

# 小容量ボイラーの連続制御 (P.I 制御) による性能改善

川重冷熱工業(株)ボイラ技術部

柳 田 高 秀

Improvement of Efficiency by Proportional & Integral Control for Compact Boiler

by Takahide Yanagida

## 1. はじめに

産業用ボイラーとして広く使われている小容量ボイラーでは、燃焼量制御は三位置制御や四位置制御といった段階制御で、給水制御も電極棒による ON-OFF 制御が大半である。これらの制御では、蒸気負荷に対し燃焼量が 100%、50%、0% 等と段階的に変わるので、蒸気圧力の変動は避けられず蒸気の質の低下、さらにはバージによるボイラー効率の低下が生じていた。

また、大容量ボイラー並の比例制御を小容量ボイラーに採用するには、給水の ON-OFF による蒸気圧力への外乱が大きいなど制御の安定性の問題があった。

今回、連続制御 (P.I 制御) により小容量ボイラーの高性能化を達成したので以下に紹介する。

## 2. 制御の概要

### 2.1 新規提案

- (1) 負荷に比例して燃焼量を制御する比例制御に、蒸気圧力を一定に維持するための積分機能を付加し、大型水管ボイラー並みの制御方式で蒸気圧力の安定を図る。
- (2) 給水の蒸気圧力への影響を最小限に抑えるために、給水量補正制御を行い安定した蒸気圧力を実現する。
- (3) 燃焼弁の固有特性による制御への影響をプログラム上の処理で緩和する。
- (4) 上述と押込送風機の電動機を負荷に合わせて回転数制御を行い、消費電力の低減を図る。

### 2.2 制御の構成機器

- (1) 蒸気圧力制御

装置概要及び P.I 制御フローを図 1 と図 2 に示す。蒸気圧力を制御するために、蒸気圧力の検出と、燃料量及び空気量の操作を連続的に行う。

蒸気圧力設定値と蒸気圧力の差を PI 演算し、操作量 (燃料弁開度と空気流量指令すなわちインバータ回転数指令値) を出力する。

また、蒸気圧力はセンサーで検出しフィードバックして連続制御している。

#### (2) 水位制御

水位を制御するために、水位の検出と給水流量の操作を行う。

給水量制御は ON-OFF 制御を採用し、給水による蒸気圧力への影響は、燃焼量の補正制御を図っている。図 3 に給水補正概要を示す。

給水ポンプ ON 中に燃焼量を増加することで、蒸気圧力低下を抑えるように処理している。

また、給水制御を比例制御する方法も考えられるが、低コスト化を達成するため ON-OFF 制御を採用している。

#### (3) 空気量制御

空気量制御はインバータによる回転数制御を採用し、省エネルギー化及び低騒音化を図る。

また、燃料量に対応した空気量指令値を出すことにより、常に適切な空燃比を達成し、安定した燃焼を確保する。

### 2.3 マッチングのポイント

#### (1) 空燃比調整

燃焼量の変化に対し、各負荷ごとに燃焼弁開度設定及び空燃比を初期設定する。燃焼量 (弁開度) に対する空気量 (インバータ回転数) を変化させて常に最適な空燃比調整が可能である。

#### (2) 最小負荷

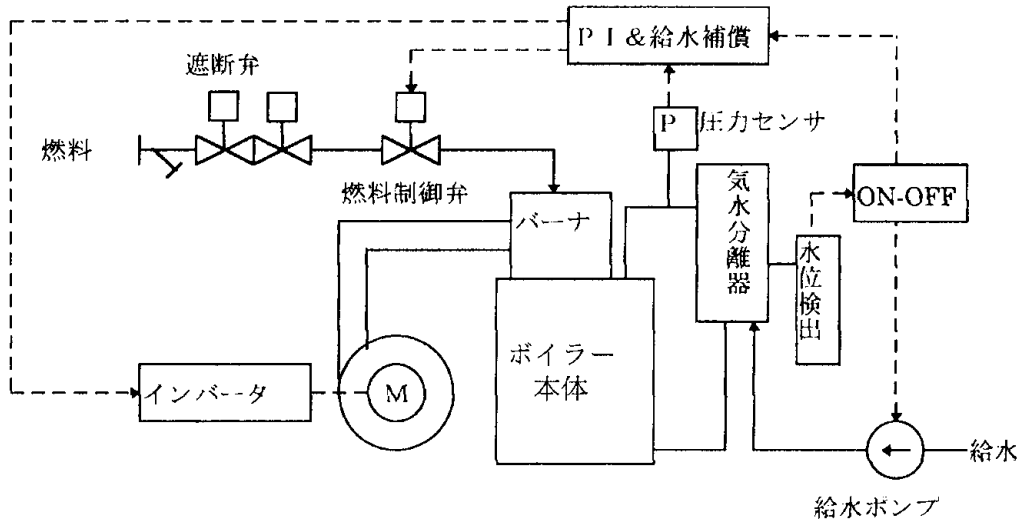


図 1 装置概要

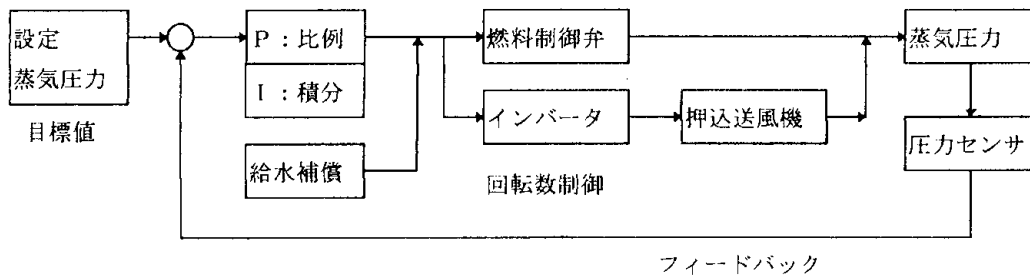


図 2 PI制御フロー

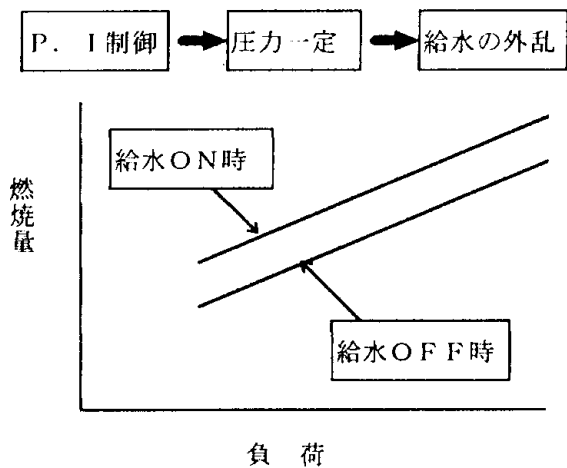


図 3 給水補正制御

負荷急変時の追従に対し、燃焼弁動作速度と送風機インバータ追従速度の関係を確認し、適正空燃比を保持するために各変化率を設定する。さらに、追従性を向上させるためP.I制御に必要なパラメータを最適値に設定する。

### 3. 試験結果

#### 3.1 テスト用ボイラー仕様

ボイラー型式：川重冷熱工業(株)製 (図 4)

小型貫流ボイラー KF-2000 GE

換算蒸発量 : 2000 kg/h

最高使用圧力 : 0.98 MPa (10 kg/cm<sup>2</sup>)

燃 焼 : 都市ガス 13 A

#### 3.2 蒸気圧力の安定

三位置制御とP.I制御の蒸気圧力変動状況を、図 5～図 7 に示す。

三位置制御ではプレバース中の蒸気圧力降下及び給水の外乱の影響で蒸気圧力が変動する。変動幅は、±0.147 MPa (1.5 kg/cm<sup>2</sup>) (燃焼負荷 30～50

最小負荷の要因として、バーナの燃焼範囲を確認し、良好な燃焼を確保する。

また、ボイラーの安全を確認する。

#### (3) 制御の追従性

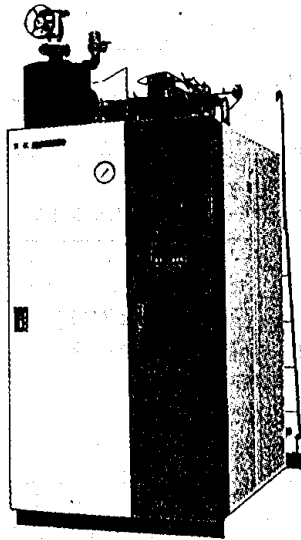


図 4 テストボイラー

%) 及び  $\pm 0.049 \text{ MPa}$  ( $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) (燃焼負荷 50~100%) に対し, P.I 制御では, 負荷全域にわたって蒸気圧力の変動幅が  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ) に制御され, 蒸気圧力の安定が格段に向上した。

### 3.3 負荷変化時の追従性

負荷変化時の蒸気圧力の変動状況を, 図 8 に示す。負荷 20% ステップ変動の場合でも, 蒸気圧力に対し  $\pm 0.02 \text{ MPa}$  ( $0.2 \text{ kg/cm}^2$ ) の範囲に収まり, その後すぐ  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ) 以内に安定し良好な負荷追従性を示した。連続制御とそれに伴う蒸気圧力の安定は, 蒸気乾き度の安定効果にも寄与し, 常に乾き度 99% 以上の良質な蒸気が供給されている。

### 3.4 給水補償の効果

給水補償の効果を示す。給水補償制御をすることで, 給水外乱による蒸気圧力変動幅は,  $\pm 0.049 \text{ MPa}$  ( $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) から  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ) 以内に改善し, 全体として蒸気圧力を  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ) 以内に安定させることが実現できた。

### 3.5 ボイラー効率の向上

三位置制御では蒸気圧力に対し, 燃焼量を 100%, 50%, 0% 等に段階的に変化させるため, パージによる熱損失により, 実質のボイラー効率は低負荷域では約 3% 低下していたが, 連続制御方式では発停回数が低減し平均ボイラー効率が向上した。

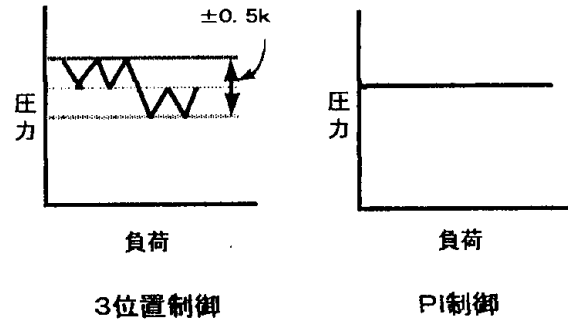


図 5 3位置制御とPI制御

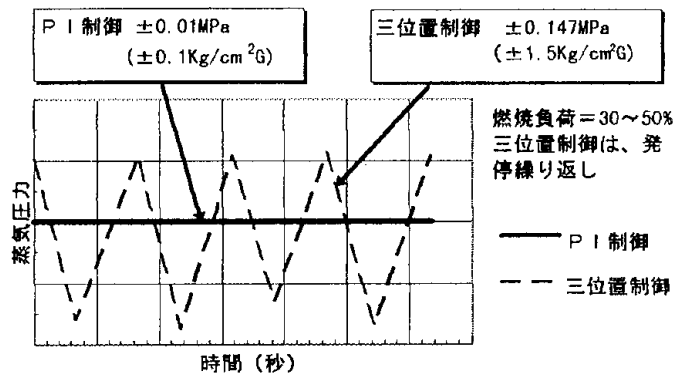


図 6 蒸気圧力変動幅 (低負荷時)

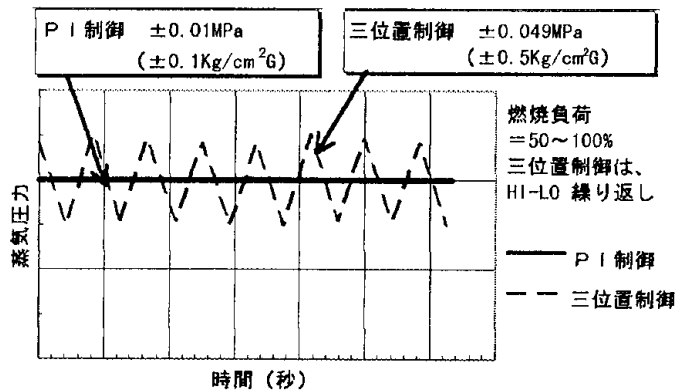


図 7 蒸気圧力変動幅 (高負荷時)

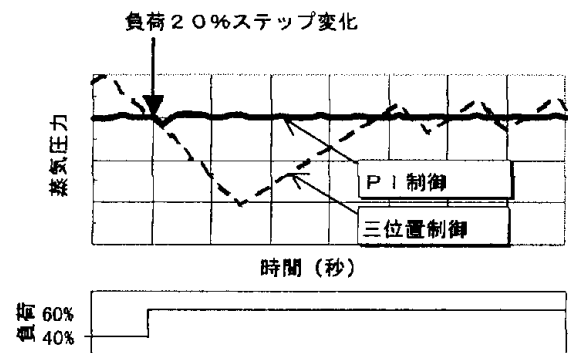


図 8 負荷ステップ変化時の追従性

負荷とボイラー効率の関係を、図 10 に示す。

### 3.6 消費電力の低減・低騒音化

ボイラー負荷と押込送風機動力の関係を、図 11 に示す。インバータ制御の採用で、低燃焼域で押込送風機の動力は約 80% (当社比) 低減している。また、インバータの採用による低騒音効果を図 12 に示す。低燃焼域で騒音値が 7 dB (当社比) 低減している。実際運転では、ボイラー容量は最大負荷を満足するためにやや大きめのボイラ容量を選定する場合が多く低燃焼域での運転が多く、消費電力の低減・低騒音効果が大きいといえる。

### 3.7 低 NOx 標準

低 NOx のガスバーナを標準採用し、全負荷において NOx 60 ppm (O<sub>2</sub>=0% 換算) 以下を確認した。燃焼特性を、図 13 に示す。

### 3.8 蒸気圧力の追従試験 (測定チャート)

蒸気圧力追従試験の測定チャートを紹介する。P.I 制御の追従性を図 14 に示す。

燃焼及び空気量を連続的に制御し、蒸気圧力変動幅は、±0.01 MPa (0.1 kg/cm<sup>2</sup>) に安定している。また給水による影響を緩和している。

P.I 制御をしない場合、給水の影響で蒸気圧力変動幅は±0.049 MPa (0.5 kg/cm<sup>2</sup>) 程度となる (図 15)。ステップ応答試験では、負荷 20% ステップ変動時、±0.02 MPa (0.2 kg/cm<sup>2</sup>) の範囲に収まりすぐに安定する。負荷 50% ステップ変動でも約 30 秒で回復し、その後安定した追従を示した (図 16)。

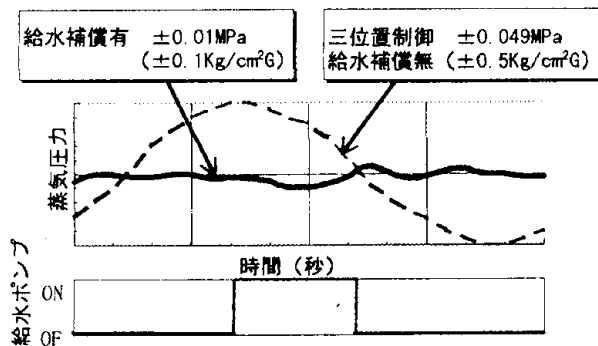


図 9 給水補償の効果

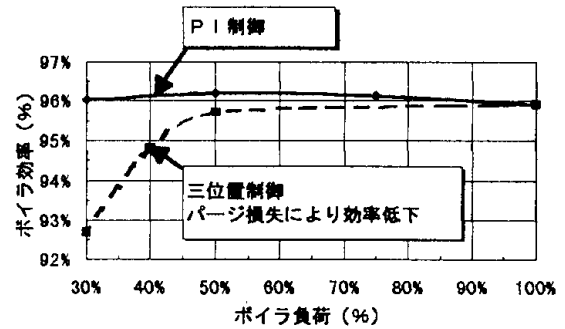


図 10 負荷とボイラー効率の関係

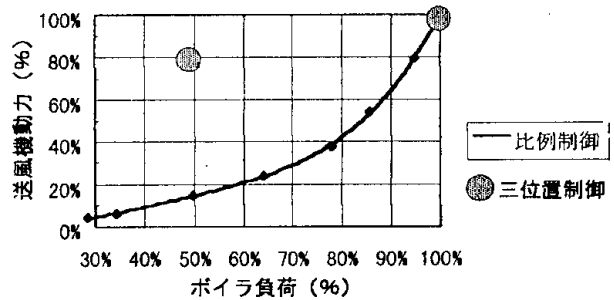


図 11 負荷と送風機動力の関係

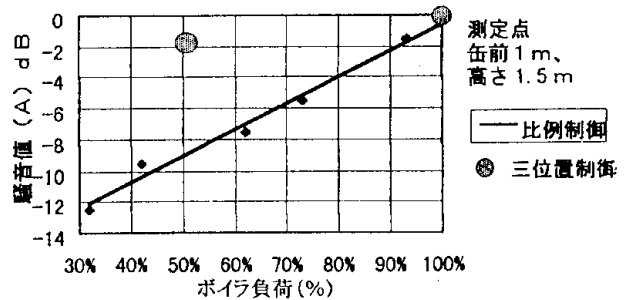


図 12 負荷と低騒音効果の関係

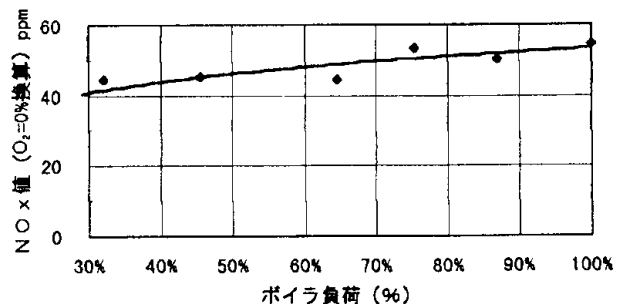


図 13 負荷と NOx 特性

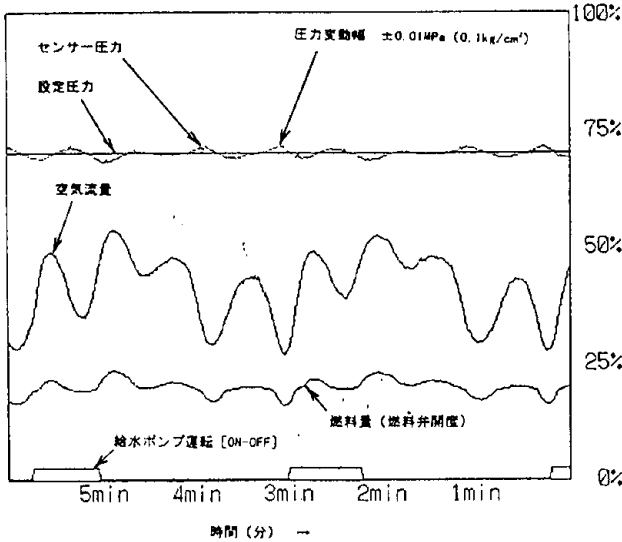


図 14 PI制御

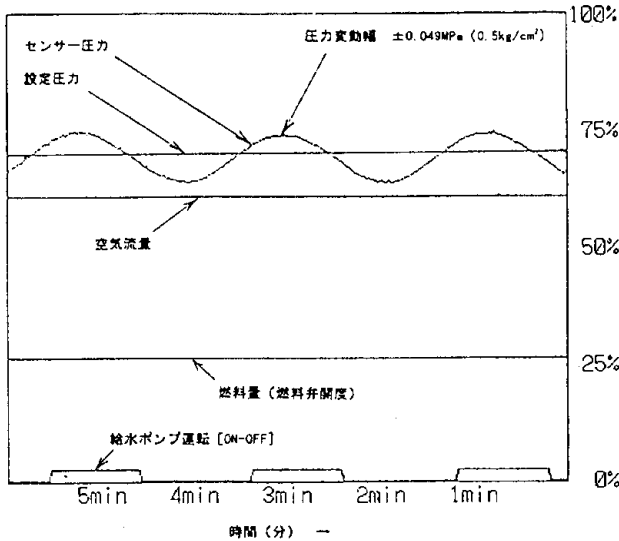


図 15 給水の影響

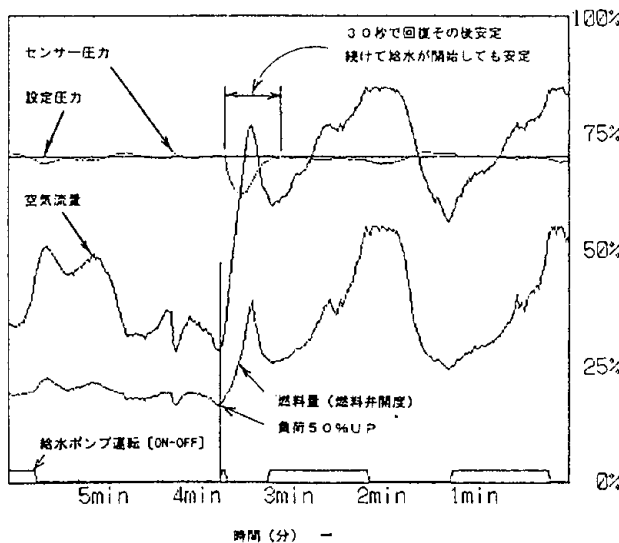


図 16 ステップ応答

#### 4. まとめ

##### 4.1 連続制御 (P.I制御) 採用による利点

- (1) 蒸気の質の向上
  - ①蒸気圧力安定化の達成  
蒸気圧力変動幅:  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ )
  - ②蒸気圧力の追従性向上  
負荷 20%ステップ変化時,  
蒸気圧力変動幅:  $\pm 0.02 \text{ MPa}$  ( $0.2 \text{ kg/cm}^2$ ),  
その後すぐに  $\pm 0.01 \text{ MPa}$  ( $0.1 \text{ kg/cm}^2$ ) 以内に安定
  - ③蒸気圧力安定効果により蒸気乾き度 (99%) を常に確保
- (2) 省エネルギー性の向上
  - ①実質ボイラー効率の向上  
(負荷=30%でボイラー効率=96%確保)  
比例制御の採用により 30%以上の負荷では,  
パージ損失なし
  - ②押込送風機のインバータ制御により, 低燃焼負荷での低騒音化 (-7 dB) 及びモータ動力の低減 80% (当社比) により消費電力の低減
- (3) 環境特性の向上  
低 NOx ガスバーナの採用により全負荷において, NOx ( $\text{O}_2 = 0\%$ 換算) 60 ppm 以下を達成

#### 5. おわりに

業界初の連続制御 (P.I制御) 方式の小型貫流ボイラーを開発し, 既に納入実績もできた。この連続制御 (P.I制御) 方式の貫流ボイラーは, 従来の三位置制御のような低コストのための簡易な制御方式と比較し, 蒸気の質の向上という課題を克服した本格的な高性能貫流ボイラーであると確信している。