循環流動層内の固気混相流れに及ぼす横揺れ運動の影響 (続報) *

村田 裕 幸** 安達 雅 樹** 高木 正 英**
稲坂 富士夫*** 岡 秀 行** 平岡 克 英**
春海 一 佳**

Effects of Rolling Motion on Gas-Solid Flow in Circulating Fluidized Bed - 2nd Report

By Hiroyuki MURATA, Masaki ADACHI, Masahide TAKAGI, Fujio INASAKA,
Hideyuki OKA, Katsuhide HIRAOKA, and Kazuyoshi HARUMI

A series of experiments was performed on a circulating fluidized bed (CFB) in order to investigate effects of the rolling motion on gas-solid heat transfer in the riser. Superficial velocity was changed in the experiments, while amplitude of the rolling motion and rolling period were fixed at 15deg. and 6s, respectively. The following results were obtained: (1) Heat transfer at the riser walls was dominated by collision between particles and the wall. Therefore, it depends on change of the gas-solid flow near to the wall region. Namely, heat transfer is augmented by the downflow of particles in the upper/mid part of the riser, and is promoted by the particles drifting on the distributor, in the lower part. (2) When the CFB stands upright, heat transfer rate in the upper/mid part grows gradually with the increase of the superficial velocity through activation of the downflow. On the other hand, the heat transfer rate in the lower part of the riser decreases rapidly with the superficial velocity increase, which reduces the suspension density through the flow regime change. (3) When the CFB undergoes the rolling motion, the downflow along the riser walls periodically changes, and the contact between particles and the walls is promoted. As a result, the heat transfer rate in the rolling motion is larger than that at upright attitude in the upper/mid part of the riser. In the lower part of the riser, the heat transfer rate also increases notably by the rolling motion, which increases suspension density there.

1. はじめに

本研究は循環流動層の持つ高い反応効率と熱伝達率に着目し、4 サイクルディーゼル機関を搭載した内航船を対象に、循環流動層を利用して排気脱硫を行うと共に回収熱量の増大を図る、小型・高性能な船用排熱回収システム^{1,2)}の開発を目的とする。

船舶に搭載されるため、本排熱回収システムは横揺れ・定傾斜等の船体運動の影響を受けると考えられる。筆者らは、循環流動層における固気混相流れに及ぼす船体運動の影響を明らかにするため、循環流動層を動揺台上に搭載した模擬実験を実施し、①横揺れ運動によりライザー一部壁面の粒子下降流が周期的に変動し、壁面を流下してライザー下部に滞留する粒子量が大幅に増加するため、全圧力損失は正立時に比べて顕著に増大すること、②同様に、定傾斜状態においてもライザー下部に滞留する粒子量の増加により全圧力損失は増大すること、③横揺れ時における循環流動層の全圧力

損失は横揺れ周期には影響されないが、横揺れ振幅の増大により増加することを報告した^{3,4)}。

今回、循環流動層ライザー一部における固気混相熱伝達に及ぼす横揺れ運動の影響について実験的に検討したので、その結果を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

本実験では、前報³⁾で用いた循環流動層コールドモデルのライザー一部を改造して使用した(図1参照)。前報ではライザー一部側面の6箇所(3箇所×2面)に透明アクリル製の観察窓が設置されていたが、本実験では片側の側面3箇所を観察窓と同一寸法のベークライト製発熱板(寸法: 240mm×440mm 及び 240mm×540mm)と交換した。図中の各発熱板に付された数値は、各発熱板中央と分散板との鉛直方向距離を示す。また、分散板から158mm上方にステンレス製の円柱発熱体を流れ方向と直交させて挿入した。

送風機から供給された空気は分散板を通過し、装置内部に装填された循環粒子を巻き上げてライザー一部

*原稿受付 平成21年3月10日。
**正会員 海上技術安全研究所(三鷹市新川6-38-1)。
*** 海上技術安全研究所(三鷹市新川6-38-1)。

図1 実験装置概略

（断面寸法：288mm×288mm，高さ：2408mm）を上昇する。ライザー部を出た固気混相流はサイクロンで固気分離され，循環粒子はダウンカマー部を流下して J バルブに堆積した後，J バルブをオーバーフローして再びライザー下部に戻って装置内部を循環する。なお，J バルブに堆積した循環粒子の流動化を促進するため，コンプレッサーから少量の圧縮空気を J バルブ底部に導入する。一方，サイクロンを出た空気はバグフィルターを経て外部に放出される。本実験で使用した循環粒子は粒径 $dp:0.18\sim0.35\text{mm}$ の石灰石粒子（充填量：40kg）であり，静止時の粒子層高は分散板から 175mm となる。

実験装置には圧力計，オリフィス流量計（F1，F2）のほか，各部に温度計が設置されている。また，粒子循環量（ライザー部における循環粒子の断面平均質量速度） $G_s[\text{kg/m}^2\text{s}]$ は前報と同様，正立静止状態のときに計測し，J バルブ上部管に設置された観察窓から堆積した循環粒子の流下速度をストップウォッチで計測することにより求めた。なお，本実験では J バルブ底部に導入する圧縮空気量を全てのケースでほぼ同一としたが，粒子循環量は空塔速度の増大に伴って次第に増大する³⁾ため， $2.3\sim14.3[\text{kg/m}^2\text{s}]$ の範囲で変化している。

横揺れ運動を与えるため，実験装置は動揺台⁵⁾に搭

載された。動揺中心は実験装置の中心線上，分散板から 2400mm 上方に位置している。本実験では，図 1 に示す実験装置に対して本紙面と垂直方向に，①横揺れ振幅 $\Theta=15^\circ$ ，周期 $\tau=6\text{s}$ の横揺れ運動，②傾斜角 $\alpha=15^\circ$ の定傾斜（発熱板は側面下側）を与え，循環流動層ライザー部の熱伝達に及ぼす影響を検討した。

図 2 に本実験で使用したベークライト製発熱板の概略を示す。発熱板の内側壁面には厚さ：0.1mm のステンレス板が貼付されており，外径：1mm の T 型シース熱電対がステンレス板の裏側に 3 箇所，発熱板外側表面に 1 箇所設置されている。ステンレス板は直流電圧により直接通電加熱され，計測した端子間電圧，電流から発熱量 Q を算出する。ステンレス板表面の熱伝達率 h は次式で評価した。

$$h \cdot (\bar{T}_w - T_f) \cdot S = Q - Q_{\text{loss}} \quad \cdots (1)$$

$$\bar{T}_w \equiv (T_{w1} + T_{w2} + T_{w3})/3 \quad \cdots (2)$$

ここで，ステンレス板の平均表面温度 $\bar{T}_w$ はステンレス板裏側の熱電対計測値の算術平均値とし，固気混相流温度 T_f は分散板から 766mm 上方に設置した白金測温抵抗体（ $\phi 15\text{mm}$ ，挿入長さ：170mm）で計測した。また， S はステンレス板の面積を， Q_{loss} はステンレス板の発熱量のうち実験装置外部へ流出する熱損失を表し，次式

$$Q_{\text{loss}} \equiv -\lambda \frac{T_o - \bar{T}_w}{l} \cdot S \quad \cdots (3)$$

で与えた。ここで， λ はベークライトの熱伝導率， T_o は発熱板外側表面温度， l は発熱板厚さを示す。

図2 ライザー側面発熱板 1

図3にライザー下部に挿入した円柱発熱体の概略図を示す。円柱発熱体は内部にシースヒーターを組み込んだ外径: 15mm の円柱であり、表面温度を計測するため、外表面近くの周方向4箇所に管軸に平行な挿入孔が穿たれており、その中に外径: 1mm のT型シース熱電対が挿入されている。円柱発熱体の表面熱伝達率 h_{rod} は

図3 ライザー部円柱発熱体

図4 ライザー部発熱体の位置関係

$$h_{rod} \cdot (\overline{T_{w,r}} - T_f) \cdot S_{rod} = Q_{rod} \quad \cdots (4)$$

$$\overline{T_{w,r}} \equiv (T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4})/4 \quad \cdots (5)$$

として計算した。ただし、 $\overline{T_{w,r}}$, S_{rod} , Q_{rod} は円柱の平均表面温度、円柱発熱体表面積、シースヒーター発熱量である。

図4に動揺中心の軸方向から見たライザー側面発熱板、円柱発熱体、测温抵抗体、圧力測定孔の位置関係を示す。円柱発熱体、圧力測定孔は各々ライザー中心線から 100mm オフセットして設置されている。また、本実験ではライザー側面発熱板がライザー部の下側に位置するように定傾斜させるため、粒子下降流は発熱板に沿って流下する^{3,4)} ことになり、正立状態と比べると発熱板と循環粒子との接触は増大する。

実験は送風機流量、ヒーター出力、及び船体運動条件(正立静止状態、横揺れ、定傾斜)を設定した後、系内各部の温度をモニターし、各部温度が一定値に収束して系が定常状態になっていることを確認した上でデータ収録した。本実験装置では、条件設定後、系が定常状態に達するのに約2時間30分を要した。なお、測定値は120s間計測したデータの時間平均値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 正立時のライザー壁面熱伝達 図5に正立時のライザー側面発熱板の熱伝達率を示す。横軸は空塔速度(ライザー部の断面平均空気流速) U_g である。また、次式

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.5} \quad \cdots (6)$$

で示される、流れが発達した空気単相流のときの管内壁面乱流熱伝達率⁶⁾を併せて示す(本実験における Re 数は $2.20 \times 10^4 \leq Re \leq 6.57 \times 10^4$)。発熱板2, 3が設置されたライザー中央部、上部の熱伝達率は、 $U_g = 1.36[\text{m/s}]$ では空気単相流の値とほぼ等しいが、空塔速度の増加につれて次第に増大し、 $U_g > 2.21[\text{m/s}]$ では空気単相流における熱伝達率に比べると数倍程度大きくなっている。

前報³⁾で報告したように、空塔速度が低いと循環粒子はライザー一部上端まで到達せずに途中で落下してライザー下部に留まっている(気泡流動状態)が、空塔速度の増大に伴って循環粒子は次第に高く吹き上げられるようになり、 $U_g > 1.75[\text{m/s}]$ では循環粒子はライザー一部から流出してサイクロン、ダウンカマーを経由し

図5 ライザー部側面の熱伝達率（正立時）

図6 ライザー壁面近傍の粒子下降流

て再びJバルブからライザー下部に流入するようになり、系は循環流動層となる。このとき、断面平均で見ると、ライザー部の粒子質量速度は上昇流となっている。しかし、局所的に見ると、ライザー壁面近傍では気相速度が遅いため、壁面近傍の循環粒子は壁面に沿って流下している（粒子下降流、図6参照）。

空塔速度の増加に伴って発熱板2、3の熱伝達率が增大するのは、空塔速度が低い気泡流動状態では循環粒子がライザー中央部、上部に到達せず、ほぼ空気単相流となっているのに対し、空塔速度が増大して系が

循環流動層となると、粒子下降流によって熱容量の大きい循環粒子が発熱板に接触しながら流下するため、発熱板から失われる熱量が増大することによって推察される。

一方、発熱板1が設置されたライザー下部の熱伝達率は、 $U_g \leq 2.21$ [m/s]ではライザー中央部、上部に比べると遥かに大きい、 $U_g > 2.21$ [m/s]では急激に減少している。循環流動層ライザー部の壁面熱伝達率は粒子ホールドアップ（容積分率）の増加により増大する⁷⁾ことが知られているが、ライザー下部の粒子ホールドアップは空塔速度が増大するとライザー部の流動様式の変化により顕著に減少する³⁾。そこで、ライザー下部の熱伝達率と粒子ホールドアップとの関連について検討する。

一般に循環流動層ライザー部の鉛直方向圧力勾配は

$$-(dp/dz) = \rho_p (1 - \varepsilon) g = \rho_p \varepsilon_p g \quad \cdots (7)$$

と近似され、ライザー部の圧力勾配はボイド率 ε あるいは粒子ホールドアップ ε_p と関連づけられる⁸⁾。図7にライザー部圧力勾配から求めた粒子ホールドアップの鉛直方向分布を示す。図中の z は分散板から鉛直方向上向きに測った距離を表し、発熱板1～3の存在する範囲を併せて示す。ライザー下部の粒子ホールドアップは $U_g < 2.94$ [m/s]（乱流流動状態）では高いが、 $U_g \geq 2.94$ [m/s]（高速流動状態）では顕著に減少する。このため、 $U_g \geq 2.94$ [m/s]では発熱板1に接触する粒子量が減少して、熱伝達率が急減するものと考えられる。

発熱板1～3が存在する鉛直方向範囲の平均粒子ホールドアップを図7から算出し、熱伝達率と比較した結果を図8に示す。図より、ライザー下部の熱伝達率は粒子ホールドアップにより整理でき、既存の知見の通り、粒子ホールドアップが増加すると熱伝達率も増

図7 ライザー部粒子ホールドアップ（正立時）

図8 粒子ホールドアップと熱伝達率の関係

大する傾向を示すことが分かる。また、ライザー上部の熱伝達率も粒子ホールドアップの増加に伴って増大している。ライザー上部の伝熱促進に寄与する粒子下降流は壁面近傍の局所な現象であり、ライザー部の断面平均値である粒子ホールドアップと直接関連づけられる訳ではないが、ライザー上部の熱伝達率と粒子ホールドアップとは相関を持つことが分かる。なお、発熱板3を流下した粒子下降流は必ず発熱板2上を流下してそこでの熱伝達促進に寄与するため、ライザー中央部の粒子ホールドアップはライザー上部に比べて低いものの、その熱伝達率はライザー上部の値に比べて大きくなっている。

3. 2 横揺れ時のライザー壁面熱伝達 横揺れ時のライザー部における粒子ホールドアップ分布を図9に示す。横揺れ運動を与えると粒子下降流は周期的に変動し、着目する側面がライザー部上側となるとときには循環粒子は側面に接触することなく上昇し、ライザー部下側となるとときには側面に沿って大量に流下する³⁾。側面に沿って流下した循環粒子はライザー底部の分散板上に落下するが、横揺れ運動を受けるため落下した循環粒子の上昇は正立時ほど容易ではなく、ライザー下部に滞留する粒子量は正立時に比べて増加する。その結果、正立時では高速流動状態となる空塔速度においても、横揺れ時にはライザー下部の粒子ホールドアップは0.26と比較的大きな値を維持している。

横揺れ状態における各部熱伝達率を図10に示す。ライザー下部の熱伝達率は、 $U_g > 2.21$ [m/s]で正立時の値よりも大きくなる。これは、上に述べたようにライザー下部の粒子ホールドアップが正立状態に比べて顕著に大きいことによる。一方、横揺れ時のライザー中央

図9 ライザー部粒子ホールドアップ (横揺れ時)

図10 ライザー部側面の熱伝達率 (横揺れ時)

部、上部の熱伝達率は、空塔速度が増大すると正立時の値よりも大きくなっている。これは、横揺れ運動によりライザー部側面の粒子下降流による粒子流下量が大幅に増加することに加え、循環粒子の壁面への接触が促進されるためと考えられる。図11に示すように、ライザー側面が垂直の場合には粒子下降流が壁面に向かう力は作用しないが、側面が傾斜している場合には重力により粒子下降流が壁面に向かう力が作用する。このため、ライザー側面が傾斜している場合、循環粒子と壁面との接触の度合いは増大する。

横揺れ時の各部熱伝達率を粒子ホールドアップで整理し、正立時の熱伝達率と比較した結果を図12に示す。ライザー下部の熱伝達率は正立時の熱伝達率整理式

図11 粒子のライザー壁面への付着 (模式図)

図12 粒子ホールドアップと熱伝達率 (横揺れ時)

(図中の実線)と良く一致しており、横揺れ運動によるライザー下部の粒子ホールドアップの増加が直接、熱伝達率の増大に結びついていることが分かる。一方、横揺れ時のライザー上部熱伝達率の整理式 (図中の破線) は、正立時の整理式に比べると粒子ホールドアップに対する勾配が大きくなっており、横揺れ運動によって粒子下降流が周期的に変動し、循環粒子の伝熱面への接触が促進される結果、熱伝達率が増大することを示している。ライザー中央部における熱伝達率についても、(粒子ホールドアップは両者でほぼ同じものの) 熱伝達率は横揺れ時の方が正立時よりも大きく、横揺れ運動による循環粒子の壁面付着の促進が熱伝達率の向上に寄与していることが分かる。

3.3 定傾斜時のライザー壁面熱伝達 定傾斜状態における各部熱伝達率を図10に示す。定傾斜時のライザー壁面熱伝達率は何れも正立時、横揺れ時の値よりも遥かに大きいことが分かる。本実験では、粒子下降流は発熱板が設置されたライザー側面下側に沿って流下すると共に、粒子流下量が増大する。傾斜によって粒子の接触が促進されるため、発熱板の熱伝達率は正立時に比べて増大するものと考えられる。

3.4 ライザー部に挿入した円柱の熱伝達 図13にライザー下部に挿入された円柱発熱体の表面熱伝達率を示す。図中の破線は、空気単相流中に挿入された円柱周りの平均ヌセルト数⁹⁾に関する次式

$$Nu_m = 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.37} (Pr/Pr_w)^{0.25} \dots (8)$$

図13 円柱発熱体の熱伝達率

図14 円柱発熱体の熱伝達率と粒子ホールドアップ

から求めた平均熱伝達率であり、 Pr_w は円柱表面温度で評価したプラントル数を表す (本実験における Re 数は $1.19 \times 10^3 \leq Re \leq 3.41 \times 10^3$)。正立時の円柱表面熱伝達率は空気単相流中の熱伝達率に比べると 1 オーダー大きく、円柱表面への粒子接触による熱伝達促進効果が顕著であることが分かる。正立時の熱伝達率は空塔速度により $\pm 25\%$ 程度増減しているが、その傾向は明瞭ではない。図 14 に熱伝達率を粒子ホールドアップにより整理した結果を示す。熱伝達率は粒子ホールドアップに対しても明瞭な傾向は示さない。また、横揺れ時における熱伝達率は正立時の値と殆ど変わらず、空塔速度、及び粒子ホールドアップに対する依存性は殆ど認められない。ただし、正立時には円柱表面温度が周方向に不均一で、熱伝達率は下側で相対的に高く、上側で低くなっていたのに対し、横揺れ時における円柱表面温度は周方向にほぼ同一で熱伝達率が一様となっている。これは、横揺れにより円柱周囲の循環粒子が攪拌されることによると推察される。

4. まとめ

循環流動層ライザー部の固気混相熱伝達に及ぼす横揺れ運動、定傾斜の影響を評価するため、空塔速度をパラメータとする循環流動層伝熱実験を行い、以下のことを明らかにした。

- (1) 正立状態におけるライザー壁面熱伝達率は、ライザー中央部、上部では粒子下降流による循環粒子の壁面への接触により熱伝達が促進されるのに対し、ライザー下部ではライザー下部に滞留する粒子の壁面への接触による伝熱促進が支配的である。
- (2) このため、空塔速度が増加すると、ライザー中央部、上部では粒子下降流が活発化して熱伝達率が次第に増大するのに対し、ライザー下部では流動様式の変化によってライザー下部の粒子ホールドアップが減少するため、熱伝達率は急激に減少する。
- (3) 循環流動層に横揺れ運動を与えると、ライザー部側面に沿った粒子下降流が周期的に変動して循環粒子の壁面への接触が促進されるため、ライザー中央部、上部における熱伝達率は増大する。一方、ライザー下部では横揺れによりライザー底部に滞留する循環粒子量が増加して粒子ホールドアップが増大するため、熱伝達率は正立時に比べて顕著に増加する。
- (4) 定傾斜状態におけるライザー下側壁面の熱伝達率は、傾斜により粒子流量が増大すると共に、壁面への粒子接触が促進されるため、熱伝達率は正立時、

横揺れ時の値よりも大きくなる。

- (5) ライザー下部に流れに直交して挿入された円柱表面の熱伝達率は、空塔速度、及び粒子ホールドアップに対する依存性を明瞭には示さず、ほぼ一定範囲に収まっている。また、横揺れ運動が及ぼす影響も殆ど認められない。但し、横揺れにより周方向の熱伝達率分布は均一化する。

本実験により、循環流動層ライザー部の熱伝達率に及ぼす船体運動の影響について定量的に評価することが出来た。しかし、横揺れによる伝熱促進がいかなるメカニズムに基づくのか、については十分明らかになったとは言い難く、今後、ライザー部におけるボイド率分布・粒子速度分布・気相速度分布等、ライザー部の固気混相流の詳細について明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究は NEDO 受託研究「環境調和型高性能ハイブリッド熱交換器による高効率船用排熱回収システムの研究開発」により実施された。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 安邨 功一 6 名, 船用ディーゼル機関排熱を利用した動力回収システムの概念設計, 日マリ学誌, 43-5 (平 20-9), 130-135.
- 2) 安邨 功一 6 名, 船用ディーゼル機関排熱を利用した動力回収システムの概念設計 (第 2 報), 日マリ学講, 78 回論集 (平 20-9), 13-14.
- 3) 村田 功一 6 名, 循環流動層の固気混相流れに及ぼす横揺れ運動の影響, 日マリ学誌, 44-1 (平 21-1), 119-126.
- 4) 村田 功一 6 名, 循環流動層の固気混相流れに及ぼす横揺れ運動の影響, 第 14 回流動層シンポジウム論集, (2008-12), 25-28.
- 5) H. Murata *et al.*, Natural Circulation Characteristics of a Marine Reactor in Rolling Motion, Nucl. Eng. Design, 118 (1990), 141-154.
- 6) 日本機械学会, 伝熱工学資料 (第 4 版), (1986), 56, 丸善.
- 7) 堀尾 功一 1 名, 流動層ハンドブック, (1999), 106, 培風館.
- 8) J. R. Grace *et al.*, Circulating Fluidized Beds, (1997), 314, Blackie Academic & Professional.
- 9) 6) の文献, 61.