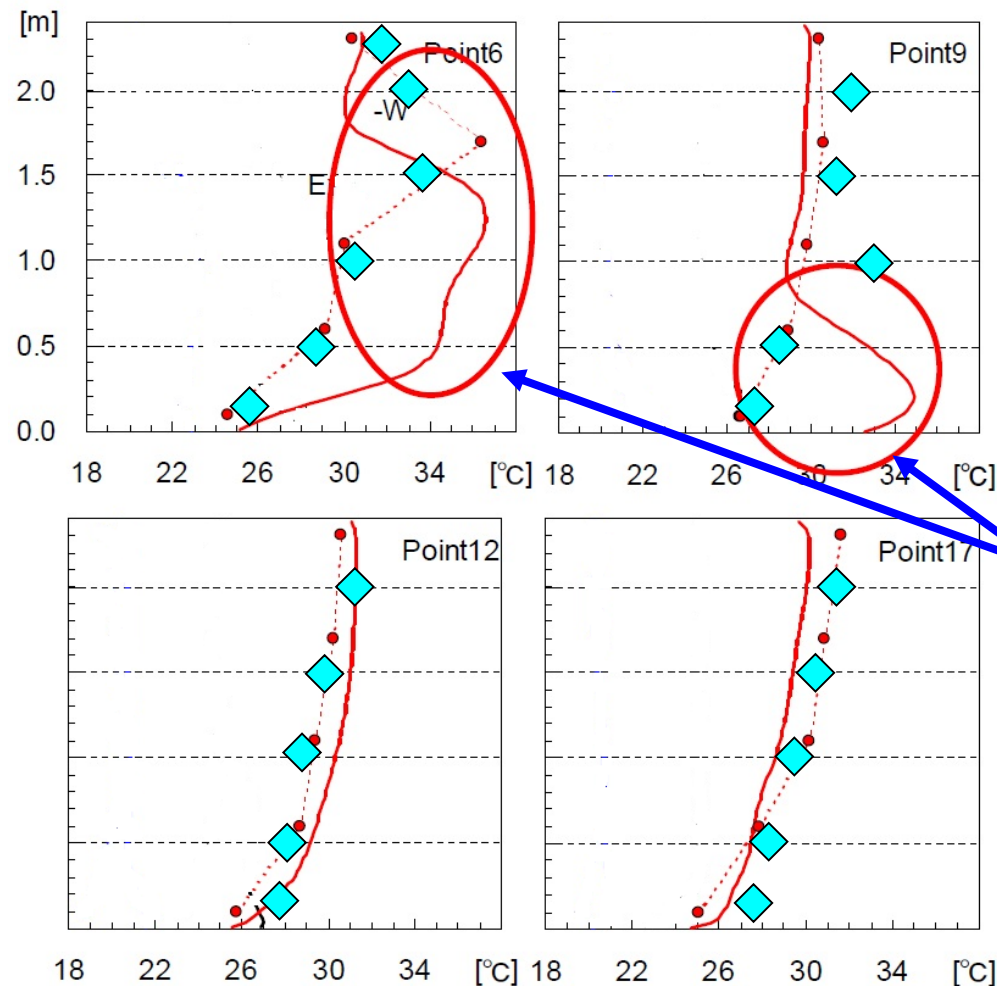
エアコンからの暖気は自らの浮力で、途中で上昇流に転じる。



WindPerfect解析結果結果（断面温度分布）

酒井孝司, 「CFDによる異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境解析」, 伝熱+熱環境シミュレーション合同小委員会・合同WG, 熱環境シミュレーション小委員会資料 より

実測とWindPerfectの比較2—5



本解析でも弊社ソフト解析は、原論文解析よりも実測と良い一致をする事が分かった

実測と解析が結果で食い違う事を原論文で明示している箇所

- ・実測: (dotted line with red dots)
- ・原論文解析: — (solid red line)
- ・WPDx解析: ◆ (cyan diamond)

実測結果とWindPerfect解析結果の比較 (鉛直方向温度分布)

酒井孝司, 「CFDによる異なる暖房方式を採用した居室の温熱環境解析」, 伝熱+熱環境シミュレーション合同小委員会・合同WG, 熱環境シミュレーション小委員会資料 より

WindPerfectの解析精度5

まとめー空調解析での文献との比較

実測値とWindPerfectの空調解析結果の比較を行った。

1. 夏季解析について

弊社ソフトWindPerfectの結果は松木らの実測値と非常に良く一致した。

2. 冬季解析について

弊社ソフトWindPerfectの結果は、酒井らの実測結果と良く一致した。