コンテナターミナルにおけるリーファー・コンテナの 蔵置時のルーフ・シェードの省エネ効果に関する研究

篠田 岳思¹・M. Arif Budiyanto²

Energy Saving Effect of Roof Shade for Reefer Container in Marine Container Terminal

Takeshi SHINODA and M. Arif Budiyanto

Abstract

The Kyoto Protocol came into effect in 2005, and actions for prevention of global warming are strongly desired in container terminals. Although energy saving will be significant impact on reduction in CO₂ emissions, electric power consumption by stored reefer container seems to make up about 50% of total power consumption in a container terminal. To reduce heat penetration on walls of reefer container by a load of strong solar insolation in summer will enable an improvement of energy consumption of reefer container. In this paper, we clarify the effect of reducing energy consumption of reefer container due to installing of roof shade that covers the reefer container storage yard to protect from solar insolation.

Keywords: Port facility, Cargo storage, Greenhouse gas, Reefer container, Energy-saving

キーワード: 港湾施設、貨物保管、温室効果ガス、リーファー・コンテナ、省エネ

1. 緒言

2005年の京都議定書の発効に伴い温室効果ガス削減目標が課され、温暖化防止に対する対策への取組が求められている。港湾からの温室効果ガスの排出としては、本船の停泊時や荷役オペレーションや港湾における物流活動がある。温室効果ガスの削減の取組として、博多港ふ頭の香椎およびアイランドシティ・コンテナターミナルでは、2010年よりRTGの電動化設備の推進や、ハイブリッド型ストラドルキャリアの試験的導入、リーファー・コンテナでの日除けのためのルーフ・シェードの試験的設置等が試行されている。本研究では、リーファー・コンテナの蔵置場所にルーフ・シェードを設置した際に期待される電力削減効果について検討する。

リーファー・コンテナは冷媒であるフロンを圧縮、凝縮、膨張、蒸発させてリーファー・コンテナ内の冷蔵・冷凍を行っている。このときの消費電力は、主に冷媒の圧縮を行うコンプレッサーによるものが大きい。冷凍コンテナの省エネ化には、冷凍機の改

良、運転方法の効率化、コンテナ外部から内部への熱侵入を抑制する必要がある。

これまでの研究においては、省エネ型のリーファー・コンテナの提案や研究がなされてきているが⁽¹⁾、リーファー・コンテナの熱侵入を抑制するための蔵置方法の検討はなされていない。また、外部日除けについては建築物の窓に対しての日射遮蔽性を扱った研究⁽²⁾があるが、リーファー・コンテナの蔵置場所での日除けの効果については、研究がなされていない。

本研究では、コンテナターミナルでの蔵置場所での省エネ性向上の見地から、主にリーファーコンテナの外部から内部への熱侵入の抑制対策として、博多アイランドシティ・コンテナターミナルに試験的設置に設置されたルーフ・シェードの省エネ効果を、リーファー・コンテナ6本を利用して、これにセンサー設置して計測による効果の把握を目指す。また、6本のリーファー・コンテナを用いて長期間に渡り計測することは蔵置場所の制約や実験費用の制

¹ 正会員 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地) shinoda@nams.kyushu-u.ac.jp

² 学生会員 九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 muhammad.arif.budiyanto.123@s.kyushu-u.ac.jp

Fig. 1 Layout of HICCT and experimental site for the roof shade

約もあることから、長期間を想定した際の省エネ効果の把握や、コンテナ・ターミナルが別の場所で蔵置された場合の把握や、ルーフ・シェード以外の別の手法での省エネ効果の推定ができるようにするために、温熱シミュレーションにより省エネ性の効果を把握できるように検討を進める。

2. 環境要因によるリーファー・コンテナへの温熱影響調査

2.1 ルーフ・シェードの設置と温熱影響調査の概要

Fig. 1 に博多アイランドシティ・コンテナターミナルの配置図を示す。このターミナルは水深 14m と 15 m に分けられた全長 680m 岸壁があり、総面積は 284,000m² ある。岸壁にはアウトリーチが 50m のコンテナ 18 コラム分のスパンがある 5 基のガントリークレーンが配置されている。また、蔵置場所は 19 レーンの内、2 レーンが冷凍コンテナ用に割り当てられており、総コンテナ蔵置数は 19,296 TEU あり、冷凍コンテナ用にプラグが 336 口用意されている。これらのレーンにはコンテナ 8 コラムのスパンの RTG(Rubber Tired Gantry Crane)、17 基が配備されて荷役を行っている。

このコンテナターミナルでは、多くの荷役機器を扱うため、これらの運用に伴う電力消費の削減は、省エネ推進の見地からも重要課題である。特に、リーファー・コンテナに関する電力消費量は消費電力全体の約 50% を占めており、夏季の電力ピーク時の消費電力の削減が求められている。

このため、2010 年より、新しい試みとして、リーファー・コンテナの蔵置場所である Fig. 1 に示す西側ベイの P39 および P41 の 3 段積み 2 ベイのリーファー・コンセント架台（計 48 コンセント）に、日除けのためのルーフ・シェードが試験的に設置され、効果の検証が社会実験として取り組まれている。ルーフ・シェードは省エネ効果があるものと期待されるものの、具体的な数値等の客観的な情報が不足している。このため、環境要因によるリーファー・コンテナへの温熱影響調査を実施した。

ルーフ・シェードの省エネ効果の把握には、ここでは、Fig. 2 に示すように、図中の赤色で示すリーファー・コンテナの供試体として、製造年月が近く、コンテナの性能に差が無い 6 本のコンテナを用いて、2 組の 3 段積みの組合せを作り、一方にはルーフ・シェード下に日射が抑制された状態として蔵置し、一方には通常の使用状態として屋外環境下の状態として蔵置を行い、これら 2 組みの供試体を蔵置場所のロットを R1、R4、R8 と移動させ温熱状態を変化させて、リーファー・コンテナの作動状態を比較することから検討を行った。

供試体コンテナの計測実験時の蔵置の様子を Fig.3 に写真で示す。Fig.3(a) は、従来の蔵置状態であるルーフ・シェードが無い場合にベイ H19 の南側ロット R1 に 3 段積みされている様子を示しており、Fig.3(b) はルーフ・シェードが有る場合にベイ P41 の南側ロット R1 に 3 段積みされている様子を示している。なお、コンテナの荷役時はシェードが折り畳まれて開閉が行われる。

Fig. 2 Concept of measuring experimentation on effect to reefer container by installing roof shade

(a) Condition without roof shade
(Bay:H19, Slot:R1)

(b) Condition with roof shade
(Bay:H41, Slot:R1)

Fig. 3 Photo of experimental units in the reefer container storage yard

(a) Arrangement of thermoelectric sensor on reefer container

(b) Solar insolation sensor

(c) Fixed base for solar insolation sensor

Fig. 4 Sensor units of measurement for environmental condition

リーファー・コンテナの暑熱環境下での蔵置には、日射や気温上昇、路面輻射、排熱部周りの温度上昇からリーファー・コンテナに大きな省エネ阻害要因が起こりうる。このため、環境要因の把握のために供試体にセンサーを設置し、暑熱環境下での冷凍機の作動状況について計測調査を行った。

Fig. 4は供試体コンテナへのセンサーの配置図を示す。Fig. 4(a)には熱電対の取付位置を示している。熱電対 (T 型 線径 1.6mm) はコンテナの内側の各

面の表面の中央部とコンテナ内部の中央部に取付け、コンテナ外側には各面の表面の中央部と外面から 100mm 離れた点にプラスチック製の治具を作り取付け、さらに、冷凍ユニット側には、給気口、排気ファン付近に取付け、1 台の供試体につき合計 19 点の温熱データを収集した。

Fig. 4(b) に日射センサー (ML - 020VM - 30、英弘精機社製) を示すが、これはリーファー・コンテナ各面の日射量を把握できるように、Fig. 4(C) に示

Fig. 5 Change of solar insolation during the day (on August 27th, 2013)

(a) The condition at 10:00

(b) The condition at 14:00

Fig. 6 Thermal influence to roof shade by solar motion (on August 27th, 2013)

す立体治具を製作して日陰にならないようにリーファー・コンセント架台の上方位置に設置した。また、リーファー・コンテナ上部への日射状況を把握するために最上部にも日射センサーを設置した。これらのセンサーからの信号はマルチデータロガー (CADAC3、江藤電子社製) に記録した。

また、簡易気象計 (Vantage View, DAVIS 社製) を事務所等屋上付近に設置し、計測当日の気象状況を把握した。さらに、リーファー・コンテナの消費電力量はクランプ型電力計 (クランプオンパワーハイテスタ 3169、HIOKI 社製) を用いて、電源回路の集まる配電盤内に設置してデータログし、各供試体コンテナの消費電力の状況を把握した。なお、供試体コンテナの庫内の設定温度は 0°C とし、省エネモードの冷凍機のオンオフ制御は解除した。

2.2 温熱影響調査によるルーフ・シェードの省エネ効果の推定

温熱影響調査による計測結果の概要について述べ

る。なお、雨天や、雲量が多い場合には日射状況が把握できないため、快晴の日を選んで温熱影響の分析を進めることとした。

Fig. 5 に 2013 年 8 月 27 日の日射量を計測した結果を示す。日の出は 5:49、南中は 12:20、日の入りは 18:51 であり、天気は快晴であった。この図によると、調査場所でのリーファー・コンテナの配置では、日の出後には、東面側から日射が注ぎ、南面、天井面、西面、北面へと移っていくことが分かった。

日射状況は、構造体の配置に関わるルーフ・シェードの形状やコンテナの蔵置状況等に伴い、コンテナへの日射状況が変化する。このため、いつ、どの面に、どのように日射が注ぎこむかを、把握することにより、日射影響と実験結果との関連性を把握する必要がある。この日射の特徴を把握するために、ここでは、同じ日の同緯度・同経度での日射状況を、CAD (Computer-Aided Design) にアドイン機能のある日照シミュレーションを実施して、コンテナへの日射状況を把握を把握する。シミュレーションを行っ

Fig. 7 Result of measuring experimentation on the top of reefer container in the condition without roof shade during the day

Fig. 8 Result of measuring experimentation on the top of reefer container in the condition with roof shade during the day

た結果を Fig.6 に示す。なお、シミュレーションは三次元 CAD のフリーソフトである Blender の拡張機能である Sun Position(3) を用いて作成している。この図によると、ルーフ・シェードのあるベイ P39 および P41 の南側にあたるスロット R1 では、日の出後に 13 時頃まで、リーファー・コンテナの南面全体に日射の直射影響があり温熱状態に影響を与え、さらに日没に掛けては、ベイ P41 の冷凍機のある西面全体に日射の直射影響があることが分かった。これらの日射状況の特徴は、現地でのビデオ観

測からも把握した。これらの日射状態は消費電力の効率に負の影響を与えることになり、ルーフ・シェードの設置には、リーファー・コンテナの蔵置場所の配置について考慮する必要があることが分かった。

供試体コンテナの南面や西面の温熱影響を排除して検討を進めるため、以降は快晴である 2013 年 8 月 27 日に、ルーフ・シェードの無い蔵置場所ではベイ H17 に蔵置し、ルーフ・シェードの有る蔵置場所ではベイ P39 に、それぞれスロット R4 に蔵置した場合の計測結果を示す。

Fig. 9 Change of temperature of vertical section on reefer container during the day (on August 27th, 2013)

Fig.7 に 3 段の供試体コンテナの最上段 (T3) について、ルーフ・シェードの無い場合の温度、消費電力、日射の経時変化を示す。この図によるとリーファー・コンテナの天井面への日射は、南面、天井面の温度上昇を引き起こす。このため、温度上昇が生じる時間内は、リーファー・コンテナの庫内の温度を一定に保つための消費電力は上昇する。

一方、Fig.8 に、3 段の供試体コンテナの最上段 (T3) について、ルーフ・シェードの有る場合の温度、消費電力、日射の経時変化を示す。この図によるとリーファー・コンテナの天井面への日射は、ルーフ・シェードにより遮られるため、南面、天井面の温度上昇は押さえられる。このため、温度上昇が生じる時間内は、庫内の温度を一定に保つための消費電力は僅かに上昇するものの、ルーフ・シェードが無い場合に比べると、消費電力はかなり小さい。なお、日射の急激なスパイクはコンテナ荷役のためにルーフシェードが開いた時に現れている。また、3 段目 (T3) の底側の温度は、2 段目 (T2) のリーファー・コンテナに影響を与えるが、ルーフ・シェードがある場合の方が、この温度が低いため、さらに消費電力の抑制に有効に働く。

段積み方向への温熱影響を調べるために、3 段の供試体コンテナを縦断する位置にある熱電対センサーとしてコンテナの上部、中間部を選び温度の経時変化を調べた。この計測結果を Fig. 9 に示す。ルーフ・シェードが無い場合 Fig. 9(a) に、ルーフ・シェードがある場合を Fig. 9(b) を示す。これらの図を比較すると、ルーフ・シェードがある場合には、最上段のリーファー・コンテナ (T3) の上部に位置する天井表面から 10cm の温度や、天井表面温度を下げる効果が見られ、これらの温熱影響は、下段側にも影響を与え、ルーフ・シェードがある場合と比較して、

全体的に低温状態にある。

さらに、南側から北側に掛けて日射状況が異なるため、ルーフ・シェードが無い場合 (ベイ H17) と有る場合 (ベイ P39) に、3 段積みの 2 組の供試体コンテナを蔵置スロットを R1、R4、R8 と移動しながら消費電力を調査した。なお、計測では、同じ日射条件とするために、日射条件に大きな違いが生じないように、快晴日を選びあまり日数を空けずに移動させて計測を実施した。

また、リーファー・コンテナの蔵置場所での消費電力の違いを比較するために、以下の方法を取る。スロット R4 はベイのリーファー・コンテナの各ベイの中央に位置するため、ベイの境界に当たるスロット R1 や R8 からの温熱影響が小さいため、ここをベイの代表的な位置とみなすことができる。さらに、ルーフ・シェードが無い場合 (ベイ H17) のスロット R4 の最上段 (T3) に蔵置されたリーファー・コンテナは、天井のみから日射影響を強く受けるため、この蔵置位置を代表値と見なし、ここでの消費電力を基準にして、各蔵置位置での消費電力を、次式に示す消費電力比 $REti$ として比較した。

$$REti = (ECti - EC34) / EC34 \times 100 \quad (1)$$

ここで、 t は各蔵置場所での段数、 i はスロット番号を示し、 $ECti$ は蔵置位置 t 、 i の消費電力を示す。

Table 1 に南中時刻に近い 10A.M.-11A.M. に掛けての $REti$ を示す。この表によると、ルーフ・シェードがある場合でも、蔵置が下段ほど消費電力が減少し、また、ベイ R8 側 (北側) に蔵置されるほど消費電力が減少する。さらに、ルーフ・シェードがある場合には、これらの傾向がより強まり、日射の影響の低いスロット R4、R8 は大きな効果が得られ、

Table 1 Evaluation for the effect of energy-saving on reefer shade

Storage condition	Date Slot Bearing	0818 R1 (South)	0827 R4 (Middle)	0905 R8 (North)	Average of tier	Weighed average of bay	(Unit: %)
Without roof shade	H17T3	5.62	0.00	-5.05	0.07		
	H17T2	-15.52	0.43	-4.74	-2.21		
	H17T1	-11.38	-15.15	-19.27	-15.19	-5.78	
	Average of slot	-7.09	-4.91	-9.69			
With roof shade	P39T3	2.29	-18.13	-23.45	-16.24		Total difference of bay -12.76
	P39T2	-17.13	-20.48	-23.83	-20.48		
	P39T1	-17.89	-18.23	-23.85	-18.89	-18.54	
	Average of slot	-10.91	-18.95	-23.71			

特にスロット R8 に蔵置された場合には顕著に効果が現れる。また、ルーフ・シェードがある場合でも南側に蔵置されるため日射影響のあるスロット R1 においても下段側であれば、ある程度の効果が得られていることが分かった。

2.3 ルーフ・シェードの省エネ効果の推定

ルーフ・シェードの省エネ効果の推定法として、ここでは、次の三つの方法について検討を行う。

(1) スロット R4 における省エネ効果の推定

ベイの中央に位置しベイの代表的なスロットである R4 に蔵置された場合に着目し、Table 1 の R4 に関わる消費電力比を用いて、ルーフ・シェードが無い場合(-4.91)と有る場合(-18.95)の差を取ると、ルーフ・シェードの省エネ効果が計算でき 14.04% が得られる。

(2) 重み付き平均による省エネ効果の推定

8 スロットのベイ全体の電力消費状態を評価するために、蔵置状態の異なるスロット R1、R4、R8 について、8 スロットの内、R2-R7 の 4 スロットが、内側のスロットにあるため、ここに蔵置された際の電力消費状態を R4 に蔵置された場合と同じであると仮定して、次式の重み付き平均である次式を用いて、蔵置場所全体の省エネ効果 TRE を把握する。

$$TRE = \sum_{i=1}^3 (RE_{t1} + RE_{t4} \times 6 + RE_{t8}) \quad (2)$$

この式を用いて、Table 1 の消費電力比を用いて、ルーフ・シェードが無い場合と有る場合の TRE を計算して、両者の差を取ることで、省エネ効果を計算すると 12.76% として推定することができる。

(3) 貫流熱量による省エネ効果の推定

建築環境工学の分野では、室内の冷暖房に関わる空調機の容量を設計する際に、熱貫流⁽⁵⁾の考え方

が用いられる。これは、壁体の内外の温度が長時間一定に保たれると壁体に流れる熱量が一定になるため、この熱量を計算すれば、空調機の容量を決定できるというものである。このときの壁体に流れる熱量を貫流熱量と呼び、次式で表される。

$$q = K(\theta_i - \theta_o) \quad (3)$$

ここに、K は熱貫流率であり次式で表される。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (4)$$

α_i は壁体で囲まれた内部の総合熱伝達率であり、 α_o は外部の総合熱伝達率であり、一般には、それぞれ 9 (W/m²K) および 23(W/m²K) を用いる。また、 λ_i は各壁材の熱伝導率であり、 x_i はその厚みであり、n は壁材の構成数である。計算によるとリーファークンテナの壁体の熱貫流率は 0.44 (W/m²K) として計算できる。

(3) 式を用いて、コンテナの各壁体の貫流熱量の総和を求めれば、コンテナ内側の温度を保つ際に必要な電力量になる。ベイの代表位置である R4 の各コンテナにおいて貫流熱量を計算し、ルーフ・シェードの無い場合と有る場合の貫流熱量比を省エネ効果とすると、13.25% と推定される。

上記の (1)(2)(3) によると数値は大凡一致しており、このことからルーフ・シェードの省エネ効果は 12% から 14% と推定できる。

2.4 省エネ効果の電力削減インパクト

ルーフ・シェードの導入の電力削減インパクトについて電力料金の観点から検討を試みる。

法人に関わる電力料金は大きく、基本料金、使用

料金、および2014年に新たに導入された使用量に応じて課金される再生可能エネルギー発電促進賦課金からなる。また、燃料費の変動に応じた燃料費調整額も可算される。ここでは簡単に削減インパクトを見積もるため、この調整額は考慮せずに、契約に関わり主に電力最大使用量に関わる基本料金と電力の従量料金のそれぞれの費用内訳から、次式による電力料金効果指数 CB によりルーフシェードの導入による電力削減インパクトの検討を行う。

$$CB = (Cb \cdot Eb + Cu \cdot Eu) \cdot Sr \quad (5)$$

ここに、 Sr はリーファークンテナのターミナル全体の消費電力割合である。ルーフシェードを設置したコンテナターミナル Sr の占める割合は大きく内部資料によると50%に上る。また、 Cb は基本料金の費用内訳、 Cu は従量料金の費用内訳であり、 $Cb + Cu = 100\%$ とする。内部資料により検討すると Cb および Cu はそれぞれ50%程度である。また、 Eb は基本料金を下げられる省エネ効果、 Eu は従量料金を下げられる省エネ効果とする。 Eb は最大使用量に関わると仮定できるため、前節で求めた省エネ効果である12.76%を仮定する。 Eu は従量に関わると仮定できるため、主に日中を仮定するものとして省エネ効果の半分として6.38%と見積もる。

これらを総合して計算を実施すると CB は4.79%として計算できる。九州地域では、梅雨時期を除く5-9月の夏季を含む期間にはこの効果が期待でき、また夏季の電力需要に課題となるピーク電力を下げられる効果も期待できる。

3. 温熱シミュレーションによるリーファークンテナの温熱環境の推定

ルーフシェードの効果を把握するために、リーファークンテナの温熱環境を推定するために温熱シミュレーションについて検討する。

3.1 温熱シミュレーションにおける熱影響要因

リーファークンテナの熱影響要因には、主に日射による輻射熱伝達、暖められた空気による対流熱伝達、リーファークンテナの筐体や断熱材の熱伝導、コンテナ庫内の対流熱伝達が主にある。また、ルーフ・シェードが吸収した熱をリーファークンテナ側に再輻射する熱影響を考慮する必要もあり、リーファークンテナ間の相互の熱の授受もある。これらの要因が重なり合い、リーファークンテナは複雑な温熱状態にある。

Fig. 10 に温熱シミュレーションを実施する際に熱影響要因が課題となる箇所を示している。これらの

各箇所について、本温熱シミュレーションモデルにおいて検討した構成材および熱移動の特徴について各Part毎に以下に述べる。

Part RS) ルーフ・シェード：構成材はキャンパスの布地である。熱移動については、強い日射の影響を受け、日射エネルギーを吸収し、布地内部では熱伝導により拡散する。また、ルーフ・シェード近傍の外気には対流熱伝達を考慮し、ルーフ・シェードが吸収した熱エネルギーはコンテナ天井壁体や側面壁体に再輻射する。

Part CW1, CW2) リーファークンテナの天井部壁体：構成材は外壁材にアルミ合金のパネル材であり表面に白色系塗装がなされている。内壁材は無塗装のステンレスのパネル材である。両壁材が囲う内部空間には断熱用のポリウレタンが充填されている。熱移動については、CW1 の場合には、外壁材は日射エネルギー、ルーフ・シェードからの再輻射エネルギーを吸収し、壁体内部に熱拡散する。また、外壁材近傍の外気には対流熱伝達と、外部への輻射熱伝達を考慮する。一方、コンテナ内部の空気には壁体との対流熱伝達と内部壁面への輻射熱伝達も考慮する。CW2 の場合には、外壁材については、外壁材とコンテナ底部壁体の輻射熱伝達とこれらの間の空気との対流熱伝達を考慮する。

Part SW1, SW2) リーファークンテナの南側、北側側面の壁体：構成材と熱移動は天井部壁体と同様であるが、熱移動について、外壁材の輻射の影響はルーフ・シェードに加え、日射により暖められた路盤表面からの影響も考慮する。

Part SW3) 相対するリーファークンテナの壁体：構成材と熱移動は天井部壁体と同様であるが、熱移動について、外壁材は相対するコンテナの輻射熱伝達、コンテナの間の空気との対流熱伝達を考慮する。

Part BW1, BW2) リーファークンテナの底部壁体：構成材は、内壁材にはアルミ合金を押し出し成形された断面形状がT字の型材が用いられ、底部の外壁材にはコルゲート状のアルミ合金が用いられ防熱塗装がなされており、両壁材の囲う内部空間にウレタン材が充填されている。計算では壁体の形状は考慮せず当価な板厚に置き換える。熱移動については、壁体内では熱拡散、底部壁体から下段側のコンテナ天井部壁体への輻射、両壁体間の空気との対流熱伝達を考慮する。なお、最下段のコンテナでは、底部壁体と路盤表面との輻射熱伝達と、両材間の空気との対流熱伝達を考慮する。

Part FP1, FP2) リーファークンテナ足元材：構成材は側面の壁体の一部を足元材とみなす。熱移動は、輻射の影響はルーフ・シェードに加え、日射に

Fig. 10 Consideration of heat affected part

より暖められた路盤表面からの影響も考慮する。足元材、コンテナ天井部壁体、底部壁体、路盤表面との輻射熱伝達と、空気との対流熱伝達を考慮する。

Part RB1, FB2) 路盤：構成材はリーファ・コンテナ蔵置ヤード内部の路盤はコンクリート、蔵置ヤード外部の路盤はアスファルトとする。熱移動については、路盤が日射エネルギーを吸収し、路盤内部では熱拡散する。路盤近傍の空気には対流熱伝達を考慮し、路盤が吸収した熱エネルギーはコンテナ側面の壁体に再輻射する。また、暖められた路盤を通してコンテナ底部壁体に熱が伝わるため、路盤とコンテナ底部壁体との間の輻射熱伝達と、両材間の空気の対流熱伝達を考慮する。

ここでは、これらの熱影響要因を考慮した流体固体熱連成モデルとしてリーファ・コンテナの温熱シミュレーションモデルを構築してシミュレーションにより省エネ効果について検討する。なお、計算量が膨大になるために、温熱シミュレーションでは熱影響要因を主に検討するために、リーファ・コンテナの代表面として中央断面をとり2次元モデルとして検討する。

3.2 温熱シミュレーションモデル

温熱環境評価のための温熱シミュレーションについて、前節で述べた熱影響要因を考慮して、2次元モデルとして検討を行う。ここでは、計算領域を、リーファ・コンテナの内・外部にある空気の流れと、リーファ・コンテナの構造を構成する内外材、断熱材等の部分に分けて、相互の熱の授受を考慮した流体固体熱連成モデルとして解析を進める。解析には汎用流体解析ソフトのPHOENICS(CHAM-Japan社)を用い、有限体積法⁽⁴⁾により数値解析を進める。

計算で考慮する支配方程式は次のように構成す

Fig. 11 Model of calculating area

Table 2 Physical values for calculation

Properties of Air		Unit
Density	1.22	(kg/m ³)
Velocity	0.3	(m/s)
Specific Heat	1.006	(kJ/kgK)
Thermal Conductivity		(W/mK)
Aluminum	204	
Poly-urethane	0.03	
Stainless steel	16	
Roof Shade	0.84	
Road	1.13	

る。連続の式は次式で表せる。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (6)$$

次に、運動方程式（ナビエ・ストークス方程式）は次式で表せる。

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + f_B \quad (7)$$

また、エネルギー保存式は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \int_V \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) dV \\ = \int_V k \nabla^2 T dV + \int_S (q_R + q_S) dS \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{v}$ は気流速ベクトル（2次元成分）、 p は静圧、 ρ は密度、 T は気体および固体の温度、 t は時間、 k は熱拡散係数、 μ は粘性係数を示している。

なお、ここでは、(7)式では、乱流にはk-ε乱流モデルを考慮し、外力の項である f_B には、流体の冷温熱による浮力を考慮するために、次式に示す熱膨

Fig. 12 Change of temperature of measuring experimentation and its simulation in the condition without roof shade during the day

Fig. 13 Change of temperature of measuring experimentation and its simulation in the condition with roof shade during the day

張による密度の変化を温度の変化として近似するブシネスク近似を用いる。

$$f_B = -\Delta\rho g = -\rho_0\beta(T-T_0)g \quad (9)$$

ここに、 β は熱膨張係数、サフィックス0は基準密度と温度を示している。

さらに、(8)式においては、日射には各緯度経度についての運行と日射量を算出するPHOENICSのライブラリであるGX SUNを用いるが、ここでは、実測した日射量を組込むこととして、 q_s として式中に考慮する。また、路面や他のリーファ・コンテナからの輻射、ルーフ・シェードからの再輻射影響を考慮するために、次式の q_R を用いる。

$$q_R = \varphi\epsilon_R\epsilon\sigma(T_R^4 - T^4) \quad (10)$$

ここに、 φ は形態係数、 ϵ は放射率、 σ ステファン・ボルツマン定数を示し、サフィックスなしは輻射を受ける側、サフィックスRは輻射側を示している。

また、(7)式においては、流体部であるコンテナ内外部の空気は左辺にて考慮し、固体部であるコンテナの構造体は右辺を考慮する。輻射のある固体境界と流体の連成には、Immersed solid法を用い、流体・固体部の両者を考慮する。

計算領域はFig. 11に示すように、大きさは幅23m x 高さ20mの領域に、2組の3段積み供試体コンテナの構造体の寸法を図面から読み取り配置する。計算では構造格子を適用し、計算を安定化させるためにスタガード格子を用い、周囲の境界はディリクレ条件を考慮している。メッシュ数は130x168であり、用いた物性値はTable 2に示している。

3.3 温熱シミュレーション結果

Fig. 12 には、2015 年 8 月 27 日に、ルーフ・シェードの無い場合について、供試体コンテナの温熱影響調査を実施した際のコンテナ外表面の温度の経時変化と、そのシミュレーション結果を示す。図には最上段のコンテナ (T3) について示している。当日の日の出の時刻は 5:48 であり、南中は 12:20、日没は 18:51 である。日の出後、日射量の上昇と共に、徐々に気温が上昇し、それに伴いコンテナ外表面の温度が上昇していく。日射量の上昇と共に南側、天井部、北側、底面の外表面の温度が上昇し、12 時頃には天井部は 54℃に達する。これ以降は、水平部の日射量の減少とともに、南側、天井部の外表面温度は減少するが、西側、北側へは引き続き日射からの温度影響があり緩やかに上昇し、5 時頃まで 30℃程度の高温状態が続く。シミュレーションでもこの傾向を良く捉えている。

一方、Fig. 13 には、2015 年 8 月 15 日に、ルーフ・シェードの有る場合について、供試体コンテナの温熱影響調査を実施した際のコンテナ外表面の温度の経時変化と、そのシミュレーション結果を示す。図には同様に最上段のコンテナ (T3) について示している。当日の日の出の時刻は 5:40 であり、南中は 12:23、日没は 19:06 である。日の出後、日射量の上昇と共に、徐々に気温が上昇し、それに伴い、コンテナ外表面の温度が上昇していく。温度の経時変化の傾向は、ルーフ・シェードが無い場合と同様で有るが、天井部は 12 時頃でも 38℃程度、南側でも 36℃程度であり、ルーフ・シェードが無い場合と比較して、これらの温度は低い状態にある。また、天井部は 14 時頃に 41℃に達するが、これは、日射の差し込みによるものと考えられる。これ以降は、水平部の日射量の減少とともに、南側、天井部の外表面温度は減少し、西側、北側の温度も下降に向かう。シミュレーションでもこの傾向を良く捉えている。

次に、上記の結果を踏まえて、ルーフ・シェードの無い場合と有る場合の省エネ効果をシミュレーションにより検討を試みる。

2015 年 8 月 27 日のルーフ・シェードの無い場合の温度変化と、2015 年 8 月 15 日のルーフ・シェードの有る場合の温度変化は、両日の日射状況が異なることが考えられるため、これを 2015 年 8 月 15 日の日射状況として共通にして、シミュレーションにより温度の経時変化を求め、3 章 (3) で述べた貫流熱量によりルーフシェードの省エネ効果を推定する。計算によると、省エネ効果は 10.95% が得られた。また、2015 年 8 月 27 日の日射状況を共通にして、

シミュレーションにより、省エネ効果について計算をすると 10.34% が得られ、これまで計測に検討した省エネ効果値に近い値が得られ、リーファークンテナの温熱シミュレーションでもある程度の省エネ効果の推定が可能であることが分かった。

4. 結言

コンテナターミナルでのリーファークンテナの日射下の蔵置について、ルーフ・シェードの遮熱効果による省エネ効果について計測調査とシミュレーションにより検討し、次のことが明らかになった。

ルーフ・シェード下の蔵置について、日射状態のシミュレーションを試みた。これによると今回の配置では南側面に日射が差し込む状況が現れ、蔵置場所の配置によってもルーフ・シェードの効果は変わることが分かった。

ルーフ・シェードの省エネ効果の推定法を提案し、実測値を元に算定したところ、12% から 14% 程度の省エネ効果を確認した。

また、リーファークンテナの温熱シミュレーションを試み計測値と比較した。これによると、日射状態でのルーフ・シェードが有る場合と、無い場合のリーファークンテナの温熱状態はシミュレーションにより大凡計測値を捉えることができ、貫流熱量により省エネ効果を推定できることを確認した。

今後はさらにシミュレーションの精度を向上して、他の省エネ対策の検討や効果の評価についての検討を進める計画である。

謝 辞

本研究は九州大学と博多港ふ頭株式会社の共同研究により実施された。博多港ふ頭株式会社には計測には多くの協力を頂いた。ここに謝意を示す。

参 考 文 献

- (1) 羽根田 誠 他：船用冷凍コンテナの環境対策・省エネルギー新技術、マリンエンジニアリング Vol. 45 号 No. 3、pp.316-320、2010.
- (2) 池尻 篤彦他、外部日除けによる日射遮蔽性能の実測と分析、環境工学学術講演梗概集、D-2、pp.1237-1238、2010.
- (3) Sun Position、http://wiki.blender.org/index.php/Extensions:2.6/Py/Scripts/3D_interaction/Sun_Position、(2016/01/27 アクセス).
- (4) スハス V. パタンカー：コンピュータによる 熱移動と流れの数値解析、森北出版、2009.
- (5) 田中 俊六 他、建築環境工学、井上書院、pp.194-195、2008.