傾斜密閉容器内の自然対流熱伝達*
(内部にある物体の影響について)木村 照夫*¹, 竹内 正紀*¹, 宮永 俊晴*²Natural Convection Heat Transfer in Inclined Rectangular Enclosure
(Effect of Body in Enclosure)

Teruo HIMURA, Masanori TAKEUCHI and Toshiharu MIYANAGA

The effects of the inner body on the heat transfer phenomena in an inclined rectangular enclosure have been studied numerically. The calculations were carried out for $Pr=10$ and $Gr_w=5\times 10^2-5\times 10^5$ ($Ra_w=5\times 10^3-5\times 10^6$). The aspect ratio of the enclosure H/W was 2 throughout the study. The size ($W_i/W, H_i/H$) and the aspect ratio H_i/W_i of the nonconducting inner body were changed parametrically. The flow and temperature fields were shown in detail and the heat transfer coefficient was discussed from the results. It is clarified here that the average Nusselt number $\overline{Nu_w}$ largely depends on the size of the inner body in the case where the inclination angle γ is larger than 0° , and there are instances where $\overline{Nu_w}$ for the enclosure with the inner body is larger than that for the enclosure without inner body.

Key Words: Convective Heat Transfer, Natural Convection, Inclined Rectangular Enclosure, Inner Body, Numerical Analysis

1. 緒 言

太陽熱集熱器あるいは二重窓や建物の壁などの建築構造物, さらには電子機器容器の設計に関連して, 対向する伝熱面がそれぞれ加熱, 冷却される断面長方形の容器が傾斜して置かれた場合の熱伝達特性の研究が数多くなされている[例えば文献(1)~(3)]. その結果, 容器の縦横比, 傾斜角度によって容器内部の流動状態ならびにそれに応じて熱伝達係数が複雑に変化することが知られている. 一方, 積極的に熱伝達を促進, 抑制するために用いる場合をも含め, 容器内に物体が存在することが多々あり, 鉛直密閉容器に関しては天井部, 底部あるいは鉛直伝熱壁に仕切板が取付けられた場合, あるいは空間内に物体を認置した場合の研究が勢力的になされている[例えば文献(4)~(6)]. しかし傾斜容器内における, これら物体の影響を論じた研究は伝熱面に取付けられた仕切板に関する若干の研究⁽⁷⁾はあるものの, 著者らの知る限り数少ない.

傾斜密閉容器内に存在する物体の影響を調べておくことは太陽熱集熱器, 電子機器容器さらには自然対流

を利用した蓄熱器などを設計する上で基礎資料と成り得ると同時に, 密閉容器内の熱移動を制御(促進, 抑制)する手法の開発に示唆を与えるものと考えられる. そこで本研究では, 断面長方形の傾斜容器内の自然対流熱伝達現象に及ぼす容器内の空間に置かれた物体の影響を数値解析により明らかにした. 容器内に物体が存在すると, 伝熱面に沿って生じる境界層と物体との干渉により熱伝達は大きく影響を受ける. この場合, 熱伝達現象は物体の熱伝導率によっても大きく影響されることが考えられるが, 本報では, 研究の第1段階として容器の傾斜と物体の大きさに着目し, 物体の熱的性質としては熱伝導がない場合, すなわち断熱物体を対象とした.

2. 主な記号

Gr_w : グラスホフ数 $= g\beta W^3(T_H - T_C)/\nu^2$

g : 重力の加速度

H : 容器の高さ

H_i : 物体の高さ

h : 物体の高さと容器の高さとの比 $= H_i/H$

Nu_w : 局所ヌセルト数(加熱面) $= -(\partial\theta/\partial x)_{x=0}$

$\overline{Nu_w}$: 平均ヌセルト数(加熱面)

* 平成2年11月2日 熱工学講演会において講演, 原稿受付
平成2年9月25日.

*¹ 正員, 福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1).

*² 学生員, 福井大学大学院.

$$= - \int_0^r (\partial\theta/\partial x)_{x=0} dy/r$$

P : 圧力

p : 無次元圧力 $= PW^2/(\rho\nu^2)$

Pr : プラントル数

Ra_w : レイレー数 $= Gr_w \cdot Pr$

r : 容器の縦横比 $= H/W$

T : 温度

T_c : 冷却面温度

T_H : 加熱面温度

t : 時間

U, V : X, Y 方向の速度

u, v : 無次元速度 $UW/\nu, VW/\nu$

W : 容器の幅

W_i : 物体の幅

w : 物体の幅と容器の幅との比 $= W_i/W$

X, Y : 座標軸

$\bar{X}, \bar{Y}$: 水平および鉛直方向の座標軸

x, y : 無次元座標軸 $X/W, Y/W$

β : 体膨張係数

γ : 容器傾斜角

θ : 無次元温度 $= (T - T_c)/(T_H - T_c)$

ν : 動粘度

ρ : 密度

τ : 無次元時間 $= \nu t/W^2$

$\Delta\tau$: 無次元時間間隔 (数値解析)

Ψ : 流れ関数

ϕ : 無次元流れ関数 $= \Psi/\nu$

3. 数値解析の方法

本解析で取扱う系は図1に示すように、内部の中央対称位置に高さ H_i , 幅 W_i の断熱物体が存在する高さ H , 幅 W の長方形断面の傾斜密閉容器である。容器の一側壁が一様温度に加熱, また対向する一側壁

図1 解析モデルと座標系

が一様温度に冷却されるものとし, 他の対向2側壁は断熱とする。流体は非圧縮性とし, 粘性散逸を無視し, 浮力項以外のすべての物性値を一定とすると, 場を支配する基礎方程式は記号欄に示す無次元量を用いると次のように定式化できる。

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \sin \gamma \cdot Gr_w \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \cos \gamma \cdot Gr_w \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial(u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\theta)}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

本報では, 上記基礎式の解法として差分法(8)を用い, 下記初期条件, 境界条件の基で解析し, 定常解を求めた。

初期条件は

$$\tau=0 \text{ で } u=0, v=0, \theta=0, p=0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

境界条件は, 容器の周囲壁について

$$x=0 \text{ および } 1, 0 \leq y \leq r: u=0, v=0, \theta=1(x=0), \theta=0(x=1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$0 < x < 1, y=0 \text{ および } r:$$

$$u=0, v=0, \partial\theta/\partial y=0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

さらに物体の周囲壁について

$$x=(1-w)/2 \text{ および } (1+w)/2 \\ r(1-h)/2 \leq y \leq r(1+h)/2: u=0, v=0, \partial\theta/\partial x=0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$(1-w)/2 \leq x \leq (1+w)/2 \\ y=r(1-h)/2 \text{ および } r(1+h)/2: u=0, v=0, \partial\theta/\partial y=0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

なお, 計算に用いた格子数は物体と容器周囲壁との間隔の大きさに応じて $42 \times 52 \sim 102 \times 102$ である。また, 非定常計算において $[\overline{Nu_w}(\tau + \Delta\tau) - \overline{Nu_w}(\tau)]/[\overline{Nu_w}(\tau) \cdot \Delta\tau] < 5 \times 10^{-3}$ になったときを定常な現象とみなした。すべての計算は $Pr=10$ で行い, Gr_w の値としては $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ ($Ra_w = 5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^6$) の範囲で行った。容器の縦横比 H/W は2とし, 容器中央部に置かれた物体の大きさとその縦横比 H_i/W_i , および容器の傾斜角 γ を種々変化した。なお, 本解析で得られた物体がない場合の平均ヌセルト数は

Ozoeらの解析⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と、 $Ra_w=5 \times 10^4$, $\gamma=0^\circ$ のとき9%, $Ra_w=5 \times 10^4$, $\gamma=45^\circ$ のとき2%の相対誤差で、また部谷らの解析⁽¹¹⁾と $Ra_w=5 \times 10^4$, $\gamma=0^\circ$ のとき1%の相対誤差で一致している。

4. 結果と考察

本報の系では伝熱面に沿って生じる境界層と物体壁との干渉および容器内に生じる循環流と物体との干渉によって熱伝達は影響を受ける。したがって、まず、伝熱面に沿う境界層と物体側壁が干渉しない程度のグラスホフ数と物体の幅について考察し、次に、それらが干渉する程度のグラスホフ数あるいは物体の幅の影響について考察を加える。まず、前者の例として、 $Gr_w=5 \times 10^5$, $w=0.4$ で一定の場合に物体の高さ h をパラメータとして、容器傾斜角度 γ と加熱面の平均ヌセルト数 $\overline{Nu}_w$ との関係を図2に示す。図2より知られるように物体の大きさにかかわらず傾斜角度 γ が $\gamma > 0^\circ$ の場合(加熱面が冷却面の上方に位置する場合)には γ の増加とともに $\overline{Nu}_w$ は急激に低下する。一方、 $\gamma < 0^\circ$ の場合(加熱面が冷却面の下方に位置する場合)には鉛直の場合($\gamma=0^\circ$)より $\overline{Nu}_w$ はわずかに増加する。なお、 $\gamma=-45^\circ$ に対しても数値解析を行ったが定常解は得られず $\overline{Nu}_w$ は計算時間の進行とともに振動を繰り返した。これは加熱面が上向き発熱面になると稲葉らの実験⁽¹⁾にも示されているように、ある角度以上で流動状態は不安定な流れに遷移するためと考えられる。本報ではこのような流れの発生しない $\gamma \geq -30^\circ$ の場合について考察することにする。図2においては、後述の図4に見られるように境界層が薄く、各傾斜角度

において $\overline{Nu}_w$ に及ぼす物体の大きさ h の影響は顕著には見られないが、各傾斜角度において h と $\overline{Nu}_w$ との関係を詳細に示したのが図3である。 $\gamma=-30^\circ$ および 0° では $\overline{Nu}_w$ は h の値にかかわらずほぼ一定である。しかし、 $\gamma=30^\circ$ においては h が小さいと $\overline{Nu}_w$ はほぼ一定であるが $h > 0.5$ において h の増加とともに $\overline{Nu}_w$ のわずかな増加が見られる。すなわち物体の存在が熱伝達の促進効果をもつことを示している。さらに、 $\gamma=45^\circ$ においても $h \approx 0.5$ で $\overline{Nu}_w$ は最大となるが h がそれより大きくても小さくても $\overline{Nu}_w$ は減少する。一方 $\gamma=60^\circ$ においては $\overline{Nu}_w$ は h の増加とともに大きく減少する。このように $\overline{Nu}_w$ に及ぼす h の影響は傾斜角度の大きさによってそれぞれ異なる様相を示すことがわかる。これらの理由は速度場と温度場の様子より次のように説明できる。

図4は物体の存在しない密閉容器内の速度場と温度場の様子を速度ベクトルと等温線により $Gr_w=5 \times 10^5$ を例に各容器傾斜角度について示している。なおここで流動パターンを明確にするために速度ベクトルの単位長さは各 γ によって異なる値を用いている。ここで、速度の大きな所はベクトル長が長く、したがって図4では色濃く現れている。また等温線は θ の値が0.1きざみで表示されている。図4より知られるように伝熱面が鉛直($\gamma=0^\circ$)あるいは加熱面が上向き($\gamma < 0^\circ$)に

図2 γ と $\overline{Nu}_w$ の関係

図3 h と $\overline{Nu}_w$ の関係

図4 速度場と温度場 ($Gr_w = 5 \times 10^5$, Without Inner Body)

位置する場合には流体は周囲壁面に沿って速度境界層を生じ、単純に容器内を循環する。また、容器中央部では流体運動は非常に弱くなり明確な温度成層を生じる。しかし、加熱面が下向きに位置する場合 ($\gamma > 0^\circ$) には加熱面に沿って上昇、あるいは冷却面に沿って下降する流体の一部は各伝熱面の中で水平方向に流動方向を変え、平行四辺形の循環流を形成するとともに循環流内部および循環流外の容器の上、下部の流体運動が非常弱くなる。このことは等温線の様子からも明らかである。すなわち平行四辺形状循環流内部は温度成層し、 γ が大きいほど等温線の並びは密になるが循環流外上下の領域の鉛直方向の温度こう配は非常に小さく、流体がよどみ状態にあることと対応している。このような流れは断面台形容器の自然対流⁽¹²⁾でも見られ、その流動パターンの発生理由は同じである。したがって傾斜角度の増加とともに容器の上、下部の流体運動が弱く、局所熱伝達率の小さい領域が増すとともに平行四辺形状の循環流領域が小さくなること、および循環流領域の対流運動が弱くなることより先述の Nu_w は γ の増加とともに減少するものと考えられる。すなわち容器が傾斜した場合の熱伝達は平行四辺形状の循環流が支配する。したがって本報で取扱う系はこの平行四辺形状の循環流に対して内部物体がどの

図5 h と ψ_B の関係

ように干渉するかが問題となる。

図5は物体の存在が流動の大きさに及ぼす影響を知るため、物体の大きさ h と容器傾斜角度を種々変化した場合の物体表面の流れ関数 ψ_B の値を示している。なお、この ψ_B の値は容器内で物体まわりを循環する流量を表す。図5より知られるように γ が大きいほど ψ_B の値は小さく、それぞれの γ においては h が大きくなると ψ_B は減少し、その減少の割合は γ が大き

くなるほど増加する。すなわち物体の存在は流動を妨げる効果を持ち、その効果は γ が大きいほど顕著となる。

$\gamma = -30^\circ$ および 0° の場合には流動状態は周囲壁面に沿って単純であり、 h の増加とともに循環流量は若干減少するものの壁面近傍に生じる境界層と物体とが干渉しない限り物体の $\overline{Nu_w}$ に及ぼす影響は先述のように小さいといえる。

図6は $\gamma = 30^\circ$ を例に種々の大きさの物体に対する速度場を $Gr_w = 5 \times 10^5$ について示している。物体が小さい場合($h = 0.1$)には物体は先述の平行四辺形状循環流の中に収まり、 $\gamma \leq 0^\circ$ の場合と同様、循環流の流動パターンに及ぼす影響は小さい。しかし物体が大きくなると物体は上述の平行四辺形状循環流と干渉し、流動パターンに顕著な変化が見られる。すなわち図6より明らかなように物体が大きくなるほど循環流は物体をう回して流動するため循環流領域は拡大し、循環流の各伝熱面に沿う長さが長くなる。したがって、この物体が伝熱面に沿う流体の流動長さを増加させる効果により $\overline{Nu_w}$ は h の増加とともに増大するものと考えられる。図7は $\gamma = 45^\circ$ の結果を示している。 $\gamma = 45^\circ$ においても循環流の伝熱面に沿う長さは h の増加とともに増大するが逆に h の増大により先述の流動を妨げる効果が大きくなり、したがって循環流拡大効果

と流動抑制効果の兼ね合いにより $\overline{Nu_w}$ は $h \approx 0.5$ で極値をとると考えられる。図8に示す $\gamma = 60^\circ$ においては伝熱面の傾斜が大きいため、先述のように対流運動が弱くなるとともに平行四辺形状の循環流も偏平となる。したがってより小さな物体でも循環流の流動に影響を与え、循環流の伝熱面に沿う長さの増加の効果よりも物体が大きくなることによる流動の抑制効果がいずれの h に対しても大きく h の増大とともに $\overline{Nu_w}$ は低下するものと考えられる。

図9は $Gr_w = 5 \times 10^5$ における加熱面の局所ヌセルト数 Nu_w を $\gamma = 30^\circ$ および 60° について示している。 $\gamma = 30^\circ$ の場合、物体の存在する高さである加熱面中央付近では h の増加とともに Nu_w は減少するが、容器上下の領域では h の増加とともに Nu_w は増大する。ここで、容器上方の Nu_w の増加は先述の伝熱面に沿う流動長さの増加の効果によるものであり、容器下方の Nu_w の増加は h の増加とともに冷却された流体が加熱面下方に流動するためと考えられる。この容器上下における Nu_w の増大が平均熱伝達係数を増加させる原因となる。一方、 $\gamma = 60^\circ$ においては加熱面のいずれの高さにおいても h の増加とともに Nu_w は減少する。これは先述の流動抑制効果が大きいことで、 h の増大による循環流の拡大効果は Nu_w の増大には至らないことを示している。

図6 速度場 ($Gr_w = 5 \times 10^5$, $\gamma = 30^\circ$)

図7 速度場 ($Gr_w = 5 \times 10^5$, $\gamma = 45^\circ$)

図 8 速度場 ($Gr_w = 5 \times 10^5$, $\gamma = 60^\circ$) (a) $\gamma = 30^\circ$ (b) $\gamma = 60^\circ$

図 9 局所ヌセルト数

図 10 は $Gr_w = 5 \times 10^5$ を例に物体の幅 w が 0.2 および 0.8 の場合について h を種々変化させた場合の $\overline{Nu_w}$ の結果を先述の $w = 0.4$ の場合の結果とともに示している。 $w = 0.8$ と物体の幅が大きくなると対流運動が弱められるため、 $\overline{Nu_w}$ は w が小さい場合の値よりも低下するとともに、 h の増加に伴って減少する。 $w = 0.2$ の場合は h の変化による $\overline{Nu_w}$ の様子は $w = 0.4$ の結果と定性的に同様であるが w が小さいにもかかわらず定量的には若干小さくなる。これは $w = 0.2$ と 0.4 とでは対流運動の強さへの影響は同程度であるが、図 11 に示す速度場の様子から明らかのように同一の h の値では $w = 0.2$ に比べて $w = 0.4$ のほうが壁面に沿う流動長さが若干長くなるためと考えられる。

以上のように傾斜角度によって物体の大きさ (h , w) が $\overline{Nu_w}$ に及ぼす影響が異なることが示されたが、 Gr_w が異なれば壁面に沿う境界層厚さが変化するため、物体の存在が $\overline{Nu_w}$ に及ぼす影響も変化するものと考えられる。そこで図 12 は $\gamma = 45^\circ$ を例に $w = 0.4$, $h = 0.8$ の物体について Gr_w と $\overline{Nu_w}$ との関係は物体のない場合の結果とともに示している。図 12 より明らかのように Gr_w が大きい場合には物体の有無により $\overline{Nu_w}$ はほぼ同一か物体のある場合のほうが若干大きくなる。これは図 13 に示すように Gr_w が大きいと境界層が薄くなり対流の強さに対する物体の影響が小さいこと、および物体の存在による壁面に沿う流動長さの増加の効果によるものと考えられる。一方 Gr_w が小さくなると物体が存在する場合の $\overline{Nu_w}$ は物体のない場合に比べてかなり小さくなる。これは Gr_w が小さくなると境界層が厚くなり周囲壁面に沿って流動する流体層と物体とが干渉することによる物体の流動抑制効果の増大のためであると考えられる。図 14 は $\overline{Nu_w}$ に及ぼす h の影響を $Gr_w = 5 \times 10^3$ と 5×10^5 について $\gamma = 45^\circ$ を例に比較している。 Gr_w が大きい場合 ($Gr_w = 5 \times 10^5$) には先述のように物体の存在により $\overline{Nu_w}$ は増加するが、 Gr_w が小さくなる ($Gr_w = 5 \times 10^3$) と h

図 10 h と $\overline{Nu_w}$ の関係

図 11 速度場($Gr_w = 5 \times 10^5$, $h = 0.5$, $\gamma = 45^\circ$) 図 13 Gr_w と Nu_w の関係

の増加とともに Nu_w は減少する。この傾向は先述の $Gr_w = 5 \times 10^5$ で $\gamma = 60^\circ$ の場合と同様であり、壁面に沿う流動長さの増大効果よりも h の増大による対流運動の抑制効果が大きくなるためと考えられる。

5. 結 言

本報では断面長方形の傾斜密閉容器内の自然対流熱伝達現象に及ぼす容器内の空間に置かれた物体の影響を断熱物体を対象に数値解析した。その結果、 Nu_w に及ぼす物体の影響はとくに $\gamma > 0^\circ$ で大きく、容器内に生じる平行四辺形状の循環流の領域を拡大する効果と物体の存在による流動を妨げる効果の兼ね合いにより、各傾斜角度および Gr_w の大きさによって物体が Nu_w に及ぼす影響は異なり、傾斜角度の大きさによっては物体の存在が Nu_w をわずかに促進する場合があることが明らかとなった。

図 12 速度場 ($w = 0.4$, $h = 0.8$, $\gamma = 45^\circ$) 図 14 h と Nu_w の関係

文 献

- (1) 稲葉・金山, 機論, 49-448, B(1983), 2838.
 - (2) ElSherbiny, S. M., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 104-1(1982), 96.
 - (3) Wirtz, R. A., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 104-3(1982), 521.
 - (4) Acharya, S. and Jetli, R., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 33-5(1990), 931.
 - (5) Nasteel, M. M. and Greif, R., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-4(1981), 623.
 - (6) Kanchan, M. K. and Suhas, V. P., *Numer. Heat Transf., Part A*, 17(1990), 269.
 - (7) Ramón, L. F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 32-1(1989), 87.
 - (8) Francis, H. H. and Eddie, J. W., *Phys. Fluids*, 8-12(1965), 2182.
 - (9) Ozoe, H., ほか 3 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 17-10(1974), 1209.
 - (10) Ozoe, H., ほか 2 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18-12(1975), 1425.
 - (11) 部谷・ほか 2 名, 機論, 50-451, B(1984), 724.
 - (12) 木村・ほか 3 名, 機論, 52-474, B(1986), 870.
-