自然對流に因る冷藏庫内の定常氣流と その模型實驗に就いて

岡 田 光 世

Steady Circulation of Air in a Cold-Storage Warehouse Produced by Natural Convection and its Reproduction in Models.

Mitsuyo OKADA

SYNOPSIS

By the aid of the principle of dynamical similitude applied on the equations of natural convection in the steady state with an assumption that the coefficient of eddy diffusivity is proportional to the velocity V and the linear dimension L of the general flow, the present author⁽¹⁾ has previously come to the following conclusions:

1. Whenever the distribution of temperature on the similar boundaries is similar, the distribution of temperature at any other points as well as the velocity of the general flow becomes similar in the steady state.

2. The relation between velocity of the general flow and the difference of temperatures at any assigned similarly located points θ is given by $V \propto (\theta L)^{\frac{1}{2}}$

In the summer of 1930 the circulation of air in a cold-storage warehouse was studied. The temperature and the three components of the general flow of air in several parts of the warehouse were observed and they were afterwards reproduced by models of about one seventh (1/7, 1/6.8) of the actual scale in linear dimension (Fig. 3). A kind of optically registering pendulum current meter as shown in Fig. 1 was devised for the measurement of very weak current in the dark rooms such as the cold storage warehouse. In the models the velocity component along a lengthwise vertical plane was observed by following the motion of patches of smoke supplied from a reservoir, the direction having been sketched.

The results of model experiments are compared with those of the actual observations with regard to the following points:

(i) the relative values of temperature $\theta - t = (\theta - \bar{\theta}_1) / (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)$, where $\bar{\theta}_1$ and $\bar{\theta}_2$ are the means of temperature of the cooler and the warmer halves of the general circulation respectively—calculated in the case of models t' with those in the actual cases t (Fig. 5), (ii) the direction of the general flow, sketched in the case of models ($\rightarrow$ or $\rightarrow$) with that of the corresponding component of velocity in the actual cases ($\Rightarrow$), obtained by the combination of the observed components (Fig. 4) and finally (iii) the speed of flow in the just mentioned direction in the case of models V' multiplied by the factor $(\Delta\theta L / \Delta\theta' L')^{\frac{1}{2}}$, where $\Delta\theta = \bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1$, $\Delta\theta'$ is the same thing for models and $L/L' = 7$ or 6.8 , with the magnitude of the corresponding component of velocity in the actual cases V (Fig. 7).

From the above comparisons, we can ascertain that the conclusions 1. and 2. drawn from the previous study are valid in the case of studying the steady circulation of air produced by natural convection in a cold-storage warehouse.

(1) OKADA, M.: Circulation of air in a cold-storage warehouse. I. Preliminary experiments on convection current in a rectangular chamber cooled above and heated below. J. Imper. Fisher. Inst. **26** (2), 1931, 69-78.

冷蔵庫内の空間に於ては、その形状周囲の温度の分布如何に従つて、其の内に起る自然對流に依る空氣の環流の流向、速さ等が定まる。此の關係を模型實驗で研究する前程として、模型に依り如何なる條件の下に實際の關係が表はされるかを知るために、實地と模型との比較を行つた。

昭和五年(1930)八月戸畑冷蔵株式會社の好意を得て、同會社冷蔵庫内の氣流を觀測することが出來た。茲に多大の便宜を與へられた村山威士・加藤舜郎兩氏に深謝の意を表し度い。又觀測の準備には和田英夫氏、觀測には三善清旭氏の助力を得た。兩氏に對して感謝する次第である。

氣流を觀測する爲に第1圖のやうな流速計を用ひた。輕い雲母板の羽を有する振子を、寫眞感光紙の薄片を支ふる弧狀のブリキ板にて均合を取り、雲母板に及ぼす氣流の分力に應じて起る振子の偏りを、固定した豆電球の光を細孔を通して感光紙に當てることに依つて記録

*m: mica, p: photographic developing paper,
l: enameled electric lamp with a pinhole.*

Fig. 1. 第1圖 流速計。

Fig. 2. 第2圖 流速計記錄の一例。

させた。實測に際しては流速計を消燈した冷蔵庫内に裝置し、先づ此れをボール箱で覆つて氣流を遮り、豆電燈を點じて數分間放置し、平衡の位置で感光紙に感光せしめ、次に箱を取り去つて氣流を受けしめ、數十分間放置して偏つた位置で感光させた。第2圖は記錄の一例を示す。記錄は一般に振子が或る偏りの左右に振動したことを示してゐる。此れは主として氣流が略々定常な主流の外に亂渦を伴ふためと考へられる。振動の中心に對する偏りの角を記錄から求めて、此の主流の平均速度の一成分に相當する偏りを示すものと見た。主流の平均速度と偏りとの關係を知る爲に、豫め線香の煙を使つて主流の速度を實測した自然の風又は扇風機に依つて長さ約50cm、截口約30cm²×25cm²の風洞中に起した氣流中に流速計を置いて、分度器で平均の偏りを読み取つた。しかるに此の偏りは可成りに異同があつたので次の考へに従つてその平均を求めた。振子の靜止した位置に於ける羽の面に垂直な方向に速さ

v なる氣流が在つて、その爲に起る振子の偏りの角を θ とすれば、 θ が小さい範圍では、氣流の及ぼす能率は $v^2 \cos^2 \theta$ に比例し、此れと均合ぶ重力の能率は $\sin \theta$ に比例すると考へられる。故に、 k を常數とすれば

$$v^2 = k \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} \doteq k \theta \left(1 + \frac{5}{6} \theta^2 \right).$$

測定した v, θ の値から $v^2, \theta \left(1 + \frac{5}{6} \theta^2 \right)$ を計算して、上記の關係を圖示し、圖の上で各振子の常數 k を定めた。

冷蔵庫内の溫度は U 字型トルエン最高最低寒暖計で流速觀測中の最低溫度を測り、その指度を棒狀水銀寒暖計と比較して補正した。此の補正は應々 $\pm 1^\circ \text{C}$ 以上に及んだ。

第 3 圖は觀測當時の冷蔵庫内の在荷狀態を示す。在庫品はすべて冷凍魚であつた。太い點線内は氣流を觀測した場所である。第 4 圖に各部分の氣溫、流速の觀測點の位置を示してある。すべての場合に庫内の場所による溫度の差異は 1°C 内外を出でず、從つて主流の速さも極めて小さく、此れ等の冷蔵庫の優秀な性能を示した。

此れ等實測の狀態を模型に於て再現させる爲に、室内用冷蔵庫内に $\frac{1}{7}$ 又は $\frac{1}{6.8}$ の模型を硝子板、トタン板、及びボール紙で作し、電流で加熱したニクロム線及び水道水を通じたタンク及び鉛管を適宜に配置して、空間の周圍の溫度の分布を努めて實地の分布と相似ならしめ、溫度及び環流が定常となる迄數時間待つて、溫度及び流速を測定した。第 4 圖に示す模型 No. 3 及び 4 を除く外、實地に溫度を測つた位置に相應する點に一接點を固定した熱電

Fig. 3. 第 3 圖 冷蔵庫内の在荷狀態。太い點線は實驗した場所を示す。

對で温度を測り、流速は線香の煙を煙溜めから固定した數本の細い硝子管を通じて、極めて緩徐に模型内の適當な場所に送り込み、模型内での其の觀測者の視線に垂直な運動を、直接外部から觀測して、一定距離を通過するに要する時間を測つて速さを算出し、流向を寫生した。實驗は安田秀明氏の手を煩したが、此の模型裝置及び實驗法の改良には廣瀬郁郎氏の努力に負ふ所が多い。兩氏に深く感謝する。

模型で温度の分布を實地の分布と相似にならせ得た程度を知る爲に、温度の觀測點を低温部と高温部とに分け、夫々の平均温度を $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$ とし各點の温度 θ から $t \equiv (\theta - \bar{\theta}_1) / (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1)$ を算出して、第5圖の横軸に實地の場合の t を、縦軸に模型に於ける t を取つて比較してある。但し t の計算で實地と模型と同じ點で温度の觀測してない No. 3 及び 4 では、先づ幾何學的に挿入法に依つて模型實驗の觀測の温度から各實地の觀測點に相當する點の温度を算出した。No. 1, 3 等では比較的高い相似の度を得たが、尙ほ充分な程度ではなかつた。

流速の關係を比較する爲には、先づ實測の流速の成分から第4圖の圖面に平行な垂直平面内の分速度を合成して、その方向を第4圖中に模型實驗で寫生した流向と共に示してある。

Fig. 4. 第4圖 觀測點の位置。流向の比較。

温度の分布が第5圖に示す程度に相似でも、一般に流向は實地と模型とで可成りよく一致してゐる。速さの比較は次のやうに行つた。

曩に著者⁽¹⁾は互に相似な方形の小室の床を一様に熱し、天井を一様に冷却した時起る自然對流に依る空氣の環流を研究して、次の結果を得た。

1. 環流内各部の流向は運動が定常状態になると常に相似になる。
2. 運動は亂流を伴ふが、全體としての環流の周期 T と床、天井の温度差 θ 及び室の大きさ L との間には $T \propto (\theta L)^{\frac{1}{2}}$ なる關係が常に成立する。

此の事實を説明する爲に、一般に定常な自然對流による流體の環流に就いて、力學的相似の條件を求めるに際して、次の様に推論した。定常な自然對流を考へると、その熱方程式、運動の方程式及び連続の方程式は BOUSSINESQ⁽²⁾, Lord RAYLEIGH⁽³⁾ 等⁽⁴⁾ に従へば近似的に

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad & u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \\ 2. \quad & \left(u \frac{\partial}{\partial y} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) (u, v, w) = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) P \\ & + (0, 0, g\alpha\theta) + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial}{\partial z} \right) \right\} (u, v, w), \\ 3. \quad & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

なる式で表はされる。但し x, y -軸を水平に、 z -軸を垂直に上向きに取り、 (u, v, w) は主流の流速、 θ は平均の温度 θ_0 からの温度差、 ρ_0 は温度が θ_0 な時の流體の密度、 g は重力の加速度、 P は p を氣壓として $P = p + g\rho_0 z$ を表はし、 α は流體の膨脹係数、 ν, k は共に渦散度を示すものと考へられる。G. I. TAYLOR⁽⁵⁾ に倣つて或る點で假想した面積 A の小さい平面 S の一點を通して微少時間 δt に亂渦流によつて運ばれる流體の移動の S に垂直な成分を

Fig. 5. 第5圖 温度の比較。 θ : 各點の温度、 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$: 低温の部分及び高温の部分の平均温度、 t : 實測からの値、 t' : 模型實驗での値。

δl_n , 亂渦の S に垂直な分速度を w_n とすれば, k, ν は

$$k = \nu = \frac{1}{A} \iint \delta l_n w_n dS,$$

なる式に依つて表はされる。此處で同じ流體の相似な定常環流に於ては、亂渦の大きさ、速さが主流の大きさを代表する長さ L 及び速さ $V(u, v, w)$ に比例するといふ假説を立てると、 $k = \nu \propto LV$ となる。著者は此の假定の下に (1) の満足すべき相似の條件を求めて、相似な空間の周圍の溫度の分布が相似な場合には、常に溫度の分布及び運動は相似となり、相似の位

Fig. 6. 第 6 圖。平均の速度と溫度差。⊙: 實測からの値、○: 模型實驗での値。

置に在る二點での溫度差を θ とすれば

$$V \propto (\theta L)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

なる關係が成り立つことを結論した。従つて環流の周期 T は前記の關係を満足することになる。

今 (2) が實地の冷蔵庫とそれと相似な模型との場合にも成立するかを検べることにする。先づ溫度分布が比較的よく實地と相似になつた No. 1 及び 3 の場合で、上述の主流の垂直平面内の分速度 V を觀測點の總てについて平均して $\bar{V}$ とし、模型に於ては實地の各觀測點に相當する點の附近で測つた速さを平均して各點の速さ V' とし、更に之を平均して $\bar{V}'$ を算出し、上述の高溫度と低溫度との溫度差 $\Delta\theta, \Delta\theta'$ に實地に於ては $L=7.0$ 又は 6.8 , 模型に於ては $L'=1$ を乗じて、 $\log \bar{V}, \log \bar{V}'$ と $\log(\Delta\theta \cdot L), \log(\Delta\theta' \cdot L')$ との關係を求め第 6 圖及第 1 表に示

第 1 表									
No. 1.	$\Delta\theta$	0.45°C	$\Delta\theta'$	0.64	0.80	0.83	1.25	1.70	°C
	$\bar{V}$	13.6 cm./sec.	$\bar{V}'$	6.2	9.1	8.6	8.2	10.7	cm./sec.
No. 3.	$\Delta\theta$	0.6°C	$\Delta\theta'$	1.0	1.2	1.4	1.8		°C
	$\bar{V}$	14.9 cm./sec.	$\bar{V}'$	8.7	8.0	9.6	10.0		cm./sec.

した。第 6 圖に依つて、此の關係は同圖に點線で示された $\log \bar{V} = C + \frac{1}{2} \log(\Delta\theta \cdot L), \log \bar{V}' = C + \frac{1}{2} \log(\Delta\theta' \cdot L')$ (但し C は同一の常數) なる關係で表はされるものと見て支障ないことが判

る。従つて平均の速さについては(2)が成立する。

更に各観測点での速さを比較する爲に、上記の例及び他のすべての場合に於て

$$V' \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta'} \cdot \frac{L}{L'} \right)^{\frac{1}{2}}$$

を計算し、此れと V とを比較した。第7圖に此れを示す。孰れの場合も、近似的には両者が等しいことが判る。即ち各部分に互つても(2)の關係が大體満足されて居るものと考へられる。

Fig. 7. 第7圖。速さの比較。 V : 實測からの各點の速さ。

V' : 模型實驗での値。

以上温度、流向、速さの比較から、模型に於て空間の周囲の温度を調節することに依つて空間の各部の温度を實地の冷蔵庫内の状態と略し相似にすることが出来、温度の分布を相似にすれば常に運動は相似となり、その速さと温度の分布とには(2)の關係が成り立つものと結論することが出来る。

終りに臨み此の研究に終始熱心な御指導を賜つた理學博士田内森三郎教授に厚く御禮申し上げる。

摘要。冷蔵庫内の自然對流に因つて起る氣流内の温度の分布、流向、速さを如何に模型に於て再現出来るかを知る爲に、實地の冷蔵庫内の温度、氣流の流速を實測し、約 $\frac{1}{7}$ の模型で之を再現し、曩に著者⁽¹⁾の得た自然對流の力學的相似の條件が満足されるべきことを證明した。

和 昭 七 年 十 月。

水産講習所物理研究室にて。

文 獻

- (1) 岡田光世: 冷蔵庫内の氣流 I. 低温の天井と高温の床との間の對流に關する 實驗の結果に就て。水産講習所研究報告。26 (2), 1931, 75-80.
- (2) BOUSSINESQ: "Théorie analytique de la chaleur." 2, 1903, 174.
- (3) LORD RAYLEIGH: On the convection current in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the upper side. Phil. Mag. 32, 1916, 529; Scientific Papers. 6, 436.
- (4) SEELIGER, R.: Die Abkühlung heißer Körper in Gasen und Flüssigkeiten. (Zusammenfassende Berichte). Phys. Zeits. 26, 1925, 282-295.
- (5) TAYLOR, G. I.: Eddy motion in the atmosphere. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 215, 1914, 1-26.