ディーゼル機関クラッシュアスターン時のシミュレーション*

琵琶忠志** 福田哲吾** 忍田豊樹**

Simulation for Crash Astern of Marine Diesel Engine

By Tadashi Biwa, Tetsugo Fukuda, Toyoki Oshida

The program which simulates the crash astern ability of direct coupled two stroke diesel engine was developed especially on the point of engine performance. And for the various kinds of ships the simulations were carried out with good accuracy. As the results of the simulations, the importance of various parameters which have the influence on the crash astern was found. We have selected three parameters as below.

- Specified engine revolution when brake air is put into
- The air pressure of air reservoir
- The open and close timing of starting valve

The valve timing is regulated by the distributor cam and the valve is opened by the elevated air pressure. So, the timing on the point of crank angle is delayed more when the revolution is higher.

We must consider both starting from 0 revolution and starting and braking from some revolution such as crash astern. And for these the time delay should not be ignored.

1. ま え が き

大形二サイクルディーゼル機関は各種の船舶に幅広く使われており、船舶の安全運行が強くさげばれている折から、大形ディーゼル機関のクラッシュアスターン性能は非常に重要な問題である。ここではB & W形直結大形ディーゼル機関のクラッシュアスターン性能についていろいろのパラメータを変えた場合どういう変化をするかについて述べる。

クラッシュアスターンについては現在、海上運転時に試験的に行なわれているが、その際のブレーキ空気投入回転数は経験にもとづいて設定されている。機関の遊転回転数が十分に下るのを待って、ブレーキ空気を投入すれば機関にとって有利な条件となるが、一方、船舶の停船性能の面からは出来るだけ短時間に機関を逆回転させることが要求されるため、ここに両者を総合勘案した最適なブレーキ空気投入回転数を設定する必要がある。ここでは、このような観点からシミュレーションを試みた。

2. クラッシュアスターンのシミュレーション

固定ピッチプロペラを持つ大形ディーゼル機関と搭載船のクラッシュアスターンの状況を線図で表わすと図1のようになる。図1のⅠ区間はAhead 燃料運転区間で

A点においてクラッシュアスターンの指令が出て燃料をカットして遊転区間Ⅱへはいる。この区間が機関クラッシュアスターン全区間の大半を占め停船性能に大きな影響を及ぼす。Ⅱ区間の前半は遊転回転数に静定するまで速かに回転数が下がり、その後は船速のゆるやかな低下とともに遊転回転数もゆるやかに低下する。設定回転数 N_B になったときブレーキエアが投入され機関回転数が急速に下がりC点で0になりブレーキエアがそのまま逆転始動エアとなって機関を逆転し設定回転数 N_D に達したとき空気と燃料が切り、燃料運転にはいる。Ⅱ区間の後半の回転の低下はゆるやかなので設定回転数 N_B が少しでも高い方が停船性能上は大きな効果がある。

図1 クラッシュアスターン時の回転数変化

2.1 シミュレーションプログラム クラッシュアスターンのシミュレーションとしては図1のⅢ区間、すなわち空気運転の区間だけを行った。これはこの区間

* 原稿受付 昭和50年9月17日

** 正会員 三井造船(株)玉野造船所(岡山県玉野市玉3-1-1)

図 2 フローチャート

がクラッシュアスターンの成否にかかわる重要な区間であるからである。シミュレーションを行うにあたって次のような仮定を設けた。

1. 船体の運動については逆転空気運転中は船速を一定とした。
2. プロペラトルクについてはロビンソンカーブより求めた。
3. シミュレーション計算は微小時間を区切って、この区間の最初の状態から最後の状態を算出し、この結果を用いて次の計算を順次行う「逐次法」を用いた。ここでは微小時間 $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ とした。
4. 始動空気槽、シリンダ、排気管、掃気管等の各容器間の空気の流れはすべて単純化して、絞りで隔てられている高圧容器と低圧容器の流出入現象とした。
5. 始動弁開閉タイミングはディストリビュータカムの設定角度より開で0.1秒、閉で0.2秒遅れるものとした（詳細は2.2で述べる）。

プログラムのフローチャートを図2に示す。

2.2 計算 各種のパラメータを変えたとき、ディーゼル機関のクラッシュアスターン性能がどう変化するかを調べるためシミュレーションプログラムで計算した。船の種類としてコンテナ、バルクキャリア、タンカーの3種類を選びそれぞれの要目を表1に示す。また、B&W, K 90GF 機関の要目を表2に示す。

表 1 各船の要目

	A 船	B 船	C 船
船 種	コンテナ	バルク	タンカー
重量 トン 数	2万8千トン	11万トン	13万トン
機 関	12K 90GF	7K 90GF	8K 90 GF
始動空気槽容積	36 m ³	26 m ³	24 m ³

表 2 K 90GF 機関要目

シリンダ直径	90 cm		
ストローク	180 cm		
馬力 / cyl	3,410 BHP / cyl		
回 転 数	114 r p m		
排気弁タイミング	正 転	開	91.7° A.T.D.C.
		閉	231.9° "
"	逆 転	開	93.1° "
		閉	233.3° "
掃気孔タイミング	正 転	開	138.8° "
		閉	221.2° "

A 船, B 船, C 船の遊転回転数が 50 rpm となる船速におけるロビンソンカーブの一例を図3に示す。B 船と C 船ではロビンソンカーブにほとんど差は見られないが、コンテナである A 船は B 船や C 船よりも、投入設定回転数を下げなければクラッシュアスターンが困難であることがロビンソンカーブからもわかる。クラッシュアスタ

図3 各船のロビンソンカーブ

図4 クラッシュアスターン時の始動弁開閉状況(C船)
(圧力単位は kg/cm^2)

図5 始動弁関係空気系統線図

ーンの条件として変化させるパラメータとしては次の3個を選んだ。

1. エア投入設定回転数
2. 始動空気槽圧力
3. 始動弁開閉タイミング

このタイミングはディストリビュータカムの形状による

ものであり、2.1の仮定5で述べた始動弁開閉時期の遅れは図4に示した実測値より求めたものである。

図5に始動弁の開閉を司る空気系統線図を示す。通常、運転中は始動空気はスライド弁のE室に達しており、同時にAの管系を通してパイロットバルブ上部に入り、さらに管系Bを通してスライド弁プランジャを弁座に押し

つけスライド弁を閉じている。燃料ハンドルを起動の位置におくとパイロットバルブのプランジャが押しあげられ、管系Bがblow offして押付力がなくなり、スライド弁が開く。この時、始動空気は起動空気主管Uを通して始動弁下部へ達し、いつでも始動エアが投入できる状態で待機する。一方、管系Xを通った空気は管系YとZに分岐しディストリビュータ左端及びパイロットバルブ下部へとはいる。パイロットバルブ下部のエアは管系Tを通してディストリビュータ右端へはいる、プランジャをディストリビュータのカムが空気投入位置にあれば管系YとSが通じパイロットエアが始動弁上部に達し始動弁を開く。その結果、待機していたエアがシリンダ内に投入されることになる。逆にエアがカットされるのは管系YとSが遮断された後、管系Sがblow offし、ばね力により起動弁が引きあげられ弁が閉じた時である。

ディストリビュータカムはクラッシュアスターンの場合、クランク軸が正方向に回っている間は、T.D.C.前95°からT.D.C.前5°までで開くタイミングになっている。図4に示した例ではパイロットエア圧はほぼディストリビュータカム通りT.D.C.前95°から圧力上昇しはじめ、T.D.C.前5°で圧力が下がり始めている。しかし、始動弁の方は圧力上昇ははじめより0.1秒後、圧力下降始めより0.2秒後にそれぞれ開閉する。この原因としては図5の管系S（内径16.1mm、長さ6～18m）を空気圧が伝わるに要する時間及び始動弁がパイロットエアによる力とばね力及びシリンダ内圧による力との差によって移動し終るまでの時間等が考えられる。従って、この遅れ時間は必ずしも一定でなく、シリンダ内圧や配管長さ等によって微妙に変化するものと考えられる。しかし、今回はこのような詳細な動きを考えず上記の遅れ時間をそのまま用いてシミュレートした。

2.2.1 エア投入設定回転数の影響 A,B,Cの三船についてエア投入設定回転数を36, 40, 43, 45, 48, 53 rpmのうちからいくつか選んでシミュレートした（図6参照）。A船については43 rpmではクラッシュアスターンが困難で40 rpmでも-9 rpmの空燃切り換り設定回転数に達するのに10秒以上もかかる。確実なのは、36 rpmまで待つことである。B船、C船ではほとんど同じクラッシュアスターン性能を示し8秒以内で逆転設定回転数に達するためには43 rpmをエア投入設定回転数にしなければならない。B船については37 rpmでスタートした時の実測値も合わせて示した（図中の破線）。

なお、この時の始動空気槽圧力は、初圧を30 kg/cm²としているがその圧力はエアラン時間の長さにほぼ比例して降下する。図6に示したケースのうち最も圧力降下の小さいのは、B船が36 rpmからクラッシュアスターンをかけた場合であり、-9 rpmとなるまでに0.9 kg/cm²降下する。逆に圧力降下最大となるのは、C船が53 rpmからクラッシュアスターンをかけた場合で15秒間

エアを投入し続けて7.0 kg/cm²降下する。しかも、この場合逆転には至らない。10秒程度で空燃切り換り回転数に達する場合は圧力降下は2～3 kg/cm²である。

2.2.2 始動空気槽初圧の影響 A,B,Cの3船について始動空気の初圧を30, 25, 30 kg/cm²に変化させてシミュレートした（図7参照）。A船については40 rpm, 36 rpm共に始動空気圧の高い方がクラッシュアスターン性能が良いという結果が出た。ただし、回転数の最初の落込みは空気圧の低い方が若干大きい。B, C船については36 rpmと43 rpmについて計算したが、高回転数域ではやはりA船と同様の傾向を持つが全体としては空気圧の影響は小さい。これは前に述べた始動弁開閉時期の遅れに大きな関係がある。すなわち、遅れにより機関回転数の高い所では開のタイミングは25°近くも遅れ、閉のタイミングは40 rpmでT.D.C.後40°にもなる。T.D.C.後のシリンダ内圧は機関のブレーキでなく加速に働くため前述のような傾向が出るのである。

2.2.3 始動弁開閉タイミングの影響 C船について通常の始動の状態を、ディストリビュータカムのタイミングをいろいろ変化させてシミュレートした。その結果を図8に示す。縦軸は始動後一秒の間に到達する機関回転数とその間に消費される始動空気の消費量である。

これによると、現在採用しているFの5°-95°のタイミングは始動空気の消費量が最も少ないにもかかわらず回転数の立ちあがりが大きく最も良いタイミングであるといえる。一方、クラッシュアスターンについては、BとJのタイミングが良い。すなわち、始動弁をある程度ま

図6 エア投入後
回転数変化

図7 エア初圧の
影響

図8 通常起動の場合の1秒間の回転数の立ち上がりとAIRの消費量(C船)

図9 クラッシュアスターンにおける始動弁開閉タイミングの影響(C船)

では出来るだけ早く開く方が早く逆転する。これは遅れ時間を一定と見込んだ場合、回転数が高いほど遅れ角が大きくなり、回転数0から出発する通常の始動(正転, 逆転共)では都合の良いタイミングであっても、高回転域から出発するクラッシュアスターン時は都合の悪いタイミングとなる可能性を示している。しかし、単純にタイミングを早めると、時間遅れの効果の出ない時に始動弁が閉じた後シリンダ内圧が異常に上昇するということが見られる。最も望ましいのは時間遅れが0となることであるが、できる限りこの遅れを小さくすることがクラッシュアスターン性能を改善するのに役立つと考えられる。もし、最終的に影響をあたえ得るような遅れが残る場合、なんらかの方法で高回転域でタイミングを早めることができればさらに良い影響をもたらすであろう。

3. クラッシュアスターンの失敗例と対策

クラッシュアスターンの失敗例として、C船(表1参照)と同形船の海上公試におけるテスト結果を示し、その原因と対策を示す。図10に示すように燃料カット後30秒すぎに設定回転数40rpmに達し逆転空気が投入された。図6のC船の回転数変化に示すように、40rpmからでは5秒間位で回転数が0になるはずである。それにもかかわらず、この場合は逆転空気投入直後において回転がさがり、その後はむしろ回転の上昇が見られた。この時のNo.1シリンダにおける、始動弁の動き、シリンダ内圧、パイロットエア圧の計測結果を図11に示す。

図10 クラッシュアスターン失敗例

図11 クラッシュアスターン失敗時におけるNo.1シリンダの始動弁リフト等の計測値

始動弁はT.D.C.前85.7°で開き、T.D.C.前19.6°で閉っており、しかも、始動弁リフトは12.5mmであり全開(全リフト18mm)していないことがわかった。このタイミング及びリフトを用いてシミュレートした結果が図10の計算値であり、図12のNo.1シリンダのインジケータ線図である。このようなタイミング及びリフトでは最初の圧縮行程でブレーキしない限り(回転数を0までもっていく)、ブレーキエアは起動エアとして働くことが図12の計算されたインジケータ線図を見てわかる。

始動弁開閉タイミング、特に閉のタイミングが大きく

図 12 No.1 シリンダインジェクタ線図

変化した原因は、始動弁を押し開けている力が弱いためであり、シリンダ内圧に打ち敗けて早く閉じたからである。このため対策としては、パイロットエア圧力を増加さすか、始動弁の構造を変えて始動弁の開ける力を増すことが考えられるが、大改造であり時間的に困難であった。そこで考えられたのが、ディストリビュータカムの形状を変えて、開弁を早くし始動弁オープン区間を長くすることを考えた。図9のJのタイミングにしたわけであるが、これによりクラッシュアスターンは成功している。この時は閉弁時期はT.D.C.前 30° 近くであり、むしろ早くなったが、オープン区間は前記の 66° に対して 80° とのびている。又、空気消費量のことも考えて、カムは後進カムだけタイミングを変えた。なお、前記のA, B,

C 船については始動弁の構造を変えて、開弁力を増した始動弁を採用している。

4. 結 論

A, B, C の3船についてクラッシュアスターンのシミュレーションを行った結果、以下のことがわかった。

1. これまで経験的に船形によってブレーキエア投入回転数を変えていたが、これが妥当であることがわかった。

2. 始動空気初圧についてはブレーキエアが所定回転数以下になって投入される限り、 30 kg/cm^2 , 25 kg/cm^2 , 20 kg/cm^2 でクラッシュアスターン性能に大差はない。

3. 始動弁開閉については、通常始動については $5^\circ - 95^\circ$ のタイミングが妥当であるが、更に時間遅れを小さくすることにより、通常始動、クラッシュアスターン共性能が向上する。

5. あとがき

B & WK 90 GF 形機関のクラッシュアスターン性能についていろいろ計算したが、今回は変化させるパラメータを3つに絞った。このほかにも時間遅れを変えた場合の影響、始動空気槽容積、始動空気通過面積を変えた場合の影響、逆止弁の影響、そして始動弁の詳細な動きを考慮すること等により、通常起動も含めて更に研究を深めたい。