FTAを用いた舶用機関の過給機オーバーランの原因に関する考察

技術研究所　永山友哉

１．緒言

保険クレームの統計によると、1988 年～1997 年における低速ディーゼル主機関のクレーム件数及び金額共約半数が過給機の損傷である[1)]。 NK船級船においても、図１に示すように近年、２ストローク主機関においては過給機の損傷率が最も高い値となっている。この過給機の損傷の中で、排気マニホールド内における爆発的火災の発生により、過給機がオーバーラン及び爆発する事故（以下「事故」という）があるが、この事故については機関製造者からの事故防止対策を基に種々の注意喚起がなされ、相応の対策がとられていると思われながら図２に示すように減少傾向にないのが現状である。また、1992 年～2002 年までの事故件数を調査したところ、事故は型式Ａ，Ｂ，Ｃの主機関に集中して起きており、その割合は図３に示すように 83%にも達することがわかった。

本研究の目的は事故が起きている主機関Ａ，Ｂ，Ｃと事故がほとんど起きていない主機関Ｄ，Ｅについて、FTA（Fault Tree Analysis）を用いて原因の推定を試みるものである。具体的には機関損傷の資料、海上試運転データ、ASTM 式発火点試験、及び本会が所有している１，２級損傷（１級損傷：自航不能損傷，２級損傷：出力低減損傷）のデータベースを用いて FTA を実施し、爆発のメカニズムや事故を引き起こす主原因を推定するものである。

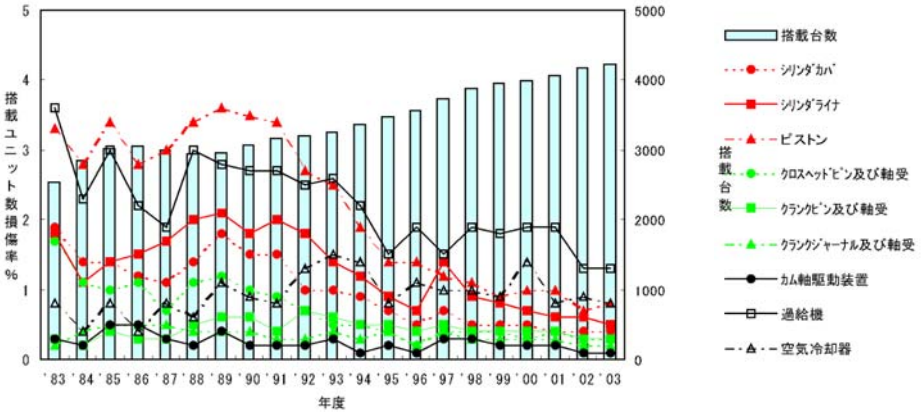

図１　２ストローク主機関の搭載ユニット数損傷率の年度別推移

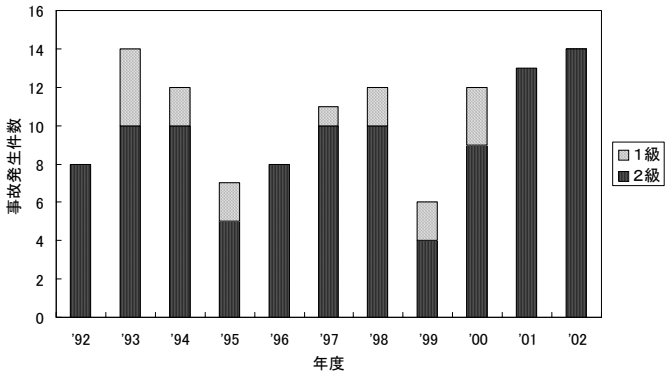

図２　過給機オーバラン事故の年度別推移

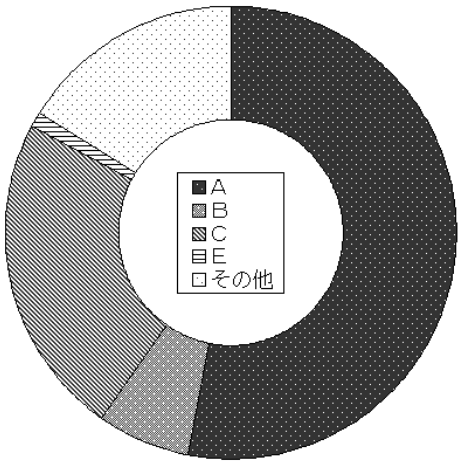

図３　機関型式別の過給機オーバーラン事故の割合（1992 年～2002 年）

2. Fault Tree Analysis（FTA）

FTA は発生しては困る、もろもろの望ましくない事象の要因を解析する手法である。FT 図と呼ばれる図式を用いて、システム中に潜在する欠陥（故障あるいは災害など）の発生構造をモデル化し、これを解析することによって改善の方法を見出す手法である。特徴は演繹的でしかも定量的な解析が可能であることであり、このため災害の定量的予測や原因推定には極めて有効と言われている。また、場合によっては定性的解析にとどめることや、災害の直接原因だけのあらい解析にしておくこともでき、逆に複雑なシステムを詳細に解析することができるなど極めて融通性に富んでいることも１つの特徴である。FTA の事故災害への実施手順を図４に示す。

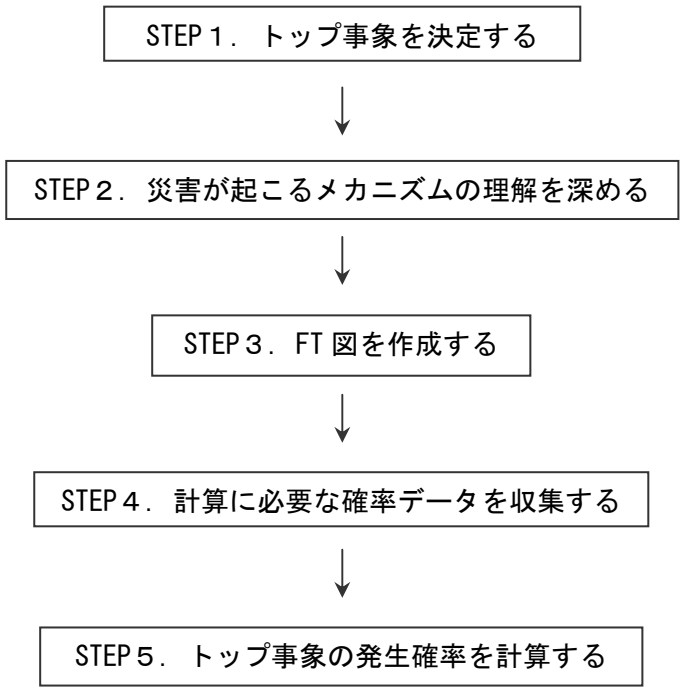

図４　FTA の実施手順

３．過給機オーバーラン及び爆発事故のメカニズム

１，２級損傷のデータベースや文献等を調査することにより、事故のメカニズムは以下に示す３つのパターンに大別できることがわかった。

（１）掃気室火災が原因となるパターン
掃気室内に油分が堆積している場合に、シリンダライナの掃気ポートからのブローバイによって油分が発火し、掃気室火災が発生することが考えられる。それにより掃気空気内の酸素が消費されるので、燃焼室内の酸素濃度が低下する。これにより燃焼が乏しいものとなり、未燃焼燃料が排気マニホールド内に侵入する。これが爆発的に発火し、過給機をオーバーラン及び爆発させる。

（２）ピストン頂部の破孔が原因となるパターン
何らかの問題により、ピストン頂部に破孔が発生するとそこからピストン冷却油が噴出し大量の未燃焼潤滑油が排気マニホールド内に侵入する。これが爆発的に発火し、過給機をオーバーラン及び爆発させる。

（３）長時間の低負荷運転が原因となるパターン
低負荷時の燃焼特性があまり良好でない静圧過給機関において極低負荷で長時間運転された場合、排気マニホールド内に過剰なシリンダ油及び未燃焼の燃料油分が蓄積され易い。これが低負荷運転状態から負荷増大の際あるいは機関始動時に排気管内で発火し、爆発的に燃焼することにより過給機をオーバーラン及び爆発させる。

4. FT 図の作成と確率データの収集

４．１ FT 図

排気マニホールド内で可燃性物質が爆発的に発火した場合、過給機はオーバランするので，前項で大別した３つのメカニズムを基に排気マニホールド内でおこる爆発的火災の FT 図を作成した。図５に示す。

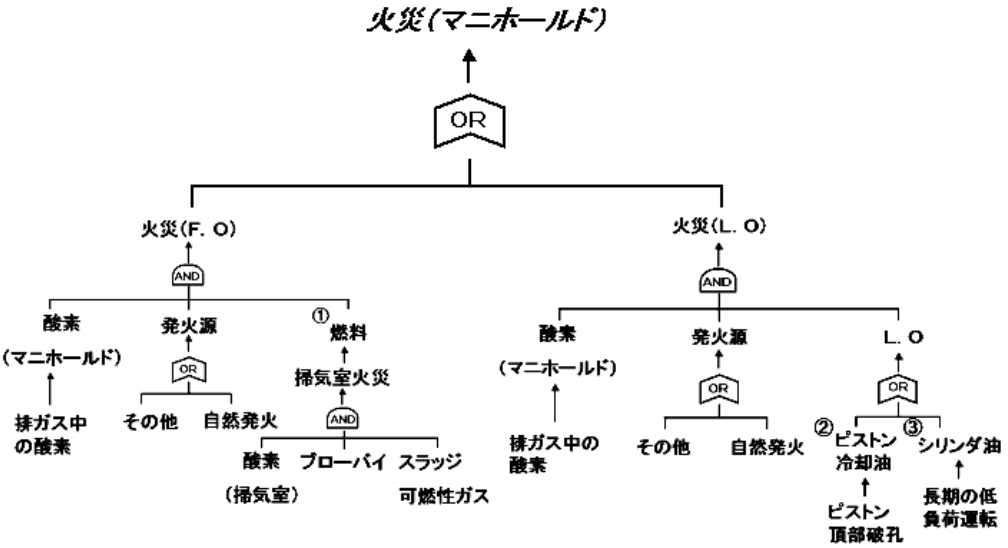

図５　排気マニホールド内でおこる爆発的火災の FT 図

４．２ 各主機関の自然発火確率

排気マニホールド内に未燃焼燃料、潤滑油（システム油，シリンダ油）等の可燃性物質が存在する場合、外的な発火源がなくとも高温であれば自然発火が起こりうる。そこで、排気マニホールド内の温度として海上試運転結果のT/C入口の排ガス温度に着目しデータを収集した。事故は就航直後ではほとんど起こらず、図６に示すように船齢が進むにつれて発生率は上昇する傾向となっている。通常、船舶は負荷 80%程度で運転されているが、ここでは最大出力（負荷100%）のデータを収集して調査を行った。その理由は、海上試運転時（新造時）のデータは船齢が進んだ船舶のデータと異なるからである。すなわち、経年変化により排ガス温度は 30℃程度上昇する[3)] と言われており、海上試運転時の負荷 100%と負荷 80%におけるT/C入口の排ガス温度の差は 20～40℃程度なので、経年変化を考慮して負荷 100%のデータを採用した。

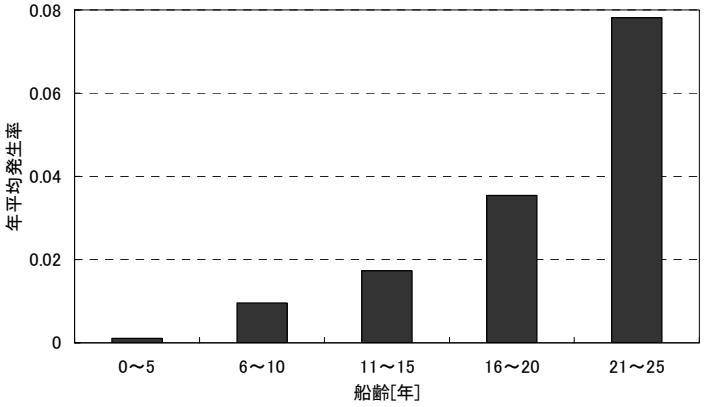

図６　船齢と事故の関係

（１）主機関の排ガス温度分布の推定－ $f_E(T)$

各主機関における T/C 入口の排ガス温度の分布が標本平均 μ，標本分散 s の正規分布 $N(\mu,s)$ であると仮定して、適合度の検定を行なった。その結果より各主機関の分布は図 7 のような分布に従うと推定することができた。

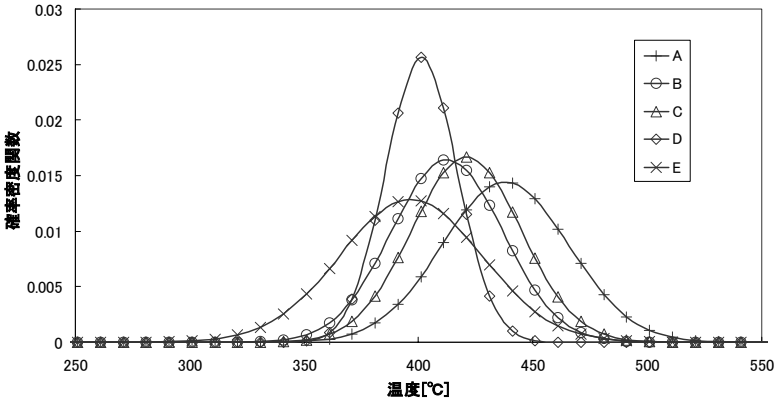

図７　各主機関の T/C 入口の排ガス温度分布

（２）排気マニホールド内の酸素濃度

排気マニホールド内の酸素濃度は排ガス中の酸素濃度に等しいと考えられる。表１は本会が保有するNOx計測時のデータより求めた排ガス中の酸素濃度の実測値である。この表によれば、機関の型式や負荷とは無関係に、排ガス中には15%程度の酸素が存在する。可燃性のガスが燃焼する酸素濃度のピーク値、すなわち限界酸素量は 11～14%程度[2)] であることから、主機関の排気マニホールド内において燃焼に必要な酸素量が存在することになる。

表１　排ガス中の酸素濃度（単位[%]）

主機関＼負荷	25%	50%	75%	100%
C	15.48	14.8	15.2	15.02
E	15.67	14.9	15.01	14.47

（３）Ａ重油・システム油の自然発火温度（酸素濃度 15%）

表１の結果を用いて可燃性物質の自然発火温度を決定する。まず、可燃性物質の自然発火温度は酸素濃度の違いにより変化するか否かを確認する必要がある。大気中の酸素濃度は 21%程度であるのに対し、排気マニホールド内の酸素濃度は表１より約 15%程度である。そこで、２種類の試料（Ａ重油，システム油）について排気マニホールド内と同様の環境である酸素濃度 15%の試験環境下において ASTM 式発火点試験を実施した。試験方法はフラスコ内に酸素濃度 15%のガスを充満させ、340℃～500℃まで 20℃刻みで試料を各温度ごとに５回滴下し、発火するまでの時間を計測する。常時発火が認められる温度に達したときにその温度以下をより細かい間隔において同様の実験を行い、発火までの時間を計測するというものである。結果を表２，３に示す。Run は滴下回数を示し、×印は発火が認められなかったことを示す。本実験によりＡ重油は 370℃、システム油は 400℃で常時自然発火することがわかった。

表２　Ａ重油の自然発火するまでの時間[秒”]（酸素濃度 15%の環境下）

温度[℃]	Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
320	×	×	×	×	×
330	×	×	×	×	×
340	×	×	×	×	×
350	×	×	×	×	×
360	×	×	×	×	×
365	×	×	×	×	×
370	2”22	2”96	3”20	1”99	1”96
375	1”99	1”67	2”65	1”68	1”50
380	1”66	1”98	1”77	1”78	1”77

表３ システム油の自然発火するまでの時間[秒”]（酸素濃度 15%の環境下）

温度[℃]	Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
360	×	×	×	×	×
370	×	×	×	×	×
380	×	×	×	×	×
385	×	×	×	×	×
390	×	×	×	×	×
395	×	×	×	×	×
400	2”06	1”93	1”99	3”55	2”18
410	2”75	3”49	3”17	3”67	3”59
420	2”06	1”93	1”99	2”02	3”22

（４）自然発火確率

図７と表２，３の結果を用いて式（１）（２）より自然発火の発生確率を算出した。実際の運航状態での排ガス温度のデータを収集して、自然発火の確率を算出するのは不可能なので負荷100%で１年間運航するという仮定のもと可燃性物質の自然発火確率を試算した。
結果を図８に示す。F.０の自然発火確率はA，B，C，D型機関がほぼ 100%、E型機関が 80%程度の確率となった。また、L.０の自然発火確率はA，B，C型機関が 90%，70%，80%程度、D，E型機関がほぼ 50%程度の確率となっている。

$$P_{F.O} = \int_{370}^{\infty} f_E(T)\,dT \qquad (1)$$

$$P_{L.O} = \int_{400}^{\infty} f_E(T)\,dT \qquad (2)$$

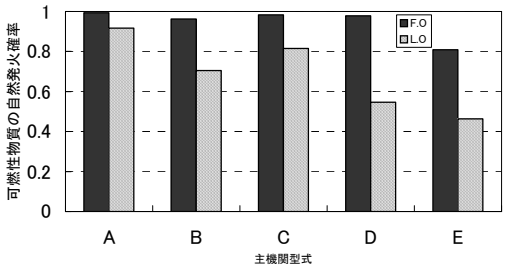

図８　可燃性物質の自然発火確率

４．３ 掃気室火災の年平均発生率

本会が所有する 1992～2002 年の過去 11 年間の１，２級損傷のデータベースより算出した掃気室火災の年平均発生率を図９に示す。A，B，C型機関で３%，0.7%，0.3%程度、D，E型機関でほぼ 0%の年平均発生率となっている。

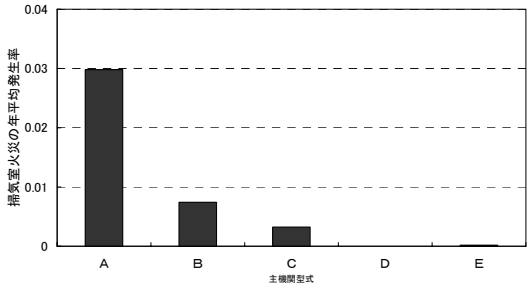

図９　掃気室火災の年平均発生率

４．４ ピストン頂部破孔の年平均発生率

本会が所有する 1992～2002 年の過去 11 年間の１，２級損傷のデータベースより算出したピストン頂部破孔の年平均発生率を図 10 に示す。A，B，C型機関で 1%，0.5%，0.4%程度、D，E型機関で 0%の年平均発生率となっている。

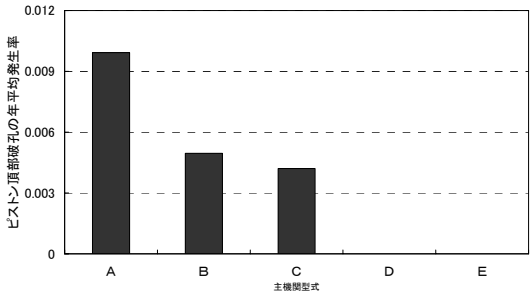

図 10　ピストン頂部破孔の年平均発生率

５．解析と考察

５．１ 解析

前項で収集した確率を図 11 の FT 図に代入し、FTA を実施した。本研究で用いたソフトウェアは米国 Relex Software 社が開発した信頼性評価ソフトを採用している。確率データの値は本研究で検討を行った、自然発火確率、掃気室火災の年平均発生率、ピストン頂部破孔の年平均発生率を基本事象に入力し、排気マニホールド内の酸素濃度については表１よりどの負荷においても 15%の酸素が存在することが確認できたのでハウス事象（欠陥事象でなく、通常の状態でシステムに生ずると思われる事象）として入力した。１，２級損傷のデーターベースからほとんど確認することができなかった長期の低負荷運転、その他の着火源の事象については考慮せず確率０を入力している。

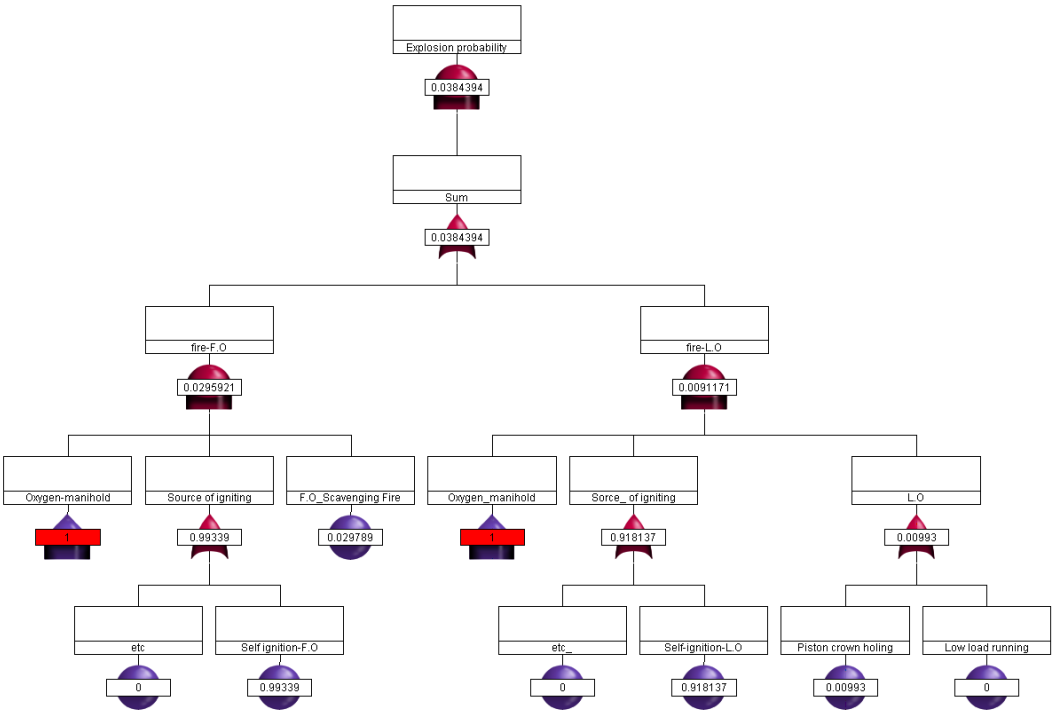

図 11　各発生確率を入力した FT 図（米国 Relex Software 社）

５．２　解析結果

解析結果を各型式別に図示したものを図 12 に示す。Ａ，Ｂ，Ｃ型機関で 4%，1%，0.7%程度、Ｄ，Ｅ型機関でほぼ 0%の発生確率が得られた。

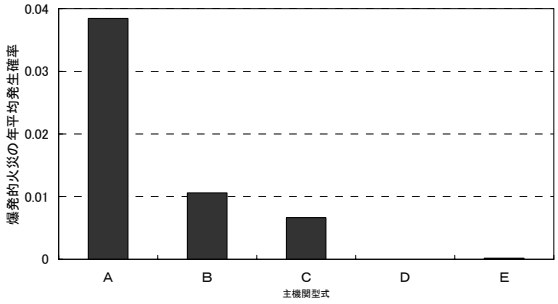

図 12　爆発的火災の年平均発生確率

５．３ 考察

（１）各事象の発生確率と解析結果の考察

・潤滑油（システム油）の自然発火確率については、事故が起きている主機関のほうが、起きていない主機関より排ガス温度が若干高いので、確率は多少高いものと推測される。

・掃気室火災については、本会に報告されていないものがあると考えられるが、事故が最も起きているＡ型機関が他の機関と比較して発生率がかなり高いと判断できる。

・ピストン頂部に破孔が生じる損傷は、事故が起きている主機関独特の損傷であると判断できる。燃料の噴霧状態やピストンの構造あるいは材料的な要因等が考えられる。

・本会が所有する損傷データベースの調査より、文献等で言われている長期の低負荷運転が原因のパターンは他の２つのパターン（掃気室火災，ピストン頂部破孔）に比べて非常に少なかった。これは長期の低負荷運転により可燃性物質が掃気室に溜まり掃気室火災となることもあるので、掃気室火災の件数に含まれてしまっていることが考えられる。本研究では検討を行わなかったが事故の原因として考える必要があると思われる。

（２）FTA による結果と実際の事故発生確率との比較

1992 年～2002 年までの 11 年間の統計調査による各主機関ごとの事故の年平均発生率（発生件数/搭載台数）を図 13 に示す。図 12 と図 13 とを比較すると、定性的にも定量的にもほぼ一致していることがわかる。

これより本研究で作成した FT 図は事故の発生構造をモデル化できていることが確認できた。

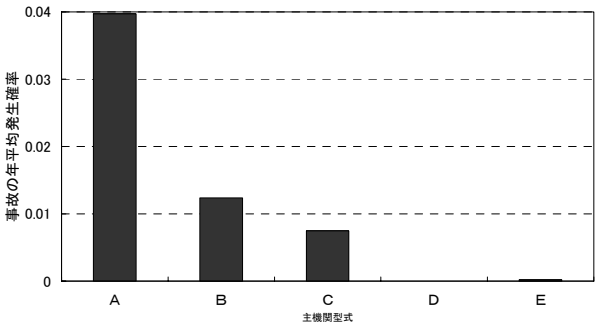

図 13　事故の年平均発生率

６．原因の重要度解析及び実際の機関に関する考察

６．１　原因の重要度解析

排気マニホールド内での爆発的火災の発生確率を下げるためにはどのような事象を改善すれば最も効率的かを検討するために重要度解析を行った。本研究では重要度の尺度としてBirnbaumが提案した、感度を意味する式（３）を採用し解析を行った。解析条件はシステムHを構成する事象P_iは全て独立と仮定している。結果を図 14 に示す。

$$Importance = \frac{\partial H}{\partial Pi} \qquad (3)$$

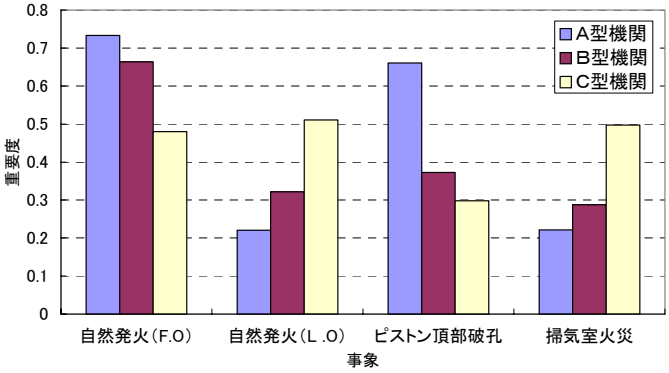

図 14　重要度

図 14 の解析結果から自然発火の事象が他の事象よりも重要度が高い値ということがわかる。つまり着火源と考えられる自然発火の事象について対策を行えば、作成した図 11 のシステムを効率的に改善できることになる。自然発火の発生確率を低下させるには、排気マニホールド内の排ガスの温度を低下させればよいので 20℃刻みに低下させて解析を行った。結果を図 15 に示す。

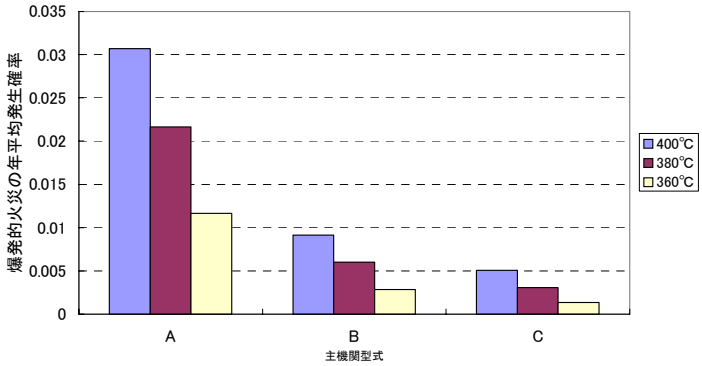

図 15　自然発火確率の低下に伴う爆発的火災の発生確率の変化

図 15 の結果を用いて排ガス温度の低下に伴う事故の発生件数の変化を表４に示す。単純計算ではあるが、例としてＡ型機関の場合はこの種の事故が年に４件程度発生しているが、仮に排ガス温度を現状よりも下げて 360℃とした場合、年に１件程度に減少する計算となる。

表４　排ガス温度を低下させた場合の事故件数の変化

	A	B	C
2002年の各主機関の搭載数[隻]	111	52	406
現状で運転した場合[件/年]	4.266773	0.551236	2.698682
400℃で運転した場合[件/年]	3.404992	0.47622	2.058249
380℃で運転した場合[件/年]	2.402262	0.311891	1.244731
360℃で運転した場合[件/年]	1.292173	0.147488	0.54406

６．２　実際の機関に関する考察

上述した重要度解析より排ガス温度の低下が事故を減少させるのに効率的であるとの結果を得たが、次に実例を紹介する。Ａ−Ⅱ型機関はＡ型機関を１部変更した機関である。図 16 は海上試運転時におけるＡ型機関とＡ−Ⅱ型機関の T/C 入口の排ガス温度の実測値をプロットしたグラフである。このグラフより、ほぼ全ての出力域においてＡ−Ⅱ型機関の排ガス温度は A 型機関より低いことがわかる。

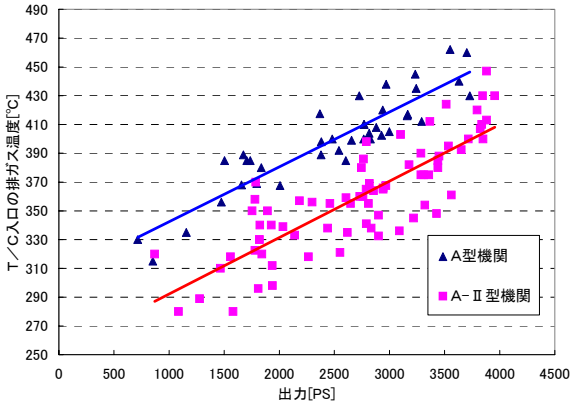

図 16　Ａ型機関とＡ−Ⅱ型機関の排ガス温度の比較

図 17 はＡ型機関とＡ−Ⅱ型機関の海上試運転時における燃料消費率の実測値をプロットしたグラフである。このグラフより、ほぼ全ての出力域においてＡ−Ⅱ型機関の方が燃料消費率は減少していることがわかる。これは、シリンダライナの掃気ポートの変更により圧縮比を上昇させたことや掃気温度を若干上昇させたこと等により、より高温高圧で燃料を燃焼させたこと等が理由として考えられる。これより、サイクル効率が増加するので燃料消費率は減少し排出熱量も減少する。これが、排ガス温度が減少した１因と考えられる。図 18 は６気筒 Bore370[mm] の A 型機関とＡ−Ⅱ型機関の事故の年平均発生率を比較したものであるが、発生率は約 1/6 に減少していることがわかる。これより他にも理由があると考えられるが、排ガス温度が低下したことにより事故が極端に減少する可能性があることがわかる。Ａ−Ⅱ型機関において負荷 85%（６気筒 Bore370[mm]で約 3300[PS]）で運航した場合の排ガス温度は約 380℃である。表４よ

りＡ型機関を全てA-Ⅱ型機関と同様の変更を行い１年間定格負荷で運転をした場合、現状で４件程度起きていたものが年２件程度つまり半分程度になることになる。また、燃料消費率の減少から推察して未燃焼油の量の減少が考えられ、その結果、掃気室火災の発生率も低下していると推定される。このことから、この事故は更に減少する可能性があると考えられる。

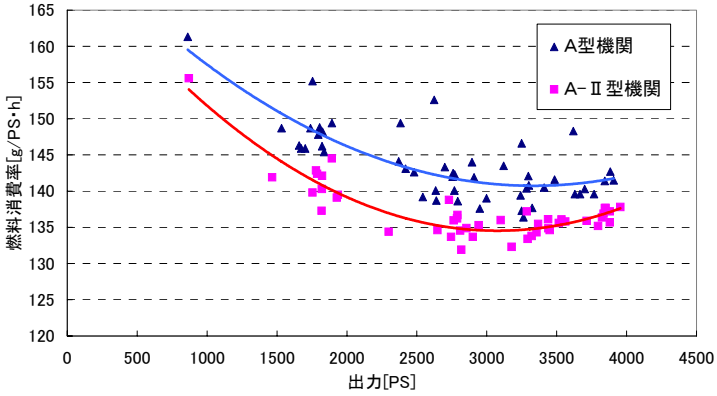

図 17　Ａ型機関とＡ－Ⅱ型機関の燃料消費率の比較

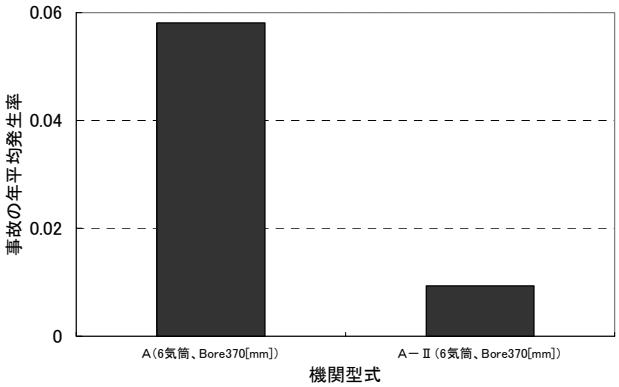

図 18　Ａ型機関とＡ－Ⅱ型機関の事故発生率の比較

７．排ガス温度の経年変化量の抑制

また、この事故は船齢が進むにつれて発生率が増加する傾向となっているので、構造等の変更と共に船齢に伴う経年変化を抑制するためのメンテナンスについても考えなければならない。図 19 に８つの経年劣化部品（過給機，エアクーラ，リング，ライナ，排気弁，燃料ポンプ，燃料弁，ピストン）がそれぞれ単体で劣化した場合の排ガス温度の変化量を実験した例を示す。本図は燃料弁，リング・ライナ劣化の２項目の整備基準時期を２年、その他の項目を４年と仮定し、それぞれの劣化要因に対する排ガス温度の変化量を絶対時間軸に対して重ね合わせたものである。各要因の中で最も劣化による排ガス温度の変化量が大きいのは過給機であり、次いでリング・ライナであることがわかる。過給機効率低下時には熱力学的にサイクル効率の低下と空気過剰率低下をもたらし、機関性能変化として P_{max}の低下、燃料消費率の増加、排ガス温度の上昇となって表れる。故に過給機効率を低下させないようにメンテナンスをすれば、効果的に経年変化量を抑制できる可能性が大きいと考えられる。この試験で実施した過給機の経年劣化部品の模擬形態はカバーリングの内周摩耗，タービンブレード先端摩耗，ノズルリングの

スケール堆積であり、これらの掃除やメンテナンスにより排ガス温度の経年劣化による上昇を効果的に抑制させ得るのではないかと考える。

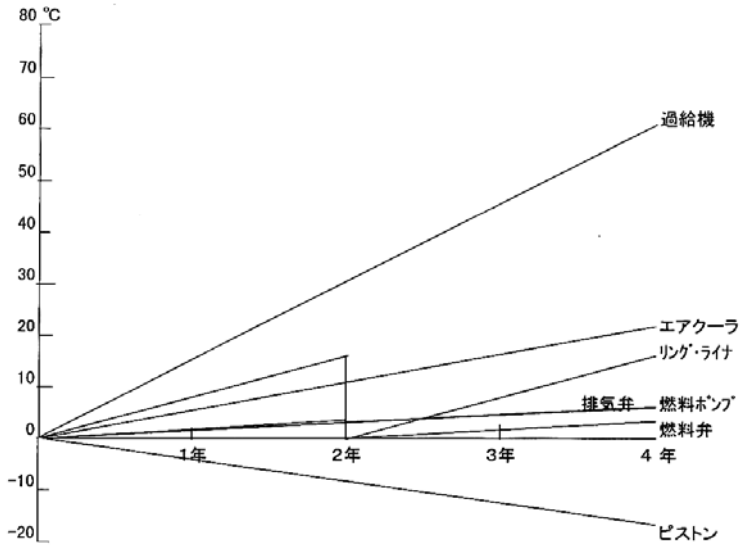

図 19　各要因の劣化による排ガス温度の変化量[3)]

８．結言

本研究では FTA を実施することにより、事故の発生構造をモデル化し、メカニズムの解明を試みた。その結果、この事故は

（１）掃気室火災発生後の排気マニホールド内へ未燃焼油の侵入、堆積
（２）ピストン頂部破孔発生後のシリンダ油漏洩、排気マニホールド内堆積
（３）減速運転等の結果としての排気マニホールド内への未燃焼油の堆積

が主原因となって発生していることが確認された。また、事故を減少させるために、自然発火，掃気室火災，ピストン頂部破孔の各事象の中で、どの事象について対策をとることが効率的であるのかを検討するために重要度解析を行った。結果は、自然発火の事象について対策を行うことが最も効率的であるとの結果を得たので、対策の１例として消火方法の１つであるエネルギー除去による消火[2)]（冷却消火法）を利用し、排ガス温度を下げることにより自然発火確率を低下させる方法を提案した。また、実例からも排ガス温度の低下が１因となり事故が極端に減少することを確認することができたので、事故対策として実例と同様の機関変更を行い排ガス温度を低下させると共に、経年変化量を抑制するための過給機のメンテナンスを実施することが効果的であると考えられる。

参考文献

１）Mr.M.Hemqvist、”Main Engine Damage From Insurer’s Point of View”、CIMAC ‘98
２）日本火災学会編、火災便覧　第３版、共立出版
３）日本造船研究協会、「経年劣化に伴う機関性能ライフサイクル」(SR235)
４）鈴木ら、FMEA・FTA 実施法　第 19 版、日科技連
５）総合安全工学研究所編、FTA 安全工学　初版、日刊工業新聞社
６）近藤信次、ディーゼル船の損傷と対策　初版、成山堂書店