特　集　論　文

多目的な利用環境に配慮したパッケージエアコン開発技術（パッケージエアコン開発におけるダイナミックシミュレーションの活用）

Development of Packaged Air Conditioners Applying to Many Using Environments

赤澤公雄[*1] Kimio Akazawa
蒲原　覚[*2] Satoru Kamohara
藤崎忠司[*3] Tadashi Fujisaki
鈴木　寛[*4] Hiroshi Suzuki

パッケージエアコンの利用環境はお客様ごとに異なり，同じ利用環境は２つとない．利用環境の違いには，室外機と室内機を接続する配管の長さ，室外機の設置場所（屋上かそれとも地上か），外気温度変化などがある．これらの違いをダイナミックシミュレーションで計算し，特殊な利用環境でもパッケージエアコンの性能を発揮できることを検証している．この計算適用事例と得られた成果とを紹介する．

1. はじめに

当社は，発電プラントのような大規模な設備で，かつ工場で全プロセスを統合した試験が困難な製品に対して，ダイナミックシミュレーションを数十年前より適用している．その実績を踏まえ，ダイナミックシミュレーションは，有効性が実証された設計検証手法といえる．

一方，パッケージエアコン開発の分野では，比較的容易に実機工場試験が可能であるため，これまではダイナミックシミュレーションよりも実機試験を主体とした開発を行ってきた．しかしながら，近年の製品市場グローバル化に伴い，その利用環境は，条件の組合せで爆発的な種類となってきており，これらを工場試験で網羅することは，現実的な方策でなくなってきている．このように開発段階では，膨大な利用環境が考えられる中，どのような利用環境のお客様にもご満足いただくため，様々な利用環境を想定したダイナミックシミュレーションを実施し，当社パッケージエアコンの性能を予測評価している．また，工場における試運転結果とダイナミックシミュレーション結果とを比較することで，この予測精度向上に取り組んでいる．

2. ダイナミックシミュレーションの概要

パッケージエアコンの性能を予測するダイナミックシミュレーションでは，エアコン内における冷媒温度，圧力，流量と室内熱交換器と室外熱交換器で熱交換する空気温度，風量及び熱交換量とを数値計算することになる．この冷媒，空気といった流体温度，圧力，流量を解くダイナミックシミュレーション計算コードとして，当社ではこれまで発電プラント動特性解析やロケットエンジンの燃料，酸素系統動特性解析に適用してきたPRANETというシミュレーションコードを保持している[(1)]．このコードで流体種類としてR134a，R407C，R410Aといった冷媒を扱えるよう改造した．さらに，エアコンに特有の計算条件である圧縮機潤滑油移動に関する計算式をシミュレーション目的に応じて追加して計算を進めている．

3. 利用環境を想定したシミュレーション

3. 1　配管長の長短

室外機と室内機とを接続する接続配管はお客様のご都合により，短いものから長いものまである．特に，ビル用空調システムの場合，５ｍから160ｍ（業界最長の当社新製品LX）まで変化することになる．この配管長の相違により，設計上考慮していることの代表的なものには以下のものがある．

① 冷媒チャージ量が変わる
② 低負荷運転時の圧縮機潤滑油濃度の変化
③ デフロスト運転所要時間の変化

デフロスト運転とは，外気温が０℃以下のように低い状況下で暖房運転を実施すると室外熱交換器表面に

[*1] 技術本部高砂研究所制御システム研究室主席
[*2] 技術本部高砂研究所制御システム研究室
[*3] 技術本部名古屋研究所空調・圧縮研究推進室主席
[*4] 冷熱事業本部空調輸冷製造部空調設計課

霜が付着するため，この霜を溶かす（デフロスト）運転をいう．

この ① の冷媒チャージ量の変化に対して，静的な計算から液配管長が決まれば適正な冷媒量が決まり，その値をユーザマニュアルに記載している．

(1) 低負荷時運転

② の低負荷運転時における圧縮機潤滑油濃度の変化については，温調負荷が小さく，圧縮機がオン／オフを繰り返すような状況下において，圧縮機内潤滑油の冷媒による希釈率がどう変化するかを問題にする．希釈率は次式により定義する．

$$Toil = \frac{Mref}{Mref + Moil} \times 100$$

ここで，

$Toil$ ：希釈率（%）

$Mref$：圧縮機内冷媒質量

$Moil$ ：圧縮機内潤滑油質量

圧縮機内に液冷媒が大量に戻ってきて，希釈率が規定値を超えると圧縮機故障原因となる．一方，配管長が長くなれば，圧縮機が停止から運転した直後に液冷媒が多く圧縮機に戻る．この圧縮機内潤滑油濃度を規定値以下に抑えるための設計パラメータとして以下のものがある．

- 低負荷時の起動，停止それぞれの最短時間
- 起動停止時における圧縮機回転数変動パターン

この低負荷運転時における現象を配管長が５ｍの場合と120ｍの場合とについてダイナミックシミュレーションで検討した例について示す．対象機種は新型ビル用空調機LXシリーズの10馬力機である．その冷媒系統図を**図１**に示す．配管長として，５ｍと120ｍを選んだ理由は，まず最低でも５ｍ程度の配管は取り付け上必要不可欠となることと，120ｍ以上の配管長の場合，管口径を小さくするため，冷媒量としては120ｍのときが最も多くなるためである．

図２にシミュレーション結果を示す．図２(a)は冷房モードにおける低負荷時運転のシミュレーション結果であり，図２(b)は暖房モードにおける低負荷時運転のシミュレーション結果である．図２から分かることは，冷房では配管長にかかわらず希釈率が10 %以下を維持しているのに対し，暖房時で120ｍ配管の時には20 %程度まで希釈率が上昇している．これは暖房時のほうが液冷媒が圧縮機に戻りやすく，配管長が長いほど大量の液冷媒が戻るためと考えられる．しかしながら，当該圧縮機の希釈率の規定値は40 %であり，現行の設計パラメータで問題ないことが確認できた．

(2) デフロスト運転

デフロスト運転において設計上考慮すべき点は，デフロストに掛かる時間と圧縮機の高低圧制限を維持できるかどうかにある．圧縮機高低圧制限は通常の定常運転を想定した制限値であり，デフロスト運転のような短時間に事象が完結する過渡時に対しては厳しい（この制限値を満たせば十分過ぎる余裕を

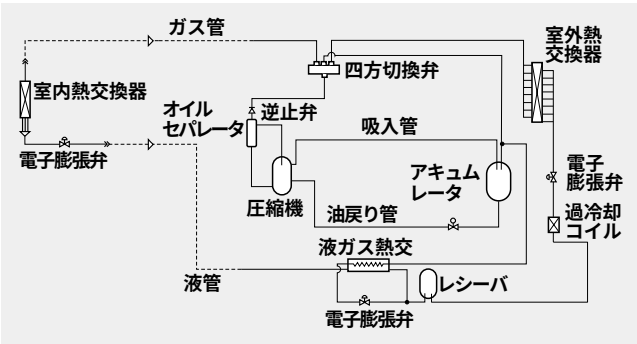


図１　新型ビル用空調機LXシリーズ10馬力機の冷媒系統図　新型ビル用空調機LXシリーズ10馬力機の構成機器，配管系統を示す．

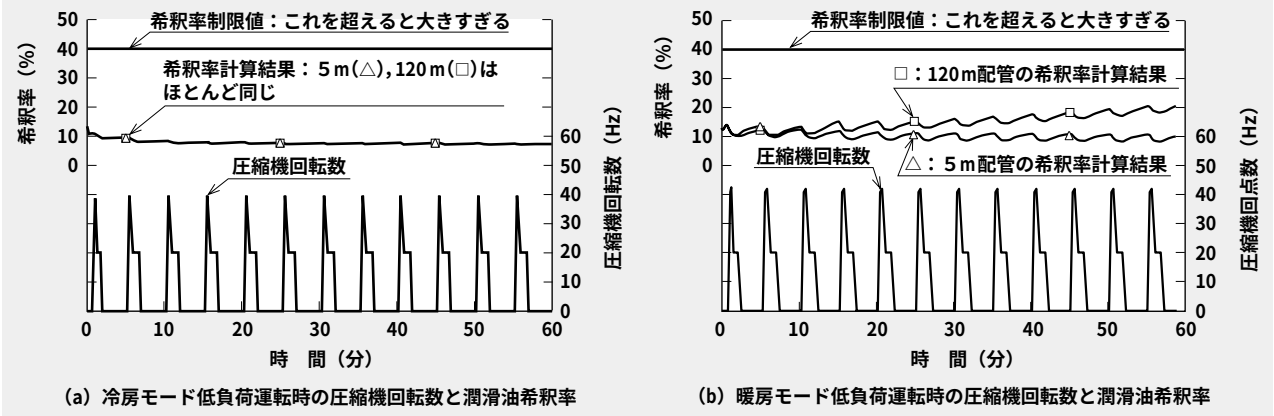


図２　ダイナミックシミュレーション例　(a)は冷房モード低負荷運転時の圧縮機回転数と潤滑油希釈率で，圧縮機が起動停止を繰り返す低負荷運転時の回転数と希釈率の時間応答を示す．(b)は暖房モード低負荷運転時の圧縮機回転数と潤滑油希釈率で，圧縮機が起動停止を繰り返す低負荷運転時の回転数と希釈率の時間応答を示す．

もつ）条件となっており，必要があれば，圧縮機の過渡時耐力を詳細に評価する必要がある．対象機種は図１に示した新型ビル用空調機LXシリーズの10馬力機とし，配管長が５m，100 m，160 mの場合について，デフロスト運転時のシミュレーションを実施した．

デフロスト運転時の高圧（圧縮機吐出圧）と低圧（圧縮機吸込圧）との関係を圧縮機定常時圧力制限と対比したものを**図３**に示す．図3から分かることは，まずデフロスト運転中，高圧が低下し，圧縮機制限範囲を外れる．これは先に記述したように圧縮機制限範囲は定常運転時の制限値であり，デフロスト運転の過渡時にそのまま適用はできない．この圧縮機圧力制限は，圧縮機回転軸の油膜厚さに関係しており，圧力，希釈率等から油膜厚さの再評価を実施し，新型ビル用空調機LXシリーズでは検証を行っている．

３．２　室外機取付け場所

国内におけるビル用空調機の室外機取付け場所は屋上が大半を占めるが，地上に設置するケースもある．さらに，海外のお客様においては，室外機を地上に設置する割合が国内における比率よりも高い．室外機を屋上に設置した場合には，室内機は室外機よりも低い位置に取り付けることになり，室外機を地上に設置した場合には室内機のほうが室外機よりも高い位置となる．この室外機と室内機の高さの最大差は，ビル用空調機LXの場合40 mである．この室外機と室内機の設置高さの違いに対して設計上考慮していることの代表的なものには以下のものがある．

- 室外機上の場合：暖房運転時，液冷媒を下から上に流すことになり，ここでの減圧による冷媒フラッシュによる能力低下．
- 室外機下の場合：冷房運転時，液冷媒を下から上に流すことになり，ここでの減圧による冷媒フラッシュによる能力低下．

いずれも液を下から上に向かって流す場合の減圧沸騰を生じさせないことが，空調機の性能維持のために必須となる．ここで減圧沸騰を回避するだけならば，静的な解析で凝縮器となる熱交換器（冷房時：室外熱交，暖房時：室内熱交）の出口過冷却度をつければ良いという答えがでる．しかしながら，ダイナミックシミュレーションすることで，そのときの膨張弁開度がどの程度になり，必要能力を発揮するための圧縮機回転数がどの程度かを事前に検討可能である．これにより，実機試験回数を低減できる．そこで図１に示した新型ビル用空調機LXシリーズの10馬力機を対象とし，室外機を室内機よりも40 m上に設置した場合に

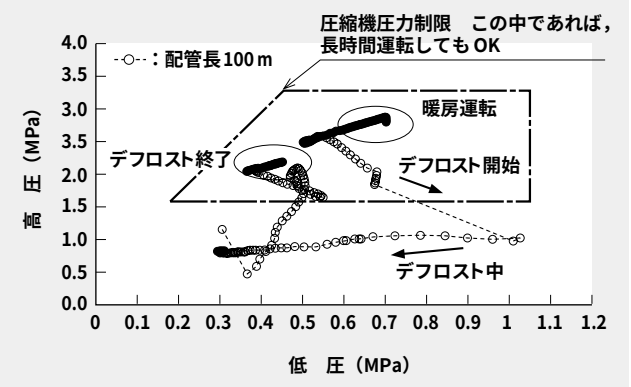


図３　デフロスト運転時の高圧と低圧との相関　デフロスト運転時の高圧と低圧の相関を圧縮機圧力制限と対比して示す．

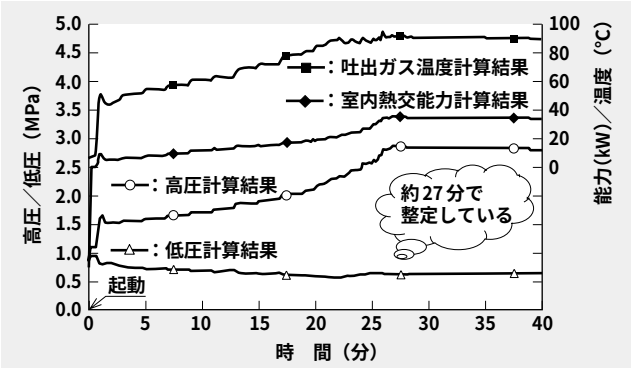


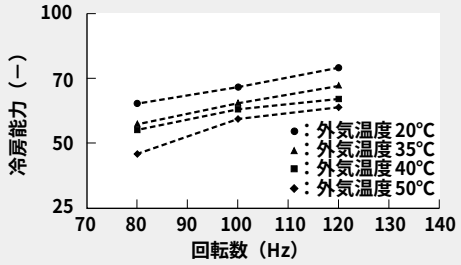
図４　室外機を室内機より40 m高い位置に設置したときの圧力，弁開度，圧縮機回転数　起動後30分経てば安定した運転ができる．

における暖房運転起動時挙動をシミュレーション計算した．この結果を**図４**に示す．図４から分かることは，暖房標準条件（外気温７℃，室内温度20℃）において，40 mの高低差があっても温度，圧力，熱交換器能力ともに安定した運転が可能であることである．この図５では，能力が整定するのに約27分掛かっているが，その後，更に短い時間で整定するパラメータをシミュレーションで決定した．この結果を新型ビル用空調機LXシリーズに適用した．

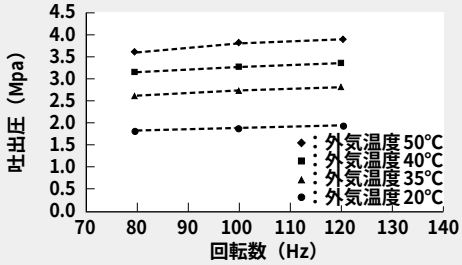
３．３　外気温度の変化

外気温度はまさにお客様ごと，また空調機を使用するその日，また一日の中でも時間によって変化する，最も不確定要素の大きい環境条件である．この外気温度が変わる影響をシミュレーションで事前に検討し，空調機能力限界と空調機耐力を評価した．空調機耐力として，最も影響が顕著に現れる高圧を選んだ．また，デフロスト運転時と同様に圧縮機圧力制限範囲についても評価した．対象機種は図１に示した新型ビル用空調機LXシリーズの10馬力機とし，その他の計算条件は以下のようにした．

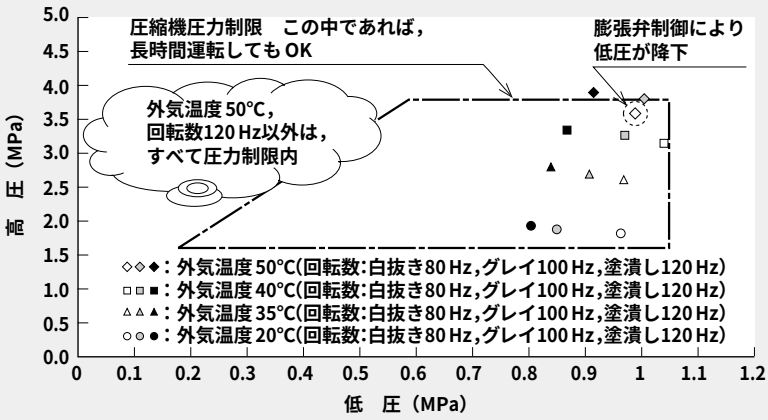
- 運転モード：冷房



（a）外気温度が変わったときの冷房能力



（b）外気温度が変わったときの高圧



（c）外気温度が変わったときの高低圧

図５　外気シミュレーション例　(a)は外気温度が変わったときの冷房能力を示す．外気温度が低いほど冷房能力が大きい．(b)は外気温度が変わったときの高圧を示す．外気温度が高いほど高圧が高い．(c)は外気温度が変わったときの高圧と低圧の相関を圧縮機圧力制限と対比して示す．

- 外気温度：50℃，43℃，35℃，20℃
- 室内温度：27℃
- 圧縮機回転数：80 Hz，100 Hz，120 Hz

この設定根拠は，室内温度はJIS規格値に固定し，外気温度を空調機使用制限上限の43℃，JIS規格の35℃，負荷が0に近くなる20℃，及び想定される上限（輻射熱など）として50℃を選んだ．また，圧縮機回転数は運転制御の適切さを検討するため，最高回転数120 Hzからその2/3の80 Hzとした．計算結果の冷房能力をまとめたグラフを**図５**(a)に，高圧をまとめたものを図５(b)に，高圧と低圧の相関及び圧縮機圧力制限を図５(c)に示す．

図５(a)から分かることは，外気温度が低いほど能力が大きいことと，圧縮機回転数が大きいほど能力が大きいことである．次に図５(b)から分かることは，外気温度が使用制限上限の43℃以下の場合には圧縮機回転数を120Hzまで上昇しても高圧は圧縮機の高圧制限を超えないことと，外気温度が50℃の場合には圧縮機回転数が80Hzでも高圧が高くなることである．これより，限界を超えた外気温度でもトラブルを回避するためには，高圧が高いとき圧縮機回転数を下げる高圧ランバック制御が必要であることが分かる．また，図５(c)より高圧ランバック制御を追加すれば，ここで検討した外気温度条件では，すべて圧縮機の圧力制限内で運転できることが分かる．ここで得た成果を新型ビル用空調機LXシリーズに適用した．

4. ま　と　め

本報では，多種多様なパッケージエアコンの利用環境をダイナミックシミュレーションの条件として組み込んだシミュレーション計算を実施することによる，設計段階におけるトラブル未然防止，品質向上，開発期間短縮への取組みを紹介した．

今後ますます製品開発加速への要求が高まる中，信頼性及び性能向上を目的とした数値シミュレーションの設計への適用は従来にも増して重要な差別化ポイントとなっており，当社においても意欲的に取り組み，多様な製品開発の要所要所にシミュレーションを活用し試作品の製作と試験期間を短縮することで，お客様のニーズを満足する製品をいち早く提供していく所存である．

参　考　文　献

(1) 桑原ほか，ノード・リンクネットワーク表現による流体システムのシミュレーションプログラムPRANET，三菱重工技報　Vol.22　No.6（1985）p.859

赤澤公雄

蒲原覚

藤崎忠司

鈴木寛