621.182.26-52

ボイラの過渡特性について⁽¹⁾寺 野 寿 郎⁽²⁾

On the Transient Characteristics of Boilers

by Toshirō TERANO

The transient characteristics of boiler is very important for the steady operation of boiler and for the synthesis of A. C. C., In the previous paper⁽⁴⁾, the author analyzed A. C. C. problem and gave the optimum setting values of controller. In this paper, he researched by experiments the correlation of the boiler pressure for the steam demand, fuel supply and the quantity of feed water. As a result, the previous calculation exactly coincided with the experimental values. And it is a Known fact that the combustion time constant (T_f) of boiler was always constant and was about 30 second for oil burning and about 1 minute for coal burning, regardless of the steam demand and the magnitude of disturbance.

1. 緒 言

ボイラの静的な特性については各方面から多くの研究がなされているが、実際の運転状態で負荷や給水量や燃料供給量などの変動する場合の過渡的な特性を研究したものはほとんどない⁽³⁾。しかし過渡特性は運転の安定性を論ずる場合はぜひ必要で、高性能のボイラになるほどこれが重要な問題になってくる。特に自動燃焼制御装置を装備する場合は、この特性が十分はあくされていないと制御器の良好な作動はもちろん、設計・調節さえ満足にできない。筆者は前にボイラ自動燃焼制御の理論的解析⁽⁴⁾を行い、ボイラの特性と制御器の最良設定値との相互関係を明らかにしたが、ボイラの過渡特性については実験に待つ所が多いので今回小型ボイラで確かめた。

ボイラの過渡状態には多くの複雑な現象が含まれているが、これを二つの部分に大別して考えることができる。たとえば石炭だきボイラで空気比の多い状態で定常運転を行っている場合に空気比を突然適正值まで下げると、蒸発量は一旦急速に低下するが、それから徐々に増加してゆく。この現象の時定数は前者が数十秒ないし数分で後者は数十分ないし数時間であるから明瞭に区別できる。本文では過渡特性として前者のみを扱い、後者は準定常状態に属するものとする。

2. ボイラの過渡方程式

ボイラの運転に当っては各種の乱れに対して圧力を常に一定に維持するように燃料を加減するのが第一であるが、そのほかに空気比・炉内圧・燃焼状況などを適当に調整して燃焼効率を最高に維持しなければならない。しかし後者の影響は比較的小さいから、ここで

は主な乱れとして蒸気需要・燃料供給量・給水量の三つだけを考え、空気比や炉内圧は常に適正值に保持されているものとする。

今記号を次のように定める。

変数

E = 燃料供給量 kcal/mn

R = ボイラ本体への伝熱量 kcal/mn

Q = 蒸発量 kg/mn

P = ボイラ圧力 kg/cm²(abs.)

Z = 給水量 kg/mn

θ = ボイラ水温度 °C

I' = (ボイラ水エンタルピ) - (給水エンタルピ)
kcal/kg

I'' = (蒸気エンタルピ) - (給水エンタルピ)
kcal/kg

t = 時間 mn

S = ヘビサイド演算子 1/mn

ボイラの効率曲線を直線で近似すれば上記の変数間には線型関係が成立するから、基準の平衡状態におけるそれらの値には添字0を附し、また基準値からの偏差量は Δ を附して表わすことにすれば、すべての変数は後者を前者で除した無次元量で表わされる。これを小文字で示す。たとえば圧力なら次のように書く。

$$p = \Delta P / P_0$$

なお定数を次のように定める。

T_F = 燃焼の時定数 mn

T_B = ボイラの時定数 $\equiv (T_W + T_K)$ mn

W = ボイラ水保有量 kg

C = ボイラ本体熱容量 kcal/°C

$$\Delta I_0' / \Delta P_0 = \mu, \quad \Delta \theta_0 / \Delta P_0 = m, \quad I_0' / I_0'' = \gamma.$$

2.1 燃焼の過渡特性 炉内への燃料供給量 e が変っても燃焼遅れや炉内熱容量などのため、本体への

伝熱量 r が変わるまでには若干の時間遅れが存在する。この現象はきわめて複雑であるが、今仮に e が一定量だけ突然増減した時、 r は指数関数的にそれに追随するものと仮定すれば⁽³⁾次式が成立する。

$$T_F \frac{dr}{dt} + r = e \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに T_F は燃焼の遅れを表わす時定数で炉の型式・大きさ・燃料の種類・燃焼方式などによって定まるものと考えられる。

2・2 ボイラ本体の過渡特性 ボイラの保有熱量は大部分ボイラ水とボイラ本体とに含まれるから、今簡単にボイラ水とボイラ本体とは常に同一温度であると仮定すれば次式が成立する。

$$R - QI'' - (Z - Q)I' = W \frac{dI'}{dt} + C \frac{d\theta}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

なおすべての偏差は基準値に比べて小さいものと仮定し、前記の無次元量を用いて (2) を書替え、かつ高次の微小量と i'' とを無視すれば

$$r - q - \gamma(z - q) = \frac{P_0}{Q_0 I_0''} (\mu W + mC) \frac{dp}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

右辺の係数を T_B とおけば

$$T_B = \frac{P_0}{Q_0 I_0''} (\mu W + mC) \zeta \equiv T_W + T_K \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって (3) を書直すとボイラ本体の過渡特性を表わすものとして次式が得られる。ただし q と z に対しては T_B の代りに T_W を用う。

$$r - q - \gamma(z - q) = T_B \frac{dp}{dt} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. ボイラの総合過渡特性

(1) と (5) を演算子 S を用いて書き替えると

$$\begin{cases} r = \frac{1}{T_F S + 1} \cdot e \quad \dots\dots\dots (1)' \\ p = \frac{1}{T_W S} \cdot r - \frac{1 - \gamma}{T_W S} \cdot q - \frac{\gamma}{T_W S} \cdot z \quad \dots\dots\dots (5)' \end{cases}$$

これより r を消去すれば総合過渡特性式として (6) が得られる。

$$p = \frac{1}{T_B S (T_F S + 1)} \cdot e - \frac{1 - \gamma}{T_B S} \cdot q - \frac{\gamma}{T_B S} \cdot z \quad \dots\dots\dots (6)$$

これをブロック線図で示せば第1図のようになる。これから圧力 p 、燃料供給量 e 、蒸発量 q 、給水量 z の

第1図 ボイラのブロック線図

相互関係が直ちに得られる。たとえば蒸発量と給水量とを一定に保ち、燃料のみを急激に一定量 e_0 だけ変えた場合は (6) より

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{T_B S (T_F S + 1)} \cdot e_0 \\ &= \frac{e_0}{T_B} \left\{ t - T_F \left(1 - e^{-t/T_F} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

これは第2図に示すような経過をたどる。(7) 式の第1項はボイラの感度を表わし、 T_B が小さいほどこ

第2図 過渡特性 (その1)

れは大きくなり、圧力変動が大きくなる。また第2項は速応性を表わし、 T_F の値が大きいほど時間遅れが大きい。したがって、ボイラ運転の安定度は両者の比 T_B/T_F で表わされる。したがって丸ボイラのように T_B の大きいものに重油燃焼のように T_F の小さい燃焼方式を採用すれば非常に安定である。逆に石炭たきの水管ボイラでは安定度が低い。これは A. C. C. を装備した場合も同様に T_B/T_F が小さいとハンチングを起し易くなる。

次に燃料を一定にして、蒸発量または給水量を突然変化させると圧力変化は (6) より次式が得られる。

$$\text{蒸発量を変えた場合} \quad p = \frac{\gamma - 1}{T_W S} \cdot q \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{給水量を変えた場合} \quad p = \frac{-\gamma}{T_W S} \cdot z \quad \dots\dots\dots (9)$$

これは第3図のようになる。

また圧力と水準とを一定にして燃料供給量と蒸発量との関係を調べると、同様にして

$$q = \frac{1}{T_F S + 1} \cdot e \quad \dots\dots\dots (10)$$

これは第4図のようになる。

第3図 過渡特性 (その2)

第4図 過渡特性 (その3)

4. 過渡特性の実験例

以上の解析を確かめるため次のごとき要目のボイラについて試験を行った。

ボイラ型式	三胴式水管ボイラ
圧 力	16 kg/cm ² , 飽和
蒸 発 量	2 000 kg/h
燃 焼 方 式	重油バーナ, { 下込給炭機 スタインミュラー・ス トーカ
伝 熱 面 積	24 m ² (除空気予熱器)
燃焼室容積	2.7 m ³

(6)～(10)の過渡特性を実験する方法としては乱れを周期的に加え出力の振幅と位相を見る方法と、急激な一定量の乱れを与えて出力の時間的経過を調べる方法とがあるが、ここでは設備の関係で後者を採用した。

第5図は(8)式の実験例で、圧力は正しく時間に比例し、時間的な遅れ (dead time) はほとんどない。この直線の傾斜から T_W の値を知ることができる。なお点線は給水量を変えた場合の一例である。

第5図 蒸発量と圧力の関係 (T_W)

次に(10)式の方法で T_F を求めたが、この際圧力は厳密に一定に保持する必要がある。よって毎分 0.05 kg/cm² の圧力変動まで検出できる微分圧力計⁽⁵⁾を用いて試験を行った。第6図はその計測例であって、第4図とよく似た曲線となり dead time はほとんどない。したがって燃焼遅れを指数かん数で表わすことは正しいことがわかる。なお、同図には排ガスの温度と CO_2 をそれぞれ点線とで示してあるが、これによると蒸発量と CO_2 は比較的すみやかに次の定常値に落着

第6図 燃焼時定数 (T_F) の計測例 (重油だき)

くが、ガス温度はなかなか定常に達しない。これは炉壁熱容量などに基くものであろう。

第7図 給水と蒸発量との関係

第8図 T_B/T_F の計測例

また(6)式によれば圧力と燃料が一定の場合は給水量と蒸発量とは全く時間遅れなく同形に追従するはずである。第7図はこれを確かめるため、給水を急停止した場合の蒸発量の増加を計測したもので、その時定数は約12秒でほとんど遅れはないと言ってよい。

第8図は(7)式の方法で T_B と T_F/T_B の値とを実測した例である。点線は石炭だきの場合の一例である。いずれも第2図とよく一致している。

5. T_B , T_F および T_F/T_B の実測値

以上の方法によって実測した時定数の値を、次に示す。

まず第8図の方法によって燃料変化の影響から求めた T_B の値を第9図に示す。縦軸が実測値で横軸は

第9図 T_B の実験値 (燃料の影響)

(4)より計算で求めた T_B の値である。 T_B は蒸発量に逆比例するから、横軸は負荷状態をも表わしている。これより(4)の計算は負荷の大小にかかわらず実測とよく一致することがわかる。第10図、第11図は第6図の方法で蒸発量および給水量を乱れとして求

第10図 T_W の実験値 (蒸発量の影響)

めた T_W の値でいずれも計算値とよく一致している。

次に第7図の方法で求めた T_F を第12図および第13図に示す。前者は重油だきの場合で、燃料を増加した場合も減少した場合もほぼ同一の値をとり、負荷状態や乱れの大小にも余り影響されずだいたい1分前後で一定と見なされる。なお四角印は空気量は不変で送油量のみ増減した場合である。この時最終到達定常蒸

第11図 T_W の実験値 (給水の影響)

第12図 T_F の実験値 (重油だき)

発量は、もちろん空気比も適当調整した場合よりも低い。しかし T_F の値はあまり影響を受けないようである。三角印は第8図の実験から求めた T_F の値でこれは多少低くなっているが、これは第7図の実験では流量計自身と水準の追従に時間遅れがあるためと考えられ、真の T_F はほぼ0.5~1分の間にあると見てよい。

第13図 T_F の実験値 (石炭だき)

第13図は石炭だきの場合の T_F であるが、過渡現象はきわめて短いのでこの時は送炭量ではなく送風量の変化が e に相当する。その結果得られた T_F は1分前後であって予想よりはるかに小さい。したがって重油燃焼の場合に比べて特に運転が不安定になるとは思えない。ただし石炭の表面水分によってかなり T_F の値が左右され最高2分ぐらいのこともあった。

最後に第8図の方法で求めた T_B/T_F の値を第14図

第14図 T_B/T_F の実験値

に示す。前述のように T_F はほぼ一定で、 T_B は負荷に逆比例するから、高負荷になるほど T_B/T_F は小さくなり不安定になる。

なお同様の試験を3種の船用ボイラで行った結果を

第1表 船用ボイラ過渡試験成績

ボ イ ラ 要 目	型 式	三水管ボイラ	胴 丸ボイラ	乾 燃 室 丸ボイラ	乾 燃 室 丸ボイラ	
	燃 焼 方 法	石 炭 手 だ き	石 炭 手 だ き	石 炭 手 だ き	石 炭 手 だ き	
	圧力 kg/cm ³	16	16	16		
	蒸発量 kg/h	6 000	6 000	3 000		
	伝熱面積 m ²	187	240	97		
	本体重量 t	39.7	38	17.5		
	ボイラ水 保 有 量 t	8.4	24	11.1		
試 験 方 法		投炭・送風停止、水準一定保持、 圧力計測				
T_B 計算値 mn		43.1	53.5	31.6	29.0	22.7
T_B 実測値 mn		40	73	31	30	32
T_B/T_F 実測値		14.3	18.2	28.6	20	28.6
T_F 実測値 mn		2.6	0.54	1.11	1.5	0.8

次表に示す。これらはいずれも石炭手だきボイラなので、圧力・温度・蒸気流量などは同期的に変化する⁽⁶⁾。乱れを与える時間はほぼ投炭と投炭との中間をねらって行った。ただし No. 1 の試験では投炭直後に乱れを与えたためか T_F の値がだいぶ大きくなっている。

6. 結 言

以上の結果を総合すると次のようになる。

(i) ボイラの過渡特性は(6)式できわめてよく近似できる。

(ii) ボイラ本体の時定数は(4)式で計算して十分正確である。

(iii) 燃焼による時間遅れは一次の熱容量の存在と考えることができる。

(iv) その時定数は重油だきで0.5~1分、石炭だきで1分内外で、乱れの大小や負荷状態にかかわらず常にほぼ一定の値をとる。

(v) ボイラの安定度は T_B/T_F で表わせるから同一ボイラでは負荷が低い時ほど安定である。

(vi) 過渡状態における蒸発量は重油だきでは送油量、石炭だきでは送風量によって支配される。

(vii) 船用ボイラについて試験した結果も、上記の結論ときわめてよく適合している。

今回の実験では給水量の制御が不正確であったため測定値が多少散ったが、この点を改良すればもっと正確なデータが得られよう。なお今後機会があれば微粉炭ボイラや移床式給炭機で実験を行いたい。

注：—

- (1) 昭和28年4月5日 第30期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和28年4月30日。
- (2) 正眞、運輸技術研究所。
- (3) Oetker, Schroeder: Regelbarkeit des Druckes von Dampferzeugern, BWK, Nov. (1951).
- (4) 寺野：ボイラの自動燃焼制御、運研報告、2巻10号(1952)。
- (5) 寺野、伊藤：試作微分圧力計、運研報告、3巻2号(1953)。
- (6) 瀬尾：石炭ボイラの性能について、運研報告、3巻2号(1953)。