

一般論文

リーファーコンテナによる冷凍冷蔵貨物の混載に関する研究

小日向 理 早*、渡 邊 豊**

Study of Consolidated Storage of Refrigerated Cargo and Fresh Cargo in a Reefer Container

Risa KOHINATA* and Yutaka WATANABE**

近年、クール宅配便の出現により冷凍冷蔵貨物の多品種少量物流のニーズも高まってきた。多品種少量物流の効率化には混載による輸送や保管が欠かせない。そこで本研究は、既存の一般的なリーファーコンテナ（陸上設置保管庫用途）を用いて、庫内に間仕切りを設けて、併せて外気をわずかに取り入れることにより、一つのリーファーコンテナ内に異なる温度空間を創出することが可能であるかを、実験により検証する。さらに、当該実験より得られたリーファーコンテナ内の時系列温度データに基づいて、冷凍機の設定温度と外気温の二つのみを入力データとした、リーファーコンテナ内各部の温度推定式を構築する。そして、その推定式に基づき、冷凍貨物と冷蔵貨物をリーファーコンテナ内に混載し、両貨物の品質を維持できる保冷温度を実現する検証実験を行う。本研究の実験と温度推定式によって、特に、リーファーコンテナの奥側空間を冷凍空間に、リーファーコンテナの手前側空間を冷蔵空間にできることで、既存の保冷インフラによっても冷凍貨物と冷蔵貨物の混載を実現できる可能性を示すものである。

In recent years, variety of refrigerated and fresh cargoes have been consolidated on a specially designed truck of home delivery services in which compartments are separated with different temperatures. Regarding the need of the consolidation in cold supply chain, the authors conduct experiments by which two different temperatures of spaces are created in a reefer container by partitioning in the center of the container and taking in open air. A model of estimating temperatures in the container is formulated according to measurement of the experiment. Under the estimated temperatures of the model, the authors conduct a proof experiment by which a frozen cargo and a fresh cargo are stored in the container and investigate that quality of the cargoes are preserved. Results of the research indicate that ordinary reefer containers may be utilized for consolidating cargoes that need to control temperature differently in cold supply chain.

キーワード：低温物流、混載貨物、貨物の品質維持、温度管理、熱量

Keywords: cold supply chain, consolidated cargo, preservation of cargo, control of temperature, quantity of heat,

* 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6).

**連絡者(Corresponding author), 東京海洋大学, Tokyo University of Marine Science and Technology 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan,

TEL:03-5245-7370, FAX: 03-5245-7370, Email: ywatana@kaiyodai.ac.jp

1. 緒言

近年、冷凍/冷蔵の両空間を一つの庫内で実現できる保冷専用車が大手宅配業者により実現されている¹⁾。しかしながら、このような特注の専用設備の導入には多額の設備投資が必要になるため、スーパーやコンビニなどの短期保管多頻度出庫が常態化する中小零細企業において実現することは難しい。そこで、本研究では既存の一般的なリーファーコンテナを用いて、庫内に間仕切りを設けることにより、一つのリーファーコンテナ内に異なる温度空間を創出することが可能であるかを実験により検証する。さらに、当該実験より得られたリーファーコンテナ内両部の時系列温度データに基づいて、庫内の設定温度と外気温の二つのみを入力データとしたリーファーコンテナ内各部の温度推定式を構築する。そして、その推定式に基づき、冷凍貨物と冷蔵貨物をリーファーコンテナ内に混載し、両貨物の品質を維持できる保冷温度の検証実験を行う。

なお、本稿では特に断らない限り、コンテナとはリーファーコンテナのことを示すものとして記載する。

2. 異なる温度空間を創出する実験

2.1 実験概要

既存のリーファーコンテナの中央に間仕切りを作り、冷凍機を稼働するとともにコンテナのドア部にわずかな隙間を設けて、ドア部において外気の取入れとコ

ンテナ内部の空気の排気を可能にする²⁾。間仕切りの奥側の空間は冷凍機の冷気に直接冷やされるが、間仕切り上部から流入する手前側空間の温度に影響を受けた気流とも混合する。同様に手前側の空間も外気に直接温められるが、間仕切り上部から流入する奥側空間の温度に影響を受けた気流とも混合する。このように、間仕切り上部の空間に、奥側と手前側のそれぞれの空間の温度を調和させてバランスを保つ役割を持たせる。これらの様子の側面から見たイメージが Fig. 1 である。

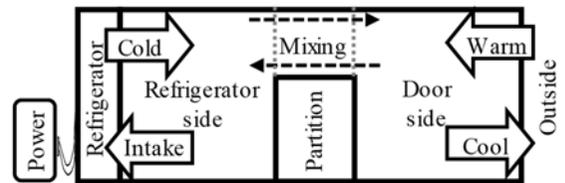


Fig. 1 Side view image on separation of spaces in the container

2.2 実験目的

庫内の設定温度と、間仕切りと庫内の天井部との開き具合を調整させることで、コンテナ内に 2 つの異なる貨物保冷温度を創出する。例えば、奥側空間を冷凍食品向けに氷点下とし、手前側の空間を野菜・果物類保冷用に涼温にする等を実現する。保冷開始後から時系列による温度差創出のイメージを Fig. 2 に示す。

なお、ドア部に設ける隙間は、気温や風圧変動による影響を最小限にとどめる目的で、コンテナのドアのロックハンドルを解いた状態で自然に生じる最小の

隙間幅である約 3cm に保った。その様子を Fig. 3 で示す。この隙間により生ずるドア部の通気面積は、コンテナのドアを全開にした場合の面積の約 1.30% である。

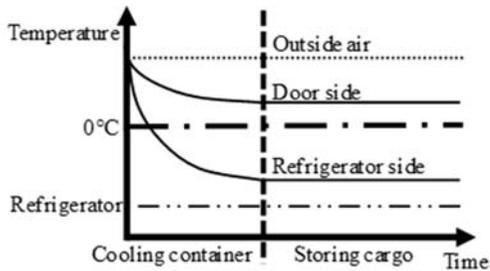


Fig. 2 Creation of different temperature in a refrigerated container



Fig. 3 The minimum opening onto a door of container when unlocked (approximately 3cm)

コンテナのドアを開封した状態で運用することは、通気を必要とする貨物には一般的に行われていることであるが、開放しているドア部に第三者・物にぶつかり事故とならぬよう安全対策を施す必要がある。本実験でも、開放するドアには強風下にさらされても切れぬ強度を有するワイヤーを括り、上記隙間値以上はドアが開かない安全対策を実施した。なお、陸上設置保管庫用途に用いられるリーファー

コンテナには、一般的に、国内用途限定のもの、カスタムメイドの当該用途用、国際物流にも用いられる海上コンテナ等、様々なタイプがあり個々にドアの開口部の位置や構造は相違する。Fig. 3 は、本研究で用いた海上コンテナの例である。したがって、通風の仕組みや構造は、各種コンテナの態様に合わせて工夫がなされる必要がある。

2.3 実験方法

最初に、40ft のリーファーコンテナ内に間仕切りを設ける。間仕切りに用いる部材は、空気を遮ることができればよく特に制限はない。本研究では、コスト削減と環境貢献を鑑みて使用済み無用となった段ボール箱を間仕切りに用いる。次に、コンテナのドアは通気のために、上述のとおりドアロックを解いた状態での最小の開放幅（約 3cm）を開けた状態にした。この条件にて、冷凍機により庫内を冷却した。

Fig. 1 より冷凍機側の空間をコンテナの奥側とし、ドア側の空間をコンテナの手前側とした。またコンテナ内部の各空間およびコンテナ外部において、温度計を用いて 1 分ごとに温度の計測データを集積し比較する。この際に庫内空気の温度計については、コンテナ床部の金属の影響を受けないようにするために段ボール箱の土台の上に設置した。冷却時間は、日中に最高気温を生じる時間帯を経るこ

とができるよう 13 時 00 分から同日の 16 時 00 分に定めた。ここで間仕切りと天井部の開き具合を 8cm、44cm、60cm の 3 通りに加え、冷凍機の設定温度も -6°C、-11°C、-21°C の 3 通りで試行し、合計 9 パターンの実験を行った。この実験パターンの識別を Table 1 で示す。

**Table 1 Pattern of the experiment
(Temperature of the refrigerator, Height above the partition)**

Temperature of refrigerator	Height above the partition		
	8cm	44cm	60cm
-6°C	(-6, 8)	(-6, 44)	(-6, 60)
-11°C	(-11, 8)	(-11, 44)	(-11, 60)
-21°C	(-21, 8)	(-21, 44)	(-21, 60)

2.4 実験に使用した機材

実験に使用した機材は下記のとおりである。

- ・ 40feet リーフアーコンテナ
- ・ 温度計…3 個
- ・ 段ボール箱

- (i) 間仕切り用…40 個
- (ii) 調整用…4 個
- (iii) 温度計の設置用…2 個

2.4.1 40feet リーフアーコンテナ

実験に使用した 40feet リーフアーコンテナは、下記及び Fig. 4 のとおりである。

- ・ 製造会社：Shanghai Reeferco Container Co., Ltd

- ・ 冷凍機：三菱重工業株式会社製
- ・ 庫内温度の設定範囲：-30°C～+25°C
- ・ 外寸：H 2.896m, W 2.438m, L 12.192m
- ・ 内寸：H 2.548m, W 2.290m, L 11.588m
- ・ ドア開口部：H 2.569m, W 2.294m



**Fig. 4 A 40feet reefer container utilized for the experiment
(The circle symbol is the placement of a thermometer.)**

Fig. 4 の○枠部は、次項に示す温度計を設置した場所を記している。

2.4.2 温度計

実験に使用した温度計は下記及び Fig. 5 のとおりである。



**Fig. 5 A thermometer utilized for the experiment
(WATCH LOGGER, KT-255U, Fujita Electric Works, Ltd, 2018)**

この温度計を用いた理由としては、温度の測定範囲が $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ と広く防水機能付きで、外形寸法が H 34mm, W 90mm, D 15mm と小型であり、測定誤差は $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ であるため精度が高いと判断したためである。測定間隔は 1 分~255 分に調整でき、温度の分解能は小数第一位までである。本研究は、温度変化を正確に得る目的で 1 分間隔に設定した。温度計をコンテナの外部に設置する際は、Fig. 4 で示したコンテナの○枠部において、Fig. 6 のようにコンテナと地面の隙間に温度計を土台石の上に設置した。これは直射日光と風雨やコンテナのドア開口部からの冷気の影響を受けないようにするためと、軽量の温度計が外乱により移動しないようにするためである。



Fig. 6 A thermometer placed outside under the container attached on a stone

2.4.3 段ボール箱

実験に使用した段ボール箱は下記及び Fig. 7 のとおりである。

段ボール箱は、間仕切り用を 2 種類と上記の温度計の設置用を用意した。

(i) 間仕切り用使用済み段ボール箱

外形寸法は、H 52.5cm, W 42.5cm, D 61cm の A フルートである³⁾。坪量は $778.7(\text{g}/\text{m}^2)$ であり、表ライナ・中芯・裏ライナを含めて算出している⁴⁾。箱形式については A 式段ボール箱である³⁾。ここでは間仕切り用として扱ったため、箱の中には何も入れずに利用した。

(ii) 上部開き調整用使用済み段ボール箱

外形寸法は H 18cm, W 120cm, D 18cm の B フルートである³⁾。坪量は $641.1(\text{g}/\text{m}^2)$ であり、表ライナ・中芯・裏ライナを含めて算出している⁴⁾。箱形式についてはポスター式段ボール箱である³⁾。こちらも(i)と同様に中には何も入れずに利用した。

(iii) 温度計の設置用使用済み段ボール箱

コンテナ床部が金属であるため、庫内の気温を測る目的の温度計に床部の金属温度が影響しないよう考慮し、段ボール箱の上に温度計を置いた。使用した段ボール箱の外形寸法は H 28cm, W 46cm, D 29cm の厚紙である³⁾。坪量は $1041(\text{g}/\text{m}^2)$ であり、表ライナ・中芯・裏ライナを含めて算出している⁴⁾。この段ボール箱はコンテナの奥側と手前側でそれぞれの空間の中心に設置した。

(i)と(ii)を用いた段ボール箱の積み方は、天井と間仕切り上部の段ボール箱の間の開きが 8cm、44cm、60cm の 3 パターンである。

ここで Fig. 7 では、左側に間仕切り用の段ボール箱とコンテナの内壁との隙間が生じているように見えるが、Fig. 8 (コ

ンテナを上から見た透視図) に示すとおり
に間仕切り構成の用の(i)および破線で
示す(ii)の段ボール箱を交差させて配置し
ているため、奥側と手前側の空間は間仕
切られている。



Fig. 7 A condition of the partition and the placement of the thermometer (Circle symbol)
{The partition for the experiment patterns of (-6, 8), (-11, 8), (-21, 8) in Table 1}

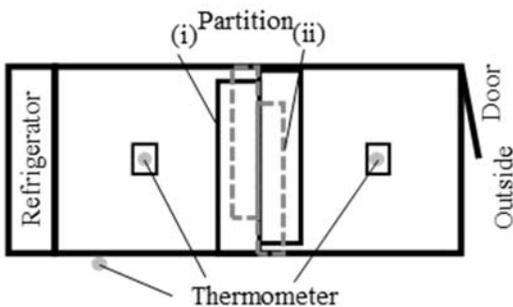


Fig. 8 Vertical view image on inside the container

3. 異なる温度空間創出実験結果

3.1 温度計測データ

Table 2 は、温度計から取り込んだ温度データを、温度計測場所別に整理したものである。温度の実測値は、13時00分から16時00分までを、前述の2で説明したとおり1分ごとに記録されている。

Table 2 A part of measurement of temperature {Pattern (-21, 8) in Table 1, Unit: °C}

Time	Place of measurement		
	Refrig.	Door side	Outside
13:00	17.5	18.6	18.2
13:01	15.9	18.2	17.8
13:02	14.3	17.9	17.4
13:03	12.6	17.5	17.4
13:04	11.1	17.2	17.1
13:05	9.8	16.8	16.8
~~~~~			
15:56	-20.1	-10.1	15.1
15:57	-20.3	-10.2	15.1
15:58	-20.6	-10.2	15.0
15:59	-20.5	-10.2	15.0
16:00	-20.3	-10.3	15.0

#### 3.2 庫内定常温度の測定

前述の2で示したTable 1の実験パターンごとに温度計測データをTable 2の様式に整理し、奥側空間と手前側空間の温度がほぼ下げ止まった16時の時点を実験終了と定め、その時点の各空間の温度を定常温度と定義しグラフ化した。そのイメージを示したのがFig. 2の縦点線の位置である。Fig. 9は実験パターン(-6, 8)、Fig. 10は実験パターン(-6, 60)、Fig. 11は実験パターン(-11, 60)の測定結果である。

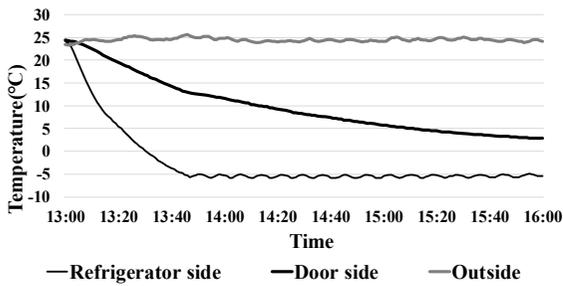


Fig. 9 Time series variation of temperature under the pattern (-6, 8) in Table 1

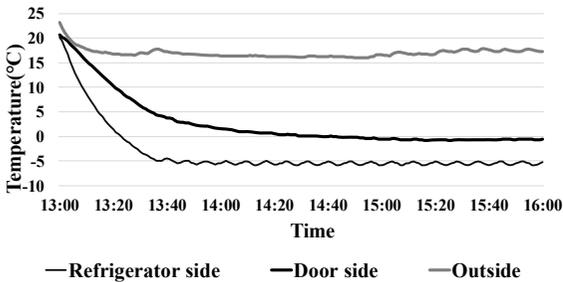


Fig. 10 Time series variation of temperature under the pattern (-6, 60) in Table 1

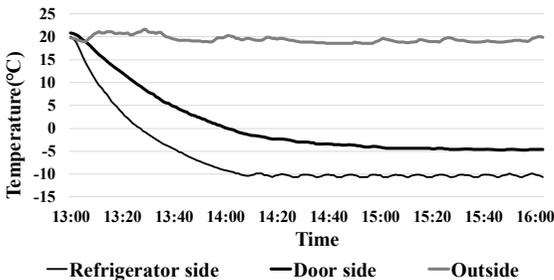


Fig. 11 Time series variation of temperature under the Pattern (-11, 60) in Table 1

庫内の設定温度にもよるが、奥側空間の温度は冷却開始からほぼ 1 時間程度で定常温度に到達する。奥側空間は手前側の空間よりも冷却器からの冷気により大きな影響を受けるため、定常状態でも温

度は冷却制御の影響により一定の範囲内で温度の上昇と下降を繰り返す。

手前側の空間は、庫内の設定温度のみならず間仕切り上部の開口部、そして、外気にも影響を受けて、2 時間から 3 時間ほどで定常状態に達している。

なお、実験条件を整合するためすべての実験パターンにおいて 16 時に計測を終了した。そのため、Fig.9 における手前側空間については定常温度に到達する手前であった時点とも考えられるが、指数減衰の温度低下の傾向から判断すれば、ほぼ定常温度の近傍に到達していると判断できる。

### 3.3 庫内定常温度の測定結果

Table 3 は、温度計測位置、庫内の設定温度、間仕切り上部の開き具合別に、すべての実験パターンにおける 16 時の計測終了時点の庫内の定常温度ならびにその時点の外気温をまとめたものである。

Table 3 Results of the measurement of temperature at the end of experiments (Unit: °C)

		Temper. of refrig.	Height above the partition		
			8cm	44cm	60cm
Places of measurement	Refrig. Side	-6	-5.5	-5.9	-5.8
		-11	-10.8	-10.1	-10.6
		-21	-20.3	-20.1	-14.3
	Door side	-6	2.9	1.5	-0.7
		-11	0.0	-1.4	-4.6
		-21	-10.3	-12.1	-6.9
	Outside	-6	24.2	28.9	17.5
		-11	20.3	25.1	19.9
		-21	15.0	18.5	18.1

Table 3を見ると、奥側空間ではすべてのパターンで氷点下となり、かつ冷凍食品長期保存推奨値（ $-15^{\circ}\text{C}$ 以下）を達成できたパターンもある。一方、手前側空間では、野菜青果類から氷温に適する温度の創出ができたパターンもある。しかしながら、両者を同時に達成するには至らなかったパターンもあり、今後の課題である。

本実験は、2018年の5月から10月にかけての半年間に行った。そのためTable 3に示された外気温の計測結果は、最低 $15^{\circ}\text{C}$ 、最高 $28^{\circ}\text{C}$ 、平均 $20.8^{\circ}\text{C}$ 、そして、標準偏差 $4.13^{\circ}\text{C}$ となった。よって、本実験は、春から夏を超えて秋の外気温帯には適応できると考えられる。しかしながら、冬期においても本実験の想定が妥当であるかは未定であり、今後の課題となる。

なお、陸上設置型の保冷库は、一般的に移動が容易ではないため設置時点において直射日光の影響が少ない建屋脇等に設置されることが多い。本研究で用いたコンテナは、7階建てのビルの脇の静穏な環境に設置されている。この環境において、本実験計測時間帯がコンテナに直射日光が照り続ける時刻に該当する。そのため、どの実験パターンにおいても外気温は、庫内の温度より十分に高く計測終了時刻まで維持された。

#### 4. リーファーコンテナ内の熱量モデル

##### 4.1 温度が定常状態の熱量モデル

一般的にリーファーコンテナは、コン

テナ壁面が断熱構造となっていることに加えて冷凍機が絶えずコンテナ内を設定温度近傍に維持する機能を有している。一つの室内が、熱平衡によって定常な一つの温度に維持されるという現象については、例えば、紺野ら⁵⁾が論じている。これに対して本研究は、コンテナ内の一つの空間内に、二つの異なる定常な温度を有する空間が、相互に連結された状態で存在する、という議論である。そこで、本研究では、Fig. 1に示した本研究の実験方法に合致するコンテナ内の定常熱量モデルを考えることにする。

温度が定常状態の熱量とは、物体の量（重さや体積）にその物体が保つ温度を乗じた値で示すことができる⁶⁾。ここで、Fig. 1の各温度と空気の流量を定式化して示した側面図がFig. 12である。まず、コンテナの奥側の空間を例にとって定常な温度状態を説明する。

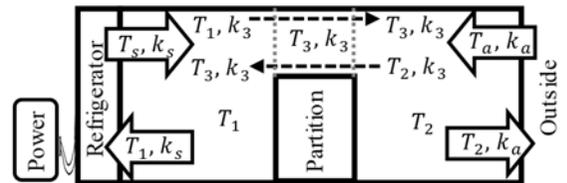


Fig. 12 Side view image on a model of creating different temperature in a refrigerated container

- ① 庫内の設定温度 $T_s$ の空気が、単位時間に $k_s$ の体積で冷却器からの冷気の吹出口から奥側空間に入り込んでくる。ここで、奥側の空間全体の

体積は固定であるから、同様に $k_s$ の量の空気が、奥側の冷凍機の吸入口に吸い込まれていく。

- ② ①と同様に、間仕切り上の空間から $T_3$ の温度の空気が $k_3$ の量で、奥側の空間に流入してくる。間仕切り上の空間の体積は変わらないから、後述の③で示す $T_1$ の温度の空気が $k_3$ の量で、奥側から間仕切り上へと流出する。
- ③ 上記①②により $T_s$ と $T_3$ の空気が混じり合い平衡して奥側空間の温度 $T_1$ になる。
- ④ 空気は圧縮性流体であるが、温度差が小さいときには密度はほぼ一定とみなし得る。(例えば、 $0^\circ\text{C}$ と $-5^\circ\text{C}$ の差異は約2%である。)

したがって、奥側の空間内では、単位時間に、以下に示す流入(左辺)と流出(右辺)に伴う熱量の平衡状態が成り立つ。

$$T_s k_s + T_3 k_3 = T_1 (k_s + k_3) \quad \dots (1)$$

同様に、間仕切り上の空間と手前側の空間の熱量の平衡状態も、次のように記述できる。

$$T_1 k_3 + T_2 k_3 = T_3 (k_3 + k_3) \quad \dots (2)$$

$$T_3 k_3 + T_a k_a = T_2 (k_3 + k_a) \quad \dots (3)$$

ここで、

$T_2$ : 手前側空間の温度

$T_a$ : 外気の温度

$k_a$ :

ドアの隙間からの空気の流入量及び排出量である。式(2)より、

$$T_3 = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad \dots (4)$$

を得る。式(4)を式(1)と式(3)に代入すると、

$$T_s k_s + \frac{T_1 + T_2}{2} k_3 = T_1 (k_s + k_3) \quad \dots (5)$$

$$\frac{T_1 + T_2}{2} k_3 + T_a k_a = T_2 (k_3 + k_a) \quad \dots (6)$$

となる。式(5)より、

$$k_3 = \frac{2(T_s - T_1)}{T_1 - T_2} k_s \quad \dots (7)$$

を得る。同様に、式(6)より、

$$k_3 = \frac{2(T_2 - T_a)}{T_1 - T_2} k_a \quad \dots (8)$$

を得る。

## 4.2 奥側空間と手前側空間の温度の定式化

ここで、奥側と手前側に温度差があるから間仕切り上部の開口部に通気( $k_3$ )が生じ、 $T_1$ も $T_2$ も維持されると考えられる。つまり、奥側と手前側の空気の置換量は同じであるので、開口部を通して熱の移動のみが生じる現象に等しいと、相似的に考えることができる。したがって、 $k_3$ は、 $T_1$ と $T_2$ の温度差と開口部の大きさに比例すると仮定できる。よって、

$$k_s = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1) \quad \dots (9)$$

と記述できる。ここで、

$h$ : 間仕切り上部の開口部の開き

$H$ : コンテナ内高さ

$a$ : 比例係数

である。 $k_s$ と $k_a$ についても同様に考えることができるが、リーファーコンテナの冷気の吹出口と吸入口の大きさは設定温度によらず一定であり、ならびに本研究では外気を取り入れるドアの隙間幅の大きさも、外気温によらず一定としたので、 $k_s$ と $k_a$ は、それぞれ、 $T_1$ と $T_s$ の温度差、 $T_2$ と $T_a$ の温度差、に比例すると仮定できる。したがって、

$$k_s = b(T_1 - T_s) \quad \dots (10)$$

$$k_a = c(T_a - T_2) \quad \dots (11)$$

と記述できる。ここで、 $b$ と $c$ は比例係数であり、 $T_s < T_1 < T_2 < T_a$ である。

次に、式(7)と式(9)より、

$$\frac{2(T_s - T_1)}{T_1 - T_2} k_s = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)$$

$$2(T_1 - T_s)k_s = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)^2 \quad \dots (12)$$

を得る。さらに、式(12)に式(10)を代入すると、

$$2b(T_1 - T_s)^2 = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)^2 \quad \dots (13)$$

を得る。同様に、式(8)と式(9)より、

$$\frac{2(T_2 - T_a)}{T_1 - T_2} k_a = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)$$

$$2(T_a - T_2)k_a = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)^2 \quad \dots (14)$$

を得て、さらに、式(14)に式(11)を代入すると、

$$2c(T_a - T_2)^2 = a \left( \frac{h}{H} \right) (T_2 - T_1)^2 \quad \dots (15)$$

を得る。ここで、式(13)と式(15)の両辺の平方を取って整理すれば、

$$T_1 - T_s = \sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}} (T_2 - T_1) \quad \dots (16)$$

$$T_a - T_2 = \sqrt{\frac{a}{2c} \frac{h}{H}} (T_2 - T_1) \quad \dots (17)$$

を得る。式(16)より $T_2$ を求めると、

$$T_2 = \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}}} \right) T_1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}}} T_s \quad \dots (18)$$

となる。よって、式(17)に式(18)を代入して整理すると、

$$T_1 = \frac{T_a \sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}} + T_s \left( 1 + \sqrt{\frac{a}{2c} \frac{h}{H}} \right)}{1 + \sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}} + \sqrt{\frac{a}{2c} \frac{h}{H}}} \quad \dots (19)$$

これより、式(18)に式(19)を代入して整理すると、

$$T_2 = \frac{T_a \left( 1 + \sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}} \right) + T_s \sqrt{\frac{a}{2c} \frac{h}{H}}}{1 + \sqrt{\frac{a}{2b} \frac{h}{H}} + \sqrt{\frac{a}{2c} \frac{h}{H}}} \quad \dots (20)$$

を得る。式(19)と式(20)の未知数は、比例

係数を除けば、庫内の設定温度( $T_s$ )と外気温( $T_a$ )のみとなる。

### 4.3 比例係数の推定

間仕切り上部の通気量は、奥側空間と手前側空間の温度差と間仕切り上部開口部の大きさに影響されると仮定しているので、式(19)と式(20)において $b$ と $c$ は、任意の $a$ に対する比で表すことのできる式系となっている。よって、ここで仮に

$$a = 1 \quad \dots(21)$$

と置くと未知数は $b$ と $c$ の2つとなる。 $b$ は冷凍機による庫内の通気量の温度への影響力の重みであり、 $c$ はドア部の隙間の通気量の温度への影響力の重みである。前者は動力による強制通気であるのに対応し、後者はドア部の無動力自然通気に対応する。また、間仕切り上部開口部は両者の中間に位置している。したがって、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ の重みの相違は、 $b \gg a \gg c$ と考えられる。

ここで式(19)と式(20)から算出される値と実測値の誤差の総和を最小とするときの $b$ 、 $c$ を数値計算によって求める。その方法は、まず、 $b$ と $c$ の初期値を定め、初期値から $c$ を変動させて誤差の総和を最小とする $c$ の値を求める。次に、 $b$ を微変させて上記を繰り返し、誤差の総和が最も小さくなる $b$ と $c$ の組み合わせを求めた。

この方法における誤差の総和は、

$$\epsilon(c)$$

$$= \frac{\sum_i^n (|T_{r1i} - T_{c1i}| + |T_{r2i} - T_{c2i}|)}{n} \quad \dots(22)$$

と記述できる。ここで、

$\epsilon(c)$ : 誤差の総和の平均( $c$ の関数)

$T_{r1i}$ : 奥側空間の温度の実測値(Table 3)

$T_{r2i}$ : 手前側空間の温度の実測値(Table 3)

$T_{c1i}$ : 奥側空間の温度の式(19)

による計算値

$T_{c2i}$ : 手前側空間の温度の式(20)

による計算値

$i$ : 実験パターン(Table 1)

$n$ : 実験パターンの総数

である。

Fig. 13 は、この方法で求めた $b$ 値の推移を示したものである。

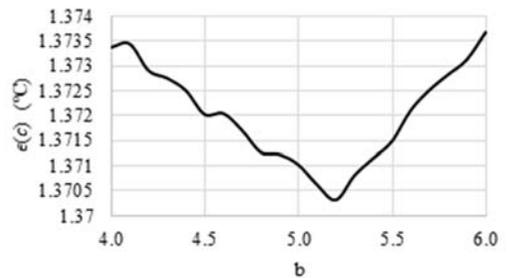


Fig. 13 Relation between  $b$  and  $\epsilon(c)$

Fig. 14 は、Fig. 13 において $\epsilon(c)$ を最小にする $b$ 値を得た計算過程における $c$ 値の変動と誤差の総和の推移を調べた結果である。

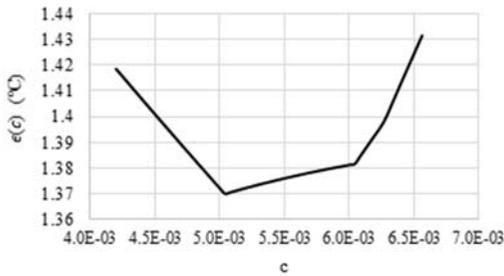


Fig. 14 Relation between  $c$  and  $\epsilon(c)$

Fig. 13 及び Fig. 14 により、

$$b \cong 5.20 \quad \dots (23)$$

$$c \cong 5.04 \times 10^{-3} \quad \dots (24)$$

において $\epsilon(c)$ が最小になっていることが分かる。

以上のとおり、 $c$ は $a$ 、 $b$ と比較して十分に小さく、 $b \gg a \gg c$ と仮定したことが妥当であったと言える。

Table 4 に、式(21)、式(23)、式(24)を式(19)と式(20)に適用し、Table 1 の実験パターンを計算した温度の推定結果を示す。

Table 4 The estimated temperature of the model (Errors compared to the measurement in Table 3)

		Temper. of refig.	Height above the partition		
			8cm	44cm	60cm
Places of measurement	Refrig. Side	-6	-5.41 (-0.09)	-5.15 (-0.75)	-5.41 (-0.39)
		-11	-10.39 (-0.41)	-10.12 (0.02)	-10.22 (-0.38)
		-21	-20.30 (0.00)	-20.03 (-0.07)	-20.02 (5.72)
	Door side	-6	5.30 (-2.40)	1.48 (0.02)	-1.48 (0.78)
		-11	0.71 (-0.71)	-3.26 (1.86)	-5.06 (0.46)
		-21	-7.53 (-2.77)	-12.54 (0.44)	-13.48 (6.58)

なお括弧内の値は Table 3 に示した計測結果から本推定値を引いたものである。

Table 4 を Table 3 の実験結果と比較すると、間仕切り上部の開口部が 8cm と 44cm の場合は、実験結果に比較的近く、60cm の場合は乖離が大きくなる箇所もある。したがって、式(19)と式(20)を評価するには、別途実験を行って妥当性を検証する必要がある。

## 5. 冷凍貨物と冷蔵貨物の混載検証実験

### 5.1 実験概要

前述の 4 で示したコンテナ内の温度を推定する式(19)と式(20)の妥当性を確認するために、前述の 2 で示した基礎実験のパターンにおいて冷凍空間と冷蔵空間を同時に創出できるパターンを選び、両空間にそれぞれ冷凍保存に適する食品と冷蔵保存に適する食品を入れて、各食品の品質を維持できるかを検証する実験をあらためて行った。

なお、本検証実験は、2019 年 5 月に実施した。

### 5.2 実験目的

前述の 4 で示した推定式の妥当性を確認することに加えて、本研究の実験を 1 年の時を隔てて再び行うことでその再現性を確認すること、さらに、実物の冷凍/冷蔵貨物が同時に混載保管可能であるのかを検証することである。

この目的のために式(19)と式(20)に基づき、コンテナ内の冷凍空間および冷蔵空間の温度を事前に推定したうえで、その推定温度となるよう庫内の設定温度を当日の外気温に対して定めた。そして、推定温度が保冷適温となる冷凍食品と冷蔵食品を選定し、コンテナによる両者の混載が可能なことを実証した。

### 5.3 実験方法

前述の 2 の Fig. 5 に示した温度計を設置した段ボール箱の上に、コンテナの奥側には冷凍貨物を、コンテナの手前側では冷蔵貨物を配置し、短期保存を前提として 24 時間の保冷を行った。そして、冷凍/冷蔵保存終了後に両貨物を取り出す際に、それぞれの貨物の鮮度が保たれているかの確認を行った。この実験パターンとしては、当日の外気温を考慮して Table 3 の(-6, 8)を採用した。

### 5.4 実験に使用した機材

前述の 2 で示した機材に加え、冷凍/冷蔵保存する貨物として、冷凍貨物には豚肉を、冷蔵貨物にはレタスを選定した。式(19)と式(20)及び当日の外気温 (Table 5 参照) から、コンテナの奥側は $-5.5\sim-5^{\circ}\text{C}$ に、コンテナの手前側は $2\sim3^{\circ}\text{C}$ になると推定された。食肉の保冷温度は一週間程度の短期保管であれば、 $-5^{\circ}\text{C}$ 程度が適切であり⁷⁾、野菜の保冷温度は $2\sim3^{\circ}\text{C}$ が適切であると判断⁸⁾できることから、本推定値は妥当

と考えられる。選定した貨物を配置した様子を Fig. 15 および Fig. 16 に示す。



Fig. 15 A sample of meat (pork) to store in the frozen condition at the refrigerator side



Fig. 16 A sample of fresh green (lettuce) to store in the cool condition at the door side

なお Fig. 15 ではコンテナの奥側の空間の温度が、実際に氷点下となる推定温度を維持できているかを念のため確認する目的で、水を入れたコップも配置した。

### 5.5 実験結果

実験を行った結果、式(19)と式(20)により推定された温度と温度計による実測温度との誤差は小さく、選定した冷凍貨物と冷蔵貨物を適切に冷凍/冷蔵保存する

温度を保つことが出来た。それを示したのが **Table 5** である。

これを見ると、推定値は奥側が $-5.5^{\circ}\text{C}$ 、手前側が $2.0^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、実測値は奥側が $-5.7^{\circ}\text{C}$ 、手前側が $2.5^{\circ}\text{C}$ となった。推定値と実測値の誤差は奥側と手前側ともに $0.5^{\circ}\text{C}$ 以下であった。また、保冷状況が適切に維持されたことを、視嗅覚により確認した。その結果、いずれについても明らかな変色や腐敗はみられず、さらにコンテナの奥側に置いたコップの水についても氷となって冷え切っていることが確認できた。

**Table 5 Comparison between the estimated temperatures and the measured temperatures (Unit:  $^{\circ}\text{C}$ )**

	Refrig. side	Door side	Outside air
Measurement	-5.7	2.5	21.4
Estimate	-5.5	2.0	-
Error	0.2	0.5	-

## 6. 結論

本研究の実験と温度推定式によって、既存のリーファーコンテナ内に間仕切りを設けその上部を通気させ、かつ、ドアをわずかに開放し外気を取り入れることによって、一つのコンテナ内に異なる2つの温度空間を創出できることが分かった。特に、奥側空間を冷凍空間に、手前側空間を冷蔵空間にできたことは、既存の保冷インフラによっても冷凍/冷蔵貨物の混載を実現できる可能性を示すものである。

今後の課題としては、異なるサイズのリーファーコンテナや保冷库においても、本研究の考え方を適用できることについての議論や、外気温の条件が今回のケースとは異なる場合(冬季等)において実験する必要がある。今後の実験では冷凍冷蔵貨物だけではなく保温の必要な貨物についても検討すべきである。さらに、陸上設置保管庫用途のみならず輸送中のリーファーコンテナに対しても、本研究を応用していくことが将来的な課題である。

## <参考文献>

- 1) ヤマトホールディングス株式会社, 四半期報告書, p.3, 2014. [https://www.yamato-hd.co.jp/investors/library/securities/pdf/y150_01.pdf](https://www.yamato-hd.co.jp/investors/library/securities/pdf/y150_01.pdf), (2020年4月30日閲覧)
- 2) 小日向理早, 渡邊豊, リーファーコンテナ内に温度の異なる保管スペースを創出する基礎実験, 日本包装学会, 第28回年次大会ポスターセッション, 48-49, 2019.
- 3) 飯田恭平, 佐藤幹彦, 徳田宙瑛, 段ボール
- 4) シートの原紙推定方法に関する研究, あいち産業科学技術総合センター, 研究報告, p.25, 2013.
- 5) 紺野康彦, 島田潔, 繪内正道, 生産・物流施設における温熱環境改善の研究, 日本建築学会, 論文集71巻, 第609号, p.9, 2006.

- 6) 戸田盛和, 熱・統計力学, 岩波書店, 10-12, 1987.
- 7) 公益社団法人熊本県畜産協会  
[http://kumamoto.lin.gr.jp/shokuniku/kisochisiki/hanbai_eisei/index.html](http://kumamoto.lin.gr.jp/shokuniku/kisochisiki/hanbai_eisei/index.html) (2020年4月30日閲覧)
- 8) 相良泰行, 生鮮青果物のクールドチェーンにおける温湿度管理の留意点, 日本冷凍空調学会, 4月号第78巻, 第906号, p.42, 2003.

(原稿受付 2020年5月13日)

(審査受理 2020年11月20日)