

日立液体窒素冷蔵コンテナの性能

Characteristics of Container Refrigerated by Liquid Nitrogen

松田紀元* 石田登士夫*
Toshiharu Matsuda Toshio Ishida

内 容 梗 概

近年冷凍食品および高級生鮮食品の輸送量の増加が著しくなり、それにともなって、より高性能な冷蔵車の需要が高まってきた。このような情勢のもとで、日立製作所が今回製作した液体窒素冷蔵コンテナは急速な冷却ができ、かつ室内を任意の温度に調節できるなど、従来の冷蔵車にない大きな特長をもっている。また懸案になっていた液体窒素の価格も液体窒素冷蔵車の出現とともに下がりはじめ、経済的にも従来の冷蔵車と対抗できるようになったので、今後の発展が期待される。

1. 緒 言

従来冷蔵車といえば、輸送物の周囲に氷をおいただけの氷方式に限られていたが、その後冷凍食品の増加につれて、より低温で輸送するために氷の代わりにドライアイスを用いたドライアイス方式が採用されるようになった。ところがこれらの方式では室内の温度調節ができない。そこで冷凍機を設置した冷凍機方式が現われ、つづいて急速に低温まで冷却できる液体窒素方式(以下 LN 方式と略す)が出現するに至ったのは当然の成り行きである。

筆者らはこれら種々の冷却方式のうち構造が比較的簡単で、急速な冷却ができ、冷却能力も大きく、かつ温度調節が自由にできる LN 方式が将来発展すると考え、液体窒素冷蔵コンテナ(以下単にコンテナと呼ぶ)の開発に着手した。まず小形モデルによって冷却速度、温度調節状況などについて検討し、その結果に基づいて 8 t 車用コンテナを製作し、性能テストを行なった。また筆者らはコンテナの性能向上のために、性能を左右する液体窒素の消費量を計算によって求めることを考えた。

2. コンテナ冷却方式の比較

コンテナの冷却方式としては前述の 4 方式のほかにも自動車の燃料である LPG の気化潜熱を利用した LPG 方式があり、各方式にはそれぞれ第 1 表に示すような長所、短所があるが今回は緒言で述べた理由から LN 方式コンテナを開発することにした。LN 方式の中にも、Lique Freeze 方式、Linde 方式、Partlaw 方式があるが、これらのうちで Lique Freeze 方式(これは初期冷却のみで、輸送中には冷却を行わないもの)は温度調節および輸送中のとびらの開閉ができないので今回は対象外とし、他の 2 方式について検討した。Linde 方式と Partlaw 方式の相違は温度調節機構にあり、前者はコンテナ内が設定温度以上になると、サーモスタットの働きで自動的に電磁弁が開いて液体窒素を散布し、コンテナ内を常時一定温度に保持しながら輸送する方法で、後者は電磁弁の代わりに液体窒素容器内のガス圧によって開閉する液体窒素弁を使用してコンテナ内の温度調節を行なう方法である。

筆者らは電源が不要で、顧客の要望に応じて温度指示計、または温度記録計を設置できる後者を選んだ。

3. コンテナの仕様および構造

3.1 コンテナの仕様

今回製作した 8 t 車用コンテナの仕様は下記のとおりである。

(1) コンテナ諸元

外側寸法 5,520×2,110×2,450 mm

* 日立製作所笠戸工場

第 1 表 各冷却方式の比較

	長 所	短 所
氷方式	(1) 設備費がかからない。 (2) 安価である。	(1) 温度調節ができない。 (2) 低温の輸送が困難である。
ドライアイス方式	(1) 設備費がかからない。	(1) 温度調節ができない。 (2) 低温の輸送が困難である。 (3) 運行費が高い。 (4) 冷却速度が遅い。
冷凍機方式	(1) 温度調節が可能である。 (2) 運行費が安い。 (3) 行動範囲の制約を受けない。	(1) 設備費が高い。 (2) 保守、点検が複雑である。 (3) 冷却速度が遅い。
LN 方式	(1) 任意の温度に調節できる。 (2) 急速冷却ができる。 (3) 構造が簡単で保守、点検が容易である。	(1) 運行費が高い。 (2) 液体窒素の供給基地が少ない。
LPG 方式	(1) 運行費がかからない。 (2) 設備費が安い。	(1) 冷却速度が遅い。 (2) 低温の輸送が困難である。 (3) 大形のコンテナに適用しにくい。

断熱材厚さ 150 mm

内容積 20 m³

実容積 19 m³

自重 2,500 kg

最大積載量 5,500 kg

(2) 付 属 設 備

液体窒素容器 Linde 社製 (210 l)

温度調節装置 Partlaw 社製 (温度記録計付)

3.2 コンテナの構造

本コンテナの構造を第 1 図に、外観、コンテナ内部および操作ボックス内部を第 2~4 図に示す。コンテナの外箱は一般構造用圧延鋼、内箱は耐食アルミニウム合金製で、それぞれビス止め、および溶接構造になっており、後部とびらはコンテナ内の冷気を逃がさないように、密封構造になっている。断熱材にはフロン発泡のポリウレタンフォームを使用し、外部からの熱の侵入を防ぐために内箱と外箱が金属接触しない構造になっている。床面には荷物が密着して冷たいガスの循環を妨げることのないように耐食アルミニウム合金製の荷受け台を敷いてあり、一方コンテナ内に噴射されたガスを外へ放出するための排気管もガスの循環をよくするような位置に設置してある。

次にスプレーヘッドの構造は液状の窒素が直接輸送物を過冷却することのないよう完全にガス化して噴射されるように考慮してある。またコンテナ内で作業中に液体窒素が噴出しないようにドア弁が設置され、ドアを閉めてはじめて自動温度調節機構が働くようになっている。

3.3 温度調節装置

第5図はコンテナ内の温度調節機構の系統図である。作動原理について簡単に述べると、コンテナ内温度が設定値以上になれば感温部⑳内の水銀が膨脹して温度調節器⑫の回転子を動かし、窒素ガスの逃がし穴を閉じるため液体窒素容器①内上部のガスがストレーナー⑭、減圧弁⑬、温度調節器⑫、ドア弁⑯を経て液体窒素弁⑮の中のペローを押して弁を開くようになっている。またコンテナ内が設定温度以下になれば水銀の収縮によって回転子を動かし、窒素ガスの逃

がし穴が開くので液体窒素弁のペローに圧力がかからなくなり、スプリングによってスピンドルは持ち上げられ、弁は閉じるようになっている。

4. コンテナの性能テスト

コンテナの性能を左右するのは液体窒素の消費量であり、これを計算によって求めることができれば大きさ、構造の異なるものについてもその性能をあらかじめ推定することができる。

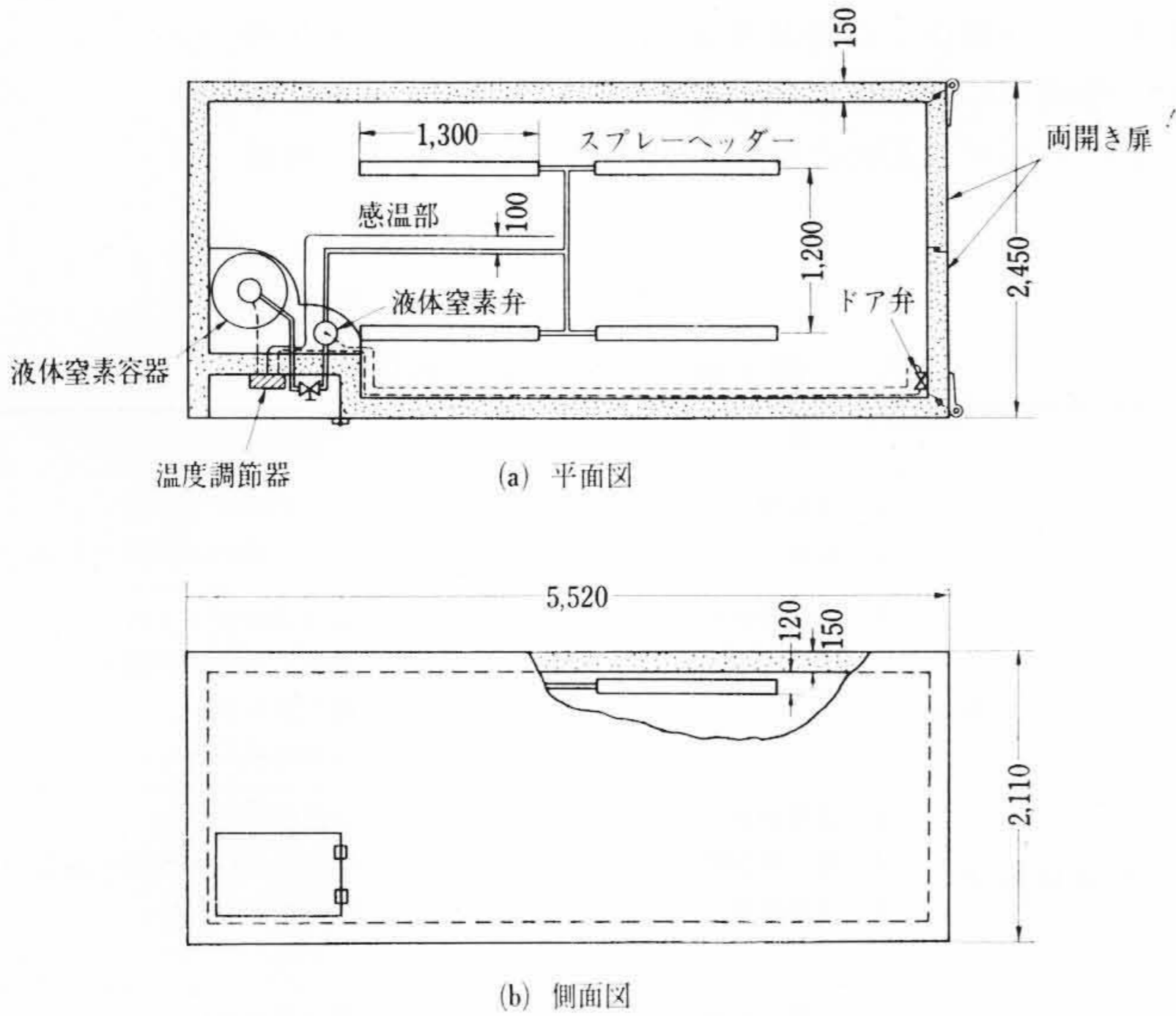
筆者らは電気アナログ法によって壁の各部の温度を求め、その結果を使って液体窒素の消費量の時間的経過を算出することを考えた。

4.1 液体窒素消費量の計算

計算方法を簡単に述べると、コンテナの壁を単位面積について第6-(a)図のように厚さ方向に8個のブロックに分けて、各ブロックの中心間の熱抵抗にある換算係数を乗じて電気抵抗に置き換える。また各ブロックの熱容量に別の換算係数を乗じて電気容量に置き換え、温度差に換算係数を乗じて電圧差に置き換えると、第6-(b)図のような電気回路になる。この回路において、はじめ各ブロックの温度を外気(点9)と等しくしておき、コンテナ内(点0)の温度を瞬間的に設定値まで冷却したときの各ブロックの温度降下量を求め、(1)式によって液体窒素消費量 $G(kg)$ を算出する。

$$G = \frac{F}{H} \left(\sum_{i=1}^8 C_i \cdot W_i \cdot \Delta t_i + K_m \cdot \Delta t \cdot \tau \right) \dots \dots \dots (1)$$

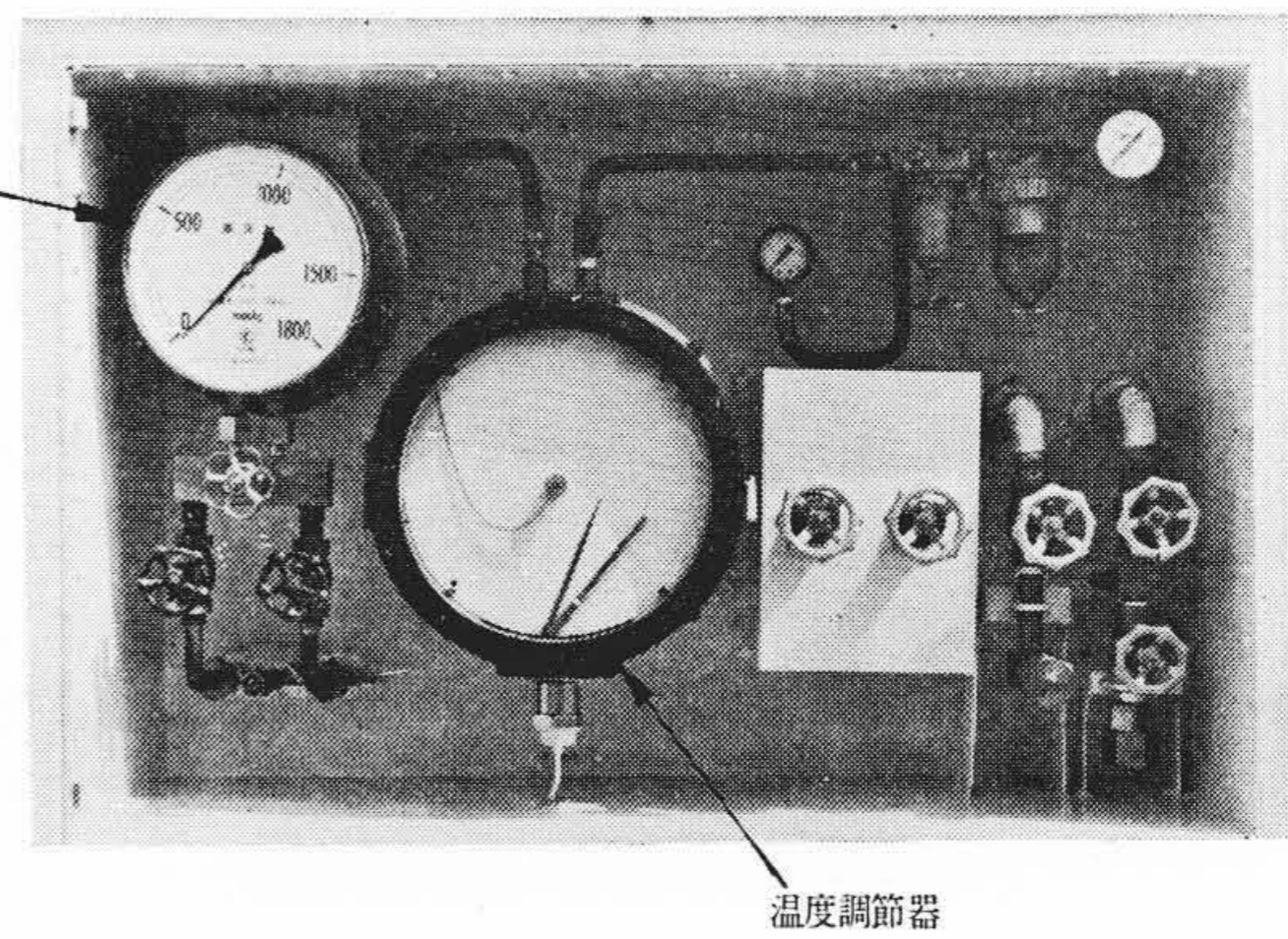
- ここに、 C_i : i 番目のブロックの比熱 (kcal/kg°C)
- W_i : i 番目のブロックの重量 (kg)
- Δt_i : i 番目のブロックの温度降下量 (°C)
- K_m : コンテナの全平均熱貫流率 (kcal/m²h°C)



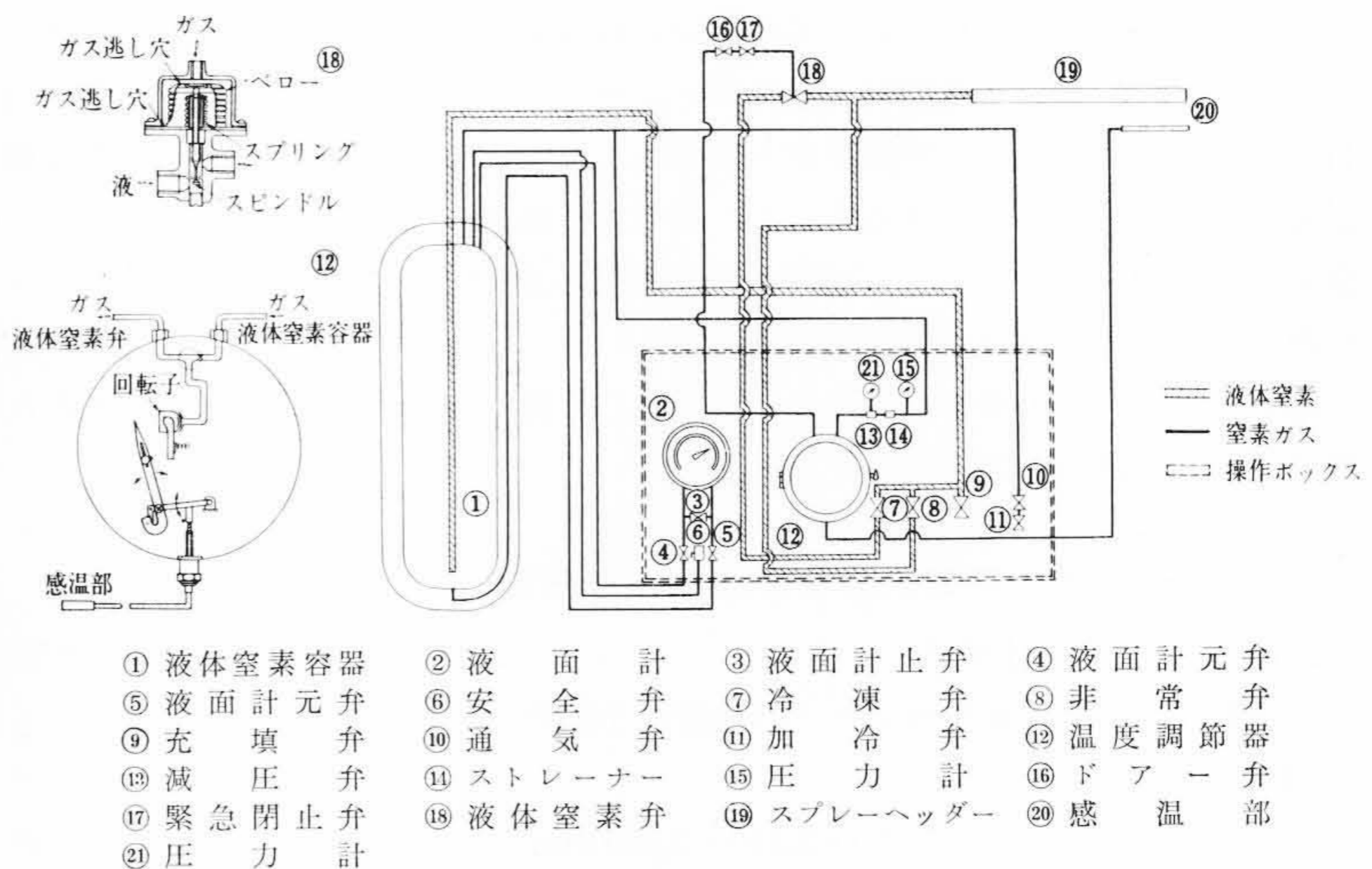
第1図 コンテナの構造



第2図 コンテナ

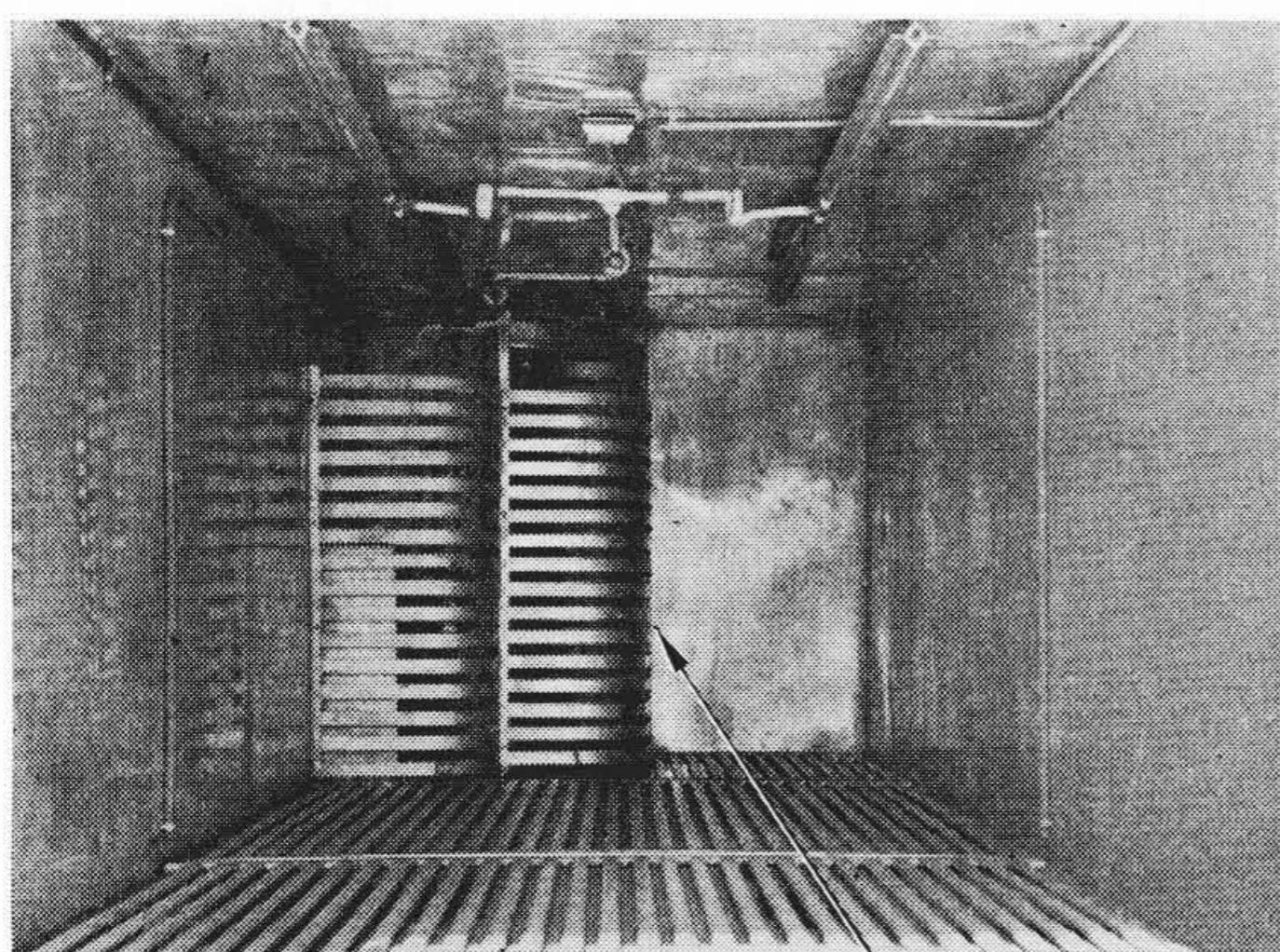


第4図 操作ボックス

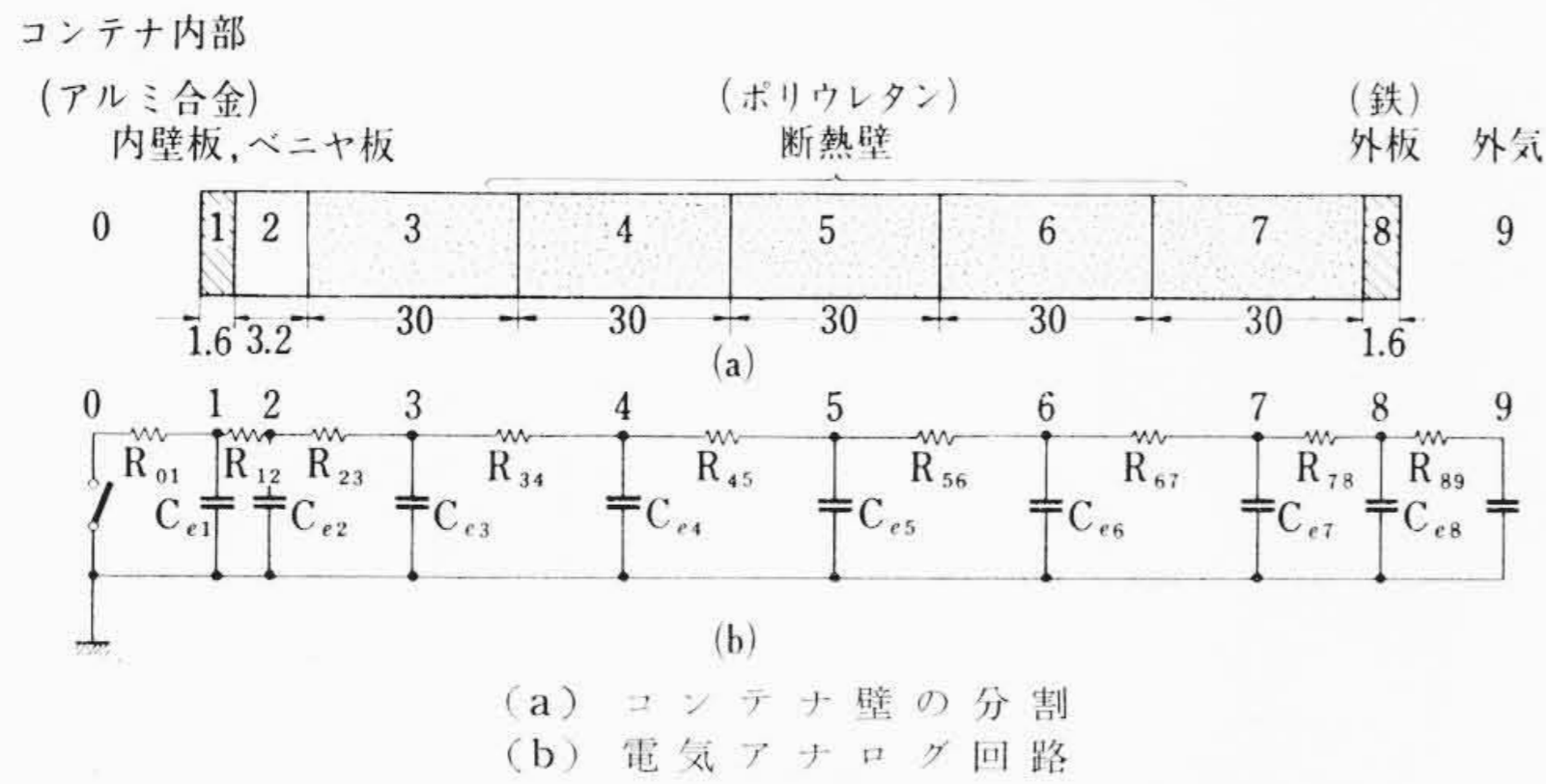


- ① 液体窒素容器
- ② 液面計
- ③ 液面計止弁
- ④ 液面計元弁
- ⑤ 液面計元弁
- ⑥ 安全弁
- ⑦ 冷凍弁
- ⑧ 非常弁
- ⑨ 充填弁
- ⑩ 通気弁
- ⑪ 加冷弁
- ⑫ 温度調節器
- ⑬ 減圧弁
- ⑭ ストレーナー
- ⑮ 液体窒素弁
- ⑯ スプレーヘッダー
- ⑰ 緊急閉止弁
- ⑱ 液体窒素弁
- ⑲ スプレーヘッダー
- ⑳ 感温部

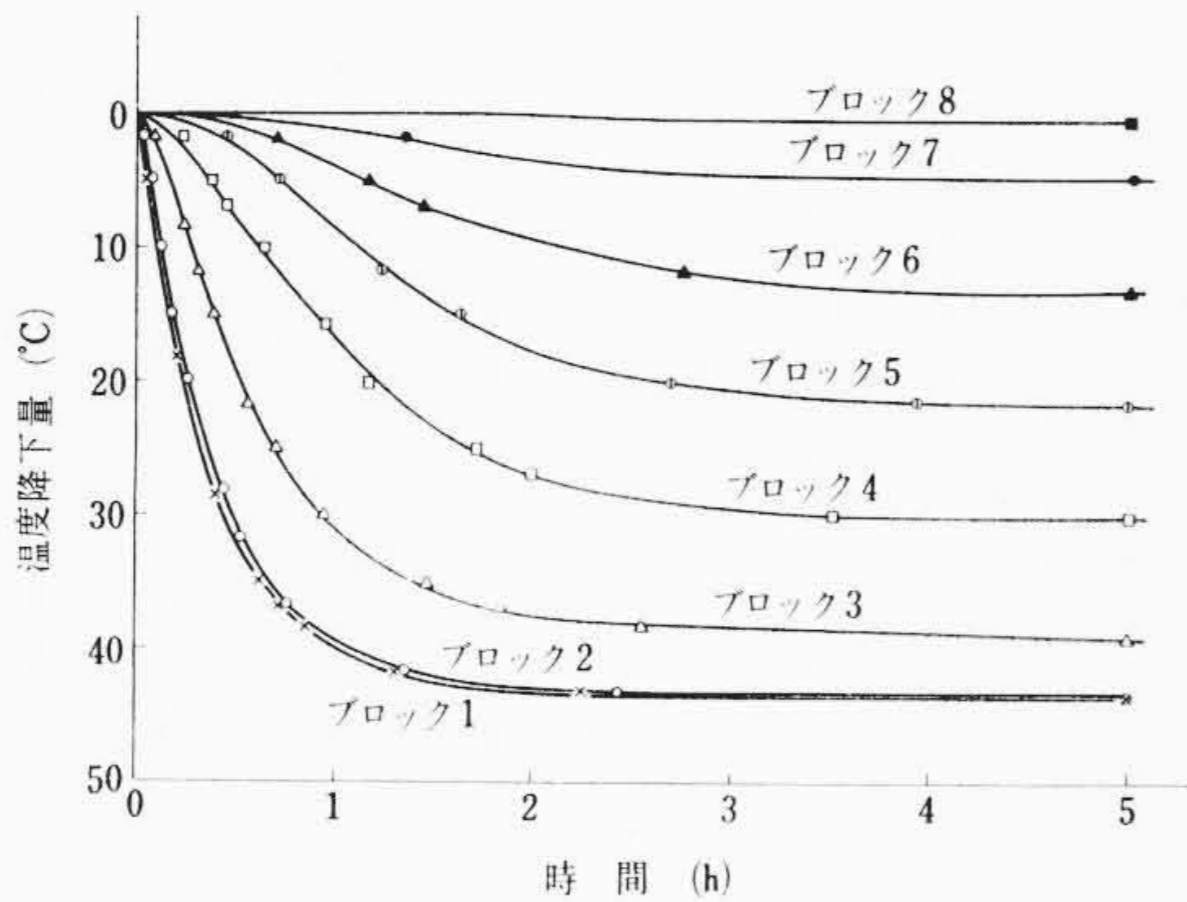
第5図 温度調節機構系統図



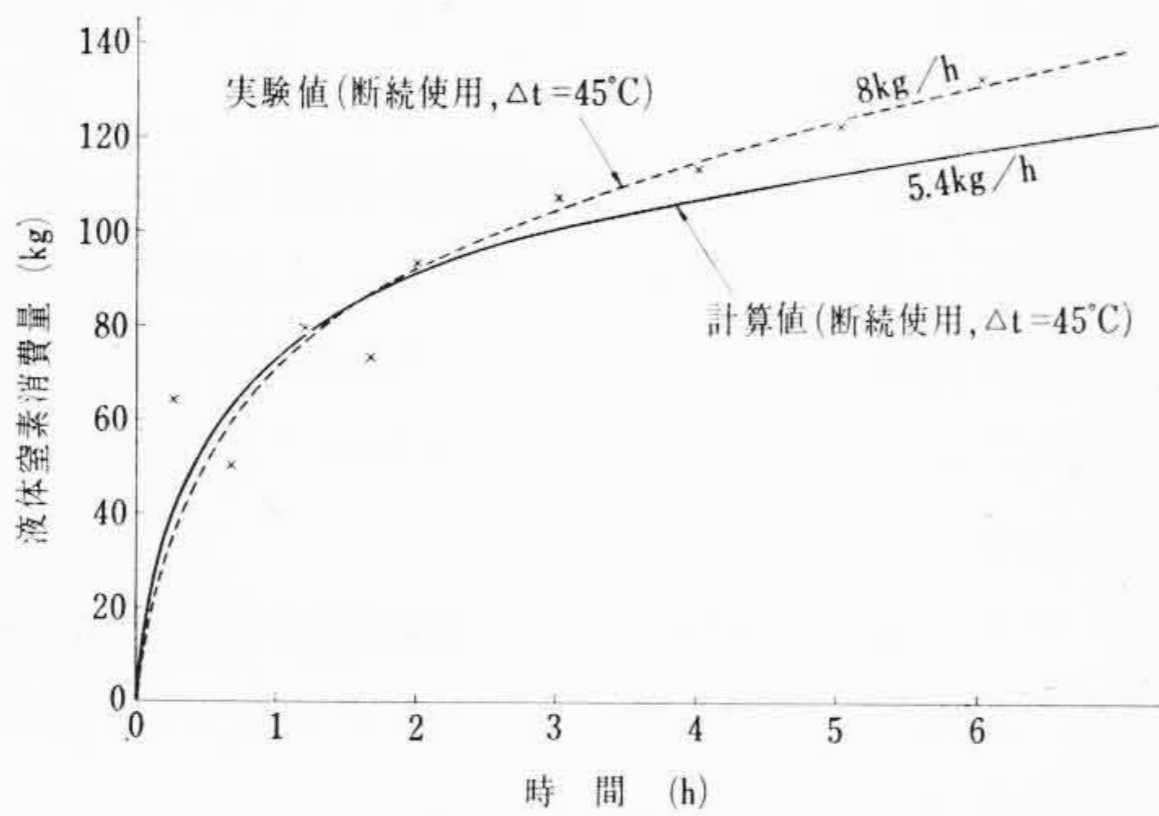
第3図 コンテナ内部



第6図 コンテナ壁の各部温度降下量計算法



第7図 各ブロックの温度降下量の時間的経過



第8図 空荷時の液体窒素消費量

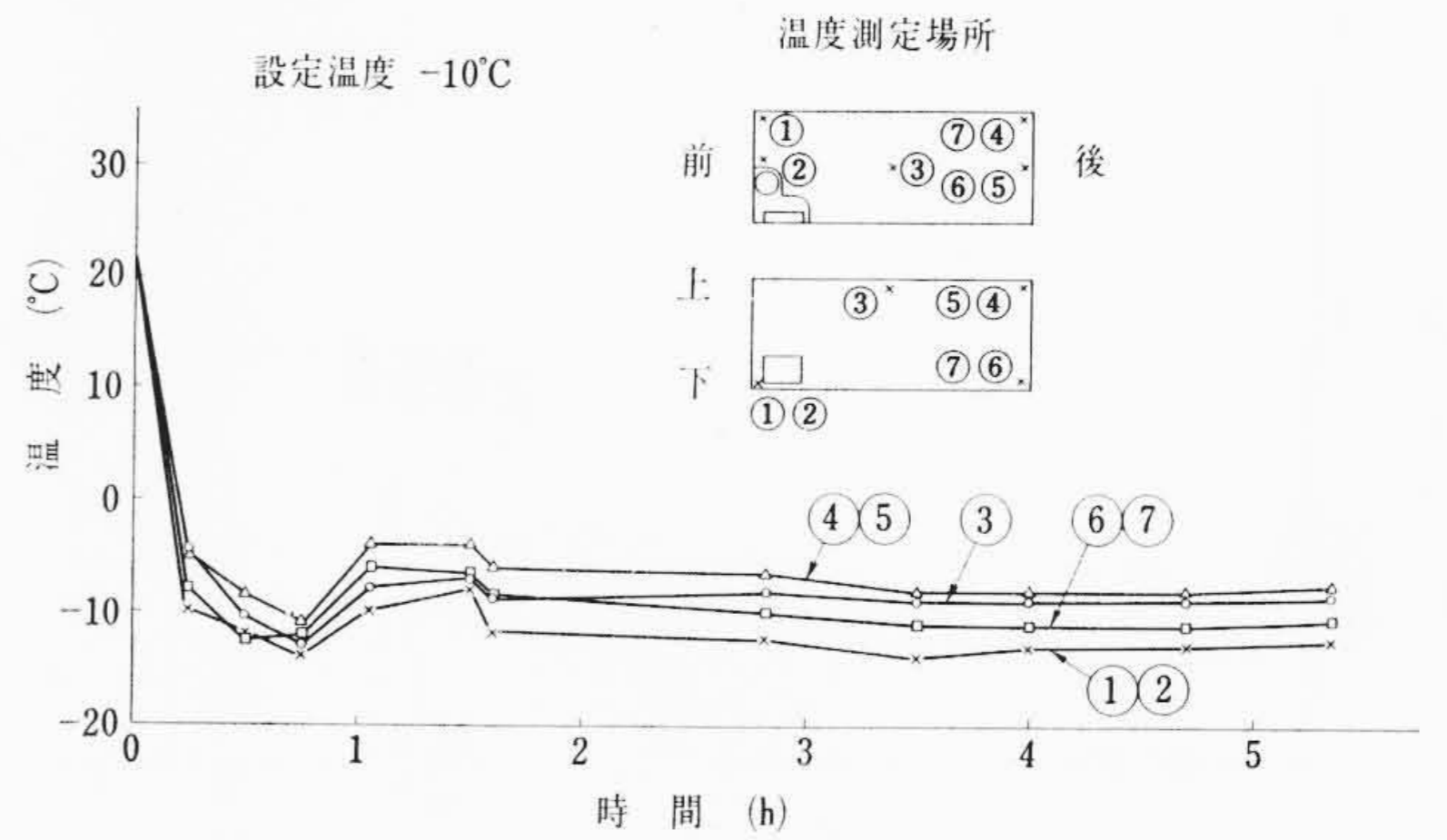
- F : コンテナの幾何平均伝熱面積 (m²)
- Δt : 外気温度とコンテナ内設定温度との温度差 (°C)
- τ : 経過時間 (h)
- H : 液体窒素が冷蔵室温になるまでの冷却能力 (kcal/kg)

いま計算例として、今回製作したコンテナ ($F=54.6 \text{ m}^2$, K_m の計算値 $\approx 0.2 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$) について $\Delta t=45^\circ\text{C}$ の場合の各ブロックの温度降下量および液体窒素の消費量を図示すると、それぞれ第7図および第8図のとおりである。

4.2 液体窒素消費量の実験値

一例として、 $\Delta t=45^\circ\text{C}$ における液体窒素消費量の実験値を第8図に示す。第8図によって計算値と実験値を比較してみると、コンテナが定常状態になるまで(第7図の各ブロックの温度曲線が水平になるまでで、約2~3時間と考えればよい)は、よく一致している。これによって今後コンテナの設計に際して、構造その他変更があった場合、ただちにその性能を推定できる。

ただ定常状態になってからの単位時間当たりの液体窒素消費量は計算値が 5.4 kg/h であるのに対し、実験値は 8.0 kg/h で、かなりの差がある。この点については今後二、三の例について実験値と計算値の比を求め、それを安全率として計算値に乗ずれば、精度よくコンテナの性能を推定することができる。



第9図 コンテナ内の温度分布

4.3 コンテナの全平均熱貫流率

定常状態になった後の単位時間当たり液体窒素消費量の実験値から全平均熱貫流率 K_m を算出するには(2)式を使えばよい。

$$K_m = \frac{G_s \cdot H}{F \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 G_s : 定常状態での単位時間当たり液体窒素消費量 (kg/h)

(2)式に第8図の結果を代入して K_m を求めると、 $K_m \approx 0.3 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となり、 K_m の計算値との比は約1.5倍になる。この比率は他社のコンテナについて計算してもほとんど同じである。このように K_m の計算値と実験値の差が大きいのは、断熱材の熱伝導率が公称値に比較して一般に悪いこと、および断熱施工の効率を無視していることに起因しているものと考えられる。したがって今後さらにコンテナの性能を向上させるためには、断熱材の製造、および断熱施工過程における管理を十分に行なう必要があると考える。

4.4 コンテナ内の温度分布

液体窒素を噴射したときのコンテナ内の温度分布がどのようになるかということは冷凍食品輸送の際に重要になる。今回製作したコンテナの空荷の場合について、筆者らが測定した一例を示すと第9図のようである。

なお温度測定は内壁から約50mm離れた点に銅-コンスタンタン熱電対をつり下げて行なった。図中において冷却開始後30分付近でコンテナ内温度が設定値以下になっているのは、温度調節器の感温部が熱電対に比較して感度が鈍いためである。第9図の結果からみると、コンテナ内の場所による温度差は 5°C 程度で、下部のほうが上部よりも低い。また前後方向の温度分布をみれば、前部よりも後部とびら付近のほうが温度が高くなっている。しかしながらこの程度の温度差は、他方式の冷蔵車においてもみられるものであり⁽⁴⁾、また実際の冷凍食品輸送においてもさしつかえないと思われる。

4.5 輸送テスト結果

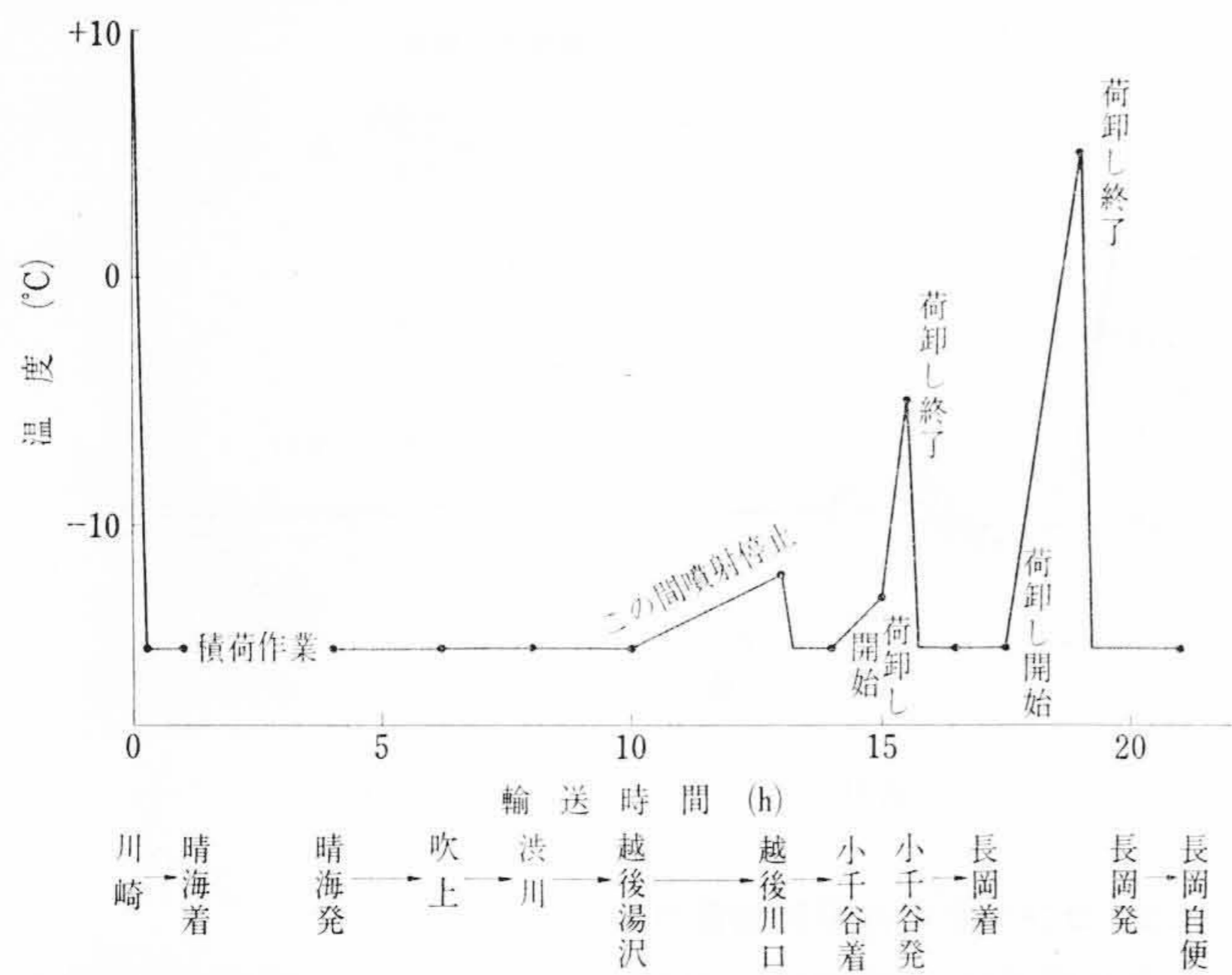
実車による輸送の際のコンテナ内の温度経過、および液体窒素の消費状況の一例をそれぞれ第10,11図に示す。

この輸送テストは東京~長岡(新潟県長岡市)間で行なわれ、輸送物は、カキフライ、冷凍魚、加工品(ミートボール)、プロイラー、冷凍野菜などで積込み時の輸送物温度はいずれも約 -15°C である。コンテナ内温度は途中の荷降し作業時間以外は -15°C に保持されており、荷降し時の輸送物も全然異状なかった。

また液体窒素消費量について他社のコンテナと比較するために、発表された範囲での他社のデータを筆者らの実験条件、およびコンテナ寸法に換算して示したのが第11図である。

5. 液体窒素冷蔵コンテナの将来性

以上、日立製作所が開発した液体窒素冷蔵コンテナについて述べ



第10図 輸送テストにおける室内温度経過

てきたが、今後この種のコンテナが普及するか否かは次の点にかかっている。

- (1) 液体窒素の供給基地の整備、および液体窒素の価格
- (2) 冷凍食品、および生鮮食品の積込み、輸送時の許容温度規定の問題

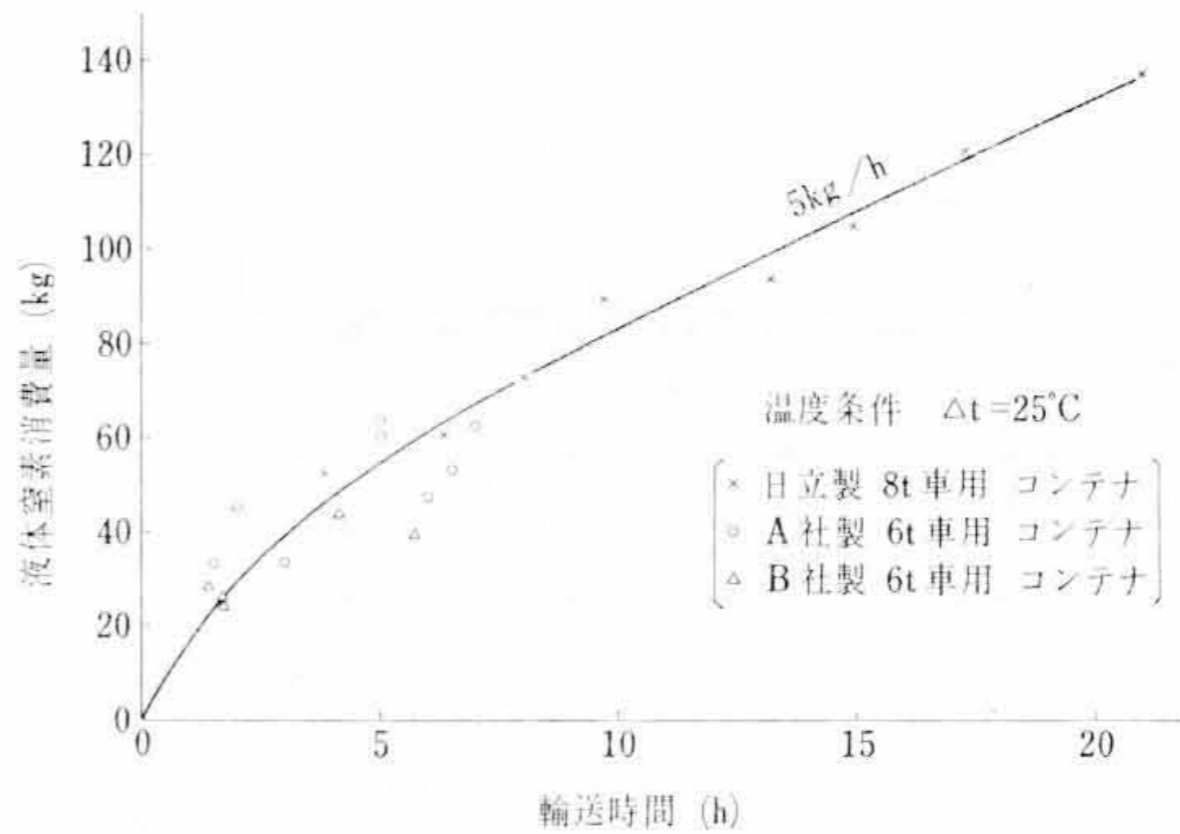
まず液体窒素の供給基地についてみると、いままでは製造工場に限られており、LPGなどのように貯蔵、販売を行なう基地がほとんどない状態で、しかもその製造工場も大手メーカーの場合、大部分が京浜、阪神地区に集中しており、残りもほとんどが表日本側に集まっており、裏日本側、および北海道、九州には非常に少ない。したがって地方から都市へ品物を輸送する場合に一度液体窒素を充てんしてから積荷地点へ行かねばならない不便がある。

ところが液体窒素冷蔵車の出現とともに液体窒素の貯蔵、販売基地設立の機運が高まってきているので、近い将来に全国の主要都市において液体窒素の供給が可能になるものと考えられる。

また液体窒素の価格についても、昭和37~38年ころまでは1kg当たり(比重は0.808)80~100円していたものが、現在では1kg当たり50円程度になっており、さらに一部では大口消費者には40円となっているので、これも近い将来アメリカなみ(1kg当たり20~30円)になるものと考えられる。

そうならば経済性の点においてLN方式のコンテナは冷凍機方式のコンテナに比較して有利になる(科学技術庁からの報告⁽²⁾によれば液体窒素の価格が1kg当たり45円ならば冷凍機方式とLN方式の経済性は同じになると推算されている)。

次に冷凍食品および生鮮食品の輸送温度規定についてみると、国際的には、1962年に国際冷凍協会(I.I.R.)で制定された勧告値があ



第11図 輸送テストにおける液体窒素消費量

り、アメリカでは、1961年に全米冷凍食品関連産業協力委員会で制定された冷凍食品取扱勧告がある。

一方わが国においては、そのような全面的な勧告や規定はなく、特定の食品について最高保持温度が決められている程度である(たとえば牛乳は+10°Cである)。しかしながらわが国においても徐々に規定食品の範囲をひろげていく方向に向かっているので近い将来、生鮮食品、冷凍食品の全体にわたって規定されるものと考えられ、それにともなって高性能の冷蔵コンテナの必要性が高まるであろう。

6. 結 言

今回製作した8t車用日立液体窒素冷蔵コンテナの性能テストの結果は次のとおりである。

- (1) 定常状態になった後の液体窒素消費量は、コンテナ内外温度差45°Cのとき、8kg/hであり、これからコンテナの全平均熱貫流率を算出すると約0.3kcal/m²h°Cである。
- (2) 定常状態におけるコンテナ内の場所による温度差は5°C程度である。
- (3) コンテナが定常状態になるまでの液体窒素の消費量については、電気アナログ法によってあらかじめかなり精度よく推定できることがわかった。

今後液体窒素の供給基地の整備、液体窒素の価格の低下、および国内における生鮮食品、冷凍食品に関する輸送温度規定の制定などによってこの種のコンテナの発展が期待される。

終わりに本開発を遂行するに当たって種々ご協力いただいた、日通総合研究所、および日通東京自動車路線事業所の関係各位に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 鉄道技術研究所速報 No.62-334 (昭37-11)
- (2) 科学技術庁資源調査会報告 第25号 (昭39-4)