

(46) 高炉における脈動の伝達について  
(高炉における脈動送風の研究—II)

日本鋼管, 技術研究所

下間 照男・○佐野 和夫

The Transfer of Pulse through Blast Furnace Stack

(Studies on blast furnace operation with pulsated blast—II)

Teruo SHIMOTSUMA and Kazuo SANO

1. 緒 言

高炉の操業度向上を目的として、炉内ガス圧に周期的変動を与える脈動送風を実際に高炉に適用する場合、根本的問題の一つとして脈動圧力の炉内における伝達状態がある。そこでこれらの問題を解明するために、高炉モデルとして充填層を用いてモデル実験を行ない、脈圧を与えてその伝達状況を把握、解析すると同時に、高炉への適用として第3次鶴見第2高炉(内容積 516 m<sup>3</sup>, 羽口数 10 本)の吹し卸し前を利用して、低周波領域の送風脈動および衝風添加物脈動を、さらに第2次川崎第2高炉(内容積 1137 m<sup>3</sup>, 羽口数 16 本)の休風時を利用して、高周波領域の爆破圧脈動を実施した。これらの試験操業を解析した結果、低周波脈動はかなり伝達性がよいのに対し、高周波脈動は比較的炉内における減衰が大きいという結論を得るに至つたので、その概要を以下に報告する。

2. 充填層における脈圧伝達実験

高炉モデル充填層に 5~30 mm φ のガラス球を充填し、高炉ボッシュ部とほぼ等しいレイノルズ数になるように送風して、それに送風入口の回転板により脈動を与え、二口レベルと充填塔各段との間の脈圧の減衰率と位相変化を測定した。脈動周波数は 5~100 cps の間で 10 水準で変化させて、脈圧の測定はストレンゲージ型プレッシャーヘッドで検出し、ストレンメータを通して電磁オシログラフまたはシンクロスコープにより測定した。Fig. 1 に脈圧の減衰状態を表わした脈動の角速度とゲインおよび位相の関係を表わすボード線図を示す。この結果から、モデルの伝達関数を求めるとともに、それを充填層の通気系の等価回路より求めた伝達関数と比較して修正する。次に実際の高炉の通気系の等価回路より求めた伝達関数をこの方法によつて修正し、それをを用いて羽口の脈動の還元帯における減衰状態を推定するため、鶴見第2高炉を対象にその還元帯の代表点として、羽口レベルから、4.5m, 7.2m, 11.1m の高さを取り、羽口レベルとこれらの位置における脈圧の減衰率を推測すると Fig. 2 のようになる。ここで伝達関数について若干考察を加えると、充填層の場合、基本的には減衰振動型の2次系伝達要素と等価と考えられるので<sup>1)</sup>、それを高炉に適用するためには、さらにむだ時間系を考慮して修正する必要がある。したがつていくつかの伝

達要素が結合した系となり、全体の伝達特性は次のような形で表わされる。

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-SL}}{S \prod_{k=1}^n (T_k S + 1) \cdot \prod_{k=1}^m (S^2 + 2\zeta_n k_1 \omega_{nk} S + k_2 \omega_{nk}^2)}$$

ゲイン特性

$$\begin{aligned} |G(j\omega)| = & 20K \log_{10} \omega_n \\ & + 20 \log_{10} |(\cos \omega L - j \sin \omega L)| - 20 \log_{10} \omega \\ & - 10 \sum_{k=1}^n \log_{10} (\omega T_k)^2 \\ & - 10 \sum_{k=1}^m \log_{10} \{(\omega_{nk}^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_n \omega_{nk} \omega)^2\} \end{aligned}$$

位相差

$$\begin{aligned} \angle G(j\omega) = & - \left( 90 + \frac{180\omega L}{\pi} \right) \\ & - \sum_{k=1}^n \tan^{-1}(\omega T_k) - \sum_{k=1}^m \tan^{-1} \frac{2\zeta_n k_1 \omega_{nk} \omega}{\omega_{nk}^2 - \omega^2} \end{aligned}$$

ここに

$T_k$ : 減衰時定数 (sec)

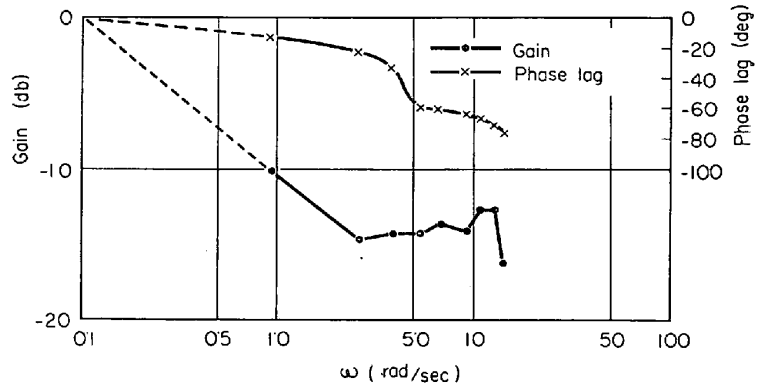


Fig. 1. Pulse frequency vs. gain and phase on packed beds. (Bode diagram)

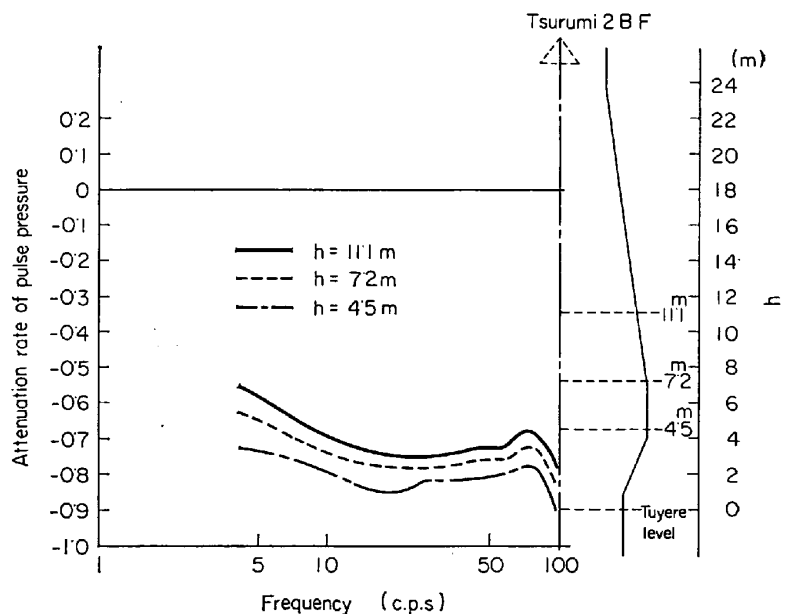


Fig. 2. Attenuation of pulsating gas on reduction zone by model.

$\omega$ : 伝達周波数 (c/sec)

$\omega_n$ : 振動性要素漸近線の折点周波数 (c/sec)

$\omega_{nk}$ : 無定位性, 振動性, 単容量要素, 微分要素などを含む結合型要素漸近線の第  $k$  次折点周波数 (c/sec)

$L$ : むだ時間 (sec)

$k_1, k_2, k'$ : 定数

$\zeta_n$ : 伝達要素の過渡応答におけるパラメータ, その他の記号は自動制御理論に準ずる

すなわち, ゲイン曲線は全周波数についてかなり複雑になり, 位相差は  $\omega$  にしたがって増加していくと考えられる。したがって, 実験結果に表われているごとく脈動周波数が 100 cps を越えると, その減衰は相当大きくなるといえる。

### 3. 高炉操業における脈圧伝達試験

#### 3.1 低周波脈動の伝達

充填層における模型実験の結果, 高炉々内における脈圧の伝達性を確保出来るという結論が得られたため, 第 I 報<sup>2)</sup>に述べた方法により, 鶴見第 2 高炉の送風に振巾約  $\pm 0.09 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$  で周波数 0.5~16 cpm の正弦波を 6 段階に変化させて, シャフト各段における脈圧の伝達状態を測定し解析した。測定位置は冷風本管 (P-1), 環状管入口 (P-2), シャフト下段 (P-3, 羽口レベルから 9m), シャフト中段 (P-4, 羽口レベルから 14.2m), および炉頂 (P-5, 羽口レベルから 22m) の 5 カ所とした。Table 1 にそれらの各個所における減衰状態を示す。

ここにおける脈圧振巾の数値は, 各測定位置における通常平均ガス圧に対する % をもって表わしてある。炉頂における脈動は 0.5~4 cpm の範囲では, 伝達性を明りように確認することが出来た。鶴見第 2 高炉の脈動送風をおこなわない場合の通常状態における前記各位置の平均圧力は (P-1) が 1.0, (P-2) が 0.93, (P-3) が

Table 1. Attenuation of pulse pressure (1).

Pulse frequency (cpm)	Pulse frequency (%)			
	P-1	P-2	P-3	P-4
0.5	$\pm 6.5$	$\pm 6.4$	$\pm 6.2$	$\pm 6.0$
1	$\pm 5.9$	$\pm 5.3$	$\pm 5.0$	$\pm 4.6$
2	$\pm 3.7$	$\pm 2.8$	$\pm 2.6$	$\pm 2.3$
4	$\pm 2.0$	$\pm 1.2$	$\pm 0.9$	$\pm 0.5$
8	$\pm 1.1$	$\pm 0.8$	$\pm 0.3$	$\pm 0.2$
16	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$

Table 2. Phase lag of pulse pressure (1).

Pulse frequency (cpm)	Phase lag (deg)			
	(P-1)~(P-2)	(P-2)~(P-3)	(P-2)~(P-4)	(P-3)~(P-4)
0.0	4.8	1.8	3.4	1.6
1	10.8	4.5	10.8	6.3
2	20.6	9.5	17.0	7.5
4	29.3	20.2	36.0	15.8
8	67.2	24.1	45.8	21.7
16	82.0	41.3	85.3	44.0

0.24, (P-4) が 0.09, (P-5) が 0.04, それぞれ  $\text{kg/cm}^2 \text{ G}$  である。また脈圧の各周波数における各位置での位相遅れを Table 2 に示す。数値は環状管 (P-2) を基準として測定した結果である。

これらの結果から次のようなことが考察される。

(1) 冷風本管 (P-1) から環状管入口 (P-2) までの間は, 脈圧の減衰, 位相の遅れが大きく, 周波数が高くなるほど大きくなる。これは熱風炉の容量の影響がかなりあると考えられる。

(2) 炉内における脈圧の減衰は 16 cpm までは, 炉内圧力の変化と密接な関係がある。特に 8 cpm までは完全に伝達性がある。しかし, (P-2)~(P-3) いわゆる羽口からボッシュ, 切立, シャフト下部に至る溶融層を含む部分は, 伝達機構がかなり複雑であることが推察される。

#### 3.2 高周波脈動の伝達

高炉々内における高周波領域に関する脈圧伝達性を解明するため, 川崎第 2 高炉を対象として, 休風時に羽口レベルから 6.8m の切立部に (PG-1, PG-2) の互いに対象の位置で交互に脈圧を発生し, 羽口レベル (P-1) およびシャフト 5 カ所 (P-2, P-2', 羽口から 6.8m) (P-3, 羽口から 9.6m) (P-4, 羽口から 16m) (P-5, 羽口から 19.4m) において脈圧を測定した。脈圧発生源は PG-1, PG-2 に火薬爆発装置を取付け, これにダイナマイト, 黒色火薬または無煙火薬を 40~100g 装着し, これを爆発させて 50~400 cps の範囲の複合波の脈圧を与えた。Table 3 に脈圧周波数に対する最大応力減衰状態, Table 4 にその位相差を示す。実験 I および III は (PG-1) で II は (PG-2) で爆発した結果である。

これらの結果より次の点が考察される。

(1) 爆発による高周波脈圧は, 炉内距離 2.8m までに, 10~7% に減衰し, 次の 6.4m の間では比較的減衰が少ない。これは爆発波は初期に急激に減衰することを示しているとともに, 発生脈圧のうち若干は wall 効果によつて炉壁を伝わっていくため, それが搬送波によつて炉内の固有振動波とともに維持されるので, 脈圧振巾がある程度以下になるとこの影響が表われてくる。

(2) ゲイン特性と位相遅れはかなり相似した曲線を示し, ゲインの低い周波数領域は位相遅れも大きくな

Table 3. Attenuation of pulse pressure (2).

Pulse frequency (cps)	Pulse pressure ( $\text{kg/cm}^2$ )			P-3/ P-2 (%)	P-4/ P-2 (%)	P-4/ P-3 (%)	
	P-2	P-3	P-4				
I	310	29.4	2.7	2.6	9.3	8.7	94.0
	460	35.0	3.0	2.8	8.6	8.0	92.1
	750	26.7	1.8	1.7	8.7	8.0	91.6
II	350	25.4	1.8	1.3	7.2	5.1	72.3
	410	24.8	1.7	0.9	7.1	3.4	47.8
	2300	29.2	2.3	1.6	7.8	5.3	68.0
III	330	13.0	1.5	1.5	11.6	11.4	98.0
	520	29.8	2.4	2.2	8.1	7.5	92.5
	570	27.5	4.3	2.1	8.4	7.5	89.6
	2100	46.2	3.9	3.0	8.5	6.5	76.1

る傾向が見られ、周波数による減衰率の差はあまり表われてない。

3.3 水蒸気脈動の伝達

鶴見第 2 高炉の衝風に、添加水蒸気量を  $20 \pm 5 \text{ g/Nm}^3$  で  $0.25 \sim 8 \text{ cpm}$  の脈動をさせた場合の脈圧減衰状態を Table 5 に示す。測定位置は前述の低周波脈動の場合と同様に、冷風本管 (P-1)、環状管 (P-2)、シャフト 2 カ所 (P-3, P-4) でおこなった。この操業試験により、低周波領域における衝風添加物の脈動伝達性を確認することが出来た。

4. 考 察

鶴見第 2 高炉および川崎第 2 高炉における試験結果より、各々の周波数に対するゲインおよび位相の関係を Fig. 3 のボード線図に示す。ここで充填層における模型実験結果と高炉の低周波、高周波脈動伝達試験結果との関係について見ると、減衰状態および位相遅れとも相対的にはかなり傾向が一致している。しかしながら、これらの間には、① 充填物による通気状態の差、② 炉内ガス流れおよび炉内圧の差、③ 脈圧波の性質の相違、などがあるが、これらの点を考慮することによりこの種の模型実験から高

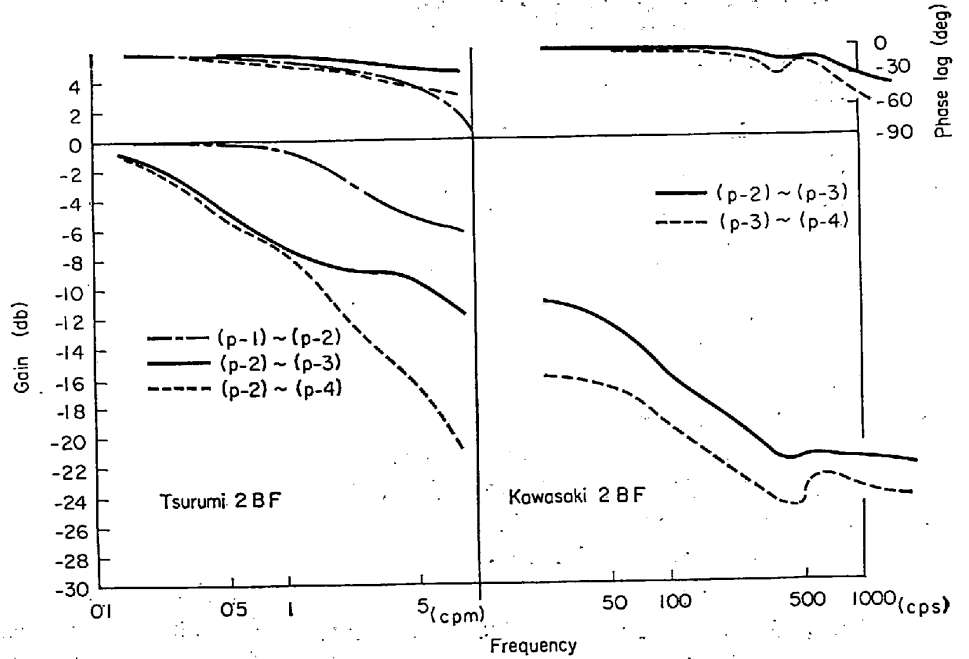


Fig. 3. Pulse frequency, vs. gain and phase on blast furnaces. (Bode diagram)

炉々内における脈圧の伝達状態を推定することは、十分可能であることがわかった。

5. 結 言

(1) 高炉々内における脈圧伝達状態について、次のことが解明できた。

① 高炉設備および炉内での脈圧の減衰の大きな部分は熱風炉、環状管と flow pipe を含む送風本管、ポッシュ部の順である。

② 高周波脈圧 (1 cps 以上) はポッシュ部でもほとんど減衰し、中周波脈圧 ( $0.16 \sim 1 \text{ cps}$ ) は熱風炉、送風本管、ポッシュ部でかなり減衰するが、低周波脈圧 ( $0.08 \sim 0.16 \text{ cps}$ ) は減衰が比較的少ない。

③ 高炉シャフト部における脈圧の伝達率は 60 cps の脈圧で、シャフト高さ 10m 当り 7~8%, 同じく 2 cps では約 93% である。

④ 高炉々内における脈圧伝達は方向性はないが、脈圧の稀釈性がある。

(2) 炉内における脈圧の減衰は、通気性と密接な関係にあるが、脈圧振巾 10% 程度以下の脈動送風操業の場合は炉内通気性に対して、あまり影響は与えないと考えられる。

(3) 模型実験による伝達状態の予測と高炉における試験操業を対比した結果、炉内脈圧減衰状態および位相遅れとも定性的にかなり一致した傾向を得ることができた。

文 献

1) D. P. CAMPBELL: Process dynamics, (1956), M. I. T.  
2) 黒田, 下間, 佐野, 長谷川, 阪本: 鉄と鋼, 53 (1967), 3, p. 254

Table 4. Phase lag of pulse pressure (2).

Pulse frequency (cps)	Phase lag (deg)			
	(P-2)~(P-3)	(P-2)~(P-4)	(P-3)~(P-4)	
I	310	6.4	9.4	3.0
	460	15.0	21.8	6.8
	750	27.2	39.4	12.2
II	350	18.0	24.0	6.0
	410	24.0	33.0	9.0
	2300	58.5	79.5	21.0
III	330	17.2	25.7	8.5
	520	12.0	16.2	4.2
	570	14.2	19.0	4.8
	2100	36.0	49.9	13.9

Table 5. Attenuation of pulse pressure (3).

Pulse frequency (cpm)	Pulse amplitude (%)			
	P-1	P-2	P-3	P-4
0.25	$\pm 3.1$	$\pm 3.0$	$\pm 2.8$	$\pm 2.7$
0.5	$\pm 3.0$	$\pm 2.9$	$\pm 2.7$	$\pm 2.6$
1	$\pm 2.6$	$\pm 2.4$	$\pm 2.3$	$\pm 2.3$
2	$\pm 2.1$	$\pm 1.8$	$\pm 1.7$	$\pm 1.6$
4	$\pm 1.2$	$\pm 0.9$	$\pm 0.8$	$\pm 0.7$
8	$\pm 0.4$	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.0$