

高温・高湿環境に対応したグローバル自動販売機の冷却技術

Cooling Technology for Global Vending Machine Installed in High-Temperature High-Humidity Environments

村瀬 孝夫 MURASE, Takao

中国の主要都市部の最高気温・湿度を考慮し、周囲温度 40℃、相対湿度 75% の環境下で運用できるグローバル自動販売機の開発に取り組んだ。目標とする周囲温度の上昇に伴い、増加する熱負荷を効率良く冷却する断熱・冷却技術と、効果的な運転制御技術の開発を行った。また、高温・高湿環境下で蒸発器に発生する着霜の影響については、その成長過程を観察した結果、着霜量の低減対策として蒸発温度の設定レベルに着目し、再調整を行うことで着霜量を制限した。これらの対策により、高温・高湿環境下でありながら、必要冷却能力の低減と初期冷却時間の短縮を実現した。

We have been working on the development of a global vending machine capable of operating in environments with an ambient temperature of 40℃ and relative humidity of 75% in consideration of the maximum temperatures and humidity of major cities in China. Along with an increase of target ambient temperatures, we have developed an efficient operating control technology, as well as a heat insulating and cooling technology for efficiently cooling increased heat loads. With regard to the effect of frost formed on the evaporator under the environment of high temperatures and high humidity, we have focused on the evaporation temperature setting level from the result of the observation of the frost formation process, and by readjusting the setting, we have controlled the amount of frost formation. These measures have enabled the model to reduce a required cooling capability and shorten an initial cooling time even in high-temperature high-humidity environments.

① まえがき

日本自動販売機工業会の調査によれば、2014 年末における日本国内の飲料自動販売機の普及台数は、256 万 8,600 台で前年度より 0.9% の減少となっている⁽¹⁾。台数減少の主な原因は、消費増税に伴う売価の上昇による売上減や、コンビニエンスストアで販売されるコーヒーの人気による缶コーヒーの売上減などである。その一方、中国では大都市の地下鉄の構内やオフィス、工場などを中心に 7～8 万台程度が普及しているといわれ、今後も設置台数は増大することが予想されている。

富士電機は、伸長が期待される中国を中心とした海外市場に展開するため、高温・高湿環境に対応したグローバル自動販売機を開発した。本稿では、その冷却技術について述べる。

② 開発の背景

上海、杭州、広州などの中国の主要都市部では、最高気温は例年 40℃ に達し、日本国内よりも高温環境にあるといえる。日本国内向けの高湿環境条件は 32℃ であり、このような 40℃ を超える高温や高湿環境における動作検証は従来行ってこなかった。なお、低温環境条件 (5℃) は日本国内向けの仕様と同じであり、動作検証は完了している。

中国をはじめとしたグローバル市場に展開するためには、高温・高湿の設置環境を考慮した自動販売機を開発する必要がある。

③ 開発の狙いと課題

3.1 高温・高湿環境下での課題

自動販売機の冷却能力は、単位時間あたりに庫内から奪う熱エネルギー量で評価を行う。その熱エネルギー量は周囲温度や商品温度とその目標温度との差によって決定され、温度差が大きいほど奪う熱エネルギー量は大きくなり、高い冷却能力が必要となる。

また、熱エネルギー量は、商品の冷却を完了するまでの到達時間により案分されるため、目標とする到達時間が短いほど単位時間あたりに要求される冷却能力は高くなる。

図 1 に、冷却完了の到達時間と必要冷却能力の関係を示す。周囲温度と商品温度が同じになっている初期状態からの冷却（初期冷却）において、日本国内では周囲温度 32℃ にて 24 時間での冷却完了を基準値としている。周囲温度が 32℃ から中国市場で要求される 40℃ に変化すると、温度差による熱エネルギー量の増加により 1.4 倍の冷却能力が必要となる。

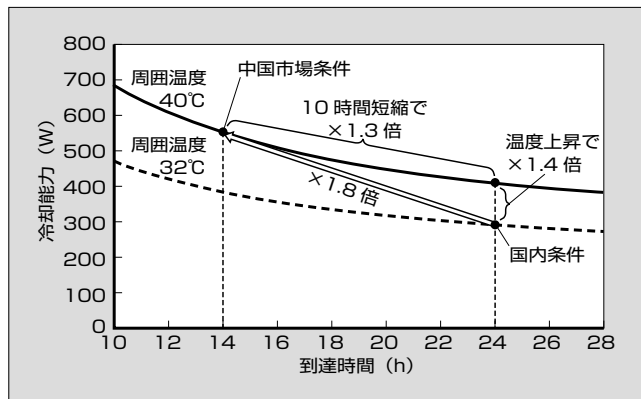


図 1 到達時間と必要冷却能力の関係

また、稼働後の安定時に新たな商品を補充して復帰するまでの冷却（補充復帰冷却）では、補充商品が十分に冷えるまでの販売待機時間は販売の機会損失になるため、短時間で復帰することが求められる。中国市場では、日本国内の24時間に対して10時間短い14時間以内に全商品の補充復帰冷却を完了することが要求される。到達時間が10時間短縮することにより、同じ周囲温度条件であっても初期冷却に対して1.3倍の冷却能力が必要となる。

この結果、周囲温度40℃、14時間での補充復帰冷却は、日本国内の基準に対して1.8倍もの冷却能力が必要となる。高い周囲温度の下では冷凍機そのものの効率が低下することにより冷却能力は減退する。このため効率良く冷却を行うには熱負荷対策を十分に行うことが必須である。

また、同じ相対湿度であっても周囲環境の温度が高いほど空気中に含まれる水蒸気量は多い。庫内温度が低下すると水蒸気は凝縮して露や霜となる。これらの露や霜は、蒸発器（冷却用熱交換器）のフィンの表面に付着し、冷却効率を減少させるので、悪影響を及ぼさないようにする必要がある。

3.2 狙い

グローバル自動販売機に求められる環境条件を、日本国内の周囲温度32℃、相対湿度65%に対して、周囲温度40℃、相対湿度75%を定格高温・高湿の設計値として定め、14時間以内で補充復帰冷却を完了することを目指し、初期と補充復帰時の冷却性能を改善するため次の3点について取り組んだ。

- (a) 熱負荷想定と断熱・冷却性能の確保
- (b) 最適運転制御による初期冷却時間の短縮
- (c) 着霜対策

4 高温・高湿環境技術の特徴

4.1 熱負荷想定と断熱・冷却性能の確保

自動販売機の必要冷却能力は、式(1)によって決定される。

$$\text{必要冷却能力} = \text{庫外からの侵入熱量} + \text{商品熱負荷} \dots(1)$$

必要冷却能力の増大には、圧縮機や熱交換器の大型化などによって対応できるが、消費電力の増大につながるため安易に選択はできない。これに対して“庫外からの侵入熱量”と“商品熱負荷”の冷却熱負荷を適切にコントロールできれば、必要冷却能力を低減し、より効率の良い冷却システムを実現することができる。ここでは、この2点の対策について述べる。

(1) 庫外からの侵入熱量対策

図2に、庫外からの侵入熱量対策を示す。庫外から侵入する熱量は、庫内と庫外の温度差に比例し増加する。

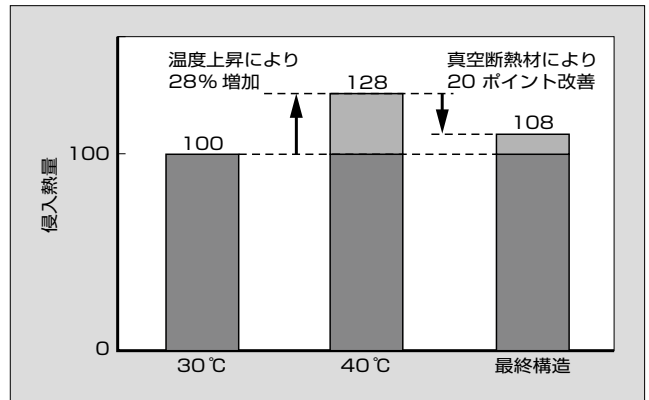


図2 庫外からの侵入熱量対策

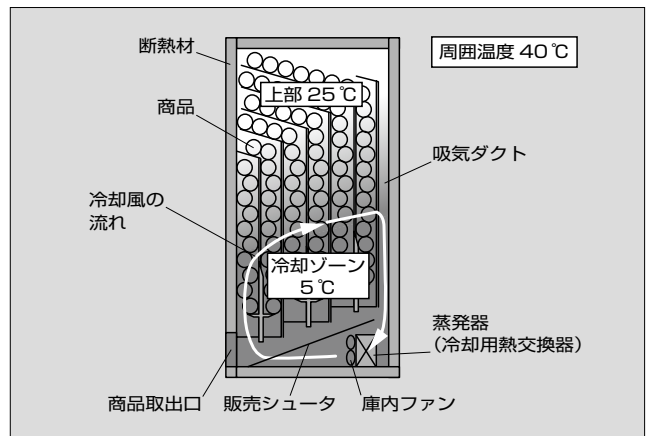


図3 ゾーンクーリングの概要

32℃の侵入熱量を100とすると、周囲温度が32℃から40℃になることで侵入熱量が28%増加する。

今回の開発では、断熱構造に真空断熱材を採用し、40℃環境下での断熱効果を20ポイント改善した。これにより、周囲温度の変化による侵入熱量増加分を28%から8%に抑制し、必要冷却能力を抑制した。

(2) ゾーンクーリングによる商品熱負荷対策

図3に、ゾーンクーリングの概要を示す。庫内全体を冷やすのではなく、次に販売する商品だけを部分的に冷やすことで必要冷却能力を低減できる。

中国市場における販売パターンの分析により、4本目までが冷えていれば適冷商品を継続して提供できることが分かっている。

今回の開発では、各商品の下方から4本目までの領域に限定して冷却風を循環させた。この商品熱負荷を最小とするゾーンクーリングによって、冷却対象となる商品数を限定し、冷却システムとして要求される必要冷却能力を低減した。

4.2 最適運転制御による初期冷却時間の短縮

(1) リカバリーシフト冷却

図4に、リカバリーシフト冷却の概要を示す。保冷運転のオン・オフ制御では、実際の商品温度でなく、庫内空気温度を保冷温度レベルの基準にして冷却制御を行うのが一

〈注1〉商品熱負荷：庫内に搭載する商品を投入温度から提供温度まで冷却する際に、奪う必要のある熱エネルギー量の総和のことである。

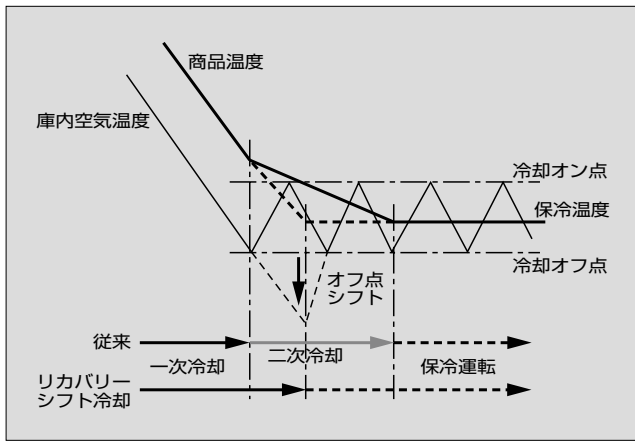


図4 リカバリーシフト冷却の概要

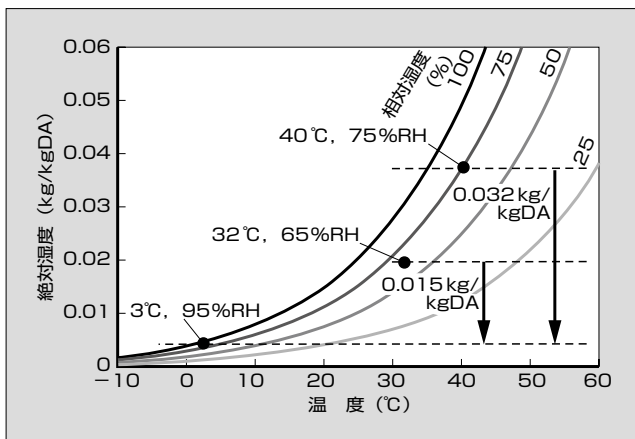


図5 湿り空気線図

一般的である。この場合、商品温度に対して庫内空気温度が先に冷えるため、商品が保冷温度に達する前にオン・オフ制御となり、間欠運転の二次冷却が開始されるため商品の冷却速度が遅くなり、商品保冷温度への到達時間が遅れる。

リカバリーシフト冷却では、商品温度を保冷温度まで下げる時間を短縮するため、冷却開始時の一次冷却においてオン・オフ制御の温度レベルを下方へシフトする制御を追加した。この制御により、オフ制御の検知を意図的に遅らせて空気温度を低く導き、一次冷却を持続して商品保冷温

度への到達時間を短くする。このリカバリーシフト冷却により、保冷温度への到達時間を従来の3時間から2時間20分に短縮した。

(2) 除霜運転の短周期化

図5に、湿り空気線図を示す。想定環境条件は、周囲温度40℃、相対湿度75%と高温・高湿環境であり、冷却安定時の3℃、95%との水蒸気量の差は、従来の基準である32℃、65%時のおよそ2倍になる。庫内室温が十分に低下すると、庫内の水蒸気はドレン水として排出されず、霜として蒸発器に付着し成長する。

この結霜現象により風の流路が妨げられ、蒸発器の熱交換効率は低下し、冷却能力を十分に発揮できない状態となる。そして、さらにフィン間が霜により閉塞（へいそく）状態になることで凍結が進むと、蒸発器が機能しないため庫内の冷却は行われない。また、冷却を停止して霜を融解する除霜動作の時間も霜の成長量に比例して長くなり、その間圧縮機が停止し、庫内の冷却が行われない。

この着霜の成長を抑止するため、除霜の間隔を短周期に調整し、除霜回数を増やすこととした。これにより、着霜の成長量を抑止するとともに、着霜による蒸発器の閉塞を回避し安定した冷却運転が可能になった。

4.3 着霜対策

(1) 着霜成長過程の確認

着霜の成長が著しいのは、蒸発器の排風側ではなく空気吸込み側であることが分かっていたため、空気吸込み側の状態を運転初期から安定運転状態に至るまで、小型カメラで撮影し観察した。図6に、蒸発器の空気吸込み側における着霜成長の様子を示す。

運転初期の庫内温度が比較的高い（15℃以上）状態であっても、上層部（冷媒入り口付近）には常に着霜があることが分かった。蒸発器の表面温度が氷点以下となり着霜したためである。

蒸発器は冷媒の入り口付近となる上層が最も温度が低くなり、下層の出口に向かうほど上昇する。庫内温度が高くなり、吸込み空気(注2)の温度が高い場合は、熱交換が行われて過熱度が大きい状態となり、着霜は上層のみに限定される。

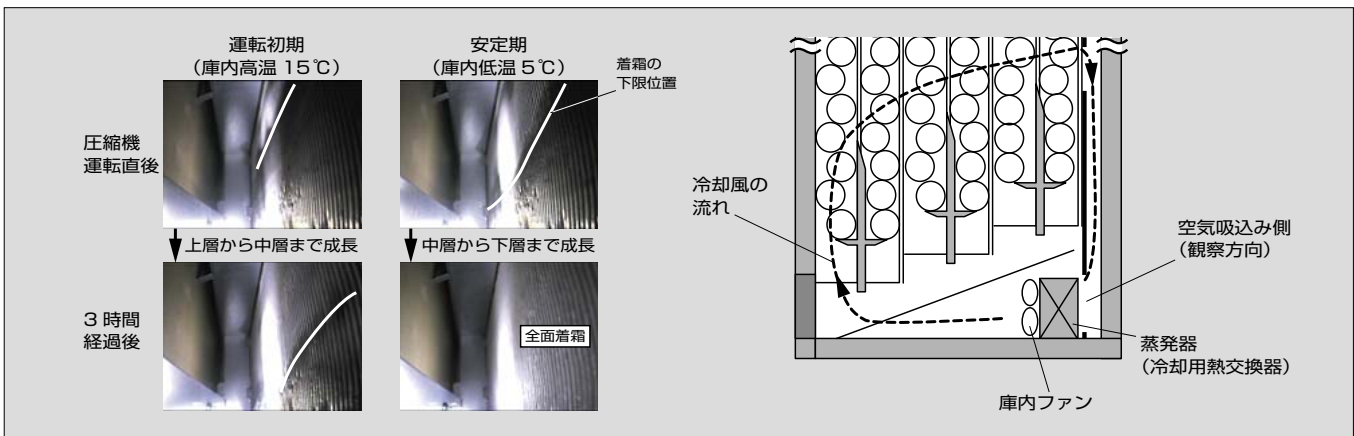


図6 蒸発器の着霜成長の様子

庫内温度の低下とともに過熱度が減少してくると、蒸発器の表面温度が上層部から徐々に均一化され、この温度変化に伴うように着霜成長範囲が拡大する様子が確認された。そして、着霜が空気吸込み面の全面に行き渡ると風量が落ち、さらに成長が加速して一気に閉塞状態まで進行する。

いったん閉塞状態に陥ると、除霜動作が行われるまで風の循環が失われ、熱交換が行われない。除霜時には霜が融解する間、蒸発器の温度は0℃に保たれる。その融解持続時間は着霜量に比例するので運転復帰が遅れ、庫内温度の上昇につながる。また、除霜動作により冷凍機の運転が停止すると、着霜状態から融解するが、安定期のサイクル運転においては全てがドレン水となって庫外へ放出されず、一部が庫内に水蒸気となってとどまる。この水蒸気が運転再開後に蒸発器の温度低下に伴い結霜し、従前の状態に復活することが分かった。

(2) 蒸発温度の下限抑制

前項で述べたように、庫内の循環空気温度の低下に伴い蒸発器の着霜は上層から下層へと進み閉塞へと至ること、ならびに除霜動作だけでは着霜量の制限ができないことが分かった。

一般的に、蒸発器は潜熱を利用して熱交換を行うのが最も効果的であり、過熱度が小さい状態での安定運転が望ましい。よって、着霜の成長が顕著とならない蒸発温度で庫内冷却を行うことが効果的であり、着霜の成長を決定する最も重要な要因は冷媒の蒸発温度のレベル調整にあると考えた。

着霜の成長の確認により、蒸発器のフィンの表面に結霜が急激に成長する温度（着霜温度）は-4.5℃付近であることが分かった。従来機では蒸発温度が-5.5℃に設定されていたため、庫内冷却が進むにつれて庫内温度が低温で安定し、着霜が全面に行き渡るため蒸発器の表面温度はより低下する。このため、表面温度は着霜温度を下回り、着霜の成長が加速されて空気吸込み側のフィンが閉塞状態に陥ることを確認した。

〈注2〉 過熱度：蒸発器内を流れる冷媒液は、熱を吸収して徐々に蒸気へと状態が変化する。この間は、液と蒸気が混ざって流れ、温度は蒸発温度のまま一定となる。全てが蒸発すると飽和蒸気となり、さらに熱の吸収が進むと過熱蒸気となって再び温度が上昇する。この蒸発温度からの温度上昇値を過熱度という。

本来、蒸発温度と吸込み空気温度の温度差が大きいほど冷却の熱交換が効率良く行われるが、あえて蒸発温度を2℃上昇させ、着霜温度を上回る-3.5℃に設定して確認試験を行った。その結果、着霜が全面に広がることなく、また着霜によるフィンの閉塞もなく、安定冷却まで初期冷却が行われることを確認した。補充復帰冷却においても同様にフィンの閉塞の発生は認められず、冷却完了時間が短縮する結果となった。これは、着霜量が低下し、相対的に蒸発器の熱交換効率が向上したためである。

この実験結果に基づき、蒸発温度レベルを-3.5℃に再調整を行った。この蒸発温度の下限抑制により着霜量を低減した。

4.4 評価結果

これまでに述べた冷却熱負荷の適切なコントロールと運転制御の最適化、および着霜対策によって、周囲温度40℃、相対湿度75%の環境下において、目標とした14時間に対して13.5時間での補充復帰冷却の完了を確認した。

5 あとがき

海外市場特有の高温・高湿環境へ対応したグローバル自動販売機の冷却技術を開発した。

今回の開発においては、周囲温度と庫内温度の大きな温度差による負荷の増大と、高湿環境から生まれる着霜現象の影響が大きな問題になることが分かり、対策を行って目標を達成した。

今後は高温・高湿環境下での冷却時間の達成だけでなく、より安定した効率的な運転を目指してさらなる改善に取り組む所存である。

参考文献

- (1) 一般社団法人 日本自動販売機工業会. “自販機普及台数及び年間自販金額” 2014年（平成26年）版. <http://www.jvma.or.jp/information/fukyu2014.pdf>, (参照 2015-06-15).



村瀬 孝夫

自動販売機の冷熱開発に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場設計第二部。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。