

富士多段形オープンショーケースのエアカーテンの研究

Researches on Air Curtain of Fuji Multiple Deck Open Refrigerated Cabinets

石川 明* 山名 祥雄* 木村 幸雄*
Akira Ishikawa Yoshio Yamana Yukio Kimura

I. ま え が き

わが国が低成長時代に入り、省エネルギー、省電力、生産性向上が国家的な方針となっている今日ほど、確かな技術に裏づけられた機能を持った、しかも廉価な製品を要求されている時代はない。

オープンショーケースにおいても同様に、これまで拡張期で大形の装飾の多かったものから、小形の省力化されたものへと移行している。それにつれて機能面での確実な改良と簡略化も行われ、たとえばエアカーテン、蒸発器、膨張弁、凝縮器、ヒータ、ファン系統などが対象となってきている。しかし、その中では特にエアカーテン部分の改良の進歩が遅れていて、熱しゃ断効率が悪く、冷凍機をより小形にすることができないという問題がある。そのほかの機能部でもまだまだ残された問題が多いが、以下エアカーテンのみを取り扱って行くことにする。

エアカーテンはこれまでビルディング、または低温倉庫などで扉の開閉時に空調を保護するために使用されてきた。そのため研究解析は多々あるが、オープンショーケースのエアカーテンは、空気と熱の侵入のしゃ断⁽¹⁾というその役割の重要性に比して、ほとんど詳しい研究が進んでいない。

そこでオープンショーケースのエアカーテンの現象を明らかにし、その簡単な解析によって熱しゃ断特性の最も良いエアカーテンを設計するために一連の研究実験を行った。以下その実験結果の一部を紹介する。

II. エアカーテンの変遷

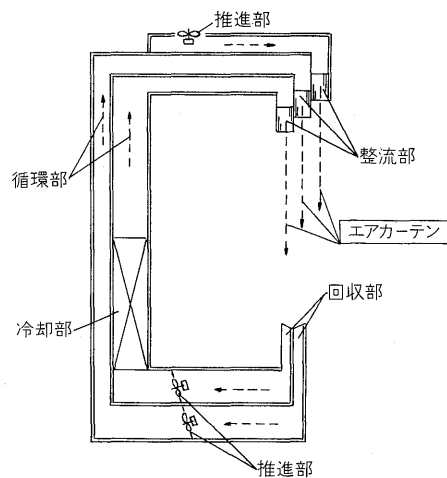
エアカーテンは1951年にドイツのシュテュットガルトではじめて実用化された。わが国でも20年ほど前から百貨店、工場、冷(温)蔵倉庫などでエアドアとして応用されてきた。エアカーテンは、従来のドアに比較して透視が効くために心理的、肉体的抵抗感がなくなり、出入りの多い百貨店のドアに適している。また、その空気しゃ断性、熱しゃ断性、そしてじんあい、虫などのしゃ断特性を利用した例も多い。

オープンショーケースへもまもなく適用され、合理化

を伴った大量販売、大量消費の時代にサービス性、省力性の面から応用された。以来、スーパーマーケットには必要不可欠となっているが、一方では、現在の省電力時代に熱侵入量が大きく冷凍機の冷凍能力のかなりの部分を充当せねばならず、早急に改善する必要が出てきている。

III. オープンショーケースの機能

オープンショーケースの説明は、本特集号の個々の論文で詳しくなされているので省略するが、本文ではエアカーテンに直接関連する機能面の概要から述べる。各機能の配置を第1図、およびその説明を第1表に示す。



第1図 オープンショーケースの機能図

Fig. 1. Functional diagram of open refrigerated cabinet

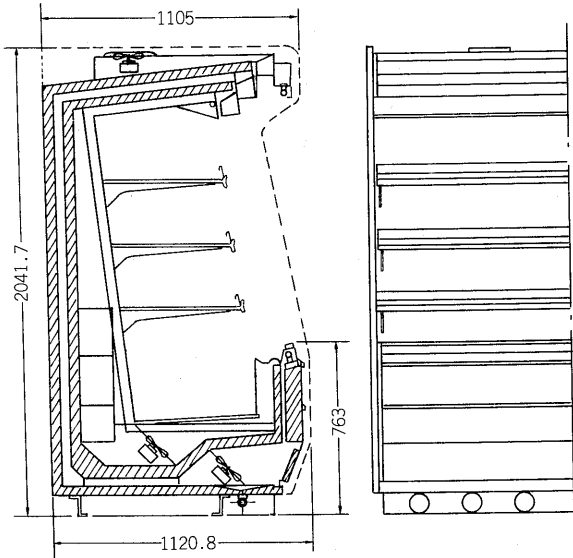
第1表 オープンショーケースの機能
Table 1. Functions of open refrigerated cabinet

	機 能	代表部品
冷却部	循環空気を冷媒で冷却する。	蒸発器
推進部	冷却空気を強制的に推進させる。	ファン
循環部	冷却空気をガイド壁を通して循環させる。	ダクト
整流部	冷却空気を整流してエアカーテン部に吹き出す。	ハニカム
回収部	エアカーテン部と外気との混合空気を吸い込む。	リターン グリル

* 三重工場

IV. エアカーテンの実験

エアカーテンそのものの特性解析は空調ビルディング、冷蔵倉庫等⁽²⁾に使用されたもので行われているが、オープンショーケースのエアカーテンに対する特性解析は現在まで詳しく行われておらず、単にエアカーテンの現象をとらえるだけに終わっている。今回は、エアカーテンの現象を(1)シュリーレン法と、(2)断面温度測定法でつかみ、その現象観察をもとにしてエアカーテンの性能に及ぼす(3)エアカーテンの風速、ハニカム部分の形状などの種々の形の組合せによる実験を行ってその結果の一部を得た。実験の供試体の代表的な機種 JL-6 C 形の断面図を第 2 図に示す。



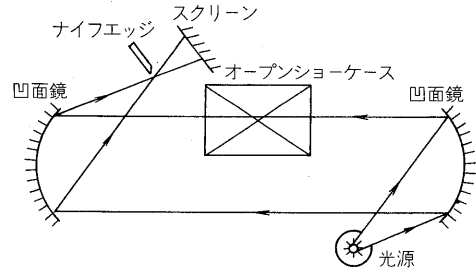
第 2 図 JL-6 C 形の概略図
Fig. 2. Outline diagram of type JL-6 C

1. 現象の把握

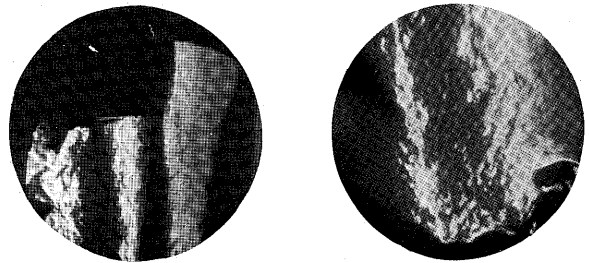
(1) シュリーレン法

まずエアカーテンの流れを目で観察する段階から入ったが、最初は煙法を使用した。それは、まず $TiCl_4$ 液を綿布にしみ込ませ、次にそれが空気に触れると白煙を発生するので、その綿布をエアカーテンに近づける。するとエアカーテンが白煙を巻き込んで流れの観察ができるという方法がある。この方法はエアカーテンの大きな流れは見分けられるが、細部は観察しにくい欠点がある。次にシュリーレン法を採用したが、この方式はエアカーテンの主部の動きと細部の動きを明瞭に観察できる。以下シュリーレン法による実験を述べる。

シュリーレン装置(カラー用)を使ってエアカーテンの断面を観察した。装置の配置図を第 3 図に示す。また、得た写真のうち代表的なものを第 4 図、第 5 図に示す。第 4 図はハニカム部分の庫内寄り、第 5 図はリターン部分でありともに各層にわかれ、また境界層で互いに混流



第 3 図 シュリーレン装置配置図
Fig. 3. Arrangement of Schlieren method

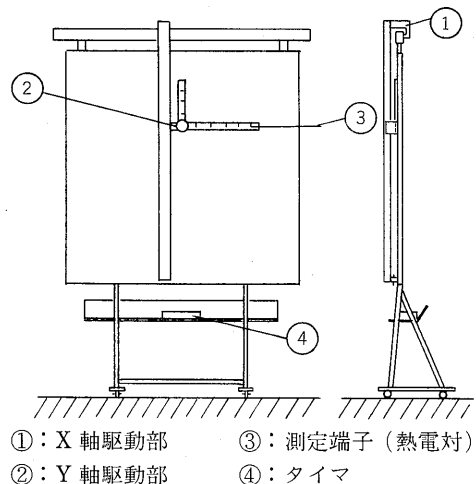


第 4 図 シュリーレン写真(1) 第 5 図 シュリーレン写真(2)
Fig. 4. Photograph by Schlieren method (1) (around honeycomb) Fig. 5. Photograph by Schlieren method (2) (around return grill)

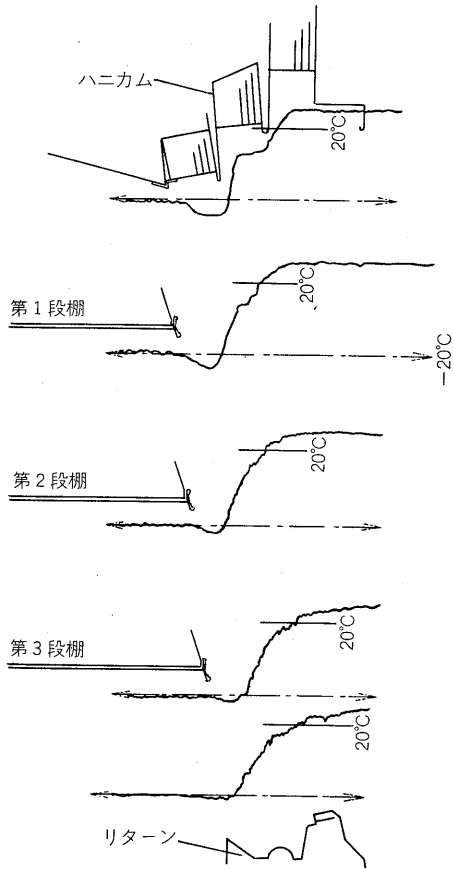
していることがわかる。この方法は、エアカーテンの流れを目で観察できる非常に有効な方法であり、特に吹出部、吸込部などの形状変化による気流の状態を観察するのに適している。

(2) 断面温度測定法

次にエアカーテンの各層の流れ、またその境界層を観察する目的で、各層の温度が異なっているのに着目して(庫内側からインナジェット $-20^{\circ}C$ 、ミドルジェット $10^{\circ}C$ 、アウトジェット $30^{\circ}C$) エアカーテンの断面の温度を測定することにした。測定装置は X-Y 軸に移動可能なものとして、断面の各高さ(Y 軸)を決定してから、断面を



第 6 図 断面温度自動測定装置
Fig. 6. Cross-sectional automatic measuring equipment for temperature



第 7 図
断面温度分布
Fig. 7.
Cross-sectional
temperature
distribution

横断 (X 軸方向) するように工夫した。測定端子は熱電対 (銅-コンスタンタン) を使い、応答性の問題からその直径を 0.3 mm ϕ とした。また端子の移動速度は、熱電対の応答速度に合致するように決定した。測定装置の概略図を第 6 図に示す。

この装置を使用して、JL-6 C 形の各高さの断面温度分布を求め、JL-6 C 形の断面図と合わせてエアカーテンを概念化したものが第 7 図である。図で矢印付きの一点鎖線は、測定端子が移動した長ささと高さの位置を表し、また測定値の -20°C の値の位置も示している。

2. エアカーテンの特性実験 (風速変化による影響)

エアカーテンに影響を及ぼす諸因子のうち、最もその効果の大きい風速変化による特性実験を行った。方法はインナジェット、ミドルジェット、アウトダジェットの 3 層の風速を周波数変換器によりファンの回転速度を可変できるようにして、3 層の風速の組合せに対するエアカーテンの特性を求めることにした。エアカーテンの特性の判断基準としてドレン量 (除霜時、排出される水量) を使用した。これは、エアカーテンの空気しゃ断性に応じて侵入空気量が変化して、侵入した空気中の水分が、除霜時に解氷してドレン量として排出されるという理由から選んだ。第 2 表に 3 種類のジェット流速の組合せ試験のデータの中で、一番有意差の大きかったインナジェットの風速の値とドレン量との関係を示した。

なお、リターン部 (エアカーテン空気吸込部) 形状変化、ハニカム部 (エアカーテン空気吹出部) 形状変化な

第 2 表 風速とドレン量

Table 2. Relation between air velocity and drain rate

実験 測定量	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
インナジェット 風速(m/s)	1.43	1.14	1.58	1.48	1.53	1.56	1.76
ドレン量 (cc/h)	733	759	683	688	637	600	668

どによるエアカーテン特性実験は、個々の機種で行われ、成果があがっているが、その結果は今後改めて発表することにしてここでは割愛する。

V. エアカーテンの特性に対する考察

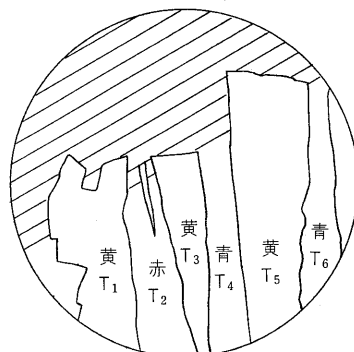
以上の実験結果から、オープンショーケースのエアカーテンの現象の把握、および風速の影響の確認がなされた。次に上述の実験結果とそれに関連したエアカーテンの特性についての考察を試みる。

1. シュリーレン法

シュリーレン写真の解析法と、その方法をもとにして第 4 図、第 5 図を説明する。

この写真は 3 色 (赤, 黄, 青) のカラー写真になっている。そして色の違いは供試体を通過する時の屈折率の違いによるもので、屈折率の大きさが赤, 黄, 青, または 3 色フィルタの方向により、その逆の順序になっていることを示している。光の屈折率は現象の密度こう配に依存し、また密度こう配は空気の流れの場合、風速 6 m/s 以内なら、温度こう配だけにと考えて良いので、シュリーレン写真の色の違い (赤, 黄, 青) は温度こう配に依存すると考えられる。すなわち、温度こう配が存在しない一定温度領域が黄色になるように装置を設置すると、温度こう配が正ならば青 (または赤)、負ならば赤 (または青) の領域といえる。

以上の原理をもとにして第 4 図、第 5 図の現象を解析してみる。第 4 図の場合、太い線領域が 3 本あるが、左から赤 (内部に細い濃赤色がある)、青、青であり、その中間領域が黄となっている。第 4 図をわかりやすく書き換えたのが第 8 図である。図で各領域を左から $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ とすると、黄色を一定温度領域としたので $T_1,$



第 8 図 シュリーレン
写真の概念図
Fig. 8. Conceptual
diagram of
photograph

T_3, T_5 は一定温度, T_2 は赤ゆえ温度こう配が負, このことは, 熱電対であらかじめ測定した値と照合することにより確認をしてある。また T_4, T_6 は青で温度こう配が正, これらのことから T_3 が最も温度が低く, インナジェットの流れであることがわかる。また T_5 はミドルジェット, T_1 は庫内側, 残り T_2, T_4, T_6 は各ジェットの境界層である。

なお, この断面写真は1.8mの長さの厚み(JL-6C形の正面幅)になっているので光軸に平行にするのがむずかしく, やや斜形となっていると考えられる。それゆえ赤, 青の境界層は実際にはもっと幅が狭くなっていてインナジェット, ミドルジェット, アウタジェットの流れは十分幅広く, かつ層流になっていて熱しゃ断効果が大きいといえる。富士冷凍多段オープンショーケース(JL-6C形)の優秀さを示すものである。第5図においても同様で, エアカーテン下部の流れにも層流が存在していることがわかる。

なお, シュリーレン写真から温度を定量測定できる方法があるが, 今後の課題としたい。

2. 断面温度測定法

JL-6C形の断面温度分布第7図について簡単な解析を行う。

各端子移動線上のインナジェットの温度を $T_i (i=1 \dots 6)$, かつこの値をその庫内温, また温度差 $T_{i+1} - T_i (i=1 \dots 6)$, 庫内温についても同様にすると第7図から第3表が求められる。それによると

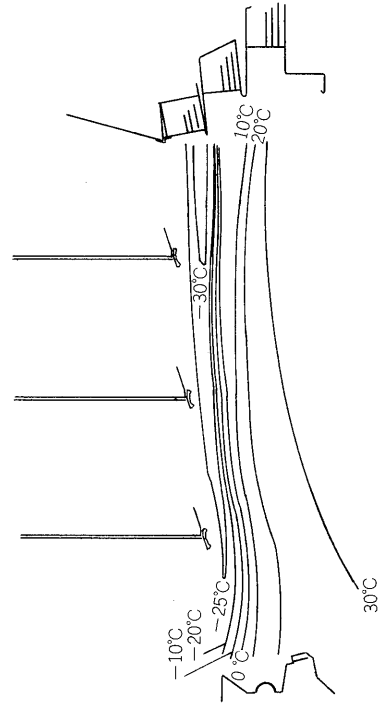
- (1) インナジェットの各部分の温度差はエアカーテン下流に行くほど大きくなるが, これはエアカーテンへの熱侵入の影響を表している。
- (2) 庫内の温度差で, $T_2 - T_1$ の値が少し大きく, $T_3 - T_2$ は負となり, 第1段棚下の方が高くなっているが, これはインナジェットのハニカムを出た直後の乱れであって, 第2段棚下になるとハニカム下の庫内温と同じになり, 庫内温はほとんど一様にしかも十分に冷えていることがいえる。
- (3) リターン部分の前後の温度差が十分に大きい。このことはエアカーテンの断熱の効果が大きいことを示している。

第3表 エアカーテン各部分の温度

Table 3. Temperature distribution in air curtain flow

位置 温度	ハニカム 下 T_1	第1段 棚下 T_2	第2段 棚下 T_3	第3段 棚下 T_4	リターン 上(後) T_5	リターン 上(前) T_6
T_i ($i=1 \sim 6$)	-30°C (-22°C)	-29°C (-19°C)	-27°C (-22°C)	-25°C (-22°C)	-21°C (-20°C)	25°C
$T_{i+1} - T_i$	1 deg (3 deg)	2 deg (-3 deg)	2 deg (0 deg)	4 deg (2 deg)	46 deg	

(注) () 内は庫内温度およびその差



第9図 エアカーテン等温分布

Fig.9. Isothermal curve of air curtain flow

以上のように JL-6C 形のエアカーテンは, 上流から下流まで十分に断熱性能を持っている。

次に第7図の各端子移動線上の点を等温線として結んだものが第9図である。図から

- (1) ハニカム下部からリターン上部まで -20°C と 20°C の等温線が伸びていて, 十分熱しゃ断効果と冷却効果をあげている。またそれらの温度間の空気はほとんどリターンの吸込部に回収され, 回収能率が非常に良い。
- (2) 庫内空気温が -20°C 以下に確実に冷却されている。
- (3) 第7図と比較してインナジェットが -20°C 以下, ミドルジェットが 0°C から 10°C, アウタジェットが 20°C ないし 30°C 以上と考えられるので, 各層が十分層流になって流れているといえる。

(4) 20°C 以下の等温線が第3段棚下以下で庫内側に向かっていることから, 従来から主張されているエアカーテン下流の正圧(外気からの圧力)の存在が認められる。最後にエアカーテンの現象の把握のまとめとして, シュリーレン写真と断面温度分布との照合を試みる。

ハニカム下部では, 第4図の庫内側 T_1 が第7図のハニカム下部の端子移動線上で -22°C, T_2 が -22 ~ -30°C の境界, T_3 が -30°C のインナジェット, T_4 が -30 ~ 5°C までの境界, T_5 が 5°C のミドルジェット, T_6 が 5 ~ 30°C までの境界となり, これまで解析したシュリーレン写真と断面温度分布の完全な一致を見た。同様に第5図と第7図の関係も理解できる。

このように、エアカーテンの現象を観察するのにシュリーレン写真、もしくは断面温度測定が非常に有効であり、かつ信頼のおけるものであるといえる。

3. 風速変化による影響

第 2 表の結果から、外気侵入量を最小にする最適風速は 1.56 m/s といえる。

この種の組合せは、後日、実験計画法で詳しく取り扱う予定であるので、ここでは定性的な法則にとどめておく。

熱しゃ断効果をあげるために、原則としてハニカム幅は厚く、開口部 (エアカーテン部) はできるだけ小さく、またインナジェットの風速は速いほど良く、またその温度も低いほど良いと考えられる。実際はこれらの因子の相関関係で決まる。

4. 侵入空気量と熱侵入量

エアカーテンから侵入する空気量の大小がそのしゃ断特性を示す要素となるので、はじめにエアカーテンを通過する空気量をドレン量から求め、次にショーケース全体に侵入する熱量を計算して、その中でエアカーテンからの熱侵入量の占める割合を考察する。

(1) 空気侵入量

エアカーテンから侵入する空気侵入量をドレン量から計算する。

ドレン量を $D(\text{kg/h})$ 、庫外空気絶対湿度を $x_1(\text{kg/kg})$ 、蒸発器吹出空気絶対湿度を $x_2(\text{kg/kg})$ 、外気比体積を $v(\text{m}^3/\text{kg})$ とすると、エアカーテンからの外気侵入量 $V(\text{m}^3/\text{h})$ は次式で表される。

$$V = D \cdot v / (x_1 - x_2)$$

ここで第 2 表の No.6 の値を使用して $D = 0.60(\text{kg/kg})$ 、 $x_1 = 0.0165(\text{kg/kg})$ (温度 30°C 、湿度 60% の外気)、 $x_2 = 0.0037(\text{kg/kg})$ (温度 0°C 、湿度 100% の蒸発器吹出空気)、 $v = 0.882(\text{m}^3/\text{kg})$ を代入すると、 $V = 41.3(\text{m}^3/\text{h})$ となる。

なお、この値は現在出回っている各社の冷凍多段オープンショーケースの中でもきわめて少なく、当社の JL-6C 形機の空気しゃ断特性が非常にすぐれていることを示すものである。

(2) 熱侵入量

オープンショーケースの熱負荷は、エアカーテンからの侵入空気に伴う熱量、エアカーテンを通過する熱ふく

第 4 表 オープンショーケースの熱侵入量

Table 4. Heat load of open refrigerated cabinet

	熱侵入量 (kcal/h)	割合 (%)
エアカーテンからの熱侵入	1,130	35.53
エアカーテンを通過する熱放射	217	6.82
ショーケースを囲む壁からの熱侵入	86.5	2.72
電装部品等の発熱	1,740	54.70
品物の持っている熱量	7.2	0.23
総 侵 入 量	3,180.7	100

射、ショーケースを囲む壁からの熱侵入、電装部品等の発熱による熱量、および商品の持っている熱量に分解できる。

第 4 表に JL-6C 形の熱侵入量の値と、各侵入量の割合を表した。

これによると、電装部品からの発熱量が総侵入量の半分を占め、エアカーテンからの侵入量は約 1/3 である。電装部品からの熱量は本機が冷凍用機種であるため、防露ヒータの影響が特に大きい。今後は、電装部品からの熱量とエアカーテンからの侵入量の減少に取り組みねばならない。なお、JL-6C 形の冷凍能力の定格は 3,140 kcal/h で、第 4 表の総侵入量と一致する。

VI. ま と め

オープンショーケースのエアカーテンの研究を行って、次の結論を得た。

- 1) エアカーテンの現象をほぼ完全に把握できた。
- 2) エアカーテンに最も影響を与える因子である風速の適当値を求める簡単な方法を研究し、空気侵入量を減少させることができた。
- 3) エアカーテンに影響を与える他の諸因子 (ハニカム部分、リターン部分等) の、おのおのの機種における対策も十分効果が出ている。
- 4) 供試体として使用した JL-6C 形のエアカーテンの優秀性が実証された。

また、今後取るべき方法としては、

- 1) これまで種々の実験を行ってきたので、より効率の良いエアカーテンを設計するため、もっと系統の実験法を使い基本データから製品応用への関連づけを行う。
- 2) 具体的な観察法としてシュリーレン法、空調シミュレーション法等を活用して、エアカーテンの全体を把握する。
- 3) 店内空調との関連でエアカーテンをとらえ、これを空調システム系の一環と考えることによって、エアカーテンの改良をマクロ的に扱う。

以上のように、エアカーテンの技術が今後ますます重要になると予想でき、この研究成果を踏まえてエアカーテンの基礎解析と空調系まで含めた広範な応用のためにいっそう努力する所存である。

参考文献

- (1) 新津・加藤：エアカーテンの性能および設計に関する研究、衛生工業協会誌 32, No.10 1 (昭 33.10 月)
- (2) 長岡・畑：冷蔵庫用エアカーテンの特性の研究、冷凍 38, No.434 15 (昭 38)



*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。