



the BEST Program

Building Energy Simulation Tool

BESTESTによる空調計算の検証
ANSI/ASHRAE Standard 140-2017で追加
された空調のテストAE100—AE400シリーズ

- シミュレーションプログラムの比較検証ツールとしてBESTESTがあり、そのテスト内容は数年ごとに更新が行われている
- 既報3)で建物側の熱負荷について、既報4)で空調エネルギー計算について報告している
- ANSI/ASHRAE Standard 140-2017で追加された空調のテストAE100—AE400シリーズを実施
- そのテスト概要と計算結果を報告する

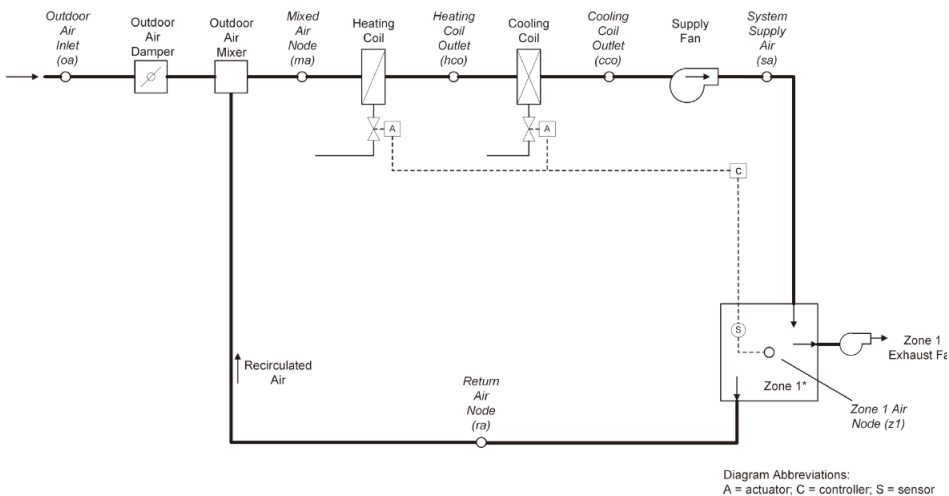
- 本計算例は2021年の空気調和衛生工学会の大会で報告した外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発その252 BESTESTによる空調計算の検証 として報告したものである。

3) 平林・村上・石野・郡・内海・二宮：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その26）BESTESTによる検証とケーススタディ，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.1105-1108,2008.8

4) 二宮・村上・石野・長井：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その163）BESTESTによる空調エネルギー計算の検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.41-44,2015.9

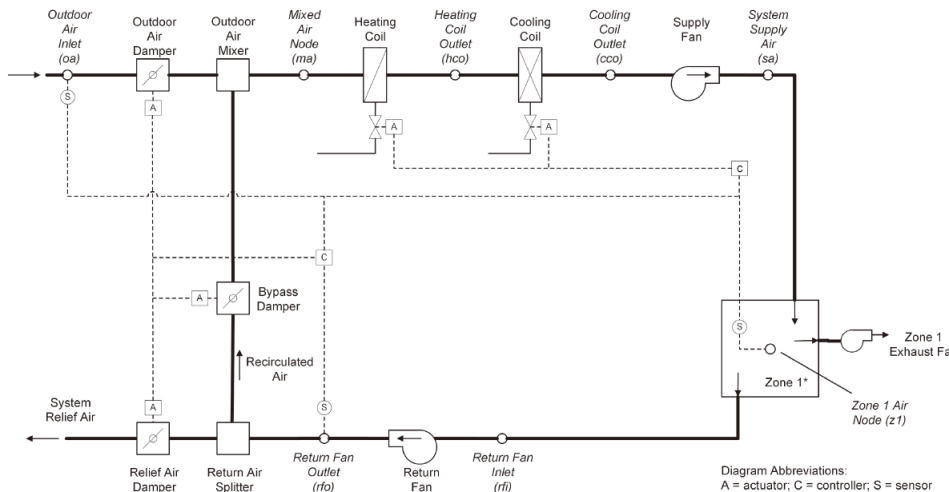
- AEシリーズは、空調装置の空気側のテストを行うものでAE100、AE200、AE300、AE400の4タイプがある
- AE100は定風量4管式空調機（ファン+コイル）方式で単室のテスト
- AE200は定風量4管式空調機で外気冷房ありの単室テスト
- AE300は定風量4管式空調機で外気冷房ありの2室のターミナルレヒート方式のテスト
- AE400は変風量4管式空調機で外気冷房ありの2室のレヒート付きVAVユニット方式のテスト

空調システム概略図



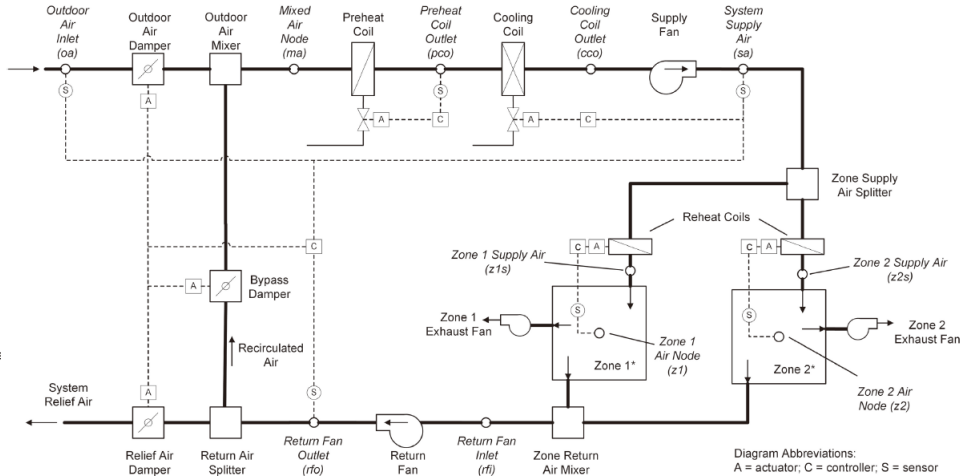
AE100 : Four-Pipe Fan-Coil (FC) System Cases

図-1 AE100の空調システム概略図



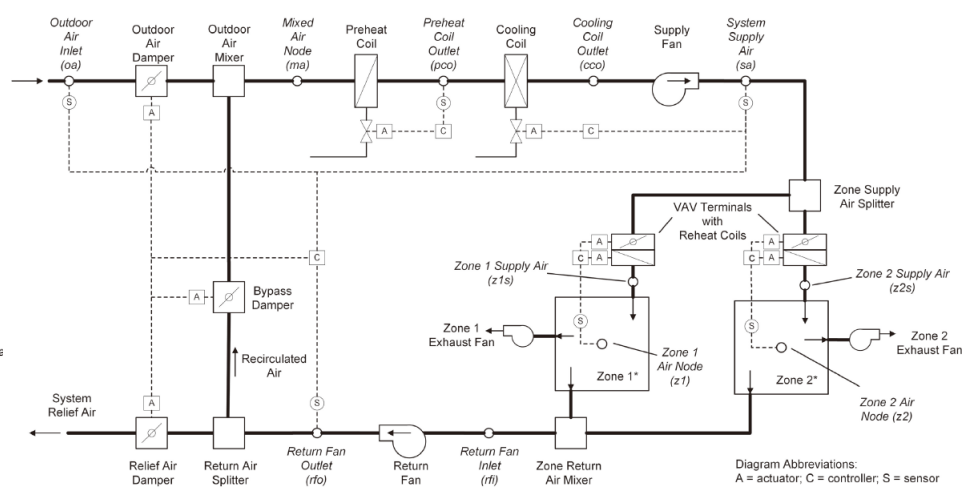
AE200 : Single-Zone (SZ) Air System Cases

図-2 AE200の空調システム概略図



AE300 : Constant-Volume (CV) Terminal Reheat System Cases

図-3 AE300の空調システム概略図



AE400 : Variable-Air-Volume Terminal Reheat (VAV) System Cases

図-4 AE400の空調システム概略図

テストケースの内容

表-1 AE100 のテストケース

case	Ambient		Zone IDB °C	Zone Loads, W			Coil Load Type
	ODB °C	ODP °C		Sensible		Latent	
			Heating	Cooling			
No Economizer							
AE101	-29.0	-29.0	21.111	2931	0	586.1	High heating
AE103	15.5	-3.0	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
AE104	26.9	22.1	23.889	0	2931	586.1	High cooling, wet coil

表-2 AE200 のテストケース

case	Ambient		Zone IDB °C	Zone Loads, W			Coil Load Type
	ODB °C	ODP °C		Sensible		Latent	
			Heating	Cooling			
No Economizer							
AE201	-29.0	-29.0	21.111	2931	0	586.1	High heating
AE203	15.5	-3.0	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
AE204	26.9	22.1	23.889	0	2931	586.1	High cooling, wet coil
AE205	24.9	2.4	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
AE206	23.0	20.9	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
Return-air comparative dry-bulb economizer outdoor air control							
AE226	23.0	20.9	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
Return-air comparative enthalpy economizer outdoor air control							
AE245	24.9	2.4	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil

表-3 AE300 のテストケース

case	Ambient		Zone Num.	Zone IDB °C	Zone Loads, W			Coil Load Type
	ODB °C	ODP °C			Sensible		Latent	
			Heating	Cooling				
No Economizer								
AE301	-29.0	-29.0	1	21.111	2931	0	586.1	High heating
			2	22.222	2345	0	879.2	
AE303	15.5	-3.0	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
AE304	26.9	22.1	1	23.889	0	2931	586.1	High cooling, wet coil
			2	25.000	0	3517	879.2	
AE305	24.9	2.4	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
AE306	23.0	20.9	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
Return-air comparative dry-bulb economizer outdoor air control								
AE326	23.0	20.9	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
Return-air comparative enthalpy economizer outdoor air control								
AE345	24.9	2.4	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	

表-4 AE400 のテストケース

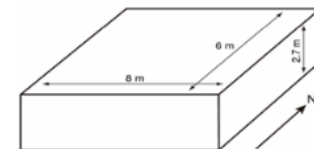
case	Ambient		Zone Num.	Zone IDB °C	Zone Loads, W			Coil Load Type
	ODB °C	ODP °C			Sensible		Latent	
			Heating	Cooling				
No Economizer								
AE401	-29.0	-29.0	1	21.111	2931	0	586.1	High heating
			2	22.222	2345	0	879.2	
AE403	15.5	-3.0	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
AE404	26.9	22.1	1	23.889	0	2931	586.1	High cooling, wet coil
			2	25.000	0	3517	879.2	
AE405	24.9	2.4	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
AE406	23.0	20.9	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
Return-air comparative dry-bulb economizer outdoor air control								
AE426	23.0	20.9	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, wet coil
			2	24.444	0	2345	879.2	
Return-air comparative enthalpy economizer outdoor air control								
AE445	24.9	2.4	1	23.333	0	1465	586.1	Low cooling, dry coil
			2	24.444	0	2345	879.2	

室負荷、室モデル

- BESTの空調エネルギー計算は室負荷の値を直接扱うことができないため室をモデル化して室の負荷を連成して解く必要がある
- このような連成計算を行うプログラムのために表5に示す仕様の室モデルが与えられており、この室モデルを作成して計算を行った
- 表5はケースAE101のもので他のケースについても同様に仕様が与えられている
- 気象データはTM2形式で与えられており、BESTで扱えるEPW形式に変換して使用した

表-5 ゾーンの様式 (AE101)

Element	R,(m2K)/W	U,W/(m2K)
Interior surface coefficient	0.1206	8.2900
Insulation	2.7000	0.3704
Exterior surface coefficient	0.0328	30.4872
Total air-air	2.8534	0.3505
Heat Loss Summary		
Component	Area,m2	UA,W/K
Roof	48.0	16.822
Wall	75.6	26.494
Floor	48.0	16.822
Infiltration		0.000
Total	123.6	43.316
Supplementary Internal Gains		
Sensible	82.9 W	
Latent	586.1 W	



出力項目

- 計算結果として求められる出力項目
- 負荷関連集計テーブルの出力項目
室（顕熱暖房、顕熱冷房、潜熱）負荷、
加熱コイル負荷、
冷却コイル（顕熱、潜熱）負荷、
冷却コイル出口相対湿度、
室レヒートコイル負荷
- 空気の状態値集計テーブルの出力項目
外気（oa）、混合空気（ma）、
加熱コイル出口（hco）、冷却コイル出口（cco）、
給気（sa）、室給気（z1s,z2s）、室（z1,z2）、
RAファン入口（rfi）、RAファン出口（rfo）
の各ポイントについて、
乾球温度、絶対湿度、比容積、比エンタルピ、質量流量

- 比較ツール
 - ANSI/ASHRAE Standard 140-2017に付属する表計算ファイルの所定のテーブルに計算結果を入力すると、ツール側で用意している他のプログラムの計算結果との比較がグラフ表示され容易に違いを確認することができる
- 比較プログラム
 - AE100とAE200シリーズは Quasi-Analytical Solution (QAS)、DEEAP 1.1.2、DeST 2、DOE-2.2 V48L、EnergyPlus 8.2.0、IES-VE 2014.2、LCEM 3.10、TRNSYS 17.01.0028の解析解を含めた8種類
 - AE300とAE400シリーズはLCEMを除いた7種類のプログラムの計算結果と比較ができる

- **AEシリーズの空調システムを計算するために
設備モジュールについて改造や新たなモジュールやテンプレートの
作成を行った**
- **不足している出力項目の追加**
- **新たなモジュールとしてレヒート付きVAVユニットのモジュール
VAVwithReheatModule2020を作成した**
- **BESTESTを試行するユーザーの利便性に配慮し、
各シリーズのベースとなる4種のテンプレートを作成した**
- **ファンの計算方法の見直し（温度上昇、比容積の適用）**

- AEシリーズのテストは2回計算を行った
- 1回目は個々のモジュールを組合せてモデル構築したもので計算し、それで発見した不具合やモジュール等の対策および作成したテンプレートを用いて2回目の計算を行った
- コイルモジュールの計算に不具合が見つかり修正した
 - ① 冷水コイルの処理熱量の計算の誤差発生対策
 - ② 冷水コイルの収束計算部分の計算式の修正
- ①の不具合はドライコイルのテストであるAE103などのケースで処理潜熱量が発生していたことで見つかった。この原因はコイルの出入り口の空気湿度で空気線関数を用いた計算誤差が影響しており、出入口の絶対湿度をチェックした上で顕熱負荷、潜熱負荷を算出することで改善した
- ②の不具合は結果の比較で冷水コイルの計算結果が合わず差が生じていたことで見つかり、収束計算部分の計算式の係数を修正することで改善した
- 不具合の①と②も誤差は小さなものであり、BESTESTを行わなければこれらの不具合は発見できなかったと思われる

- 図5にAE101の高加熱負荷ケースの出力ポイントの空気乾球温度と比容積の比較を示す(YourDataがBESTの計算結果)
- DOEとIES-VEは比容積の出力がなく、DeSt、EPlus (EnergyPlus)、LCEMの比容積は空気の乾球温度にかかわらず値の変化はなく固定値となっている
- BESTの比容積の結果は解析解のQAS、DEEAP、TRNSYSと同様の変化をしていることが確認できる。

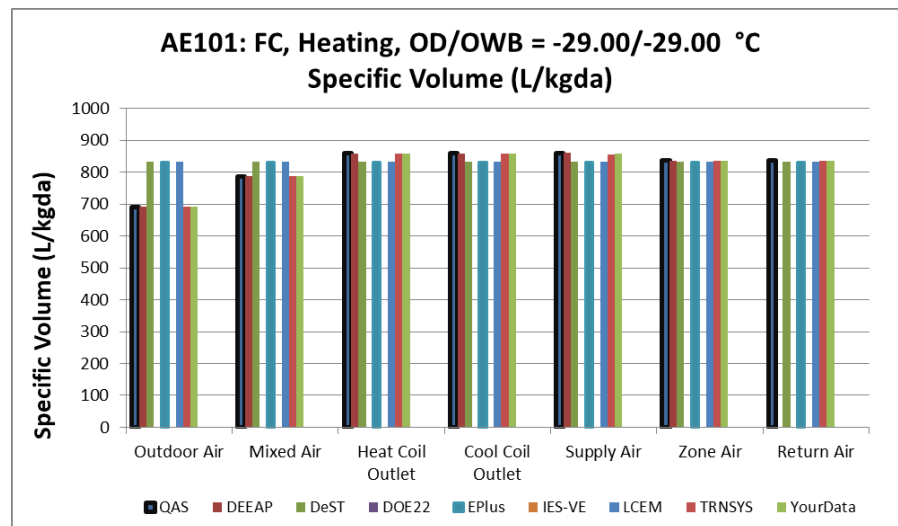
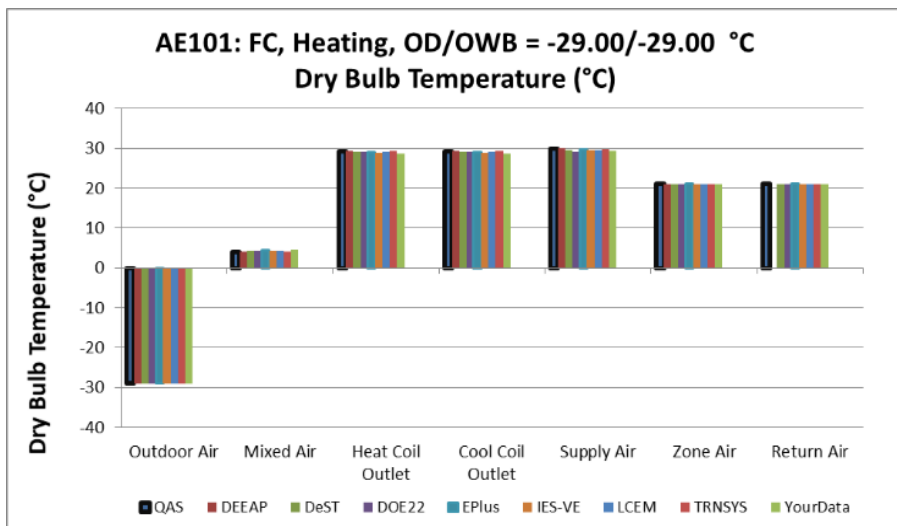


図-5 AE101の出力ポイントの空気乾球温度と比容積

新モジュール、容量設定

- **新たなモジュールとしてレヒート付きVAVユニットのモジュール VAVwithReheatModule2020を作成した**
- **既存のVAVユニットモジュールを元にレヒータの加熱能力と室からの単独固定排気流量の入力項目および制御用信号の接続ノードを追加したもので、既存の給気風量の制御に加え、レヒータの加熱能力制御、単独固定排気流量の有無の操作が可能である。**
- **機器の容量設定**
 - **テスト条件には加熱コイルや冷却コイルと同様にレヒータの具体的な仕様の条件設定はない**
 - **これらの定格容量などは、室が設定温度となるのに必要な能力をテスト実行者が設定することとなっている**
 - **このモジュールでは電気ヒータタイプとして加熱量に応じた消費電力を出力するようにしている。**

新テンプレート

- AEシリーズのテストを行うにはBEST専門版を用いて複数のモジュールでシステムのモデルを構築する必要がある
- BESTESTを試行するユーザーの利便性に配慮し、各シリーズのベースとなる4種のテンプレートを作成した
 - ts20ZAC AE100FCsystem
 - ts20ZAC AE200SZsystem
 - ts20ZAC AE300CVsystem
 - ts20ZAC AE400VAVsystem
- これらは「ゾーン空調_tsZAC」テンプレートシェルタイプで作成しており、他の同一テンプレートシェルタイプのもものと入れ替えが可能でBESTEST以外でも利用ができる。
- このテンプレートを用いてBESTESTを行うには建物側の室モデルデータを作成しておく必要がある。今回作成した室モデルデータも提供する予定である。

- AEシリーズのテストは2回計算を行った
- 1回目は個々のモジュールを組合せてモデル構築したもので計算し、それで発見した不具合やモジュール等の対策および作成したテンプレートを用いて2回目の計算を行った
- コイルモジュールの計算に不具合が見つかり修正した
 - ① 冷水コイルの処理熱量の計算の誤差発生対策
 - ② 冷水コイルの収束計算部分の計算式の修正
- ①の不具合はドライコイルのテストであるAE103などのケースで処理潜熱量が発生していたことで見つかった。この原因はコイルの出入り口の空気湿度で空気線関数を用いた計算誤差が影響しており、出入口の絶対湿度をチェックした上で顕熱負荷、潜熱負荷を算出することで改善した
- ②の不具合は結果の比較で冷水コイルの計算結果が合わず差が生じていたことで見つかり、収束計算部分の計算式の係数を修正することで改善した
- 不具合の①と②も誤差は小さなものであり、BESTESTを行わなければこれらの不具合は発見できなかったと思われる

Fanによる温度上昇

- SAファンおよびRAファンの各出入り口空気の温度差を比較
- 1回目の計算で他と異なる結果となったので、テスト条件に示されている次のファンの発熱 H_o の計算で行った
$$H_o = Q \times P \times K \times C \times (1/\eta - 1) = H_i \times (1 - \eta)$$
$$= \text{軸動力} \times (1 - \text{ファン効率})$$
- この条件式で計算した結果はどのケースも他のプログラムの40～50%の温度上昇にとどまり違いが生じた
- 比較用プログラムの計算結果を分析すると、ファンの軸動力分がすべて送風空気の温度上昇になる計算をしているようで解析解であるQASの計算過程を見ても軸動力分で計算しているように見えた
- 試しにファンの軸動力分がすべて送風空気の温度上昇となるように計算をすると比較用プログラムの計算結果と同等の結果となった

- この検証の結果をもとにBEST機器特性WGにおいて、ファンによる空気の温度上昇の計算は、軸動力分がすべて熱となり出口空気温度を上昇させる計算方法に見直すこととなった
- ポンプについても同様に、軸動力分がすべて熱となり出口水温を上昇させる計算方法に見直すこととなりそれぞれモジュールの修正を行った
- 改良として行った空気状態の比容積の出力の追加に伴い、ファンの軸動力の計算やコイルの面風速は比容積を考慮した計算に修正した

計算結果の比較

- 計算結果の比較グラフは
AE100とAE200用に22種類
AE300とAE400用に35種類
の固定グラフシートが用意されている
- 各ケース別に空気状態値（乾球温度、絶対湿度、比容積、比エンタルピ、質量流量）の変化を手動切替え表示で比較できるグラフ（全24ケース×5要素=120種類）が用意されている
- 図6～図16に2回目の計算結果で作成した比較グラフの一部を示す
- ここで紹介していない比較グラフを含めて他のプログラムと同等の計算結果であることを確認している

AE300,400の比較例(図6-9)

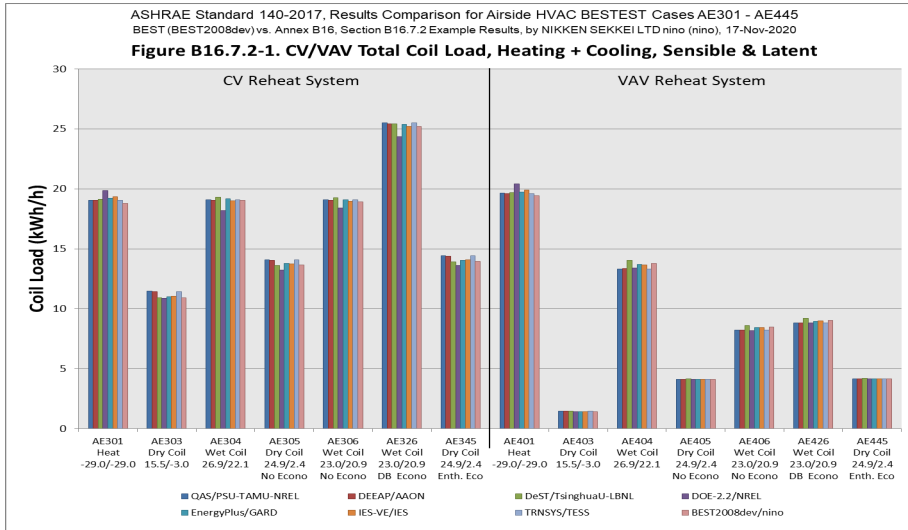


図-6 AE300, 400のコイル負荷

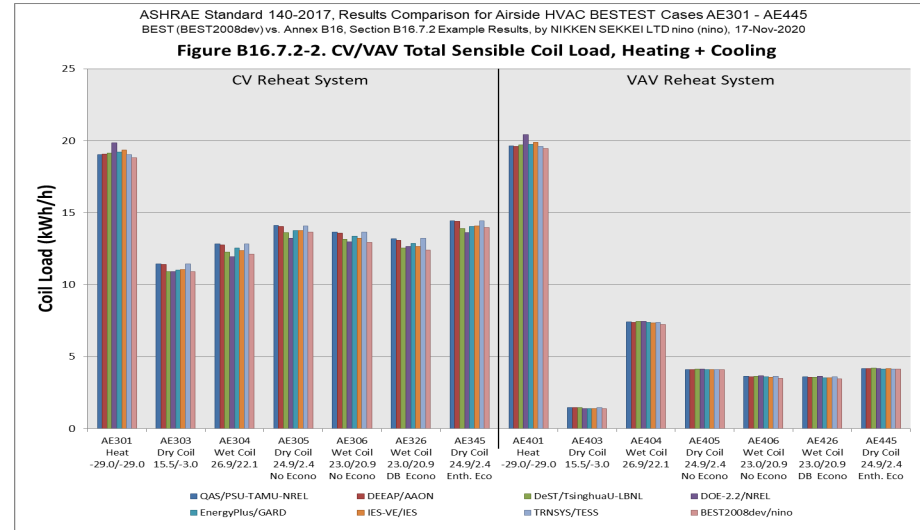


図-7 AE300, 400のコイル負荷 (顕熱)

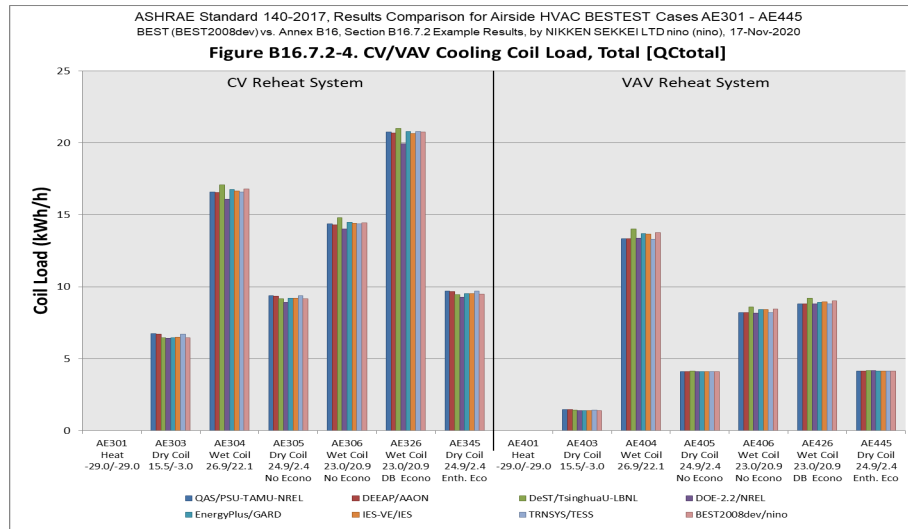


図-8 AE300, 400の冷却コイル負荷

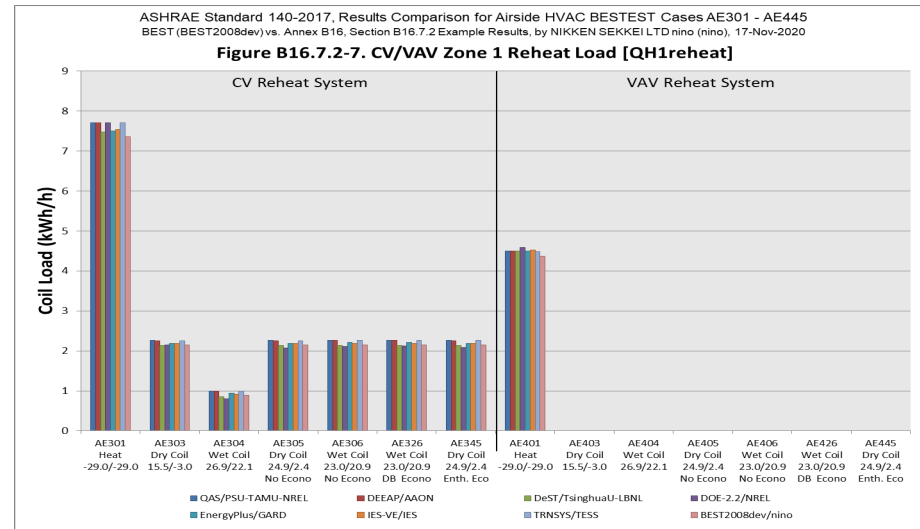


図-9 AE300, 400のゾーン1のレヒート負荷

AE300,400の比較例(図10-13)

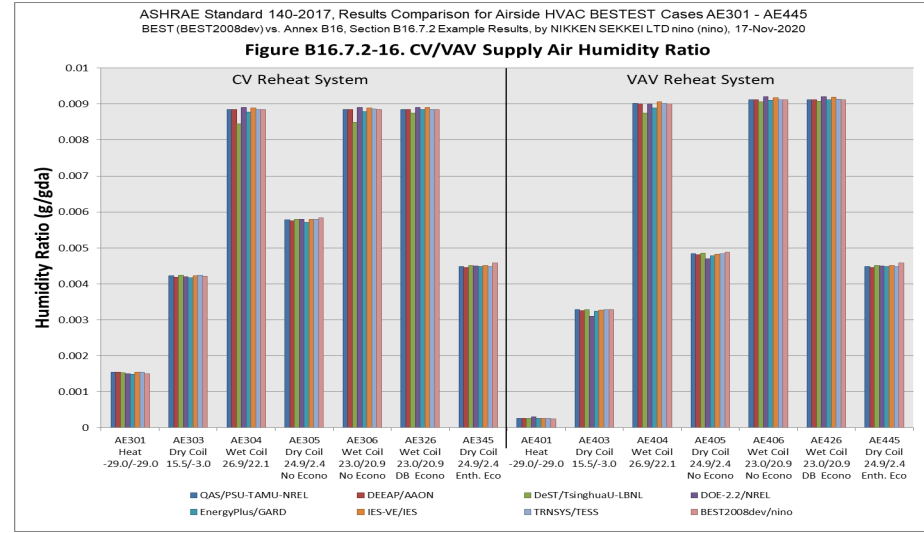
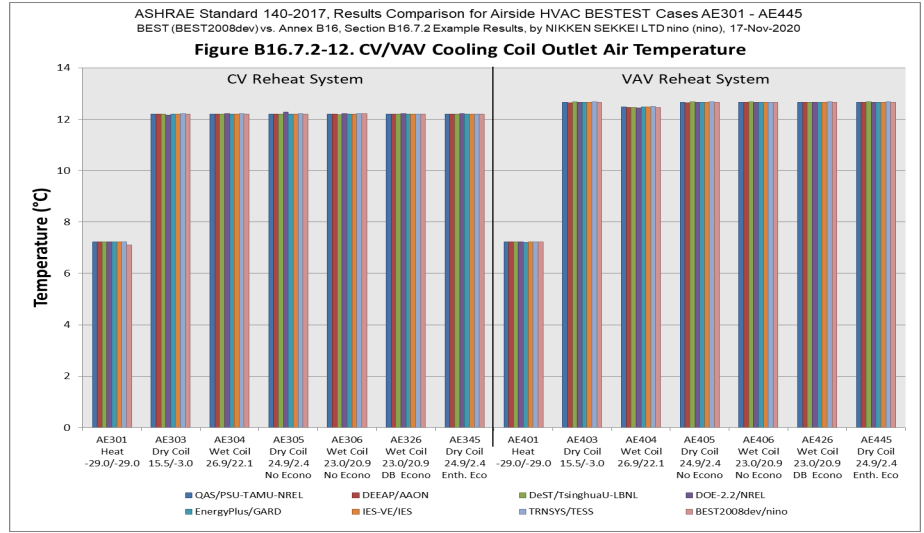


図-10 AE300, 400の冷却コイル出口空気温度

図-12 AE300, 400のSA絶対湿度

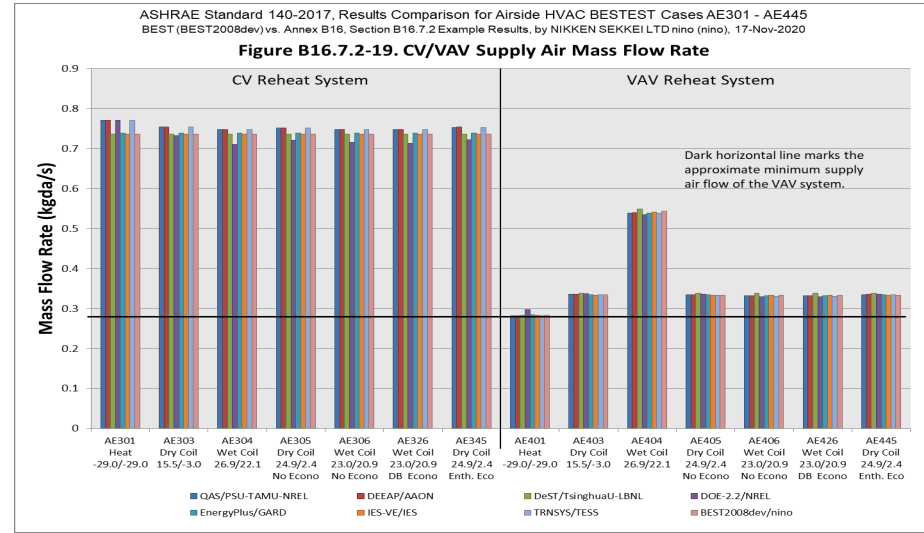
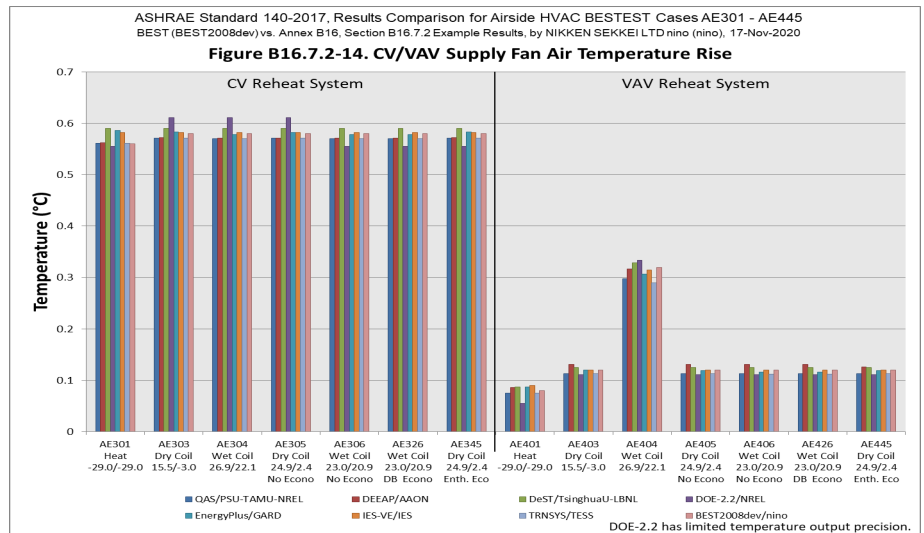


図-11 AE300, 400のSAファン出入口
空気上昇温度

図-13 AE300, 400のSA質量流量

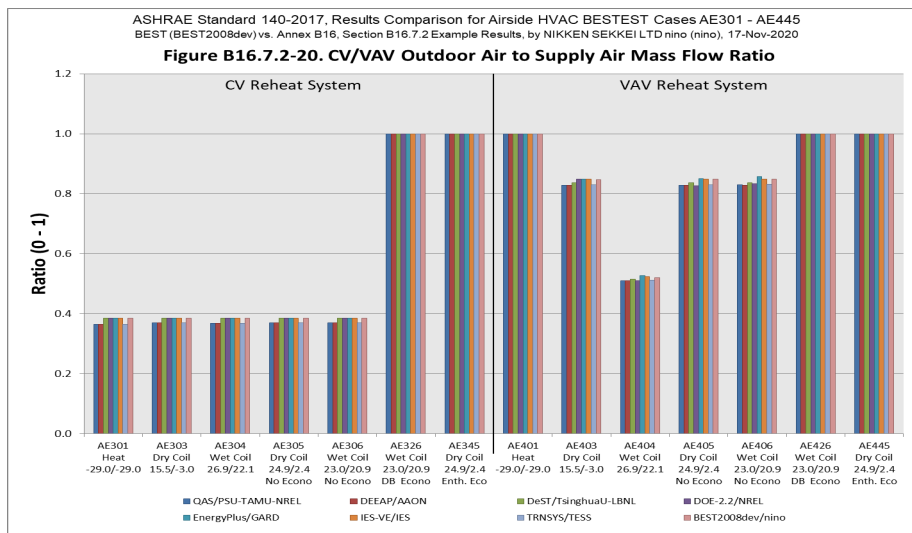


図-14 AE300, 400の外気質量流量の比率

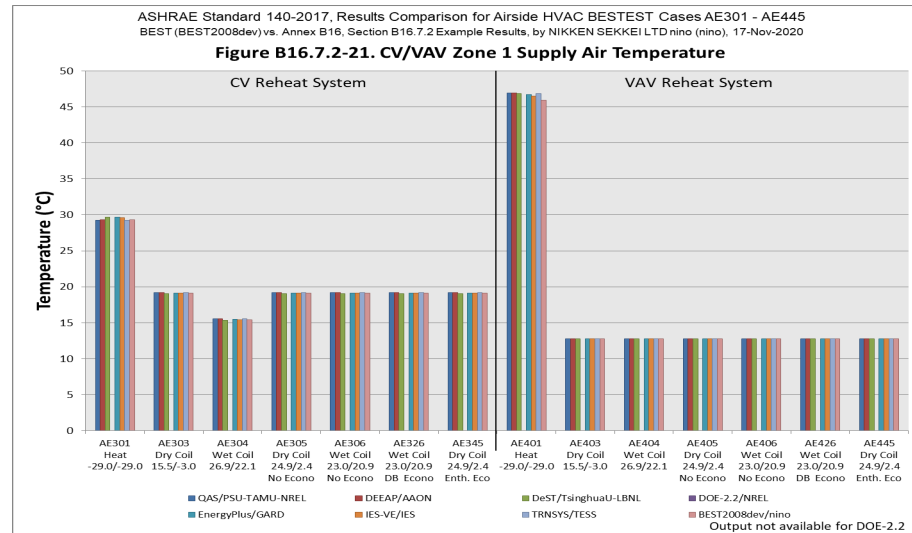


図-15 AE300, 400のゾーン1 給気温度

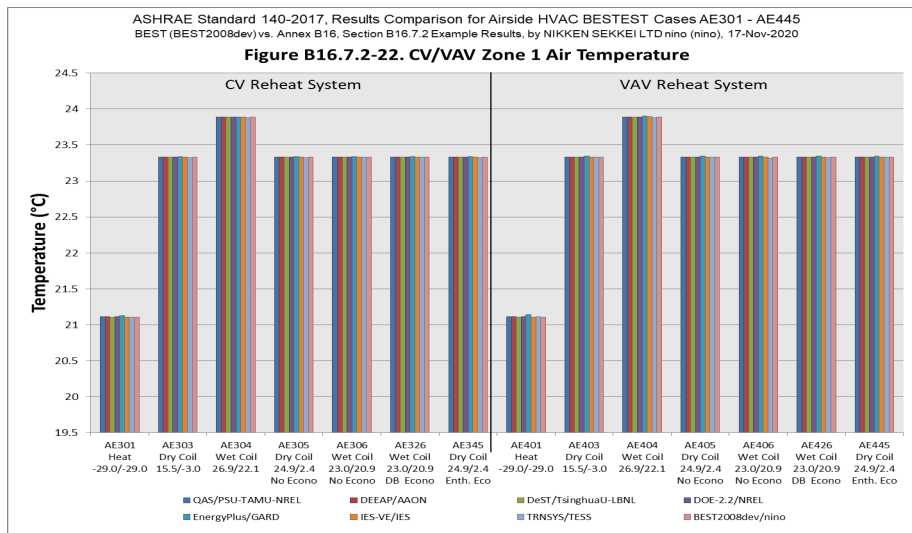


図-16 AE300, 400のゾーン1 室温

● ここで紹介していない比較グラフを含めて他のプログラムと同等の計算結果であることを確認している

まとめ

- **ANSI/ASHRAE Standard 140-2017で追加されたテストAE100~AE400シリーズをBEST2008devで実施し、計算結果が世界の主要なシミュレーションプログラムのもものと同等であることを確認した**
- **このテスト実施において行った機能追加や改良、テストモデルのテンプレートの開発について報告した**
- **本学会の特別委員会が開発した検証ツールで国内プログラムの計算結果との比較検証も行うなど、今後も計算精度向上に努めていく予定である**

【参考文献】

- 1) R.Judkoff, J.Neymark : International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method : February 1995**
- 2) ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 : Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**
- 3) 平林・村上・石野・郡・内海・二宮 : 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その26) BESTESTによる検証とケーススタディ, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1105-1108, 2008.8**
- 4) 二宮・村上・石野・長井 : 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その163) BESTESTによる空調エネルギー計算の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.41-44,2015.9**