

空調システムと CFD との連成解析ツールの不具合分析・診断への適用可能性

2008MBB002 伊東由衣

白石研究室

In general, the influence of the control setting of HVAC and the fluctuation of indoor heat load due to the residents is large. Especially, the analysis and diagnosis in consideration of both sides of air-conditioning and indoor environment become important in the office building. In this research, the coupled simulation tool of HVAC system simulation and CFD analysis was proposed and the case study based on steady state simulation supposing the generation of fault was performed for an office building. The following results were obtained: 1) The analysis values using this simulation tool were in agreement with the experiment values. 2) The influence of fault factors to the indoor thermal environment was large, and the importance of this tool in consideration of both HVAC system and the indoor environment was shown. 3) According to the result of case study based on simulation supposing the fault, the feasibility of fault analysis and diagnosis utilizing this simulator was shown by classifying the influence which fault factors has on HVAC system and indoor environment.

HVACSIM+(J), CFD 解析, 連成解析, 不具合, 分析・診断

1. はじめに

空調設備においては、設計時に意図された性能を運用段階において確実に発揮させることが重要となる。一般に、運用・設計段階における設定ミスや不具合、居住者による室利用形態の変動が空調エネルギー消費量や室内温熱・空気環境に与える影響は大きく、特に、空調ゾーン毎に制御方法が異なる事務所ビルなどの空間においては、性能検証のために必須となる空調設備の挙動を詳細にかつ定量的に把握することは難しく、労力もかかるのが現状である。本研究では、事務所ビルを対象とし、設計段階から運用段階において省エネ性能評価が可能な空調システムシミュレーション(HVACSIM+(J))と、室内温熱・空気環境を詳細に再現できる CFD との連成解析による”空調性能シミュレータ”^{文1)}を提案し、同シミュレータの有効性及び設計段階における不具合分析・診断への適用可能性について検討することを目的としている。有効性の検証においては、事務所ビルを模擬した試験室を対象として実験値と解析値を比較することにより予測精度の検証を行う。同シミュレータの不具合分析・診断への適用可能性においては、同試験室を対象に、定常解析時における設計・運用段階における不具合を想定したケーススタディを行い、ケース間比較及び不具合要因における空調機側及び室内温熱環境へ与える影響についての分析・診断を試みる。

2. 解析概要

2.1 解析対象

図1に解析対象空調システムを示す。解析は事務所ビルを模擬した空調性能試験室^{文2)}を対象とし、PZとIZでそれぞれ別々の空調方式を採用している。AHUでは、室温センサにおけるVAV制御及びファン出口温度でのVWV制御による冷房、FCUでは室温センサにおけるVWV制御により暖房を行っている。室温センサにおいては、インテリア北側壁面とペリメータ東側壁面の高さ1.2mにそれぞれ設置している。

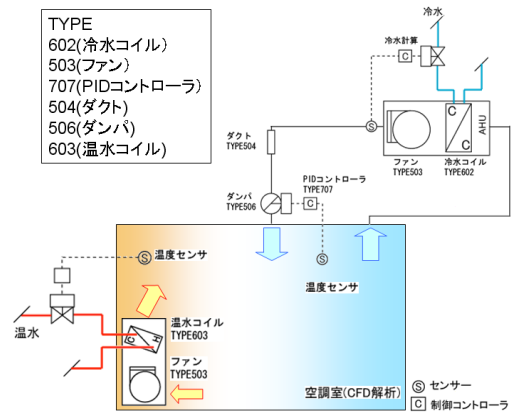


図1 解析対象空調システム

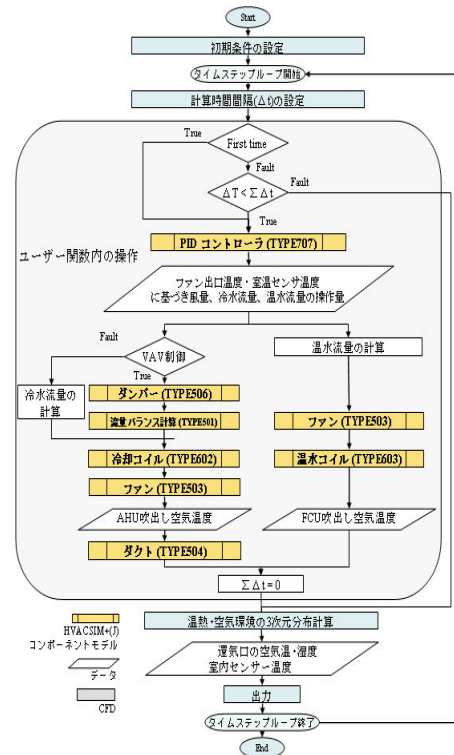


図2 連成解析の概要

2.2 連成解析の概要

図 2 に連成解析の概要を示す。本研究では、HVACSIM+(J)においてサブルーチンとして定義されている“TYPE”の中から AHU モデルとして、冷却コイル (TYPE602)、ダンパ (TYPE506)、ダクト (TYPE504)、ファン (TYPE503)、流量バランス (TYPE501)、FCU モデルとしてファン (TYPE503)、温水コイル (TYPE603) をユーザー関数を用いて CFD 解析コードに組み込んでいる^{注1)}。

3. 解析条件

CFD 解析条件及び空調システムの設定条件を表-1、表-2 にそれぞれ示す。AHU, FCU 共に熱源側の解析は行わず、AHU 冷水入口温度及び FCU 温水入口温度には実験値をそれぞれ固定値として与えた。

4. 予測精度の検証

表-3 に定常時における実験結果及び本シミュレータにおける連成解析結果を示す。尚、CFD 解析のみ及び HVACSIM+(J) の空調機単体の予測精度は既に確認しており、いずれの結果も実験値に近い値を示していた (図省略)。結果を比較すると、解析値の AHU 風量は実験値よりも小さな値となっていた。これは、実験では、室温センサは北側壁面のすぐ近くにあり、壁面からの放射の影響で IZ の空調設定室温である 22°C よりも高い値となっているためと推察される。しかし、AHU 風量の誤差は 3% 程度であり、許容範囲であると言える。また、実験値に比べ、ファンの出口空気温度が低くなっており、それに伴い冷水コイルの冷水流量も小さくなっている。原因として、解析ではファンなどの機器発熱を考慮していないため、ファンの出口空気温度が小さくなったと考えられる。これらの誤差により、解析値では、コイルの顕熱負荷が実験値と比較して大きくなった。以上より、本シミュレータにおいて、ファンの出口空気温度などの改善点はあるものの、PZ, IZ における室温センサやファン出口温度に対応した VAV, VWV 制御を概ね再現できており、連成解析による予測精度の高さを確認した。

5. 不具合時におけるケーススタディ (定常解析)

5.1 解析条件・解析ケース

図 3 に不具合検討項目、表-4、表-5 に設定条件及び解析ケースを示す。設定条件に関しては、予測精度の検証に用いた解析モデルに、発湿条件及び換気口設置による外気導入に関する条件を付加している。解析項目は、運用段階・設計段階における不具合を想定し、運用段階においては、機器の劣化・設定等による不具合 5 要因 (PZ, IZ ダンパ全閉、冷水・温水入口温度、吹出し温度) と人為的な不具合を想定した 4 要因 (PZ, IZ 設定温度、パーティション、内部負荷偏在)、設計段階における不具合としては 4 要因 (PZ, IZ センサ位置、外気導入量、換気口設置位置)、更に、室内に影響を与える要因 (外気温度) を抽出した。上記 14 要因を 2 水準において実験計画法^{L₃₂} (2³¹) に基づき全 32 ケースで行った (外気温度 5°C の解析ケースは省略)。尚、case15 は、不具合のない標準ケースとする。

表-1 CFD 解析条件

メッシュ数	439, 236 (111×83×49)メッシュ	
乱流モデル	LK モデル ^{文3)}	
吹出口	AHU	$k_{in} = (U_{in}/10)^2$ ^{文4)} $\epsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2} / \rho_{in}$ ^{文4)}
	FCU	$k_{in} = 3/2 (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / \rho_{in}$,
吸込口	自由流入出条件	
外気温度	7.0°C	
隣室温度	22.2°C~24.16°C	
内部発熱	照明	128W×15
	発熱体	100W×20

(U_m : 吹き出し風速[m/s], k_m : 吹き出し風の乱流エネルギー[m²/s²], ϵ_m : k_m の散逸率[m²/s³], C_{μ} : モデル定数(=0.09))

表-2 空調システムの設定条件

AHU	制御方式	VAV 制御方式
	室温設定温度 [°C]	22
	吹出し設定温度 [°C]	16
	AHU 最大風量 [m ³ /h]	1700
	冷水最大流量 [ℓ/min]	28
	冷水温度 [°C]	6
FCU	制御方式	VWV 制御方式
	室温設定温度 [°C]	24
	温水最大流量 [ℓ/min]	30
	温水温度 [°C]	44.25

表-3 定常時を対象とした連成解析結果

		実験値	解析値
A H U	AHU 風量 [m ³ /h]	1569.0	1518.37
	冷水流量 [ℓ/min]	10.02	8.32
	室温センサ温度 (IZ) [°C]	23.43	22.46
	吸込口温度 [°C]	22.85	23.08
	冷水コイル出口空気温度 [°C]	14.70	14.59
	冷水コイル入口水温 [°C]	6.00	6.00
	冷水コイル出口水温 [°C]	14.14	15.17
	ファン出口温度 [°C]	16.00	15.00
	ダクト出口温度 [°C]	16.45	15.09
	コイル顕熱負荷 [kW]	4.68	5.19
F C U	温水流量 [ℓ/min]	13.30	14.05
	室温センサ温度 (PZ) [°C]	23.42	23.39
	FCU 吸込み温度 [°C]	22.20	21.44
	温水コイル出口空気温度 [°C]	32.83	33.47
	温水コイル出口水温 [°C]	42.11	42.64
ミキシング量 [W]		1392.0	1432.3

表-4 設定条件

発湿量 [g/h 人]	160
AHU 外気導入量 [m ³ /h 人]	20
CO2 発生量 [ℓ/h 人]	20
外気相対湿度 [%]	50

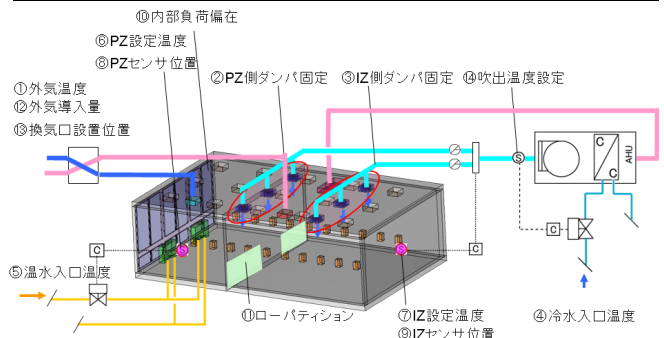


図 3 不具合検討項目

表-5 定常時における不具合解析ケース

ケース	外気温度	ダンパ 固定(PZ)	ダンパ 固定(IZ)	冷水温度	温水温度	設定室温 (PZ)	設定室温 (IZ)	センサ位置 (PZ)	センサ位置 (IZ)	内部負荷	パーテー ション	外気 導入量	換気口 位置	吹出し 温度			
Case1	7℃	全閉	全閉	12	45	22	24	壁	吸込口	PZ	なし	400	PZ-IZ	16			
Case2								壁	壁	標準	ローパ						
Case3								壁	吸込口	PZ	なし						
Case4								壁	壁	標準	ローパ						
Case5				標準	標準	12	45	24	22	壁	吸込口	標準	ローパ				
Case6										壁	壁	標準	なし				
Case7										壁	吸込口	標準	ローパ				
Case8										壁	壁	PZ	なし				
Case9		標準	全閉	7	35	22	24	壁	壁	標準	ローパ						
Case10								壁	吸込口	標準	なし						
Case11								壁	壁	PZ	ローパ						
Case12								壁	吸込口	標準	なし						
Case13								標準	標準	12	35	24	24	壁	壁	標準	なし
Case14														壁	壁	標準	なし
Case15														壁	吸込口	PZ	ローパ
Case16														壁	壁	標準	なし

5.2 連成解析結果

5.2.1 室内側の解析結果(CFD)

室内側の解析結果として、図4、図5にCase5、Case15(標準ケース)における温度場、図6に各ケースにおけるミキシング量の算出結果を示す。標準ケースであるCase15は、比較的均一な温度場であるのに対し、Case5ではPZダンパ全閉の影響により、IZ側AHU吹出の影響が大きい。また、PZ側では、ローパーティションの影響でPZ側下部の温度が低下し、一方上部では、FCUからの吹出風の影響が顕著になっている。そのため、Case5では、ミキシングが促進される結果となっている(図6)。ミキシング量においては、換気口の影響が大きく、PZに吹出口、IZに吸込口を設置した場合はAHU冷房負荷及びFCU暖房負荷を増大させるミキシングロス、逆の場合には、冷房負荷及び暖房負荷を減少させるミキシングゲインとなった。これらは、換気口からの吹出風の誘引効果によるものと考えられる。ケース間比較をすると、PZ側ダンパが全閉のケース(Case5~8)及びゾーン間の天井付近の温度差が1.0℃以上のケース(Case5、Case6、Case12、Case16)においてミキシングロスが増大し、ミキシングゲインが減少した。不具合によるゾーン毎の温度場・流れ場の変化がミキシング量に与える影響は大きい。温度場やミキシング量は空調機側のみの解析では評価できない項目であり、室内側も詳細に解析できる同シミュレータの有効性が確認できた。

5.2.2 空調機側の解析結果

空調機側の制御動作の結果として、AHU風量とIZセンサ温度の結果を図7に示す。両ダンパ全閉(Case1~4)の影響が顕著に現れている。また、IZ設定温度22℃かつ吹出温度20℃のケース(Case5、Case10、Case16)は、室温制御ができず、AHU最大風量まで達している。一方、IZ設定温度24℃のケース(Case7、Case8、Case11~14)でAHU風量が小さくなっている。また、IZセンサ位置においては、設置位置による大きな変化は見られない。更に、片側全閉(Case5~12)と標準動作(Case13~16)の場合を比較したところ、風量に大きな差は見られなかった。これは、標準動作側のダンパが全閉不具合ダンパの風量を補うためである。これらの結果より、不具合時においても室温センサに対応したVAV制御が再現できていることが確認できた。

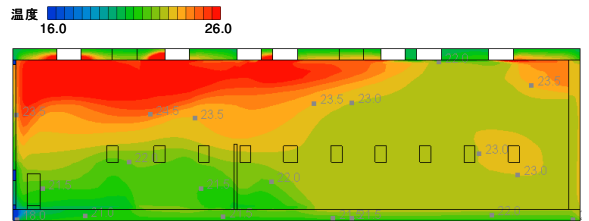


図4 Case5 温度場(Y=3.0m)

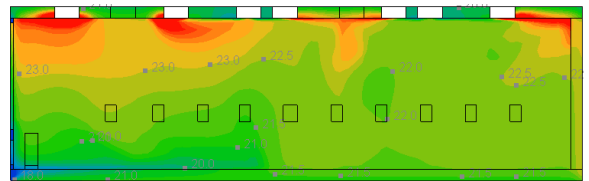


図5 Case15(標準ケース)温度場(Y=3.0m)

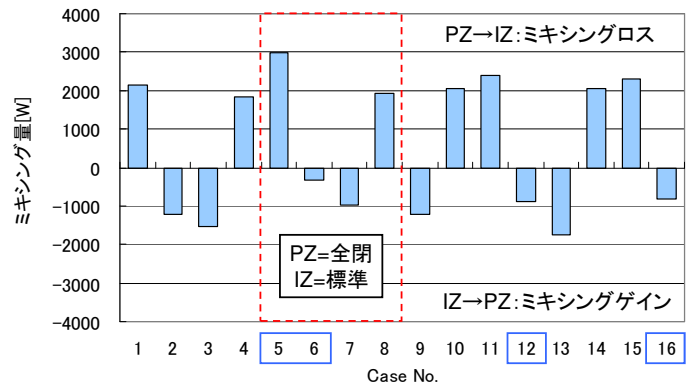


図6 ミキシング量算出結果

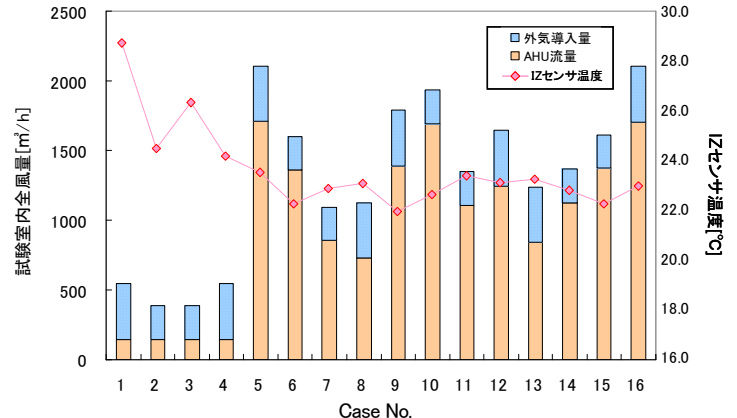


図7 AHU 風量-IZ センサ温度

5.2.3 不具合要因の影響分析^{*)}

重回帰分析による各不具合要因の AHU(冷水系,空気系,熱負荷)、FCU(温水系,空気系,熱負荷)及び室内側(吸込温度,設定値差,ミキシング量)に及ぼす影響を表-6に示す。重回帰分析の結果、偏回帰係数が1%有意なものを抽出し、偏相関の一番大きい要因を最重要要因、0.9以上の要因を重要要因、0.7以上0.9未満の要因を検討要因と位置付けた。尚、重相関係数は0.9以上と高い相関が得られた。重回帰分析による結果より、AHUに影響を与えている要因は、主にAHUの制御系に関する不具合要因(ダンパ全閉、冷水入口温度、吹出温度、IZ設定室温)であり、FCUに影響を与えている要因は、FCUの制御系に関する要因(温水入口温度、PZ設定室温、PZセンサ位置)である。また、室内においては、温度場・流れ場に大きな影響を及ぼす要因が挙げられる。交互作用^{注2)}においては、全ての物理量に対し、影響を及ぼしている結果となった。これは、両ダンパ全閉の影響が全ての物理量に対して顕著に現れるからである。以上より、重回帰分析の結果、不具合要因が各物理量に及ぼす影響の傾向を把握し、不具合要因と関係性の強いものへの影響が大きいことが確認できた。

5.2.4 不具合要因の影響診断

不具合要因が物理量に対する影響を詳細に把握するため、影響診断を行った。まず、不具合要因が各物理量に及ぼしていると想定される症状をケーススタディの結果より抽出した。次に、重回帰分析から得られた結果より、各不具合要因の及ぼす影響を照合し、プロットすることで表にまとめた(表-7)。例えば、PZセンサ温度が設定値より1.0°Cより低い場合、PZ設定室温やPZセンサ位置ミス、AHU吹出温度による可能性が高いことが分かる。今回のケーススタディにおいては、主に、ダンパ全閉による不具合と設定室温の不具合が与える影響が大きく、ローパーティション設置、PZ側内部負荷減少、外気温度の要因の影響が小さい結果となった。しかし、ローパーティションにおいてはCFD解析による温度場の結果からPZ側下部の温度低下に寄与していた。その他2つの要因においては、水準による差が小さかったこともあり、不具合要因として顕在化しなかった。このことから、CFD解析結果との比較も行いながら、不具合診断を行うことが重要である。また、ミキシングロスを増大させる要因である天井付近の温度差の結果を見ると、温水温度低下の不具合が顕在化している。しかし、ミキシングロスの減少に寄与することが分かる。このことから、設定値の見直しにより、標準ケースでのミキシング量を減らせる可能性もある。以上の結果より、不具合要因が各物理量に及ぼす影響について詳細に把握した。実際は、診断結果と試運転時に測定した物理量の差異を検討し、不具合が生じていないかの確認を行うことで空調不具合検知にかかる時間と労力を削減することが可能となる。

6.まとめ

- 1) 空調システムとCFDとの連成解析による”空調性能シミュレータ”を提案した。

表-6 不具合の影響分析結果

		外気温度	PZダンパ	IZダンパ	交互作用	冷水温度	温水温度	PZ設定室温	IZ設定室温	PZセンサ位置	IZセンサ位置	内部負荷	パーティション	外気導入量	換気口位置	吹出温度			
AHU	冷水系	冷水流量	○	△	○	◎			○								○		
		冷水出口温度	○	○	○				○		△							◎	
	空気系	風量	◎	○	○	○			○	△	○			△				△	
FCU	温水系	吹出温度	△	○	△										△			◎	
		全熱負荷	◎	○	○		△		○									○	
	空気系	温水流量	△	△	○				△	◎				△	○			△	
室内	温水系	温水出口温度	△	○	○		○	◎	△	△			△	△	△			△	
		吹出温度	△	○	○		◎		○									△	
	空気系	全熱負荷	○	△	○		◎	○	△	○			△	△	○			△	
	室内	吸込み温度	◎	○	○							△							○
		設定-PZ温度	○	△	○			△	◎	△		△							○
		設定-IZ温度	○	○	○			△	◎			△							○
		設定-PZセンサ	△	△	○			△	◎			△							△
設定-IZセンサ		○	○	○			△	◎		○	○	○	○	△				△	
ミキシング量			△	○		△		△									◎		

◎最重要要因 ○重要要因 △検討要因

表-7 不具合の影響診断結果

		外気温度	両ダンパ全閉	PZダンパ	IZダンパ	冷水温度	温水温度	PZ設定室温	IZ設定室温	PZセンサ	IZセンサ	内部負荷	パーティション	外気導入量	換気口位置	吹出温度	不具合要因			
																	設定値より1.0°C以上高い	設定値より1.0°C以上低い		
PZ	PZ温度	設定値より1.0°C以上高い																		
		設定値より1.0°C以上低い																		
	PZセンサ	設定値より1.0°C以上高い																		
		設定値より1.0°C以上低い																		
FCU	温水流量最大																			
	温水流量最少																			
IZ	IZ温度	設定値より1.0°C以上高い																		
		設定値より1.0°C以上低い																		
	IZセンサ	設定値より1.0°C以上高い																		
		設定値より1.0°C以上低い																		
	AHU	冷水流量最小																		
		冷水流量標準ケースの0.5倍以下																		
冷水流量標準ケースの1.5倍以上																				
給気温度が設定値より1.5°C以上高い																				
室内	給気温度が設定値より1.5°C以上低い																			
	AHU最大風量																			
室内	吸込温度	設定値より1.0°C以上高い																		
		設定値より1.0°C以上低い																		
	ミキシング量	ミキシングロス増加																		
		ミキシングロス減少																		
温度差	天井付近のゾーンの温度差0.5°C未満																			
	天井付近のゾーンの温度差1.0°C以上																			

■不具合による影響

- 2) 予測精度の検証を行った結果、実験値と解析値は概ね一致し、同シミュレータの有効性を確認した。
- 3) 不具合を想定したケーススタディより、空調機及び室内側を詳細に再現でき、不具合分析への有効性を確認した。
- 4) 不具合分析・診断の結果、各不具合要因は、関係の強い制御系への影響が大きく、室内側は温度場・流れ場が変化する要因の影響が大きい。
- 5) 空調性能シミュレータを用い、不具合要因が及ぼす影響を確認し、不具合分析・診断への適用可能性を示した。

【注釈】

注1) AHU及びFCUのバルブはシミュレーションの中で再現しておらず、PIDコントローラの出力値である操作量[°C]を冷・温水流量の最大値、最小値を考慮して比例換算している。注2) ここでいう、交互作用は両ダンパが同じ動作を行った場合と、片側のみ全閉の場合によるものである。

【参考文献】

文1) 飯田ら, 事務所ビルのペリメータとインテリアゾーンの空調システムの制御と診断に関する研究 : (その9) 空調システムとCFDとの連成解析による非定常的な挙動の再現, 日本建築学会研究報告 九州支部, 2, 環境系 48) pp. 409-412 20090301 文2) 相楽ら, 北九州市立大学の空調性能試験装置の概要, 学術講演梗概集, 計画系, pp1209-1210, 2002.0630 文3) Kato M. and Launder B.E.: "The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders", Ninth symposium on turbulent shear flows, 10-4, (1993) 文4) 近藤ら, 数値流体解析における空調用天井吹出口のモデリング手法, 等温実大実験と数値シミュレーション (その1), 日本建築学会計画系論文集, No557, 2002. 文5) 宮坂ら, 大規模建物空調システムのフィールドデータを利用した異常分析, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 80, 2001.01