

論文 燃料噴射ポンプ内キャビテーションエロージョンの研究*

Study of Cavitation Erosion in the Fuel Injection Pump

古田 克則 稲田 嘉宣 佐々木 忍
Katsunori FURUTA Yoshinobu INADA Sinobu SASAKI

In the diesel engine field, increasingly strict emission regulations and customer requirement have necessitated advance technology due to protecting global environment. To meet stringent emission regulations, it has been studying to increase higher injection pressure. However, many problems have arisen. One of them is cavitation erosion in the fuel injection system. This paper describes the example of study of cavitation erosion reduction in fuel chamber of the fuel injection pump.

Key Words : Diesel Engine, Fuel Injection Pump, Cavitation Erosion

1. 序 論

地球環境保護の面からディーゼルエンジンの排出ガス規制が年々厳しくなる事から高圧燃料噴射による噴霧の微粒化による燃焼の改善が進められており、噴射ポンプの高吐出圧力化が強く要求されている (図1)。

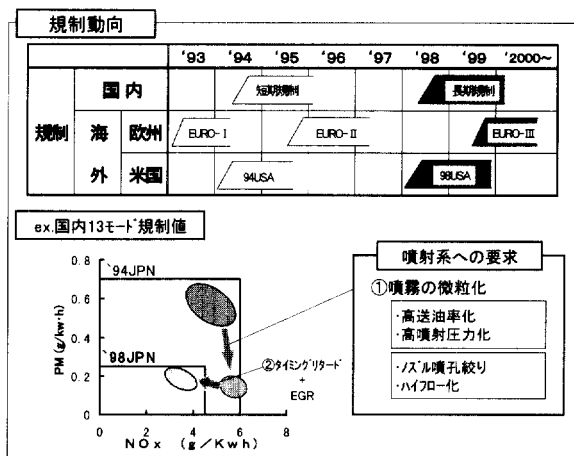


図1 排出ガス規制動向

しかし、噴射ポンプの高圧化によって、プランジャ室から燃料室内へ逆流する燃料による圧力変動が大きくなる事により、燃料室にキャビテーションエロージョンが発生し、ポンプの信頼性に大きく影響する事がネックとなっていた。そこで、本研究では列型燃料噴射ポンプの燃料室内の流れ解析、可視化及び圧力波形解析によりキャビテーションエロージョン現象のメカニズムを解明し改良手法を確立することができたの

で報告する。

2. 燃料室キャビテーションエロージョン

図2に噴射ポンプのシステム構成、図3にその噴射ポンプの燃料圧送工程を示す。エンジンにより駆動されるポンプのカムシャフトによりプランジャがシリンダ内を往復運動する。その時、プランジャがシリンダに設けてあるスピルポートを閉じるとプランジャ室の燃料は燃料室と遮断され、加圧される。ここで燃料室内には、プランジャがスピルポートを閉じる直前に、慣性的にプランジャ室と燃料室との圧力差が生じ、スピルポートを通じ燃料室へ低圧の逆流が発生する (これを以降プレスピルと呼ぶ)。次に燃料圧送終了時には、プランジャ室で加圧された高圧の燃料がプランジャに設けられた調量溝を通じスピルポートから燃料室へ高圧の燃料が一気に排出され燃料の圧送が終了する (以降、この燃料の排出をメインスピルと呼ぶ)。こ

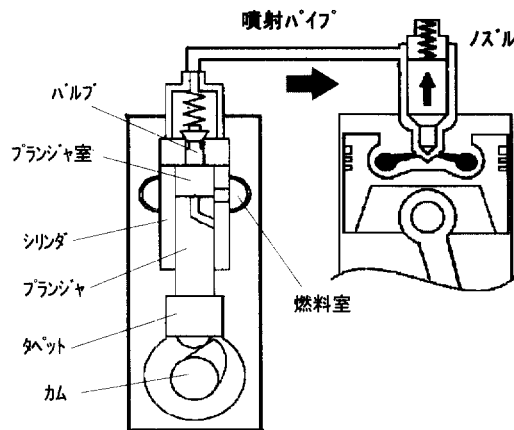


図2 噴射ポンプシステム構成

* 日本機械学会 第74期全国大会講演論文集 (vol. V) より加筆転載

の様に燃料室内では燃料の供給，燃料の排出が繰り返され常に高い圧力変動が起こっている。そこで，燃料室を構成するポンプハウジングは一般的にはアルミ材である為，それを保護する為，燃料室内のまわりには熱処理等を施し，硬い材料で作られた，スピルプロテクタと称するものが設けられているが，高圧化が進んでくると，図4に示す写真の様に（スピルプロテクタをスピルポート側から見たもの）スピルポートの開口した方向に虫食い状の侵食が発生しポンプの信頼性に大きく影響する。これが噴射ポンプの燃料室キャビテーションエロージョンである。

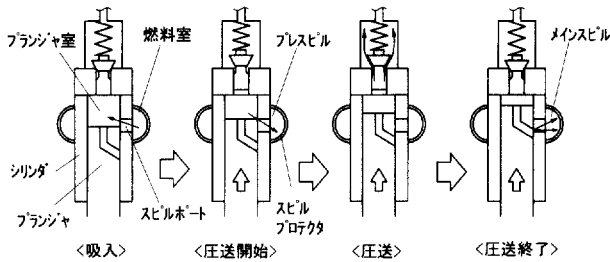


図3 燃料圧送工程

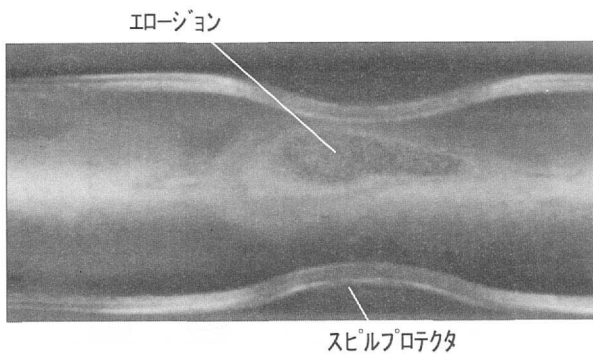


図4 燃料室キャビテーションエロージョン写真

3. エロージョン強度の定量化

3・1 キャビテーションエロージョンの一般論

キャビテーションエロージョンの発生メカニズムは一般的には，液体が高速の流れ又は外圧の影響により飽和蒸気圧以下となると気泡（キャビティ）が発生する。その気泡が外部からの圧力等により潰され崩壊する時に非常に強いエネルギーを発生し，その崩壊エネルギーにより，近傍の物体をマイクロに破壊するものと考えられている。この時の崩壊エネルギー，すなわちエロージョン強度については，これまでに多くの研究がなされているが下記に示す代表的な Rayleigh の理論式について考えた。

Rayleigh の理論式

$$f \propto E = \sum [4/3\pi P(R_0^3 - R^3) - 4\pi QR_0 \log(R_0/R)]$$

f : エロージョン強度

E : 気泡崩壊エネルギー

P : 気泡をつぶす圧力

R_0 : 初期気泡の半径

Q : 気泡のガス圧力

これより，キャビテーションエロージョン強度の主要因は，気泡量，及び気泡をつぶす圧力が考えられ，一般的に気泡崩壊時には衝撃波が生じる事が知られている。今回もエロージョン強度の定量的評価のために，燃料室の圧力波形を測定することにした。

3・2 燃料室内の圧力波形

図5に燃料室内の圧力波形及びプランジャ室のポンプ吐出圧力波形の一例を示す。燃料室の圧力をピエゾ圧力変換器により測定した。燃料室圧力波形をポンプ圧送工程を追って見てみると，まず圧送開始時にプランジャ室の余分な燃料が燃料室に逆流する比較的低圧のプレスピルが観測される。そして圧送終了時には，プランジャ室の圧力降下とともに高圧の燃料が燃料室に排出されるメインスピルがみられる。メインスピル時にはスパイク状の高周波成分が非常に大きくみられることから，ここで気泡が大量に崩壊していると考えられる。

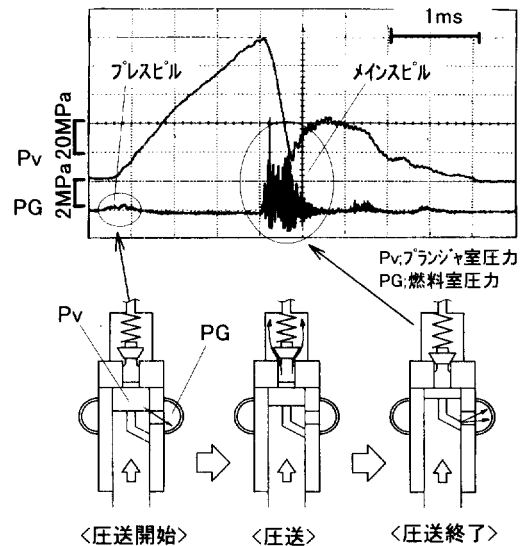


図5 燃料室内圧力波形

3・3 エロージョン強度の定量化

この燃料室圧力波形の高周波成分からエロージョン強度を定量化する為、過去の研究を参考に気泡崩壊時に発生する高周波である衝撃波を周波数分析し、100~300 kHzのエネルギースペクトル密度(ESD)のオーバーオール値とエロージョンによる浸食量の相関を解析した²⁾。

図6はポンプ吐出圧力とエロージョン強度の代用値であるESDのオーバーオール値、そのESDのオーバーオール値とスピルプロテクタを柔らかい材料で製作し、加速耐久を行ったときのエロージョンによるスピルプロテクタ重量欠損率の相関をとったものである。図に示されるように、ポンプ吐出圧力を高圧化すると、ESDのオーバーオール値、エロージョンによる重量欠損率が増加し、非常に良い相関がとれており定量化できることが解った。

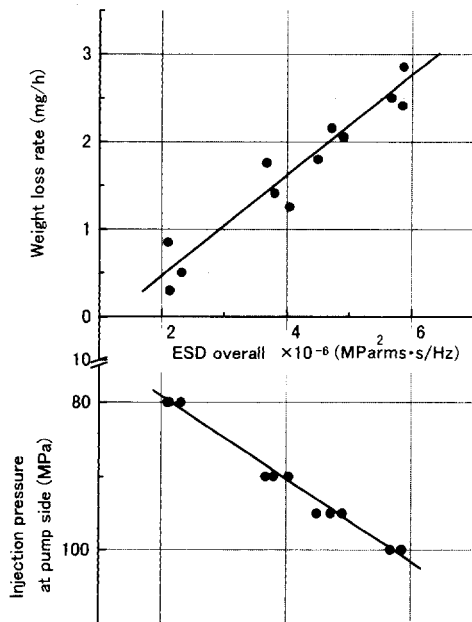


図6 燃料室内のエロージョン強度

4. メカニズムの解析

4・1 気泡崩壊エネルギーの要因解析

そこで、本評価方法を用い気泡崩壊エネルギーの要因を明確にすることにした。先に述べたとうりに燃料室内の圧力発生源はポンプ圧送開始時のプレスピルと圧送終了時のメインスピルがあるが、この2つの要因を明確にする為、プレスピル時とメインスピル時の燃料室圧力を別々に測定することにした。測定方法は図7に示すように、スピルポートを段付きにし左側にプレ

スピルのみ、右側にメインスピルのみを排出させるようにしたエレメントにて測定をおこなった。まず、プレスピルのみの場合を測定したPG1の波形と、従来のPG3のプレスピル時の圧力波形を比較してみるとほとんど変化していないのがわかる。しかし、メインスピル時を見ると、プレスピルとメインスピルを分離して測定したPG2の圧力波形の方が高周波成分が非常に小さくなっているのがわかる。これを先程のESDのオーバーオール値で比較してみた結果を図8に示

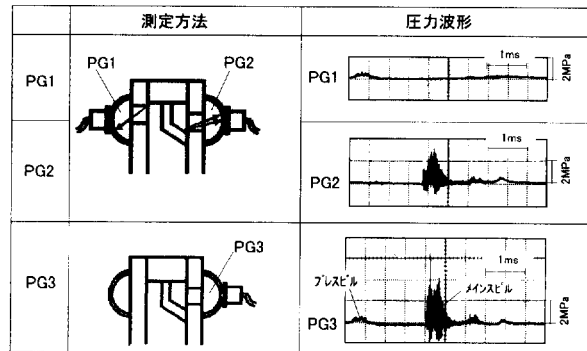


図7 測定方法

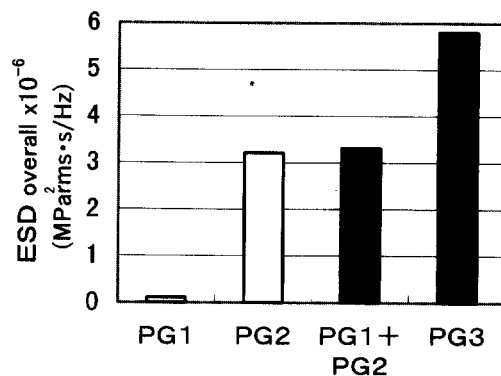


図8 要因分析結果

す。本来ならば別々に測定したプレスピルとメインスピルのESDオーバーオール値の総和は、従来の同時に測定したESDオーバーオール値の値と等しくなるはずであるが(すなわちPG1+PG2=PG3)、実際には、別々に測定した総和は非常に小さく(PG1+PG2<PG3)、現象が矛盾することが解った。これより、プレスピルとメインスピルとの間には何らかの因果関係があるのではと考え、プレスピルからメインスピルまでの気泡の挙動に着目し解析を進めた。

4・2 燃料室内の流れ解析

4・2・1 流れ解析概要

そこで、噴射ポンプの燃料室内に流れ解析を適用する事で、燃料室内の気泡の挙動を解析する事を試みた。先に述べたように、燃料室内では燃料圧送直前に燃料室に逆流するプレスピルと、圧送終了時にプランジャ室の高压の燃料が逆流するメインスピルの2つの圧力発生源がある。本解析では図9に示す様に、燃料室をモデル化し、プレスピル開始からメインスピル終了ま

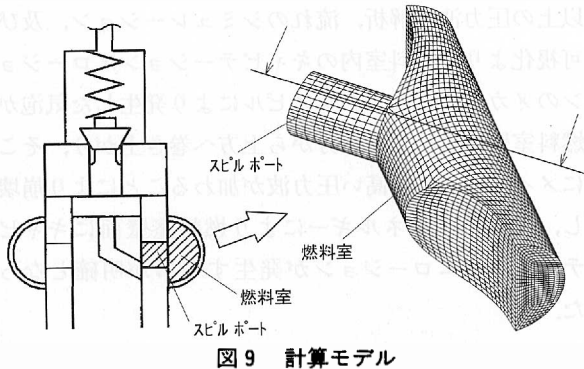


図9 計算モデル

での流れによる気泡の挙動について解析した。計算モデルはスピルポートから燃料室までの1気筒分を3次元モデルにて作成し、非定常解析を実施した(総メッシュ数約30000)。

計算には一般的な流体解析ソフトであるSTAR-CDを使用した。次に計算上の境界条件を下記に記す。

- ・圧力発生部であるスピルポートの開口面積は実機と同様に各タイムステップ毎に変化する様に与えた。
- ・圧力発生部からの圧力は、実験値を用いシミュレートさせた。
- ・気泡の挙動に関しては、本計算から得られた、流れにより飽和蒸気圧以下となった発生場所及びその時間にトレーサーとして拡散物質を流し気泡の流れを解析した。

4・2・2 解析結果

流れ解析結果を図10に示す。まずはじめにプレスピル開始直後の流れの解析結果を見てみると、スピルポート内のプレスピルの流れの出口部分が飽和蒸気圧以下となっている事がわかる。ここで気泡が発生していると考えられる為、この出口部分及び、その時間に気泡と見立てた拡散物質をトレーサーとして計算上に流し挙動を計算させた。次に、メインスピル直前を見てみると、プレスピルによる流れはスピルポート出口から燃料室下方へ流れ、そして、燃料室壁面に沿って上方へ巻き上がる流れができており、トレーサーも燃料室壁面の下方から上方へ巻き上がっているのがわかる。そして、メインスピル直後の圧送終了時には、高压のメインスピルが一気に燃料室内に排出される為、トレーサーは全体に拡散してしまいほとんどなくなっているのがわかった。以上の結果より、燃料室内のキャビテーションエロージョンのメカニズムとしてはプレ

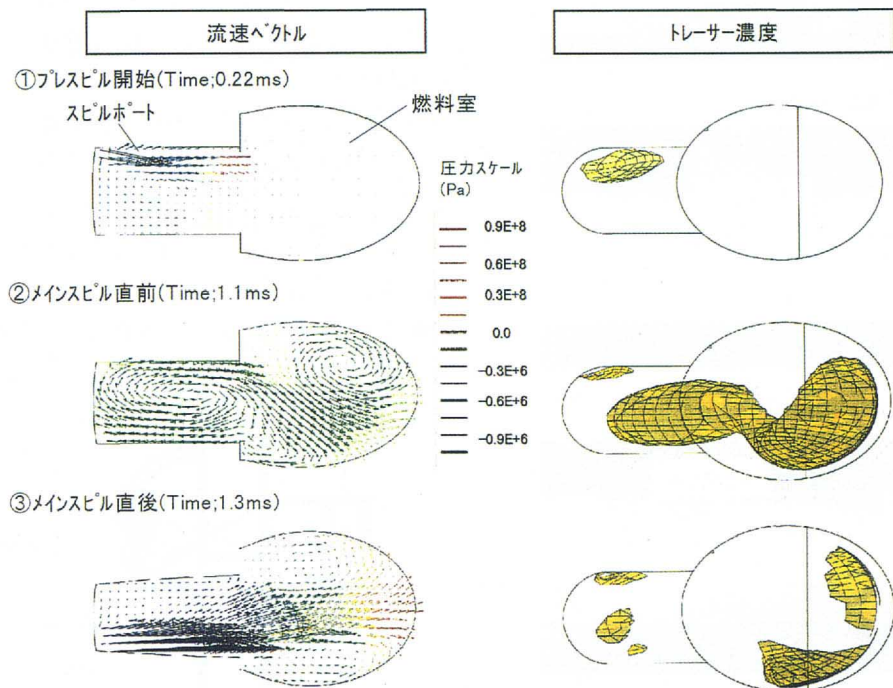


図10 燃料室内流れ解析結果

スピルにより発生した気泡は燃料室壁面に沿って下方から上方へ巻き上がり、そこにメインスピルの高い圧力波により気泡は崩壊し、その崩壊エネルギーにより燃料室壁面にキャビテーションエロージョンが発生するものと推定した。そこで、次に燃料室内の可視化をする事により、本メカニズムの検証をする事にした。

4・3 燃料室の可視化

図11に可視化装置の概要を示す。本装置では、ポンプハウジング燃料室部分をアクリルにて製作し、実機運転状態での燃料室内を可視化できるようにし、その

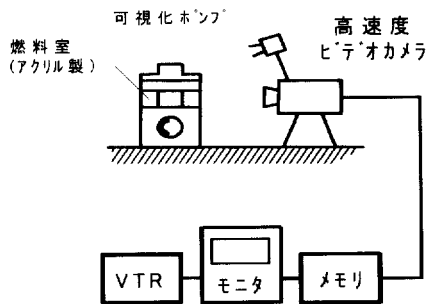


図11 可視化装置

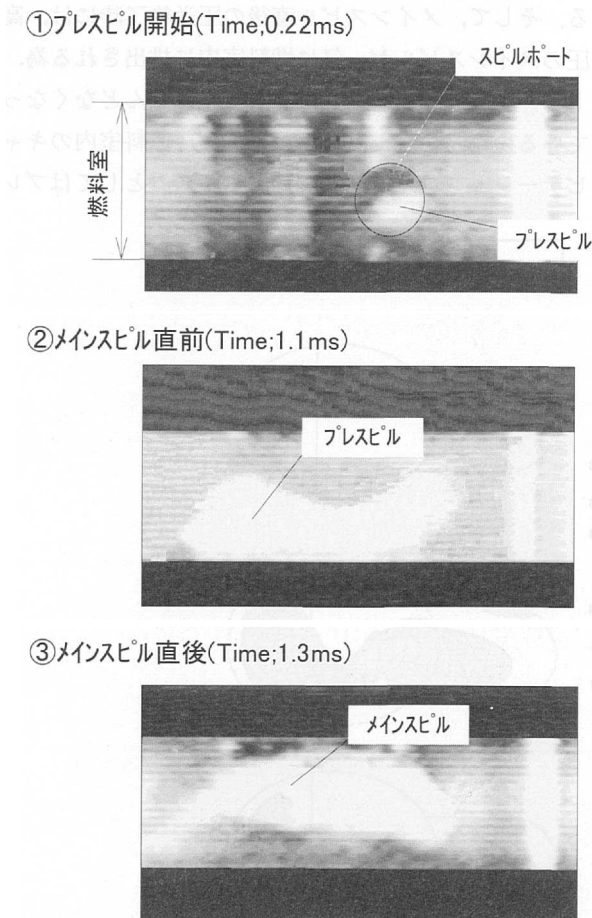


図12 燃料室可視化映像

様子を高速度ビデオカメラにて測定した(測定コマ数18000コマ/秒)。その可視化映像を図12に示す。高速で撮影している為、暗い映像であるが、スピルポート出口下方に白く見えるのがプレスピルによる気泡である。その気泡は燃料室下方から燃料室壁に沿って上方へ巻き上がっているのが良くわかる。そして、高圧のメインスピルが排出されると同時に、その圧力波により、燃料室壁に取り巻いていたプレスピルの気泡は一気に崩壊し消滅している様子が確認できた。

以上の圧力波形解析、流れのシミュレーション、及び可視化より、燃料室内のキャビテーションエロージョンのメカニズムは、プレスピルにより発生した気泡が燃料室壁面に沿って下方から上方へ巻き上がり、そこにメインスピルの高い圧力波が加わる事により崩壊し、その崩壊エネルギーにより燃料室壁面にキャビテーションエロージョンが発生する事が明確となった。

5. 改良手法の検討

以上のメカニズムより、燃料室内のキャビテーションエロージョンの抑制手法としては、プレスピルの気泡をメインスピルにより潰させない、つまり、両者を分離する事が有効であると考えられる。その具体的手法としては、前述した要因解析で用いた、スピルポートを段付きに配置し分離する手法があるが、エンジンでの燃焼の改善の為、ポンプ側の噴射終わりをすばやく終了させる為、スピルポートを両側に2つ配置する傾向にあり、それとは別にプレスピル用のポートを設ける事は、設計制約上難しい。そこで、改良事例として、燃料室形状すなわちスピルプロテクタ形状を図13に示す様なリブ形状にすることで、プレスピルによる気泡をメインスピルが飛んでくる上方へ巻き上がらない様に改良を試みた事例を示す。本改良品の効果の確認として、改良品の可視化による効果の確認を実

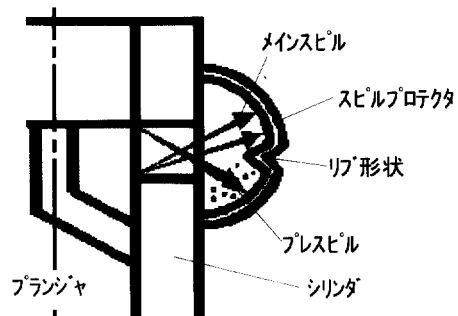
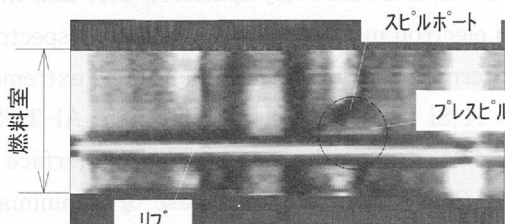


図13 改良実施例

施した。その可視化映像を図14に示す。アクリルで製作した燃料室に図に示すように、リップを設け、プレスピルによる気泡の挙動を観察した。映像で示される様に、プレスピルによる気泡は燃料室のリップにより燃料室上方へ巻き上がっていないのがわかる。次にメインスピルが飛んできて、メインスピルの飛んてくる場所にはプレスピルによる気泡は存在しない為、気泡の崩壊エネルギーは抑制されているものと考えられる。

①プレスピル開始(Time:0.22ms)



②メインスピル直前(Time:1.1ms)



③メインスピル直後(Time:1.3ms)

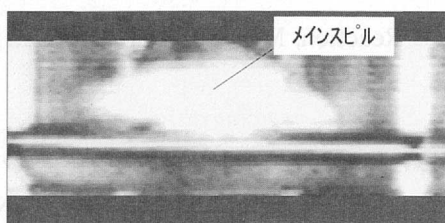


図14 改良品の燃料室可視化映像

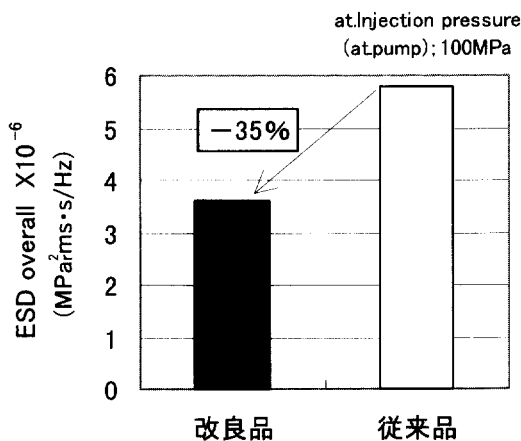


図15 改良品の効果

次に、改良品による燃料室内の気泡崩壊時のエネルギーの代用値であるESDオーバーオール値を図15に示す。本結果よりわかる様に、本改良により、従来品に比べESDオーバーオール値は大幅に低減でき、その結果、エロージョンによる重量欠損率も大幅に低減できた。

6. 結 論

以上の本研究により下記の成果が得られた。

- (1) 燃料室内キャビテーションエロージョンのメカニズムは、プレスピルによる気泡をメインスピルが燃料室壁で潰す事にある事を見出した。
- (2) 本メカニズムを明確化できた事で、有効な改良手法を確立できた。

今後、次期排出ガス規制に向けた噴射ポンプの高圧化に対し、本技術の適用検討を実施していく。

＜参 考 文 献＞

- 1) 赤松：日本機械学会 第106回講演会，“キャビテーション気泡の成長と圧壊”
- 2) 渡辺，他4名：日本機械学会論文集，第512号B編，“ディーゼル機関燃料噴射系におけるキャビテーションの研究”



＜著 者＞



古田 克則 (ふるた かつのり)
ディーゼル噴射技術2部
列型噴射ポンプの開発・設計に従事。



稲田 嘉宣 (いなだ よしのぶ)
ディーゼル噴射技術2部
列型噴射ポンプの開発・設計に従事。



佐々木 忍 (ささき しのぶ)
ディーゼル噴射技術2部
列型噴射ポンプの開発・設計に従事。