

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560979

研究課題名(和文) 船用エンジン排ガスからの排熱回収装置の最適化に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Research on design of marine heat exchangers from exhaust gas

研究代表者

安達 雅樹 (Adachi, Masaki)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20415805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では排ガスエコノマイザの最適設計を行うための基盤的手法を確立する目的で、実験ではサンプルに排ガス起因のすすを付着させる試験とすすを模擬した断熱シートをフィンチューブ表面に付着させた熱交換試験を行った。その結果、前者では長時間の暴露によりフィン間の間隙を閉塞させる程のはく離を伴うすす層が形成されること、後者では断熱シートの影響でフィンチューブ管束部の圧力損失は予測値より増加し総括伝熱係数は予測値より低下することを示した。

研究成果の概要(英文)：Basic research for optimized design of marine exhaust heat exchanger (exhaust gas economizer) includes two experiments: adhesion test of real soot as solid component in the exhaust gas on sample of plate finned tube, and air-water heat exchanging test with bank of plate finned tube, coated with thermal insulating paper as quasi-soot. The former one evidenced formation of soot layer with partial detachment to occlude flow path between adjacent fins. the latter one showed that pressure drop through bank of the finned tube was higher than expected design value, and total heat transfer coefficient was lower than expected value due to the insulating paper layer.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：排熱回収 船舶 フィンチューブ 排ガス スoot 熱抵抗 圧力損失 熱伝達率

1. 研究開始当初の背景

船舶においては、エネルギーを有効利用する目的でディーゼルエンジンから排出される排ガスの熱を排熱回収熱交換器（排ガスエコノマイザ）で回収する方法が使われており、その熱交換器には伝熱面積を確保する目的でプレートフィンチューブが多用されかつフィン間の間隙は通常の熱交換器よりも広めに確保している。その理由は、一つは主機の運転に影響を与えないよう排ガスエコノマイザの排ガス側圧力損失を抑えるためである。もう一つは排ガス内の未燃焼分の炭素を主成分とする固体不純物（スート）の影響を抑えるためであり、これがフィンチューブ表面に付着するとフィンチューブ単体の圧力損失や伝熱性能が低下するだけでなく、放置するとスート自体が燃焼を開始（スートバーニング）し、フィンチューブが熔融する事故（スートファイア）を引き起こすことがある。こうした課題があるにもかかわらず船用機器全体における優先順位から排ガスエコノマイザにおける最適設計が十分行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究「船用エンジン排ガスからの排熱回収装置の最適化に関する基礎的研究」ではこの最適設計を行うための基盤的手法の構築を目的としている。研究では解析と実験の両方から検討してきたが、特に重点をおいたのがフィンチューブ表面へのスートの付着状況と物性を検証した「実スート付着試験」とスートの代わりに断熱シートをフィンチューブ表面に被覆させた実験装置を使い実験と解析の両方から圧力損失と伝熱性能を検証した「模擬スートを被覆したフィンチューブ管束部の性能試験」である。

3. 研究の方法

3.1 実スート付着試験

実スート試験では実際の排ガスエコノマイザにて使用されているプレートフィンチューブを使って6つのサンプル（図3.1）を作り、それをディーゼルエンジンの排気系内に長時間暴露して表面にスートを付着させる試験を行った。

試験用サンプルに付着させるスートの発生源でもあるディーゼルエンジンは4サイクル、シリンダ数3、最大出力271kW、最大回

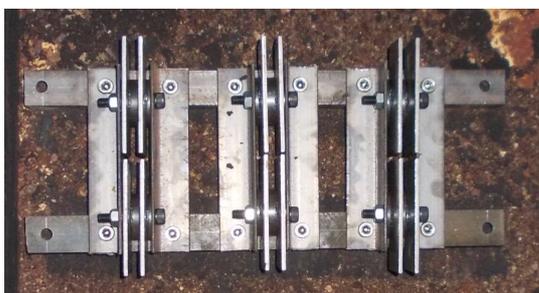


図 3.1 実スート試験用サンプル

転数420rpm、使用燃料はA重油とC重油である。サンプルは排気系内に5ヶ月間暴露していたが、この期間におけるエンジンの連続運転時間すなわち実質の暴露期間を推定した結果、エンジンの総運転時間は合計137.6時間（5日と17時間30分）、総出力は19973kWhとなった。

3.2 模擬スートを被覆したフィンチューブ管束部の性能試験

まず排ガスエコノマイザと最も構造に近い空冷式熱交換器の設計法における圧力損失と総括伝熱係数の評価式を使い、フィン表面にスート層が形成された場合の圧力損失と総括伝熱係数を試算、その結果を踏まえて実験装置の仕様を確定させ製作した。その概念図を図3.2に示す。実験装置は熱風器、接続管（フレキシチューブ）、試験部、後流管からなる構造をしており、熱風器にて流量（周波数を入力してモータの回転数を設定する）と温度を設定して試験部へ高温空気を供給する。試験部はプレートフィンチューブを基にした1×8列の管束としており、排ガスエコノマイザの管列に近い構造を採っている。熱的にスートの付着状態を模擬するために、排ガスと接するフィン表面上にシート状の

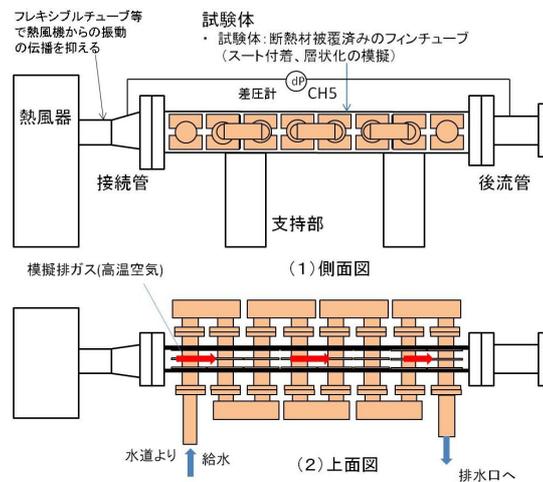


図 3.2 実験装置概念図

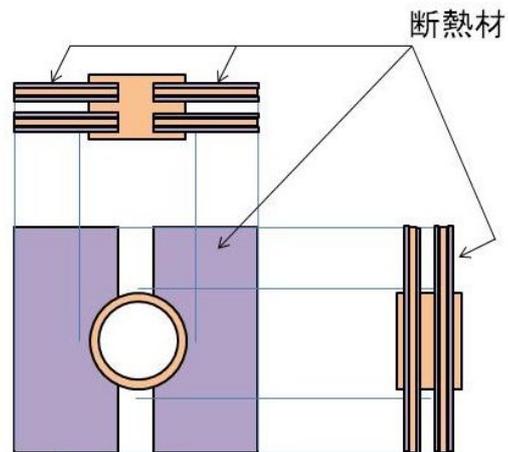


図 3.3 模擬スート（断熱材）の被覆

断熱材を被覆した(図 3.3)

実験条件は熱風器の設定温度 75 ~ 200 (T_{g,h})、周波数 30 ~ 60Hz(質量流量と相関)、計測したデータは試験部空気側の入口・出口温度、同給水側の入口・出口温度、同空気側と同給水側の圧力損失、給水流量である。

4. 研究成果

4.1 実スート付着試験

暴露後に取り出したサンプルを図 4.1 に示す。明らかに暴露していた期間にフィン表面のスートが積層化していった一方で、いくつかの箇所ではスート層の一部がはく離したり、それに伴いフィン表面とスート層の間に隙が生じている箇所が生じていたりしていると、フィン表面のスートはかなり複雑な振舞いをしていることがわかる。

付着したスート層の状態を把握するためにまず、暴露前と暴露後の各サンプルの重量からスートの付着重量を求めたところ、サンプル 6 つ全体での重量差は 8.55g であることから、サンプルでのスート付着量の平均値は 1.425g とである。これと先ほどのエンジンの運転時間から、サンプルへの単位時間当たりのスート付着量平均値は 10.36mg/hour と推定される。

次にスート層の厚さには電磁膜厚計と付属の 126 μm 厚のゲージを使って計測した。構造上フィン間の隙におけるスート層の



図 4.1 暴露後の試験用サンプル

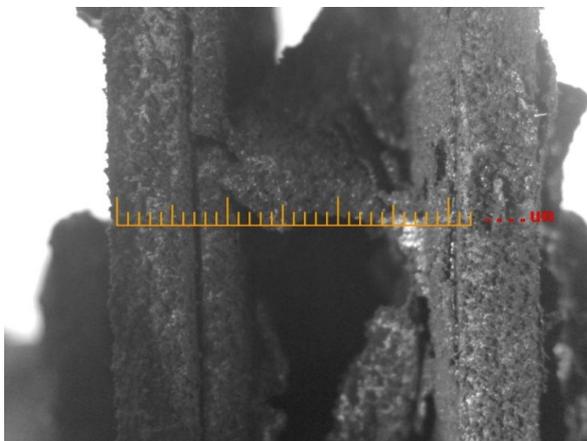


図 4.2 暴露後のサンプルフィン間隙
(デジタル顕微鏡で撮影、一目盛り 0.314mm)

厚さを計測することは困難であったことから、その反対側、フィン外側に形成されたスート層の厚さを計測することにした。結果は以下の通りで、かなりばらつきが生じていた：層厚最小値 15 μm、層厚最大値 380 μm、平均層厚 108 μm、標準偏差 75 μm。

最後にスートの熱伝導率はサンプルからスート層のかけらを抽出して周期加熱法を使って計測した。その結果熱伝導率は 0.46 ~ 0.55W/mK であった。この結果について以下に上げる過去の研究にて評価した熱伝導率と比較するとオーダー的には中間値に位置すると見られる。ただし前述にて示したスート層の付着状況から、実際にはスート層内の隙やフィン表面とスート層の間に形成された空気層等の影響により、スート層としての熱伝導率は先ほどの結果よりも低くなると推測している。

4.2 模擬スートを被覆したフィンチューブ管束部の性能試験

まず実験にて計測した管束部の圧力損失を同じく実験の計測値から求めたレイノルズ数に対してプロットしたものを図 4.3 に示す。このときの空気側流速は 6 ~ 13m/s 程度であるが、明らかにレイノルズ数と相関関係にある。次に実験での計測値を使って評価式にて算定した管束部の圧力損失を計測値と比較した結果を図 4.4 に示す。図 4.3 との対応関係からレイノルズ数 30000 程度では実験値は解析値に対して許容範囲になるが、それを越えると実験値に対して解析値が過小評価していることがわかる。評価式において模擬スート層はフィンの厚さを増やしフィン間の隙を減らす効果をもたらしているが、解析値が過小評価した要因が、模擬スート層がフィン間の隙幅を減らしたことに起因するか、元々評価式が高レイノルズ数に対して過小評価する傾向にあるのかは今後考察すべきことではあるが、もし前者の場合は排ガスエコノマイザにおいてスート付着を抑えるために排ガス流速を上げる事のり

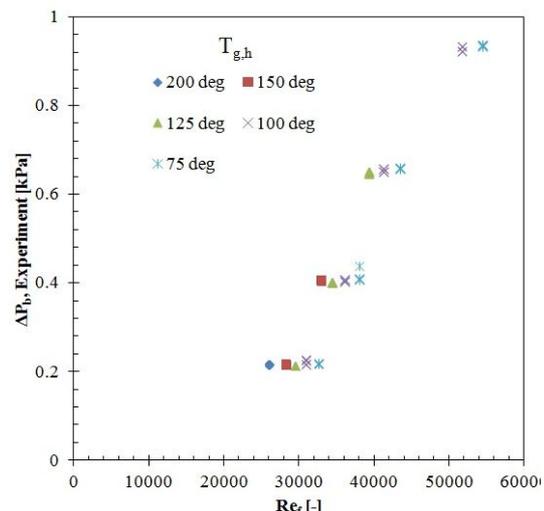


図 4.3 レイノルズ数と管束部圧力損失

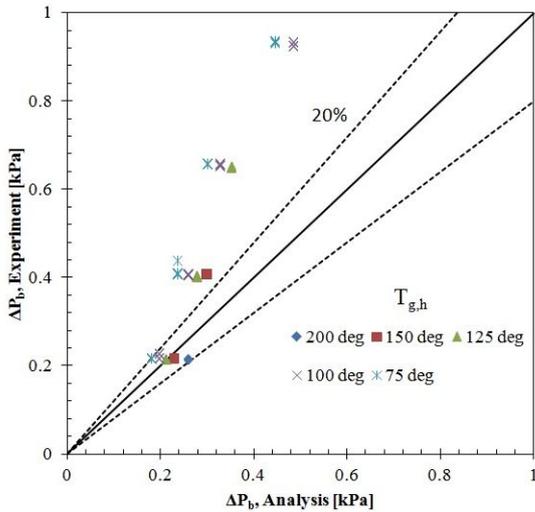


図 4.4 管束部圧力損失、解析と実験

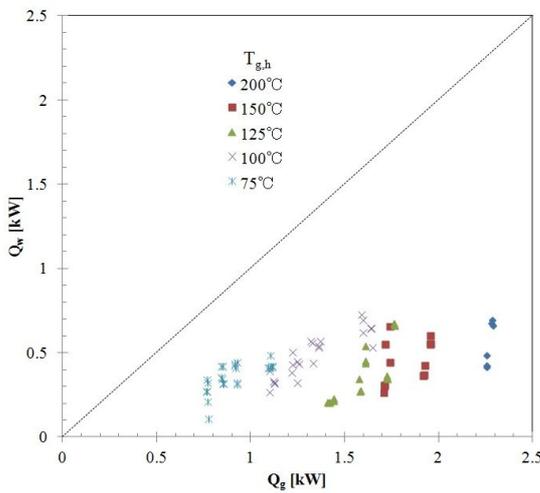


図 4.5 空気側除熱量と給水側加熱量

スクを示している。すなわちストファイアが起きた時の排ガスエコノマイザ内における排ガスの平均流速は 10~15m/s 以下という数値が出ているが、ストの付着を防ぐために 10~15m/s から流速を上げると管束部の圧力損失が増加し、排熱回収の実質的な効果が低下することを意味しており、最適設計における拘束条件の一つとなりうる。

次に伝熱性能について検証する。空気側の定圧比熱 1.0115kJ/kgK (大気圧、100)、給水側の定圧比熱 4.1814 (大気圧、20)として、実験での温度データから空気側の除熱量 Q_g と給水側加熱量 Q_w を比較プロットしたものを図 4.5 に示す。模擬スト層の影響を考慮したとしても前者に比べて後者より大幅に低下しており、実験装置表面からの放熱量が大きいことがわかる。それを示すために試験部表面を赤外線サーモグラフィーで撮影したものを図 4.6 にて表示する(熱風器の設定は 60Hz、100)。給水によりと周りの水管はほぼ周囲の温度に近いが中央の空気が流れる流路表面の温度は 70 以上となっており、試験周りに断熱材を巻いたとしてもそれなりの熱量は表面から出ていると推測

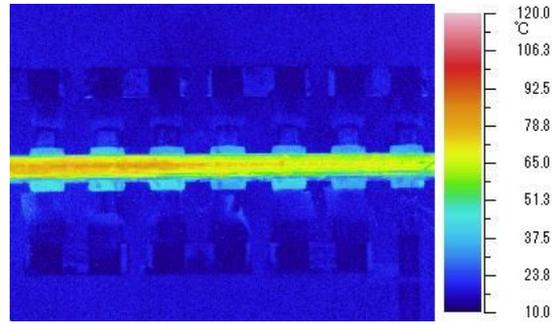


図 4.6 試験部のサーモグラフィー写真

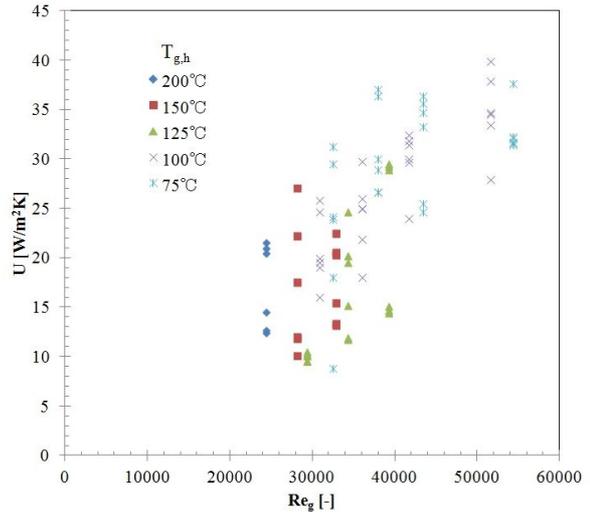


図 4.7 レイノルズ数(空気)と総括伝熱係数

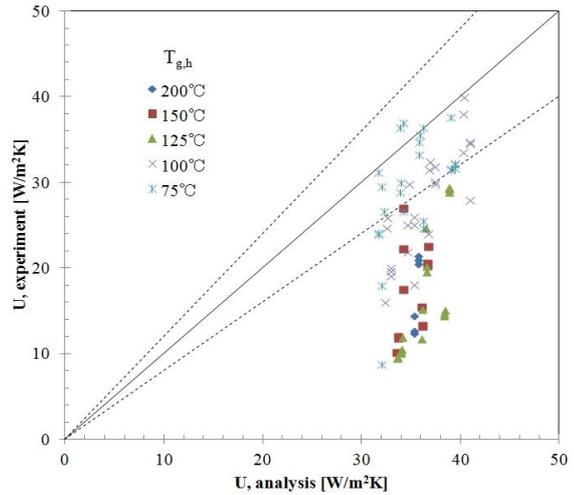


図 4.8 総括伝熱係数、解析と実験

される。そこで総括伝熱係数は Q_w を回収熱量として評価する。

総括伝熱係数を空気側のレイノルズ数に対してプロットしたものを図 4.7 にしめす。今回の場合総括伝熱係数に影響を与える要素は空気側の熱伝達率とフィンでの熱抵抗であることから、プロットから空気側のレイノルズ数に対して一定の相関があることを

示している一方でかなりのばらつきがあることから、フィンの熱抵抗の影響もあることがわかる。そこで実験データを入力して算定した総括伝熱係数を解析値として、実験値に対してプロットしたものを図 4.8 に示す。 $T_{g,h}$ が 75 と 100 では統計的なばらつきを考慮しても予測の範囲内にあるものの、125 を越えると実験値に対して解析値が過小評価している傾向になっている。これは評価式の適用範囲を考慮したとしても模擬スーツによる断熱効果が当初の予想よりも大きく管束部の伝熱性能を低下させていることを示している。このことからスーツバーニングの発生要因として、フィンチューブ表面がスーツ層の断熱効果によりスーツが付着していない場合に比べて高くなることが仮説として成り立つ可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安達雅樹 (海上技術安全研究所)

研究者番号：20415805