

循環流動層を用いた船用排熱回収システム

春海 一佳、村田 裕幸、稲坂富士夫、安達 雅樹
高木 正英、岡 秀行、永井 建夫、平岡 克英

Marine Exhaust Heat Recovery System with Circulating Fluidized-Bed Heat-Exchanger

by

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

1. まえがき

地球温暖化の問題や原油高騰を背景として、全ての分野で省エネルギーが要求されるようになってきている。船舶は貨物輸送トン・キロあたりのエネルギー使用量が鉄道と並んで最も少ない交通機関である。従って、船舶の省エネ実現の優先順位は低い、と言えれば楽なのだが、残念ながら省エネ実現は上記の通り例外無しに求められている。加えて、船舶の運航コストにおいて燃料費はかなりの割合を占め、さらに使用している燃料が重油であることから原油価格の高騰が直接燃料価格に反映されるという状況を考えると、省エネへの要求は増していると見なせるだろう。

船舶の省エネを実現する方法として、いくつかのアプローチが考えられよう。

- ①船の抵抗低減や推進効率の向上による省エネ（造船所）
- ②運航スケジュール等の工夫による省エネ（船会社）
- ③動力源であるエンジンの熱効率向上による省エネ（エンジンメーカー）

これらを組み合わせることで、システムとしての船舶輸送の省エネは進むはずである。しかし、3番目のエンジンサイドからの省エネにおける選択肢の幅は限られている。それはそもそも船用エンジンが熱効率の良いディーゼルエンジンだからである。特に、現在の大型の2サイクルディーゼルエンジンの熱効率は50%程度あり、1%上げることさえ容易では無い。一方、一般論として省エネを捉えるなら「エネルギーを使わない方法」と、「エネルギーを無駄に捨てない方法」に区分できるのではないだろうか。そして、上記3つはすべて使わない方法と見なせるだろう（厳密に言えば、③は双方の意味合いを含んでいるのだが）。エンジンサイドの省エネの実現方法として「エネルギーを使わない方法」が困難だとしたら、残るは「エネルギーを無駄に捨てない方法」ということになるだろう。

本稿では、「エネルギーを無駄に捨てない方法」として、排熱回収技術を取り上げ、その原理、現状等について解説し、特に熱回収を担う装置（熱交換器）に関する海技研での研究を簡単に紹介する。

筆者ら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結露硫酸の原因である SOx を排気から除去すると共に回収熱量の増大を図る、小型・高性能な排熱回収システム^{1,2)}の開発を目標として研究を実施している。

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ものと予想される。流動層の挙動に及ぼす船体運動の影響については、気泡流動層に関してこれまで幾つかの研究^{3~5)}が実施されており、定傾斜、及び横揺れが及ぼす影響について報告されている。しかしながら、循環流動層に関しては、船体運動が及ぼす影響について研究した例は見当たらず、その影響を明らかにすることが望まれる。今回、循環流動層の挙動に及ぼす横揺れ・定傾斜の影響を明らかにするため、循環流動層を動揺台に搭載した模擬実験を実施したので、その結果について報告する。

2. 排熱回収とは¹⁾

2. 1 排熱回収の原理

いかなる熱機関（サイクル）であろうと、物理法則に従って機能する。例えば「エネルギー保存則」に逆らって、何もないところから動力を生み出すような機関は存在し得ない。さらに、熱機関についてはエネルギーの相互変換の関係にもう一つ制限がある。それが熱力学の第2法則である。同法則によると、熱源から受け取った熱エネルギーをそのまますべて運動エネルギー（力学的な仕事）に変換できるような熱機関（サイクル）はありえない。つまり W （仕事） $< Q$ （受け取った熱）ということになり、エネルギー保存則から、 $Q - W$ にあたる熱を捨てることになる。では、この捨てられる熱エネルギーはまったくの役立たずなのだろうか？

熱機関では、高温の状態と低温の状態を行き来することで動力を生成する。例えば、内燃機関の場合、高温燃焼ガスの状態から排気ガスの温度までの状態を繰り返す。「高温の状態と低温の状態を行き来する」ということは、ある程度温度が高い状態で熱を受け取り、より低い状態で熱を捨てることができれば、原理的には、動力生成が可能ということになる。これが排熱回収の鍵になる。

排熱回収とは、まだ使えるはずの熱エネルギーをただ捨てるのはもったいないという考え方に基づいている。ある程度高い温度の熱があれば、それより低い温度との間で動く熱機関を利用して動力を回収しよう、動力回収が難しいなら熱として使う、というアプローチが排熱回収の基本的な考え方である

（図1）。

例えば、ディーゼルエンジンやガスタービンの排ガス温度は蒸気を発生させるには十分高温である。例えば、船用ディーゼルエンジンの場合、ターボチャージャー出口でどんなに低くとも 200℃ は超えているはずである。少なくとも水が蒸発する温度は超えている。理屈の上では、蒸気を発生させて蒸気タービンを回せば動力回収が可能である。このようにある熱機関が捨てている熱を利用し、蒸気タービン等の別の熱機関を動かし動力生成し、さらに温水等の形で熱の利用を行うのが排熱による省エネである。

単純化すれば、排熱回収システムとは、熱源と言える熱機関（ガスタービン等）、その排熱を回収する熱交換器、回収した熱を動力にする装置（蒸気機関、蒸気タービン等）、さらに熱を熱として利用する装置（温熱、冷熱の生成）からなる。組合せの自由度はかなり高いと言える。

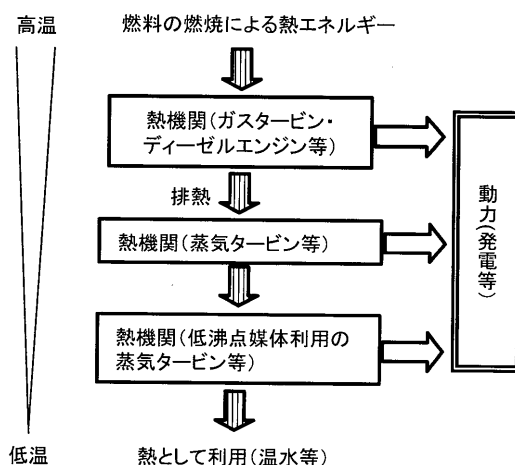


図1 排熱回収概念図

2. 2 排熱回収システム

ここでは、実際の排熱回収システムを構成する要素について解説する。

2. 2. 1 排熱源

熱機関からの排熱を対象として考える。船の主機のほとんどがディーゼルエンジンでありそこからの排熱が対象となる。なお、機関の種類・規模に応じて排熱の温度・回収熱量が異なるが、原理的にはそれに対応したシステムを構築すればよい。しかし、実際の市場においては排熱回収システムの効率、導入コスト等が導入に際して勘案されるので、低コストで高効率な排熱回収システムを構築できる排熱源が望ましい。

熱機関からの排熱といった場合、①エンジン排ガスの熱、②冷却水の熱、③エンジン本体からの

放熱、が挙げられる。このうちエンジン本体からの放熱は、一般に他の2つに比して十分小さい。

熱回収を考えたとき、重要なのは回収可能な熱量とその熱は何度で取れるのかということである。例えば、0.1MPaの条件の下1,000kgの水が30℃から25℃に下がったとして、そのとき奪われた熱量は21000kJ、同じく0.1MPaの条件の下6.6kgの水が400℃から25℃に変化したときに奪われた熱量とほぼ同じになるが、熱機関による動力回収の効率は、熱源の温度が高い方が、そして熱を捨てる温度が低いほどは上がる。つまり、同じ量の熱エネルギーを動力生成に利用するとしたら高温の熱の方が得と言うことになる。上記の例であれば、6.6kgの水が400℃から25℃に変化したときに奪われた熱量の方が望ましいということになる。そうすると、排ガスからの排熱が最も高温であり、次いで冷却水の熱ということになる。冷却水の熱が圧倒的に大きい場合はともかく、まずは排ガスからの熱回収を考えるべきである。

2. 2. 2 熱回収装置

排ガス、あるいは冷却水からの熱エネルギーを回収し、それを動力生成装置で活用可能な形にする必要がある。そのための熱回収装置が熱交換器である。熱交換器には様々な形式があるが、船用における排熱回収システム、特に排ガスからの熱回収では「排ガスエコノマイザー」が使用されている。

排ガスエコノマイザーでは、船用ディーゼルエンジンで使用される低質燃料の燃焼による排ガスに起因する熱交換用伝熱管へのスート(すす)の付着による伝熱性能低下や、スートの燃焼およびそれに伴う伝熱管壁面の急激な温度上昇(バーンアウト)による伝熱管の損傷(スートファイアと呼ばれるトラブル; 図2²⁾)、あるいは熱交換器の低温部での硫酸腐食等の問題を克服する必要がある。これらの問題に大きく関わっているのが、硫黄酸化物SO_xである。SO_x起因の結露硫酸等は熱交換器の伝熱管面へのスート付着を促進し伝熱性能やメンテナンス性を低下させる。さらに、結露硫酸は熱交換器の腐食ももたらす。これらの問題に対し、排ガスエコノマイザ

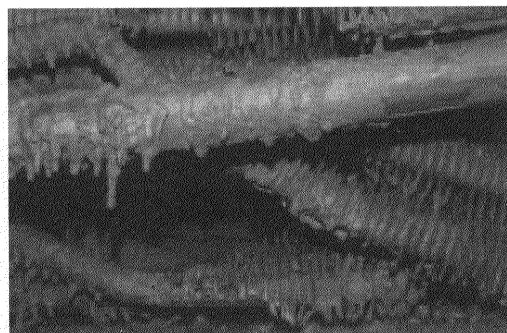


図2 スートファイアによる伝熱管の損傷

ーでは、結露硫酸を発生させない温度(露点温度から50℃以上のマージン)までしか排熱を回収しない、あるいはスート付着防止のため伝熱面積密度を小さく押さえる(コンパクト化が難しい)等の対策を講じている³⁾。

2. 2. 3 動力生成装置

排熱を利用した動力生成に多く採用されているのが蒸気タービンである。導入実績が豊富であるためシステム構築のノウハウが確立している。また、蒸気条件に応じて広い出力範囲の製品を選択することが可能である。一方、変動負荷、部分負荷運転に適していない、ガスタービン同様、小形・小出力の場合は効率が低下する、といった特徴もある。

蒸気タービンには、蒸気の流れの向きに応じて軸流式(回転軸に沿う方向に蒸気は流れる)と半径流式(流れの向きが入り口と出口で変わる。ラジアルタービンとも呼ばれる)がある。一般に、軸流タービンは中・大出力が要求される場合に適し、大型の火力発電所での蒸気タービン等はそのほとんど全てが多段式の軸流タービンである。

排熱回収での利用を考えた場合、段数の少ない軸流タービンでは効率が低いため、出力が小さい場合は半径流タービンが有力な候補となる。実際、蒸気条件が同じ場合、半径流タービンでは軸流タービンのほぼ2倍(単段あたり)の出力を得ることが可能である。しかし、半径流タービンはコスト等の問題もあり現時点で市場に広く受け入れられているとは言い難い。

他に、熱機関としては容積式スクリュウという蒸気機関と蒸気タービンの中間の装置、蒸気機関、スターリングエンジン等の熱機関や、熱電変換素子を用い、熱から直接電気を生成する熱電発電が排熱からの動力生成に利用されている。

2. 2. 4 熱利用

排熱というゴミの量を減らすためには、捨てないで使い倒す必要がある。動力を回収して温度が低下した排熱源(排ガスやエンジン冷却水)から、さらに別の熱機関や別の作動流体を用いていまだ一度動力回収することは原理的には可能である。しかし、一般にシステムの複雑化を招き信頼性を低下させる可能性が増大するとともに、追加システムのコストに見合ったゲインが得られることは少ない。そうすると、低温の熱は熱として使うのがもっとも合理的な利用法と考えられる。熱としての利用としては、燃料の予熱、給湯、暖房、造水、冷熱の生成(冷凍・冷蔵に排熱を利用する方法)が挙げられる。これらは、熱を使い尽くすための貴重なターゲットである。

3. 船舶での利用を目指した循環流動層の研究

2.2.2 項に述べたように、船用の排熱回収システムを考えたとき、排ガス性状の悪さが熱回収を制限する。海技研では、排ガス性状を改善しながら熱回収も行える機器として循環流動層を選択し、同装置を利用した排熱回収システムに関する研究を実施している。本章ではその研究について簡単に紹介する。

3. 1 循環流動層を用いた排熱回収システム⁴⁾

流動層は、固体粒子と流体が混合した状態(固気、あるいは固液混相流)を作りだし、流体と粒子との間の熱輸送あるいは化学反応を利用し、熱回収や化学物質の製造を行う装置である。化学工学の分野で広く用いられており、例えば、石油からガソリンを製造、製薬、石炭燃焼、石炭ガス化、乾燥、廃棄物処理等に活用されている。

流動層にはいくつかの種類があるが、粒子の量が少なくとも反応性能が相対的に高く、エンジンにとっては重要な圧力損失を相対的に低く抑えられる循環流動層を選択した。図3に循環流動層を用いた排熱回収システムの概念図を示す。エンジンからの排ガスは粒子と一緒に「ライザー」を上昇し、「サイクロン」で固気分離され、排ガスは外部熱交換器を通じて更に熱回収され、粒子は「ダウンカマー」経由で再び「ライザー」に戻って来る、つまり「循環」するわけである。ライザー部を粒子とガスが混じり合って流れる間に粒子が熱回収や排ガス浄化を行うここでは、脱硫可能な粒子を入れることを想定している。また、粒子が奪った熱は、ライザー壁面やダウンカマーで回収することが可能である。さらに、このシステムでは動力回収装置として、高効率なラジアル蒸気タービンを想定している。脱硫剤により排ガス中のSO_x成分が吸収され、循環流動層内で熱回収された排ガスは二次熱交換器を通して熱を回収し尽くされ、外部に放出される。脱硫により、熱回収量を増加させても硫酸結露の影響は少なくなることが期待される。さらに、固体粒子は熱伝達促進にも効果があるため、装置の小型化にも寄与し内航船等を含めた幅広い船舶への排熱回収システム導入に貢献するものと期待される。

図4に排熱回収システムのヒートバランスの一例を示す(主機エンジン出力は約1000kW)。排熱回収総量は691.4kWで、このうち約5%は脱硫に伴う反応熱である。発生蒸気流量は961.9kg/hで排ガス流量の約12%である。これは従来の排エコの蒸気流量のガス流量に対する比の2倍程度大きい。電気出力は初段タービン41.69kW、第二段42.81kWの合計84.50kWであり、主機関出力の約8%である。

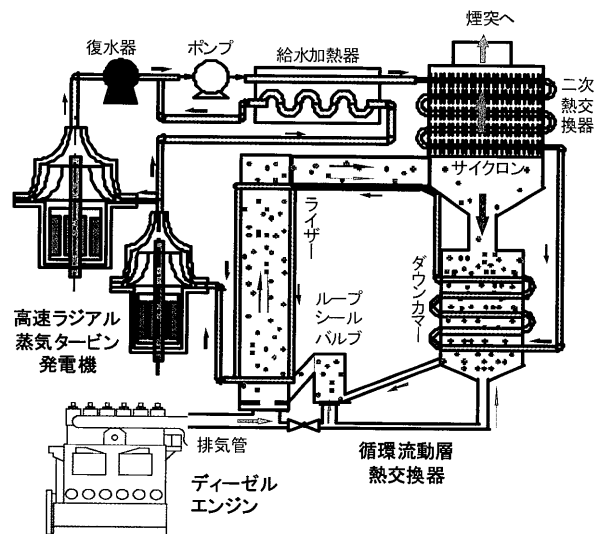


図3 循環流動層を用いた排熱回収システム

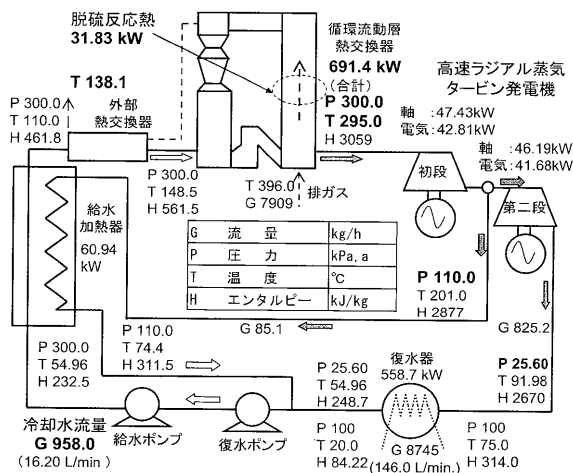


図4 排熱回収システムのヒートバランス

3. 2 循環流動層の船用利用に関する研究⁵⁾

陸上では多くの利用実績がある流動層だが、船舶での使用事例はほとんどない。特に、循環流動層への船体動揺影響を研究した事例は見あたらない。そこで、船体動揺を模擬できる動揺台に循環流動層の試験装置を搭載し実験を行った(図5)。実験の結果、粒子が循環流動層ライザー部の壁に沿って降下するダウンフローと呼ばれる現象(壁の近くではガス流速が遅くなるため流体から受ける力が減って重力の影響が卓越する。壁との熱伝達等に影響がある)が動揺影響(傾斜影響)を受けることが観察された。

また、ダウンフローの変化にともなって圧力損失が影響を受けることがわかった。図6に船体動揺が循環流動層の圧力損失に及ぼす影響を示す。空塔速度(ライザー部の平均流速)3~4m/secのほぼ実機条件において、静置状態に比し定傾斜、

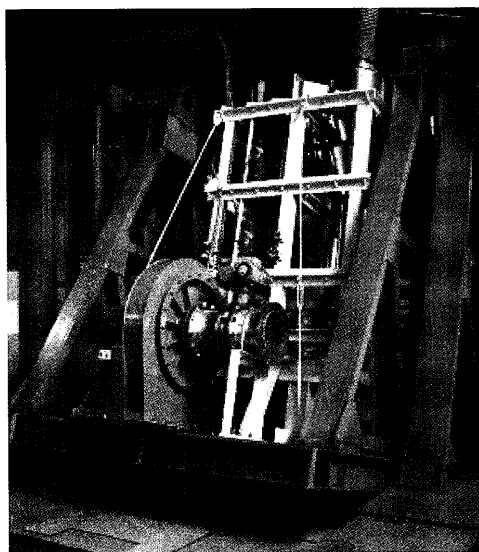


図5 動揺台に搭載された循環流動層試験装置

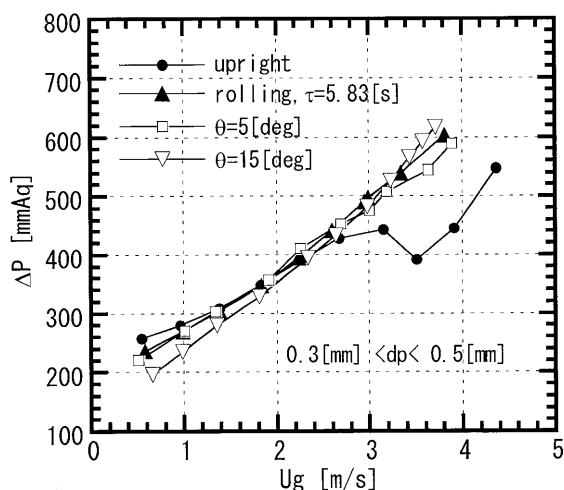


図6 横揺れ・定傾斜が全圧力損失に及ぼす影響

動揺時ともに全圧力損失が増加していることがわかる。粒子は石灰石で粒子径は $0.3\text{mm} < dp < 0.5\text{mm}$ である。

一般に、エンジン排気系における圧力損失の増加は、エンジンにとって好ましくない。この圧力損失への船体動揺の影響を軽減することを考えた。ダウンフローが動揺影響を強く受け、その結果として圧力損失が増大するとしたら、流体力の影響が重力に比して相対的に大きな径の小さな粒子をもちいることが船体動揺の影響軽減に有効と予想される。図7に粒子径 $0.18\text{mm} < dp < 0.35\text{mm}$ の全圧力損失を示す。動揺影響(傾斜影響)が軽減していることがわかる。粒子径の低減は、比表面積を増大させることにもなり、熱輸送・反応の向上にも寄与すると期待されるが、一方で固気分離が困難になるというトレードオ

フもあるため適切なバランスを取る必要がある。

これらの実験の他、熱伝達実験においては船体動揺が熱伝達の向上をもたらすという結果を得た。この傾向は熱交換器の性能向上に寄与する。

これらの知見をふまえて、実エンジンを利用した排熱回収実験を実施する予定である。

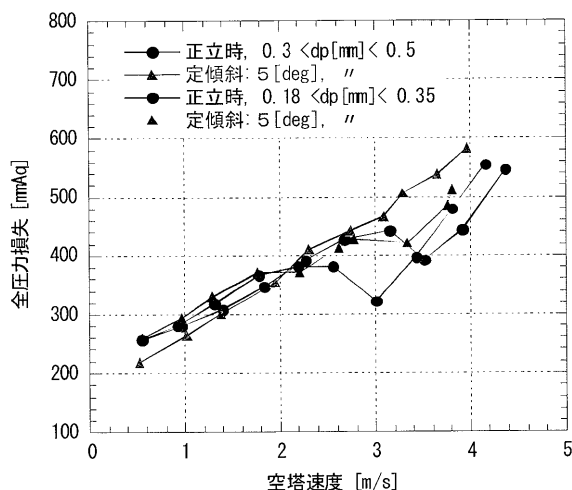


図7 粒子径が全圧力損失に及ぼす影響

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。

参考文献

- 1) 春海一佳:「排熱回収」、超省エネ船シンポジウム講演論文集、(2007)、pp. 75-93
- 2) Umeda, M.: The Current State and Measures Directed Toward Improvements in Reliability of Marine Exhaust Gas Economizer Systems in Japan, ICMEs 2003 (2003), pp. A8-1- A8-20
- 3) 日本海事協会:「排ガスエコノマイザのスタートファイア防止指針」(1992)
- 4) 安達雅樹他:「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」、日本マリンエンジニアリング学会誌、(2008)、掲載予定
- 5) 村田裕幸他:「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」、日本マリンエンジニアリング学会誌、(2008)、掲載予定
- 6) 春海一佳:「船の省エネを目指した循環流動層による排熱回収」、海技研ニュース「船と海のサイエンス」、2008 秋