

音響による高炉冷却函の破損検知法*

曾我 弘**・南田勝宏**・沢田保弘***

楯岡正毅****・合田純一*****

A New Acoustic Method for Water Leak Detection of
Blast Furnace Cooling Boxes

Hiromu SOGA, Katuhiro MINAMIDA, Yasuhiro SAWADA

Masatake TATEOKA and Junichi GODA

Synopsis:

A new method by which the detection of the damages of blast furnace cooling system is easily made was developed.

This is an acoustical method which detects the abnormal sounds caused by the entry of gas bubbles into cooling box or tuyere from the blast furnace through the small damaged part.

The result of the application of this method to the actual blast furnace was found to be quite satisfactory.

(Received 15 Dec. 1967)

1. 緒 言

高炉羽口や炉体の冷却の問題は炉体保護、寿命の延長、操業の安定性確保などの面からきわめて重要である。一方近年高炉の大型化に伴い羽口数も 30 本におよぶものもあり、膨大な数の冷却函の管理が必要となつてきた。従来これらの管理は周囲条件が悪い場合が多くきわめて困難な作業の 1 つとされていた。

一方冷却板や羽口からの炉内漏水は操業面からは最も警戒すべき事故の 1 つであり、場合によつては大きな事故と結びつくことも考えられる。

これら漏水管理に対して従来迅速、確実な方法がなく現場担当者より強く改善が望まれていた。これに対し筆者らは炉内から逆に冷却板内に混入するバブル音を検知する方法を開発し、また音の発生過程、特徴を解析し実用化した。本方法も完全とはいえないが、従来法にないすぐれた特長を持っており、今後広く利用されることを期待したい。

2. 実験結果概要

2.1 測定器

本実験に使用した基本装置は振動検出器、低雑音増幅器およびレシーバーから成る。振動検出素子は加速度に比例した出力を得る機械→電気変換素子で、その周波数対感度の特性を Fig. 1 に示す。また低雑音増幅器は入

力換算雑音 $1 \mu V(r.m.s)$ 程度のもので帯域幅 200c/s~10kc/s, 増幅度は 30, 40, 55 db の 3 段切換になつている。この出力は直接レシーバーに接続され耳で検知音を聞くことができ、またコンパクトで携帯に便利になつている。全体の様子を Photo. 1 に示す。

2.2 モデル実験

漏水検知に必要な基本的性質を知るため Fig. 2 に示すモデルを作成した。これは冷却板を 2 段に連結し、一方の先端に数種の小孔をあけ、漏水に伴う音の性質や逆に冷却板に混入してくるバブル音の性質などの解析に利用した。

一般的にいえば、炉内圧力と冷却水の水圧との大小関係によつて冷却函に小孔または小さな破損が生じた場合には、炉内への漏水が生ずる場合と逆に炉内ガスが冷却水中に混入する場合があるが、実際の高炉羽口や冷却板などの破損発生の場合は大破は別として、この 2 つの状態が高炉内での激しい動圧変化によつて交互にくり返されながら漏水が進行してゆくと考えられる。ここでは漏水にともなつて発生する音の特徴とバブルの発生による

* 昭和42年10月本会講演大会にて発表

昭和42年12月15日受付

** 八幡製鉄(株)東京研究所

*** 八幡製鉄(株)本社

**** 八幡製鉄(株)戸畑製造所

***** 八幡製鉄(株)技術研究所

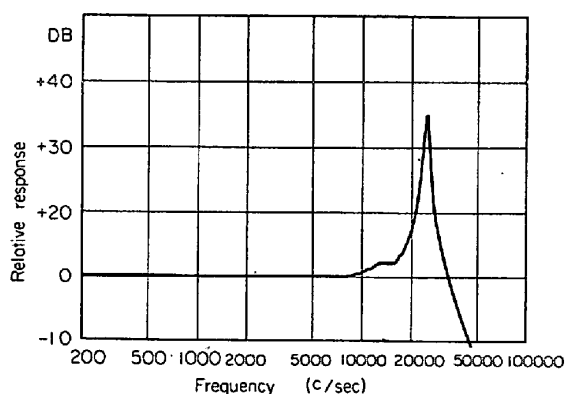


Fig. 1. Frequency response curve of the accelerometer.

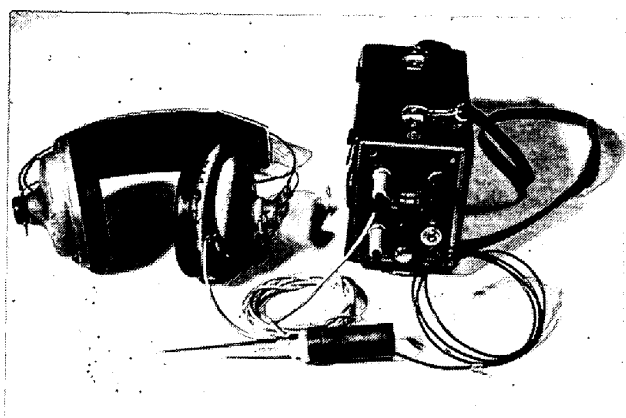


Photo. 1. The instrument.

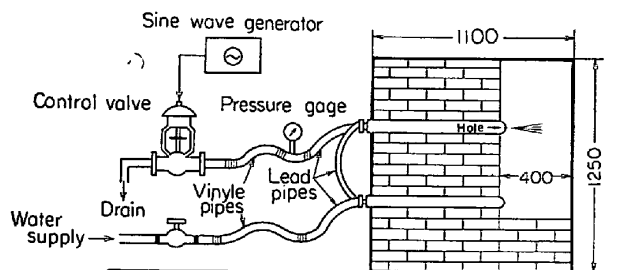


Fig. 2. The simulated model of the blast furnace wall.

音の両者について検知可能性を検討した。その結果以下述べるようにバブル音が検知可能なことが明らかになった。

2.2.1 漏水音の検知

一般に漏水がある場合それに伴って漏水音が発生することは知られているが、この漏水振動音は漏水圧、破損部形状、支持方法その他多くの要因によって異なることが報告されている。ここでは実物冷却板を用いて行なった実験結果を要約する。

(i) 漏水圧が 1.5 kg/cm^2 以下では漏水雑音はおおむね破損孔の面積に比例して大きくなる。(5 mm ϕ 以下の面積)

(ii) 水圧が大きくなるにつれて、この傾向はかわり

低周波部分は面積に比例して大きくなるが、高周波部は逆に破損孔面積が大きくなると音の大きさは減少してゆく。(4 kg/cm^2 以下の圧力)

(iii) 漏水のない場合でも流量とともに増大する流量雑音がある。これは弁や流路の急激に変化する部分から発生してパイプを伝播してくるものと考えられる。

(iv) 水圧を周期的に変化させると、それに伴って漏水音の音色も周期的に変化し、破損孔が小さいほどこの変化は顕著である。したがってこの性質を利用して漏水検知を行なうことは原理的には可能である。

(v) 漏水に伴って発生する漏水雑音の大きさは、後述する高炉周辺の雑音と比較するとほぼ 1 桁小さく、周波数スペクトルの分布も特徴的な差はなく現場実用化という観点からはかなり困難と思われる。

2.2.2 バブル音の検知

瞬時的にせよ炉内圧が冷却水水圧より大きくなれば破損部からガスが混入しバブルとなつて外部に排出される。ここでは前記モデルと平行してプラスチックの実物大モデルでこのバブルの生成過程を観察した。この生成過程は羽口、冷却板ともほぼ共通しておりバブル音によって破損を検知する場合の基礎になる。要約すると次のようになる。

(i) 破損部から冷却板内に入ったガスはバブルとなつて流されてゆくが、このバブル生成のとき音を発生する。しかしこの音は冷却板が強く固定されているときには外部に到達するまでにかかなり減衰する。

(ii) 冷却板破損部で生成したバブルは冷却水とともに出口側に流れてゆき、冷却板の傾斜や排水パイプ取付部の構造によって決まる流速の遅い部分に合体して一時たまる。

(iii) 合体して集まつたバブルはある程度以上の大きさになると一気に排出され、このとき小さなバブルに分裂して音を発生する。このバブルの大きさは流速や排水パイプの径で決まる大きさになる。もちろん平均としてであり、個々にはかなり大小の差がある。

(iv) バブルには固有振動数があり、かなり一定してほかの雑音と分離しやすい。(詳細は 3.1 参照)

(v) 一般にバブルが連続的に冷却板破損部から混入しても上記の過程により、排出されるのは間歇的となりしたがって外部で検知されるバブル音も間歇的となる。この頻度はガス圧力、冷却水の流速、破損の程度によって異なるが、バブル音の大きさは (iii) からわかるごとくほぼ同一である。

(vi) 破損部で発生するバブルの大きさは、破損の程度、形状、水の表面張力などの条件によって変化し、ほ

かの条件が同一なら破損個所が大きいほどバブルは大きい。また同一条件下なら破損個所が大きいほど聞こえるバブル音の頻度が多くなることがわかる。

2.3 現場実験

2.3.1 高炉周辺の雑音

音響的手段を高炉羽口などの漏水検知に利用する際、まず問題になるのは、大きな騒音源である羽口送風音、周辺機械の音、および炉体自身の音がどの程度のものかおよびその周波数スペクトルはどんなものかを知ることである。従来この種のデータはほとんど測定された例がないので、数回の現場実験を行ない各種の条件下でのデータを得ることができた。これらを整理要約すると次のようになる。

(i) 羽口で測定される音は送風により発生する音と冷却水の排水音が主たる音源である。送風によつて発生する音のスペクトルはかなり広い分布をもっているが羽口の機械的固有振動数が $1.6\text{kc/sec} \sim 1.8\text{kc/sec}$ であるため、この付近の成分が一段と強くあらわれる。

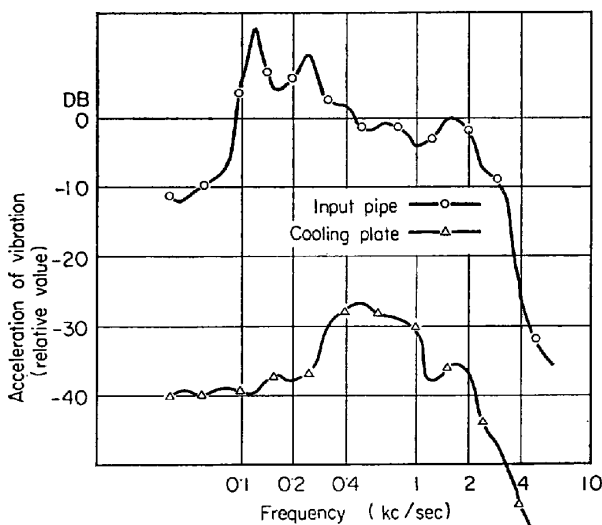


Fig. 3. Flow noise of the mantle cooling plate.

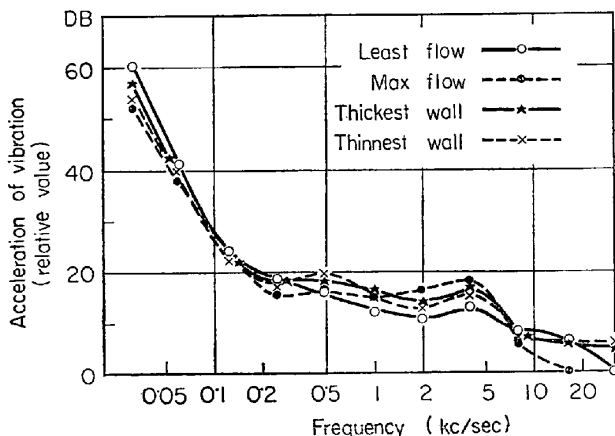


Fig. 4. Flow noise of the cooling plate.

(ii) 羽口でも冷却板でも炉体に埋込まれている部分と給排水パイプとはかなり大きな差がある。これは支持方法の違いによるものである。一例をFig. 3に示す。

(iii) 炉内の壁の厚み、冷却水量の多少による相違をみるため、シャフト部(4床)で測定した結果、これらによる差異はほとんどなく、雑音の主たるものは炉内からの振動と外部の風の音が鉄皮で集音されて伝達されてきたものと考えられる。

また羽口の雑音に比較して冷却板のそれは約 $1/10$ 程度である。

(iv) 各高炉によつてスペクトルの形が変わっているが、これは被測定部の機械的特性が異なるためであろう。

2.3.2 破損羽口の音

高圧水による冷却を行なっていない場合には、ほとんどの場合羽口冷却水圧より炉内圧のほうが高くなりうるので漏水と交互にバブル音を聞くことができる。

羽口破損の場合を要約すると次のごとくである。

(i) 羽口付近では炉内静圧もかなり高いため、かなり微少なピンホールも検知可能である。

(ii) この傾向は測定時に冷却水の水圧を下げるとさらに顕著になる。

(iii) 各羽口での雑音は時間的にはあまり変動しない。

(iv) 羽口、小丸、大丸とある場合にはこの順序で雑音は小さくなってゆく。

(v) 正常なものでも各羽口ごとの雑音レベルにはかなりの相異がある。

(vi) 破損した羽口と正常なものとの音の波形をPhoto. 2に示す。両者間にはこの例のごとく明らかな変化のあるものもあるが、これで判断できない例も相当多い。したがってこの中からバブル音を抽出する方法を考える必要がある。

3. バブル音の解析

3.1 バブルの固有振動音

バブルが生成された時に音が出ることは2.2.2で述べたが、これはバブルが生成するとき表面張力の形で持っていたエネルギーが、バブル体積の変化となつて振動しながら失われるため発生すると考えられる。この固有振動数 f_0 は(3.1)式によつて与えられる。

$$f_0 = (1/2\pi) \cdot (3\gamma P_0 / \rho R_0^3)^{1/2} \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし γ は定積比熱と定圧比熱の比、 P_0 はガスの圧力、 ρ は液体の密度、 R_0 は生成したバブルの半径である。またこの式は生成されたバブルが完全な球形をして

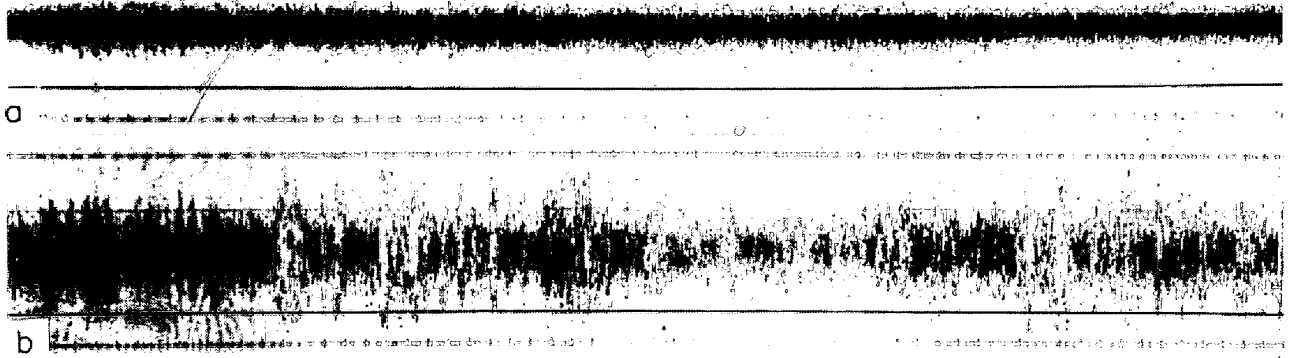


Photo. 2. Typical waveshapes of the normal tuyere vibration (a) and with a crack (b).

いると仮定して導びかれるが、実際に球形から変形した場合にも (3.1) 式がほとんどそのままの形で適用できることが、理論的²⁾にも実験的³⁾にも知られており、また以下の解析例からもその妥当性が示された。

いま高炉羽口付近で $\gamma = 1.35$ (CO と CO₂ ガスの平均), $P_0 = 2 \text{ kg/cm}^2$, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, R_0 を [cm] で表わせば, (3.1) 式は (3.2) 式となる。

$$f_0 = 0.45/R_0 \text{ [kc/sec]} \dots \dots \dots (3.2)$$

羽口や冷却板からのバブルが排出されるとき生成するバブル半径 R_0 は主として排水パイプの径と流速によって決まり、平均して R_0 は 4~6 [mm] 位であり (3.2) 式から f_0 の値は 750c/sec~1120c/sec となる。実際には音は相当歪んでおり高調波成分を多く含むが、実測データからこのバブル音を検知解析することができる。

3.2 Sonagram と Correlategraph

上述のバブル音を解析するためには、バブル発生時の音を長い時間の平均として解析したのでは検出できない。そのため sonagram (一名声紋ともいう。) と correlategraph で解析した。

sonagram は横軸に時間を取り、縦軸に周波数の直線目盛をとつて、振幅の大小を濃淡で表示したものである。この装置は信号を一たん磁気ドラムに録音して、高速で再生しながら 300c/sec の帯域幅のフィルターを徐々に移動させて作図するもので全体として 2.4 sec の間の記録が得られる。これは音声解析の技術として広く利用されている。

correlategraph は最初機械的方法を BENNETT が考案したが⁴⁾、筆者らは実時間相関器⁵⁾で実時間 correlategraph が得られるよう装置の一部改造を東大石井泰助教授に依頼し、バブル音の解析に利用させてもらった。これは短時間相関関数の時間的変化をブラウン管上に濃淡で表示できるようにしたものである。すなわち (3.3) 式

で定義される自己相関関数を (3.4) 式で近似する。

$$\varphi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t-\tau) dt \dots \dots (3.3)$$

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T}^0 x(t) \cdot x(t-\tau) dt \dots \dots \dots (3.4)$$

ここに φ は相関関数、 τ は信号の遅延時間、 T は計算に必要な信号の長さを示す時間、 $x(t)$ は信号である。

ここで T をバブルの振動の周期性を検知するのに必要な時間に比べて十分長く、かつバブル発生の間隔に比べて十分短かく選ぶと (3.4) 式は (3.5) 式の形として表わすことができる。

$$\varphi(\tau, kT) = \frac{1}{T} \int_{k-T}^k x(t, kT) \cdot x(t-\tau, kT) dt \dots (3.5)$$

ここに k は 0, 1, 2, 3... と正の整数値をとる。

また $\varphi(\tau, kT)$ は $\tau=0$ で最大値をとるから (3.6) 式のごとく規格化することができる。

$$\phi(\tau, kT) \equiv \frac{\varphi(\tau, kT)}{\varphi(0, kT)} \dots \dots \dots (3.6)$$

ここで kT を横軸に、“ τ ” を縦軸にとり、 $\phi(\tau, kT)$ を濃淡で表示すると correlategraph が得られる。この解析例は $T=10\text{ms}$, $\tau=0\sim 10\text{ms}$ まで $\Delta\tau=100\mu\text{s}$ の間隔でとり、 kT は 0~2 sec とした。したがって縦軸のフルスケールが 10ms であるから縦軸にあらわれる縞の数 $\times 100\text{c/sec}$ がバブルの基本振動を与えることになる。

sonagram と correlategraph は同じ信号を周波数領域と時間領域とで解析したもので本質的にはフーリエ変換によつて関係づけられている。

3.3 解析結果

代表的羽口音の解析例を Photo. 3, 4 に示す。(a) は sonagram による解析, (b) は correlategraph による解析である。

Photo. 3 は正常な羽口の代表例で、Photo. 4 はクラッ

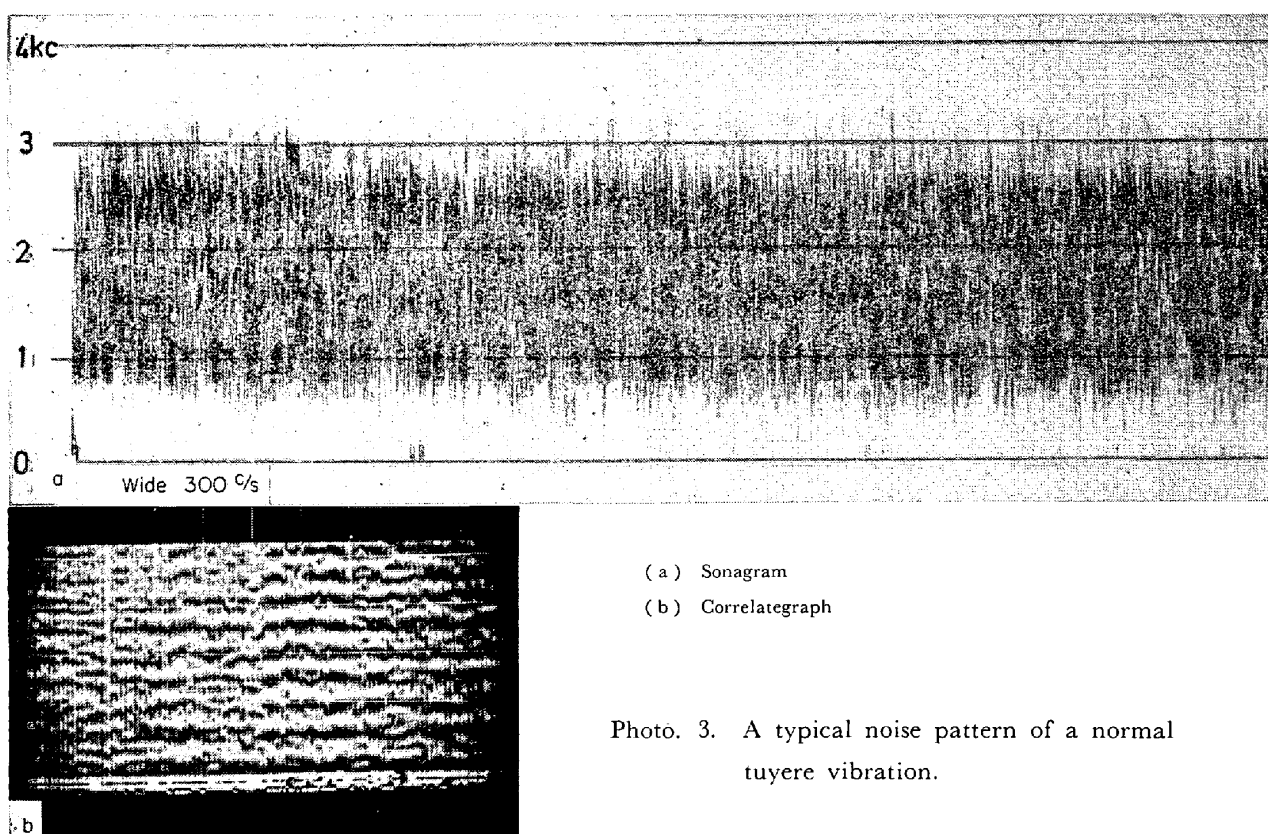


Photo. 3. A typical noise pattern of a normal tuyere vibration.

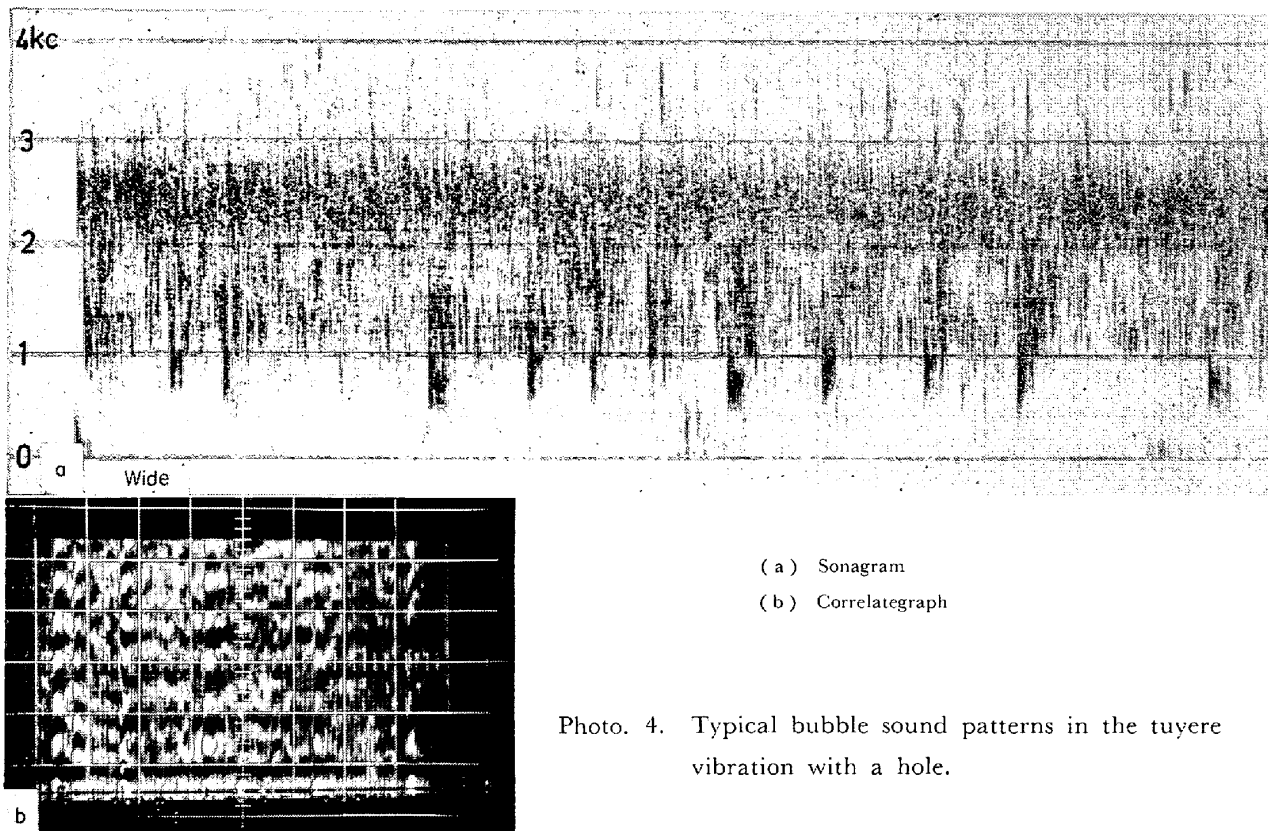


Photo. 4. Typical bubble sound patterns in the tuyere vibration with a hole.

クを生じた羽口の例である。

これらによれば正常な羽口では送風雑音が 1~2 kc 位に分布して連続的に発生している。中でも基本振動は約 1 kc 位にあることが correlategraph から明らかに読みとれる。

また破損羽口でのバブル振動が 1 kc 前後にかたまつて発生している様子がわかる。雑音は比較的一様なスペクトルを持つのに反しバブル音が非常に強い周期性を持つこと、すなわち固有振動のあることが correlategraph からわかる。

一般にこれらの解析法と人間の耳による判別能力とを比較すると耳の能力ははるかに種々な意味ですぐれている。これらについては学問的にも未知な要因が多く、現在の技術レベルを考慮するとこれらの解析データを基に耳で聞く訓練をするほうが信頼性があり、また現実的で

もある。

4. 現場使用実績

本方法を現場で使用した結果を Table 1 に示す。(表中×印は破損と判断されたもの、○印は正常、—印はデータなし、△印は判別にやや困難を感じたものである。)最初の段階では破損頻度が比較的高く、また破損状況の確認ができる羽口を対象としてデータを集積した。

この結果は本方法採用の初期の頃のデータでありその後の中卒は 80% 以上とかなり向上している。

本方法は耳で聞くという経験的要素が多いために最低 2~4 週間の訓練が必要であるが、一度音の感覚をおぼえると非常に能率よく羽口や冷却板の破損の有無を検知できる。この方法の利点を従来法と比較して Table 2 に示す。また Photo. 5 は実際に使用しているところを示

Table 1. Some results of field test at Tobata No. 2 and No. 3 B.F. success or failure of this method was checked by pulling out the tuyeres when the furnace was shut down.

	Date of shut down	No. of tuyere	State of damage	Success or failure of this method	Remarks
No. 1 B.F.	Jan. 21	4	Abrasion (inner cylinder)	s	
		8	Abrasion (tip)	s	
		9	Cracking (inner cylinder)	s	
		10	No damage	s	
		13	Pin hole (tip)	s	
		15	Cracking (inner cylinder)	s	
		18	Pin hole (inner cylinder)	f	
		19	No damage	f	
	Jan. 24	7	Molten away (tip)	Could not be used	Damages occurred abruptly
	Jan. 31	6	Break down (tip)	Could not be used	
No. 3 B.F.	Feb. 15	5	No damage	f	
		20	Pin hole (tip)	s	
	Feb. 23	2	Pin hole (tip)	s	
		15	Break down	s	
	Dec. 21	22	Cracking (inner cylinder)	s	
		24	Abrasion (tip)	s	
		27	Molten away (tip)	s	
	Dec. 24	11	Pin hole (inner cylinder)	Did not be used	
		16	Molten away (tip)	Did not be used	
	Jan. 12	27	Break down (tip)	Could not be used	
	Jan. 16	5	Break down (tip)	Could not be used	Damages occurred abruptly
		18	Molten away (tip)	s	
	Jan. 22	12	Abrasion (tip)	s	Damages occurred abruptly
		20	Break down	Could not be used	
	Feb. 8	14	Pin hole (inner cylinder)	f	*
		17	Break down	s	
		18	Molten away (tip)	s	
		21	Molten away (tip)	s	

* abnormal sound was caught once on Jan. 22, but vanished later.

Table 2. Comparison of the new method with others.

	Observation of water pressure decrease after shutting off valves at the inlet and outlet cooling water pipes	Detection of gas leakage into the outlet cooling water pipe	This method
Suspension of cooling water supply	Necessary	Not necessary	Not necessary
Additional devices to cooling water pipes	Bourdon type pressure gage (5 kg/cm^2) by additional piping	Gas sampling pipe at the outlet	Not necessary
Time and number of persons required for the test	30~60 min (four persons)	10~20 min (four persons)	0.5~2 min (one person)
Misjudge	Rare	A few	A few (a normal one is misjudged to be damaged in a few cases)

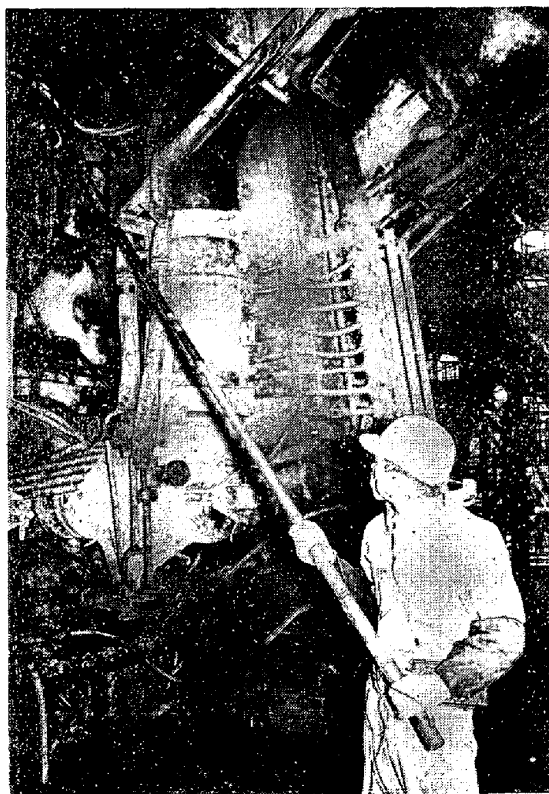


Photo. 5. Under measurement.

す。

5. 結 論

高炉羽口や冷却水の破損検知を音響的手法を用いて検出する方法について研究し、従来の方法に比較しきわめて能率よく検知する方法を実用化することができた。

この方法は破損時に生ずるバブルの音を検知する方法で、バブル音発生メカニズムやバブル音の特徴を種々

な条件下で検討し、またこれらを数種の方法で解析した。その結果を現場使用に当たつての指針として活用した。

最後に本研究においては雑音として取り扱った中には別の角度から見ると立派な信号として利用できるものがあり、高炉に関する情報収集の点から興味あるものであることを指摘したい。

本方法は日立中央研究所で開発された水道漏水検知器を基に開発したものであり、終始有益な討議と実験などに多大の協力をいただいた日立中央研究所主管研究員阿部善右衛門博士、橋本亨氏に対し厚く御礼申し上げます。

また correlategraph による解析に際し、装置の改造、借用などを快諾された東大宇宙航空研究所石井泰助教授、sonagram の解析や医学的立場から種々示唆をいただいた東京学芸大学教授大和田健次郎医博に対し感謝いたします。

さらに比較的短期間のうちに本研究が完了しえたのは八幡東研草鹿履一郎理博の適切な指導、本社鈴木久夫氏をはじめ多くの方々の援助によるものでありここに改めて感謝の意を表します

文 献

- 1) 橋本, 阿部, 他: 計測と制御, 6巻, 第1号 (1967)
- 2) M. STRASBERG: J. Acoust. Soc. Am., 125 (1953) 3, May, p. 536~537
- 3) S. D. HOWKINS: J. Acoust. Soc. Am., 37(1965) 3, p. 504~508
- 4) W. R. BENNETT: Bell System. Tech. Jour. (1953) Sep. p. 1173~1185
- 5) 石井 “実時間相関計について” 学振産業計測, 第36委員会, 第137回