

空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究*
(第7報, リミットサイクルの振幅と周波数に及ぼす諸因子の影響-その1)

川 副 嘉 彦*¹

Low Speed Hunting of the Pneumatically Governed
Compression Ignition Engine
(7th Report, Effects of Various Parameters on the Amplitude and
Frequency of Limit Cycle : Part I)

Yoshihiko KAWAZOE

For a better understanding of hunting, it is desirable to be able to obtain the amplitude and frequency of hunting analytically. In the author's last two reports as a first step toward nonlinear approximate analysis, the effects of individual parameters of a closed-engine-governor system on the instability of equilibrium state are linearly estimated, especially on the frequency and increment of amplitude. In the present report, the effects of three parameters that have a marked influence on the limit cycle characteristic are estimated as a step to analytically explaining the mechanism of limit cycle evolution. Results show that the limit cycle disappears over all speed ranges with increasing moment of inertia of crankshaft system 1.8 times that in the actual engine as with minimizing subventuri pressure lag. Results also show that the amplitude decreases except at extremely low speeds with decreasing mass of the governing system, but it is difficult to decrease the mass in reality. Further, it is found that the limit cycle does not disappear no matter what value the damping of the governor may take.

Key Words: Vibration, Instability, Shaft Speed Hunting, Limit Cycle, Internal Combustion Engine, Compression Ignition Engine, Pneumatic Governor, Engine Speed Control, Numerical Simulation

1. 緒 言

空気調速機関の低速無負荷運転域に生じる数 Hz の機関回転数変動, いわゆる低速ハンチング現象は燃料噴射量調節用サブベンチュリ負圧の位相遅れによる自励振動であり, 対策として絞弁・ベンチュリ部に続く吸気管から制御負圧を取り出せば, 位相遅れが小さいので低速ハンチングが発生しないことが明らかになり, 微小変動からリミットサイクルが生まれる過程が計算機シミュレーションにより定量的に解明された^{(1)~(5)}. しかし非線形現象としての解析的取扱いが未解決であり, リミットサイクルの振幅と周波数が何によって決まるかが明らかではない.

閉ループ系をできるだけ簡単な非線形系に抽象化することによりリミットサイクルを解析的に求めることをめざしてまず第5報⁽⁶⁾では, 回転速度変動に対するサブベンチュリ負圧応答の遅れを考慮して閉ループ・機関・調速機系の線形化微分方程式を導き, 実験および計算機シミュレーションの結果と対照することにより, その適用限界を調べた. その結果, 線形近似計算は

ごく低い回転数域を除くと, 平衡状態の不安定をよく予測でき, しかもリミットサイクルの周波数にほぼ等しい周波数を与えるが, 最大ハンチング発生回転数域における振幅の成長率計算値は非線形シミュレーションのそれと異なることが明らかになった. さらに第6報⁽⁷⁾では, この線形化微分方程式と特性方程式および開ループ系の周波数応答の式を用いて閉ループ系の変動振幅の成長率と周波数および開ループ系の周波数応答に及ぼす諸因子の影響を調べ, 平衡状態の動的(振動的)不安定に及ぼす支配的因子を明らかにした. その結果, (1)平衡状態の不安定および振動振幅の成長率・振動周期に及ぼす影響が大きい因子は, サブベンチュリ負圧応答の一次遅れ時定数のほかにクランク軸系の慣性モーメント, 噴射量調節棒変位に対するトルクこう配特性, ダイアフラム受圧実効面積, サブベンチュリ負圧感度, 調節棒復原ばねこわさであり, (2)調速機なしでの機関運転を不可能にする回転速度に対するトルクこう配特性の右上がり特性が閉ループ系の平衡状態の不安定限界に及ぼす影響は小さいこと, (3)調速機系の等価減衰係数 C_e は閉ループ系の周波数に影響するが振幅の成長率には影響しないのに対して, 等価質量 m_e は振幅の成長率に影響を及ぼすが周波数にはあまり影響を及ぼさず, 閉ループ機関・調速

* 昭和63年8月24日 第951回講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月25日.

¹ 正員, 埼玉工業大学 (〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690).

機系の不安定限界に及ぼす C_e と m_e の影響は小さいことがわかった。

この報告ではリミットサイクルの振幅と周波数に及ぼす支配的因子を明らかにするために、サブベンチュリ負圧応答の遅れのほかに、機関回転軸系の慣性モーメント、調速機系の等価質量と等価減衰係数の影響を計算機シミュレーションにより調べ、線形近似計算結果⁽⁷⁾とも対照する。各シリンダの吸気行程に基づく短周期変動、トルク特性、噴射量制御の間欠性や調速機系の噴射量調節棒復原ばねこわさの影響などについては続報に述べる。

2. 数値計算法の概要

閉ループ・機関・調速機系の各要素の動作方程式(1)~(5)を直接数値的に解いて⁽⁴⁾振動波形、リミットサイクルの振幅と周波数について調べる。式(1)は無負荷運転における回転速度の変動を表し、 N_e : 機関の角速度に対応する毎分回転数、 I_e : クランク軸系の慣性モーメント、 $J_e=2\pi I_e/60$ 、 T_e : 余剰トルクである。トルクは4シリンダ機関の各シリンダの燃焼サイクルの間の平均トルクを考える。調節棒変位と回転速度に対するトルクの実測値をマップデータとして与えておき、噴射時期 $i-1$ における調節棒変位 X_{i-1} と回転速度 N_{ei-1} に対応するトルクの値は式(2)のように補間によって求める。噴射量調節棒変位 X の運動方程式は式(3)となる。ただし、 m_e : 調速機系の等価質量、 C_e : 等価減衰係数、 k : 復原ばねこわさ、 L_0 : $X=0$ における復原ばね長、 L : 復原ばね自然長、 A_d : ダイアフラム受圧実効面積である⁽³⁾。各絞り弁開度における負圧は回転速度 N_e の変化に対して式(4)が広い範囲で実測値をよく表す。 α は各絞り弁開度における定常状態での負圧感度を表す係数、 T_p はサブベンチュリ負圧発生的一次遅れ時定数である⁽²⁾⁽⁴⁾。噴射時期 $i-1$ と i の間の負圧平均値を $P_{\pi,i}$ とし、各ピストンの作動に対応する吸気変動角周波数を ω_{mi-1} とし、 $i-1, i$ 区間の負圧波形 P を式(5)のように近似する。 t

はクランクの上死点からの時刻である。

$$J_e \frac{dN_e}{dt} = T_e \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{ei-1} = T_e(X_{i-1}, N_{ei-1}) \dots\dots\dots (2)$$

$$m_e \frac{d^2 X}{dt^2} + C_e \frac{dX}{dt} + k(X + L_0 - L) = A_d P \dots\dots\dots (3)$$

$$T_p \frac{dP_{\pi}}{dt} + P_{\pi} = -\alpha N_e \dots\dots\dots (4)$$

$$P = P_{\pi,i}(1 - \cos \omega_{mi-1} t) \dots\dots\dots (5)$$

初期設定回転速度 800 rpm の平衡状態において絞り弁をさらに微小角だけ瞬時に開いた場合の回転速度と噴射量調節棒変位の計算例と、これを噴射時期における調節棒変位と回転速度を両軸とする位相面で描いたものを図1に示す。初期変動が次第に成長し右回りのリミットサイクルを形成する。リミットサイクルの内部および外部の任意の点から出発して計算しても、両者の軌道は同じリミットサイクルに巻きつくので、このリミットサイクルは安定である⁽⁴⁾。諸因子の標準値は供試機関(4サイクル、4シリンダ、1986 cm³、渦室式)および供試噴射ポンプ(ボッシュ式列形、プランジャ径 6.5 mm、カム揚程 8 mm、ダイアフラム外径 60 mm) の値である⁽¹⁾⁽³⁾。

3. 閉ループ・機関・調速機系のリミットサイクルに及ぼす諸因子の影響

3.1 サブベンチュリ負圧の応答位相遅れの影響

図2は供試機関におけるリミットサイクル実測例であり、図3は遅れの小さな吸気管負圧制御により安定化した場合の実測例である。計算機シミュレーションでは、回転速度の長周期変動に対するサブベンチュリ負圧応答の位相遅れを一次遅れの時定数として考慮している。 T_p を考慮した場合($T_p=0.05$ s)のリミットサイクルの振幅と周波数計算値は実測値にほぼ一致し、位相遅れのほとんどない吸気管負圧制御の場合に T_p の値を零として計算するとハンチングは発生せず実測結

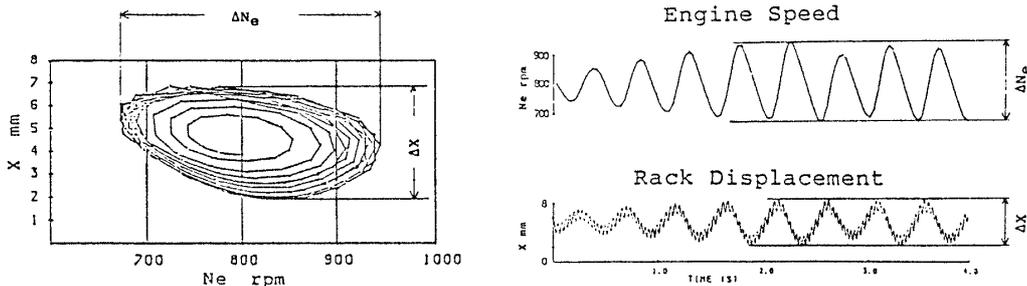


図1 位相平面でのリミットサイクル計算例

果に一致する⁽²⁾⁽⁴⁾こと, さらに線形近似計算においても T_p を考慮しない場合は平衡状態の不安定が現れない⁽⁷⁾ことはすでに報告した. T_p の値が増大するとリミットサイクルの振幅も増大し周期は長くなる.

3.2 機関回転軸系の慣性モーメント J_e の影響

図4は, 各平衡回転速度において J_e の値を標準値 J_{e0} ($I_e=0.261 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ { $2.67 \text{ kgf}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$ }) の0.5倍から1.5倍まで変えた場合のリミットサイクル (時計方向まわり) 計算結果であり, 初期外乱を与えた後の過渡挙動を噴射時期における調節棒変位と回転速度を両軸とする位相面上に表示している. J_e を大きくしていくと, 各目標回転速度における変動振幅が小さくなって

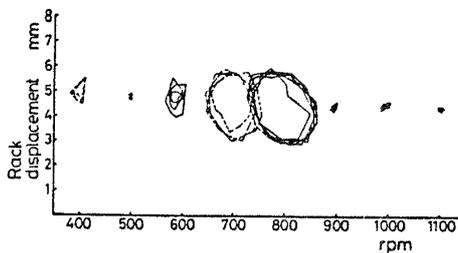


図2 噴射時期における調節棒変位と回転速度変動の位相面表示 (リミットサイクル実測値)

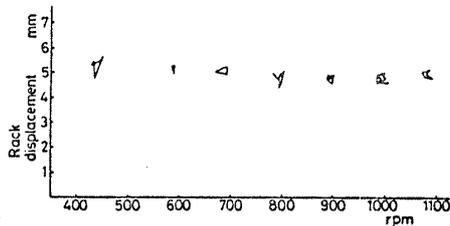


図3 位相遅れの小さい吸気管負圧制御の場合の噴射時期における調節棒変位と回転速度の変動の位相面表示 (実測値)

いくとともに, ハンチング発生領域は低回転速度側に移っていき, 発生領域は狭くなっていく. J_e が標準値 J_{e0} の1.5倍ではほとんど全回転速度領域において変動は小さくなり, J_e の値を J_{e0} の1.8倍以上にすると, ハンチングは完全に消滅する. この結果は線形近似計算⁽⁷⁾において閉ループ系の平衡状態の安定・不安定の J_e に関する限界値が J_{e0} の1.8倍であることと一致している. また, この図は J_e の増大とともに調節棒の振動振幅に対する回転速度振動振幅の比が小さくなることを示している.

図5は標準値の場合の最大ハンチング領域700~800 rpm における J_e の変化に対する周波数の変化を示したものであり, J_e の増大とともに周波数は低くなる. 図6は各回転速度における回転速度全振幅を J_e の変化に対して示したものであり, J_e の増大とともに最大ハンチング振幅が小さくなっていく.

図7は J_e を J_{e0} の1.8倍に与えた場合の計算機シミュレーション結果であり, 初期外乱は約1.8 Hzで次第に収束する.

3.3 調速機系等価質量 m_e の影響 等価質量 m_e の値は噴射ポンプの4筒分のプランジャ・ピニオン・スリーブの回転運動を直線運動に置き換えて算出した値に噴射量調節棒の質量, ダイアフラム可動部質量, 変位測定用コアの質量を加えたものである⁽³⁾. 図8は, 各平衡回転速度において m_e の値を標準値 m_{e0} (0.273 kg { $0.279 \times 10^{-3} \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ }) の0.1倍から2.0倍まで変えた場合のリミットサイクル計算結果であり, m_{e0} の2倍から m_e の値を小さくしていくと全回転速度領域においてリミットサイクルの振幅は次第に小さくなっていくとともに, ハンチング発生領域は狭くなる. ただし m_e の値を標準値よりさらに小さくす

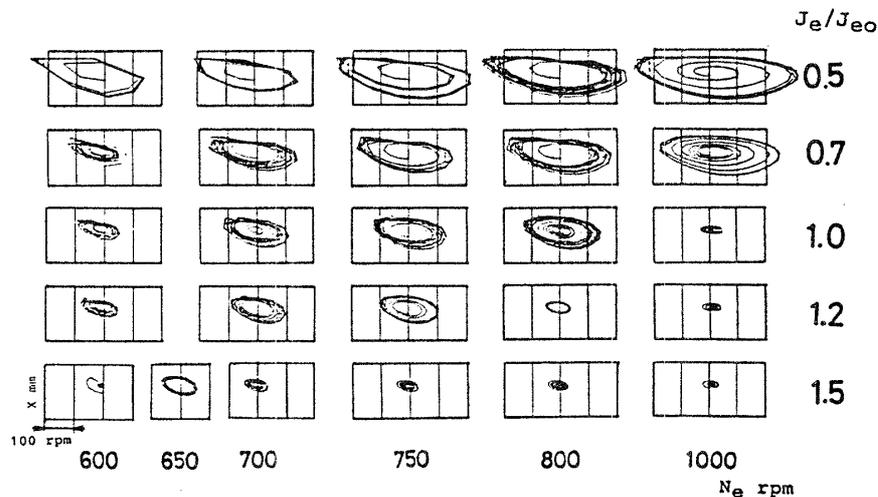


図4 リミットサイクルに及ぼす機関回転軸系の慣性モーメント J_e の影響

ると、標準値 m_{eo} では安定な 500 rpm 近傍の低回転速度域における振動振幅が逆に大きくなるとともに、回転速度振動振幅に対する調節棒変位振幅の比が大きくなってリミットサイクルの楕円の傾きが急になってくる。 m_e の値が標準値 m_{eo} の 0.25 倍では、500 rpm 近傍を除く全回転速度域でリミットサイクルは非常に小さくなり、0.1 倍ではほとんど消滅する。これは線形近似計算結果⁽⁷⁾と少し異なる。すなわち、線形計算では m_e の減少とともに振幅の対数成長率は小さくなるが安定になることはない。標準値の場合の線形近似計算による 500 rpm 近傍における平衡状態の不安定は実験(標準値)において 500 rpm 近傍の振動が非常に小さいという事実と異なっているが、 m_e の値が標準値に近い場合を除くと 500 rpm 近傍でもリミットサ

イクルが発生するという計算結果と実験においても時々 500 rpm 近傍においてハンチングが現れることがあるという事実は、本来 500 rpm 近傍の低回転速度域における運転も不安定になりやすいということを示している。すなわち標準値の場合は 500 rpm 近傍においてハンチングは発生しないが、諸因子の値が少し変わると 500 rpm でもハンチングが発生するという事である。

図 9 は m_e の値を変えた場合の閉ループ系の周波数計算値を示す。 m_e の値が m_{eo} の 2 倍近くになると周波数はわずかに低くなるが、 m_e の周波数に及ぼす影響は小さく、線形近似計算の結果と一致している。図 10 は各目標回転速度における回転速度変動全振幅を m_e の変化に対して示したものであり、最大ハンチングの振幅は m_e の増大とともに大きくなる。図 11 は m_e の値を m_{eo} の 0.25 倍に与えた場合の計算機シミュレーション例であり、平衡回転速度 800 rpm における初期外乱は収束し、ハンチングは発生しない。

m_e を小さくすると振幅は減少することになるが、 m_e を小さくすることは現実には難しい。

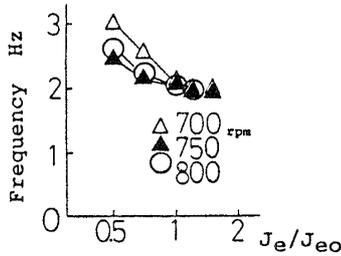


図 5 周波数に及ぼす慣性モーメント J_e の影響

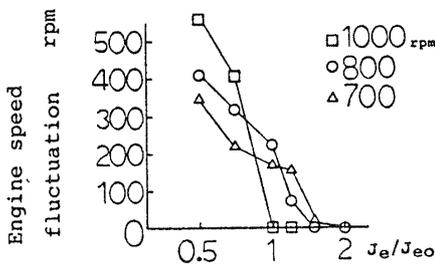


図 6 回転速度変動振幅に及ぼす J_e の影響

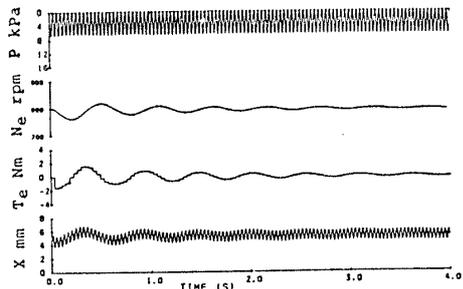


図 7 $J_e/J_{eo}=1.8$ の場合の計算機シミュレーション結果 (800 rpm)

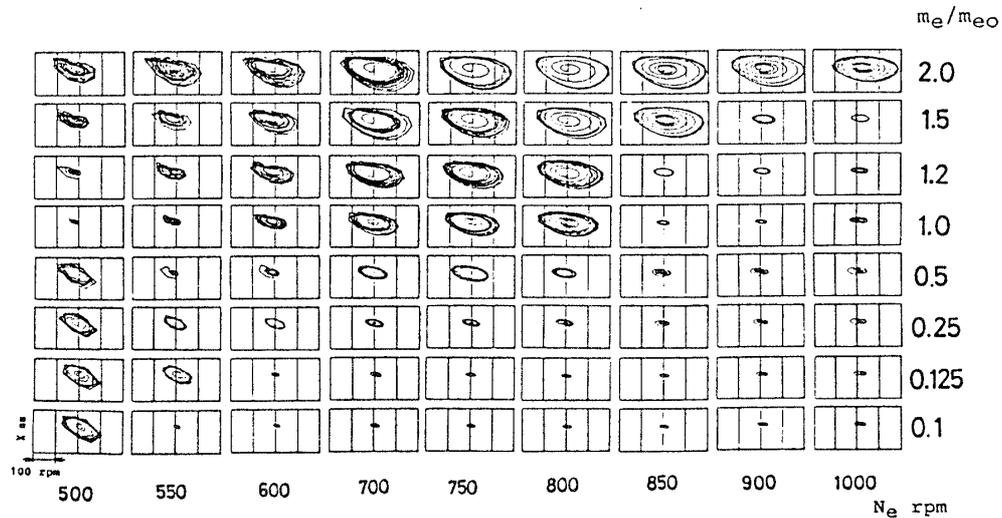


図 8 リミットサイクルに及ぼす調速機系等価質量 m_e の影響

3.4 調速機系等価減衰係数 C_e の影響 空気調速機系の負圧導管長さ 40 cm, 内径 8 mm, ダイアフラム外径 60 mm, 平衡状態での負圧室容積 50 cm^3 の場合の等価減衰係数⁽³⁾の値 $24.9 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ [$25.4 \times 10^{-3} \text{ kgf}\cdot\text{s/cm}$] を標準値 C_{e0} としている。線形近似計算⁽⁷⁾においては調速機系の等価減衰係数 C_e の値を大きくすると, 閉ループ系の周波数は低くなり, 振幅の時間的成長率は小さくなるが, 振幅の成長率には影響せず, 平衡状態の安定・不安定限界に及ぼす C_e の値の影響は小さかった。ここではリミットサイクルの振幅と周波数に及ぼす C_e の影響を計算機シミュレーションに

より調べた。

図 12 は調速機系の等価減衰係数 C_e の値を標準値 C_{e0} の 0.1 倍から 2 倍まで変えて与えた場合の各平衡回転速度におけるリミットサイクルの計算結果を示す。 C_e の値を C_{e0} より大きくしていくとリミットサイクルの振幅はむしろ大きくなり, ハンチング領域は低回転速度域のほうに広がっていく。 C_e の値を C_{e0} より小さくしていくと標準値における最大ハンチング発生回転速度域のリミットサイクルの振幅は少し小さくなるが, C_e の値が C_{e0} の 1/10 になってもリミットサイクルは消滅せず, ハンチングは高回転速度域のほうに広がっていく。また C_e が小さくなると, 回転速度振動振幅に比べて調節棒変位振幅が大きくなり, リミットサイクルのだ円形が円形に近づくとともに傾きが急になってくる。したがって C_e の値が変わってもハンチングは消滅しないということになる。 C_e が非常に小さい場合のリミットサイクルは複雑な挙動を示すが, これは C_e が標準値 C_{e0} では調速機系の振動特性が過減衰であったのに対して, C_e が小さくなると臨

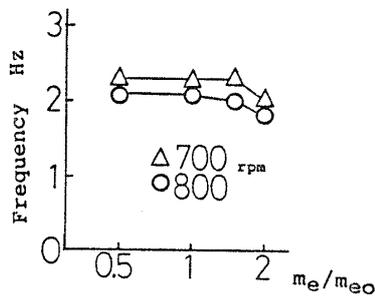


図 9 周波数に及ぼす等価質量 m_e の影響

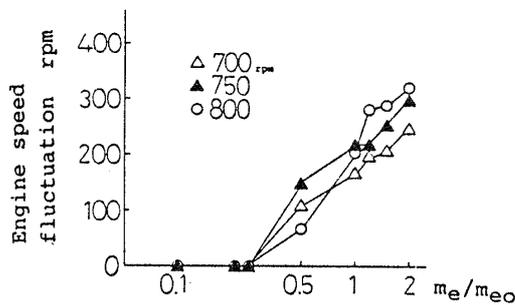


図 10 回転速度変動振幅に及ぼす m_e の影響

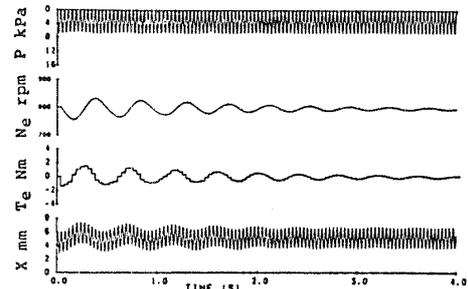


図 11 $m_e/m_{e0}=0.25$ の場合の計算機シミュレーション結果 (800 rpm)

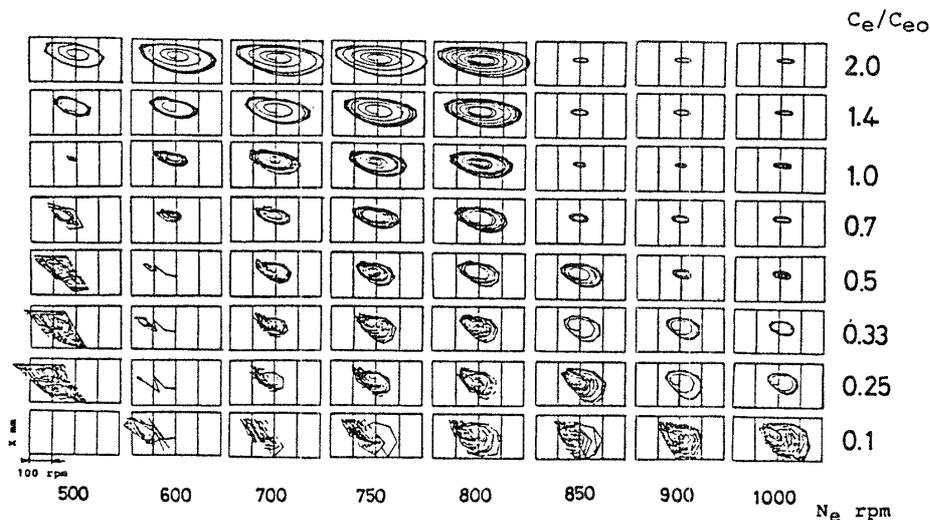
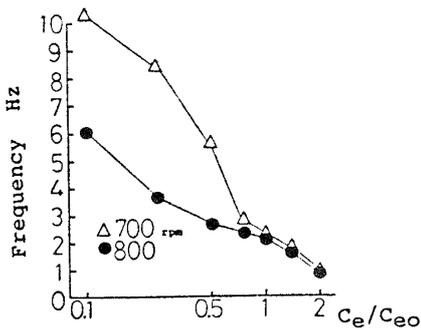


図 12 リミットサイクルに及ぼす調速機系の等価減衰係数 C_e の影響

図 13 周波数に及ぼす等価減衰係数 C_e の影響

界減衰以下 (不足減衰) になり調速機系の固有振動数が現れるためであろう。500 rpm 近傍においても C_e が小さい場合は周波数の高い振動が現れる。

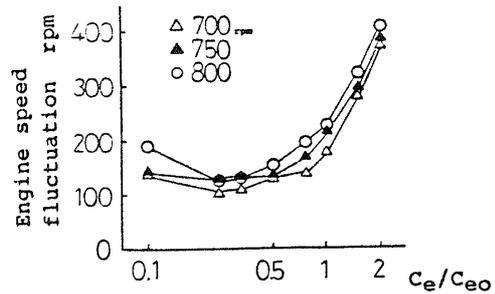
図 13 は C_e の値を変えて与えた場合の閉ループ系の周波数計算値を示す。 C_e を C_{eo} より大きくしていくと閉ループ系の周波数は低くなり、 C_e を小さくすると周波数は高くなる。図 14 は標準値における最大ハンチング発生回転速度域における C_e の変化に対する回転速度変動全振幅の変化を示したものであり、最大ハンチングの振幅は C_e の増大とともに大きくなる。すなわち調速機系の減衰を大きくしてもハンチング振幅の減少に効果がなく、むしろ振幅は大きくなる。

4. 結 論

サブベンチュリ負圧の応答おくれに並んで大きな影響をもつ因子のうち機関回転軸系の慣性モーメントおよび調速機系の等価質量、等価減衰係数が閉ループ・機関・調速機系のリミットサイクルの振幅・周波数に及ぼす影響を明らかにし、線形近似計算結果とも対照した。その内容は次記の三つに要約できる。

(1) 機関回転軸系の慣性モーメント J_e の影響は極めて大きく、その値を標準値の 1.8 倍以上に与えるとはほぼ全回転速度域においてハンチングは現れない。この結果は線形近似計算において J_e が標準値の 1.8 倍になると全回転速度域において平衡状態が安定になるという結果と一致している。

(2) 調速機系の等価質量 m_e が大きいほどリミットサイクルの振幅は大きく、 m_e を小さくしていくとごく低い回転速度域を除いてリミットサイクルは消滅する。ただし現実には m_e を小さくすることは難しい。

図 14 回転速度変動振幅に及ぼす C_e の影響

リミットサイクルの周波数に及ぼす等価質量の影響は小さい。

(3) 調速機系の等価減衰係数 C_e を標準値より大きくするとリミットサイクルの振幅はむしろ大きくなり、リミットサイクルの発生回転速度域が低回転速度側に広がる。 C_e が大きいほど周波数は低い。 C_e を標準値より小さくしていくと噴射量調節棒の変動が大きくなり、リミットサイクル発生回転速度域は高回転速度側に広がり、周波数は高くなる。すなわち減衰係数を変えてもリミットサイクルは消滅しない。

各シリンダの吸気行程に基づく短周期振動、トルク特性、噴射量制御の間欠性や調速機系の調節棒復原ばねこわさの影響などについては続報に述べる。

終わりに、本研究を進めるにあたり、いつもご指導と励ましをいただいている工学院大学・津田公一教授 (東大名誉教授) に深謝し、東大工学部・酒井宏教授と大竹祐輔助手には日頃のご援助を感謝する。また研究室をともにする関口晃教授にはいろいろ便宜をはかっていただき、62 年度卒研生・小島尉嘉君には計算・図表作成にご助力いただいた。厚くお礼申し上げます。なお本研究の一部は昭和 62 年度文部省科学研究費 (一般研究 C-61550195) の援助を受けてなされたものであることを付記する。

文 献

- (1) 川副, 機論, 51-461, B (昭 60), 404.
- (2) 川副, 機論, 51-462, B (昭 60), 721.
- (3) 川副, 機論, 51-466, B (昭 60), 1925.
- (4) 川副, 機論, 51-471, C (昭 60), 2789.
- (5) 川副, 機論, 51-468, C (昭 60), 2135.
- (6) 川副, 機論, 53-495, C (昭 62), 2249.
- (7) 川副, 機論, 54-506, C (昭 63), 2428.