ボイラ燃焼の音波計測とそのイメージ処理技術に関する基礎研究*

伊藤 文夫*¹坂井 正康*²FUNDAMENTAL STUDIES OF ACOUSTIC MEASUREMENT
AND RECONSTRUCTING COMBUSTION TEMPERATURE IN LARGE BOILERS

Fumio ITO and Masayasu SAKAI

Acoustic transmission measurement techniques for large boiler furnaces were studied and developed. It was found in fundamental acoustic transmission tests that 10-12 kHz acoustic waves were suitable for measuring combustion gas distribution in boiler furnaces. A few kinds of computer programs for CT (Computed Tomography) were written and discussed. The program based on the method of least squares was most convenient in cases where few data were available. Then, we performed the measurement of combustion gas temperature distributions in a test furnace. The data were reduced using the above CT program. The temperature distribution calculated by the CT program is very similar to and favorably agrees with the results measured by a suction pyrometer. The maximum temperature difference between the two methods is 5 percent in the 700 ~ 1000 °C temperature range.

Key Words: Acoustic Transmission Measurement, Reconstructing Combustion Gas Temperature, Gas Temperature Distribution in Furnace, Combustion Test, Computed Tomography, Acoustic Instrument for Gas Temperature

1. ま え が き

最近、工業炉を対象とした燃焼では安全性、低公害、高効率を同時に満足させる限界に近い運転を強いられることが多い。しかし、燃焼の研究といえば実験室規模のものがほとんどで実機大の研究は数が少なく、燃焼を取り扱う設計者、運転者はこれらの情報の入手を望んでいる。

一方、電子計算機の大容量化、高速化が進み、大形燃焼の研究も従来の定性的な取り扱いから、定量化へと脱皮しつつある現状にあるが⁽¹⁾、これらの研究もやはりデータ不足に悩まされている。

このようなことから、筆者らは燃焼炉としては最大級の事業用のボイラを対象にして、温度分布計測法の試験を行った。

本研究では対象を大形ボイラまで適用できることを前提としていることから、広域空間の情報が必要とな

るため、情報処理をCT(コンピュータ・トモグラフ)プログラムによる電子計算機処理を条件とした。

センサとしてレーザと音波を候補として考えたが、予備試験の結果、前者は火炎帯の通過有効距離が2 m程度であることがわかり、後者を取り上げることにした。

音波のセンサを利用する場合、基礎試験から、ガス温度が高く音波の周波数が高い領域において、CO₂による減衰が起ることが明らかになったが、適的な周波数の音波を選ぶことによって大形のボイラでも利用できる見通しを得た。次に、試験炉において試作音波センサによる温度分布計測試験を行いデータを収集した。

これと並行して、本研究のように情報量が制約される場合のCT用プログラムについても検討し、このような場合、最小二乗法が適していることを確かめた。

本プログラムを用いて、先の試験炉データを処理したところ、実測値とほぼ一致する温度分布が得られた。

実用化の為にはセンサを耐熱性にし、小形化する等、改良研究が必要であるが、本研究によって大形ボイラでの音波による温度分布計測が可能である見通しが得られたので、これらの知見を報告する。

* 昭和62年3月7日 北海道支部第28期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年9月1日。

*¹ 正員、東京電力(株)技術研究所 (〒182 調布市西つつじヶ丘2-4-1)。

*² 正員、三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5-717-1)。

2. 音波センサの特性試験

2・1 音波減衰特性試験 燃焼ガスによる音波の減衰が予想されたので⁽²⁾，燃焼生成ガスであるCO₂とH₂Oガスを空気に混入し，ガス温度と音波の周波数を変化させて音波の減衰特性を調べた。試験装置の略図を図1に示す。長さ300 mmの電気炉に直径40 mmの磁製の炉芯管を通し，一端に音波発信装置，反対側一端に受信装置を取り付け，炉芯内を所定の混合ガスが満すようになっている。この装置の試験によって図2と図3の結果を得た。

図2は空気にCO₂ガスを20%混入した媒体内を音

図1 音波減衰基礎試験装置

図2 CO₂による音波減衰の周波数特性

図3 音波減衰のCO₂濃度特性

波が伝播するときに生じる減衰をCO₂ガス注入前の音圧との比，すなわち次式によって求めた値によって整理したものである。

$$\text{減衰率 (dB)} = 20 \log \left\{ \frac{\text{CO}_2 \text{ガス注入時の受信音圧 (V)}}{\text{CO}_2 \text{ガス注入前の受信音圧 (V)}} \right\}$$

..... (1)

この減衰率は周波数が大きくなると大きくなる特性を示し，とくに600℃のガス温度で20 kHz以上の超音波域において著しい減衰が起ることを示している。

図3はガス温度を常温20℃として，減衰率が大きい40 kHz音波におけるCO₂ガス濃度による減衰率変化を示したものである。

幾らかのばらつきは見られるが，CO₂濃度にはほぼ比例して音波の減衰が起ることを示している。

これらの実験のほかH₂O蒸気混入による音波の減衰特性を調べたが，全く影響は見られず，またCO₂ガスとの相互作用もないことを確かめた。

また，空気での本試験装置による音波減衰の温度特性試験を行って図4の結果を得ている。

気体による音波吸収についてはこれまでに多くの実験研究があるが，CO₂ガスによる吸収についての報告⁽²⁾によると，CO₂ガスの場合，粘性及び熱伝導によるものより分子吸収によるものが大きいことが報告されている。

燃焼炉内の音波計測を考える場合，燃焼によって発生するCO₂ガスを考慮して，適性波長を選択する必要があることが明らかとなった。

2・2 炉内における音波伝播特性試験 燃焼ガスに対する音波の減衰特性と音波伝播時間の温度特性を調査するため，周波数帯域5~40 kHzの音波について，燃焼炉内における音波伝播試験を行った。

試験に用いた燃焼炉は図5に示す直径2.2 m，長さ10 mの横置円筒炉で，一方の端面に重油だきバーナと点火用のLPGだきパイロットーチが取り付けられている。この試験炉の出口1 m前の断面位置に対向させて音波送信センサと受信センサを取り付けた。送信センサにスピーカ（ホーンツイータ），受信部にコンデン

図4 音波減衰の空気温度特性

サを使用し、いずれも図6に示すように空冷構造として耐熱性をもたした。

センサの周波数は先の音波減衰試験と同様に5~40 kHzとした。さらに、センサは後の試験のためにスキャン用レバーが付いており伝播方向が $\pm 30^\circ$ 変えられるようになっている。

測定系は図7に示すブロック線図系のものをつくり、ゲート信号によって音波を発信させ、受信までの伝播

図5 横置試験炉

図6 音波センサ

図7 測定系ブロック線図

図8 タイミングチャート

時間をオシロスコープに記録させる方法をとった。このタイミングチャートの説明図を図8に示す。

試験はイグナイタによる60 kg/h LPG燃焼と重油200, 300, 400 kg/h燃焼時及び燃焼前の常温空気条件で音波計測を行った。

図9は音波周波数を変えたときの音波減衰率変化を示し、減衰率は次式によって評価した。

$$\text{減衰率 (dB)} = 20 \log \left\{ \frac{\text{燃焼時の受信音圧 (V)}}{\text{燃焼前の受信音圧 (V)}} \right\}$$

..... (2)

この結果より、40 kHzの超音波域では音圧を受信出来ないほど減衰が著しく、先のCO₂による音波減衰試験と同様であることが確認された。

次に、音波減衰の少ない10 kHzの周波数を選び、燃焼量を変化させて燃焼ガス温度が変わったときの音波伝播時間を計測した。燃焼量の増加とともに音波伝播時間が短くなって行く図10の結果が得られた。

この伝播時間と経路上のガス温度（均一温度分布と仮定して）との関係は次式で与えられる。

$$\sqrt{T} = \frac{1}{20.05} \times \frac{\ell}{(\tau_1 + \tau_2)} \quad \text{..... (3)}$$

ここで、T：ガス温度（°K）

ℓ：経路長さ（2.57 m, 炉直径より長い）

$\tau_1 + \tau_2$ ：伝播時間（sec）

このようにして求めたガス温度と燃焼炉の入出熱から求めたガス温度とを比較してみると図11のようになった。

精度については今後の検討が必要と思われるが、燃焼量による温度上昇の傾向は良い一致を見せており、

図9 音波減衰変化率

図10 伝播時間の温度特性

CT 解析用の入力として十分有効であることが確認された。

3. 音波 CT 用プログラムの作成

CT (コンピュータ・トモグラフィ) 法によるデータ処理用プログラムとして、総和法、コンボリューション法、最小二乗法の三種を作成し、情報量 (入力) と再生像の精度について検討した。詳細は別の機会に報告することとし、ここではその概要を説明する。

総和法とコンボリューション法は相当量の情報量が必要で、火炉一断面に対し、 30×30 分割数、情報量では 100 程度以上の投影データがなければ期待される温度分布が得られない。

そこで、ボイラのような大形火炉を対象に考えると、實際上この情報量は困難と思われるので、今回の CT プログラムは最小二乗法に主眼をおいた。

一般に CT における投影データは線型一次方程式で表わされ、対象とする断面全体を表わす方程式は次のような多元連立方程式となる。

$$\begin{cases} AY = Hb \\ A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \\ Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \\ Hb = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで Y は断面を分割した小区分を代表する物理量で、音速の逆数をとる。 Hb は計測値で伝播時間をとる。 m は計測したデータ個数で変数 Y の n 個より大きい。

すなわち

$$m \geq n \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる必要がある。 A は m 行 n 列の係数行列である。

本研究では断面の分割法として有限要素法の考え方を取り入れ、断面を微小三角形で分割し、各三角における頂点での値を Y とした。

頂点以外の任意の点を、その点の周りの y_i で直接近似すれば断面内の任意の点は $y_1 \cdots y_n$ の一次合で表

図 11 燃焼量による計測温度の変化

わされ、三角形による断面分割が決まれば行列 A は一意的に決まることになる。

(4) 式の解法としては、逐次近似法が考えられるが、数学的には収束の保証がなく、とくに本研究のような計測値に、場のゆらぎによる変動成分が含まれる場合、収束しない可能性がある。そこで筆者らは $\|AY - Hb\|$ が最小となるように解 Y を求める最小二乗法によるプログラムを作成した。

プログラムの詳細説明は省略するが、 6×8 分割での再生画像の精度を図 12 に示す。図 12 再生誤差は 1000°C の中心部で $+1.4\%$ 、周辺 700°C の領域で $+0.3 \sim 3.8\%$ となった。

4. 立形燃焼炉における温度分布計測試験

CT 法による温度分布解析法について、計測法とデータ処理プログラムの前準備を終えたので、図 13 に示すタンセンシャルファイアリング方式の燃焼試験炉を用いて温度分布の計測試験を行った。

燃焼試験炉は高さ 7m 、巾 2.1m 、奥行 2.5m の長方形立形炉で下部の 4 コーナに各 3 段のバーナが取り付けられた重油だきで、炉内ファイアボールを形成して燃焼し、燃焼排ガスは上部より水平煙道を通して外部へ排出される。

センサは先に示した図 6 と同じものを用意し、音波の周波数は先の試験結果に基づいて、減衰が少なく伝

図 12 CT 用最小二乗法によるプログラム再生

図 13 立形試験炉

図14 音波伝播経路

図15 CT用計測ブロック線図

表1 燃焼試験条件

Test No.	Propane gas flow (kg/h)	Ex.O ₂ (%)	Air flow (kg/h)
T-1	250	4.9~5.1	5335
T-2	500	2.6~2.7	9490

播時間の測定精度が高い12 kHzを選定した。

センサは送信用2ヶ、受信用3ヶを計測孔間を移動させながら使用した。

計測断面は火炉の上部で伝播経路は図14に示す29通りである。計測系をブロック線で示したものが図15である。基本的に図7のものと変わるところはない。

燃焼試験条件は表1の通りで、燃焼量を変えて2条件で試験を行った。

また、音波CT法で求めた温度分布と比較するため、サクシオンパイロメータで代表点6点を燃焼試験中に計測した。

低負荷燃焼時の計測結果を図16、高負荷時の結果を図17に示す。図中にCT法により再生して求めた温度を示し、()内にサクシオンパイロメータによる計測温度を示した。

これらの結果からみて、負荷、位置をおしならべて、すべてが略±5%以内の精度で計測できており、本計測法の第一段階としての目標は達せられた。

図18 コーナ炉CT再生結果, Test No. T-2の場合

図16 CT再生値と計測値の比較 Test No. T-1の場合 図17 CT再生値と計測値の比較 Test No. T-2の場合

なお、参考に図17のCT法再生画像を3次元的に表示したものを図18に示した。

5. ま と め

- (1) ガス中のCO₂濃度に比例的に音波の減衰が起る。
- (2) H₂O蒸気による空気及びCO₂ガスの音波減衰への影響は無視できる。
- (3) 周波数の高い音波ほど減衰率は大きく、媒体ガスの温度が高いほど大きい。
- (4) 炉内温度計測には精度と減衰から12 kHz域の音波が適している。
- (5) 情報量が少ない炉内温度計測CT用プログラムとしては最小二乗法が適している。
- (6) 音波センサとCT用プログラムを利用して試験炉における燃焼ガス温度分布計測試験を行ったところ、サクシオンパイロメータ計測値との差が±5%に納まる妥当な結果が得られた。
- (7) センサの実用性について、未だ改善せねばならない点、とくに高温火災域で使用できるような構造の工夫が必要であるが、本手法が炉内ガス温度分布計測手法として有効であることが確認された。

参 考 文 献

- (1) 例えば、坂井・他5名、三菱重工技報、28-5 (昭57), 1
- (2) F.D. Shields, J. Acous. Soc. Amer, 31 (1959), 248