音波気柱振動法による微粉体のふるい分け*

日 高 重 助** 三 輪 茂 雄***

Sieving of Fine Powders by Sonic Oscillating Air Column

by

Jusuke HIDAOKA and Shigeo MIWA

(Department of Chemical Engineering, Doshisha University, Kyoto)

A sonic oscillating air column method of sieving and its applicability for fine powders are described. The phrase "Oscillating air column" refers to a confined body of air moving essentially in a vertical direction.

Although the operating frequency of 50 or 60 Hz are being used to sieve coarser particles, a lower frequency (about 20 Hz) is adequate to sieve fine powders. This optimum frequency is almost independent of sound pressure, which makes the sieving rate increase. A sound wave radiated to the sieve is affected by the rubber membrane used to achieve a dust-tight for sound source.

(Received Dec. 22, 1977)

キー・ワード：音波ふるい，気柱振動法，高調波，周波数スペクトル，微粉体

1 緒 言

音波気柱振動法によるふるい分けとは，固定したふるい網面に音波を照射し，網上粒子群を活発に振動させてふるい分けを行う方法である。

ふるい分け機は一般に，網面に機械的な強い運動を与えて網上粒子群を運動させてふるい分ける網面運動式と，網面は固定しており网上的粒子群のみが運動する網面固定式とに分類することができる。

音波気柱振動によるふるい分け法は，網面固定式の中の一つであり，網面運動式に比べふるい分けにおける動力消費が非常に小さい特徴をもっている。網面固定式に属するふるい分け法は，ほかに2～3の方法が知られているが，音波を利用する本法は，網面上の粒子群が音波により流動化され分散され易いこと，および高速気流によりふるい網通過速度が増大することから，とくに微粉体の効率の良い乾式ふるい分け法として注目されている。

本ふるい分け法¹⁾については，すでに Hirschhorn²⁾ and Pearson, Sonderman, Suhm³⁾ および三輪⁴⁾らの報告があるが，網面に照射する音波の周波数，音圧，高調波など音波に関する諸量の変化がふるい分け性能に与える影響については明らかにされていない。

そこで本研究では，網面に音波を照射するために用

いられる振動膜からどのような音波が発生するかについて調べたのち，ふるい分け性能に及ぼす音波の変化の影響について検討した。

2 実験装置および実験方法

Fig. 1 に本実験で使用した音波気柱振動法によるふるい分け装置（以下，略して音波ふるいとよぶ）の概略を示した。実験には，装置(A)と(B)の二つの装置を用いた。最下部の音響用スピーカーから発生した音波は，強い張力を均一にかけて張ってある振動膜（ゴム膜）を振動させ，その振動膜により発生する気柱振動がふるい網に作用して网上的粒子群を振動させる。ふるいにはアクリル製円筒枠（54φ，22.9 cm²）にふるい網（ナイロンボルトニングクロス）を張ったものを用い，スピーカー自体の振動がふるい面に伝わるのを防ぐため

Fig. 1. Experimental apparatus.

* 原稿受理 昭和52年12月22日

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

*** 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

にふるい枠と音波発生部とをフレキシブルホースで接続してある。また、音波ふるいと Ro-Tap シェーカーとの比較には、内径 8 インチの ASTM の標準ふるいと Silk Standard Sieve (通称 SS シーブ) を装置 (B) の振動膜上に直接取り付け付けた。

装置 (A) と (B) は振動ゴム膜の直径が違い、装置 (A) が 300φ, (B) が 200φ である。この振動ゴム膜の直径の違いは、後述するようにふるい面に照射される音波の周波数成分に大きな影響を与える。このほかに振動ゴム膜からふるいまでの構造が少し違っている。

ふるい網に照射される音圧は、増幅器のレベルを変えることにより変化させることができ、また周波数は装置 (A) で 30.5~500 kHz, (B) が 17~2.5 kHz の範囲で変えることができるが、音波ふるいに用いられる周波数は、50~60 Hz が多くそれ以上の周波数領域は使用しなかった。

ふるい網に照射される音波の諸量や音波波形を測定するためのブロックダイアグラムを Fig. 2 に示した。ふるい面にコンデンサーマイクロホン (感度: -46 dB) を装入し、騒音計 (リオン製 N A-51 型), 周波数分析器 (リオン製 SA-35 型), 高速レベルレコーダーにより音圧と周波数スペクトルを測定した。また同時にデジタルメモリーと記録計を用いて網面の音波の波形も記録した。

Fig. 2. Block diagram of the measuring apparatus of sound.

低周波発振器: トリオ製広帯域 CR 型, 型式 AG-201, 発振周波数範囲 5 Hz~500 kHz

増幅器: トリオ製ステレオパワーアンプ, ミュージックパワー, 180W

音響用スピーカー: パイオニア製, PW-38, 38 cm ウーファー, 最低共振周波数 17 Hz, 出力音圧レベル 90 dB/W, 最大入力 80W

3 装置構造および振動ゴム膜の材質による発生音波の変化

音波ふるいは、ふるい網に照射される音波により網上の粒子群を振動させる方法であるから、ふるいに照

射される音波のちがいは、ふるい分け性能に大きな影響を与える。音波ふるい分け装置では、音波発生源を粉塵から保護するために音波発生部とふるい分け部の間に振動膜を用いて隔離する必要がある。したがって、スピーカーから発生する音波は正弦音波であっても、ふるい網に照射される音波はゴム膜の材質、寸法、音源の周波数、音圧により変化する。それは、振動ゴム膜が周波数により、いろいろな振動モードをもつこと、およびゴム膜の材質、寸法により共振周波数が変化するためである。そこでふるい網に照射される音波に対するこれらの影響について調べた。

3・1 ゴム膜の直径の影響

ゴム膜の直径の影響を調べるためにふるい分け部を取りはずしてゴム膜から一定の高さのところにマイクロホンを置き、二つの装置を同じ周波数および音圧で作動させ発生する音波の周波数成分と音波の波形を測定した。Fig. 3 は、その結果の 1 例で周波数 40 Hz,

Fig. 3. Effects of diameters of rubber membrane.

音圧 128 dB の場合である。装置 (B) から発生する音波はほとんど正弦音波 (純音) に近いものでその波形も正弦波形であるのに対して、装置 (A) の音波は高調波を含んだ複合音波である。実験した周波数範囲は 20~80 Hz であるが、実験範囲の周波数ではこの傾向は変わらなかった。

これは、振動膜が大きくなると固有振動数が下がるためであると考えられる。一般に、半径 R , 面密度 (単位面積当りの質量) ρ の円形振動膜が張力 T で張られているとすると固有振動数は次式で表される。⁵⁾

$$\nu = \frac{0.765}{2R} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (1)$$

したがって、直径が大きい装置 (A) の振動膜は、(B) よりも固有振動数が低く、小さな力でも大きな変位を示すためにスピーカーから発生する弱い高調波でも励振され、高調波のレベルが高くなるものと考えられる。

3・2 周波数、音圧の影響

Fig. 4 は、マイクロホンに受ける音圧を一定にして周波数を変えたときの音波の周波数スペクトルである。また、Fig. 5 は、周波数を一定にして音圧を変えたとき

Fig. 4. Effect of frequency. (apparatus (A))

Fig. 5. Effect of sound pressure. (apparatus (A))

きの周波数スペクトルである。

装置(A)から発生する音波は、周波数および音圧が高くなるにつれて高調波のレベルが高くなる傾向がある。この傾向は、装置(A)ほど明瞭ではないが、(B)でも観察される。

3・3 ゴム膜の材質の影響

Fig. 6 は、振動膜の材質およびその厚さの影響を調

Fig. 6. Effects of the characteristics of rubber and the thickness. (apparatus (B))

べたものである。

合成ゴムよりも天然ゴムの方が、またその厚さがうすく弾性が大きくなるにつれて高調波が発生しやすい傾向がある。

以上のことから、音波ふるいにおいては、使用する振動膜の材質、大きさ、厚さ、振動膜を駆動する周波数、音圧などが重要な因子である。

4 ふるい分け性能に及ぼす音波に関する諸量の影響

前節の結果から、振動膜の材質、大きさ、厚さ、振動膜を駆動させる音源の周波数、音圧を適当に選ぶことにより、網上粒子群を正弦音波だけでなく高調波を含む音波で振動させられることが分った。

そこで、どのような音波がふるい分けに対して有効であるかを明らかにするために、ふるい分け性能に及ぼす音波の周波数、音圧、音波の周波数成分の影響について検討した。

4・1 周波数の影響

音場におかれた1個粒子の共振運動に関して、音場の媒質粒子の変位 X_g と媒質に伴われて共振する粒子の変位 X_p との間には、ストークスの抵抗則が成立する領域で次の関係が知られている。⁶⁾

$$\frac{X_p}{X_g} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\pi \cdot \rho_p \cdot D_p^2 \cdot f}{9\mu}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (2)$$

ここで、 D_p は共振する粒子の粒子径、 ρ_p は粒子の密度、 μ は媒質の粘度、 f は周波数である。

(2)式は、ある大きさの粒子が媒質の振動に伴って振動する周波数が粒子径によって変わり、粒子径が小さくなるにつれて高い周波数でも共振することを示している。

音波ふるいに関するこれまでの報告では、 $44\mu\text{m}$ 以上の粒子群に対して $50\sim 60\text{ Hz}$ の周波数が用いられて良好な結果が得られている。したがって、さらに細かい粒子群のふるい分けには、振動加速度が大きいより高い周波数が適当であると予想される。

微粉体のふるい分けにおける周波数の影響を調べ、その結果を Fig. 7 に示す。ふるい分けは、純音に近い音波を発生する装置により、コランダム の #1 200 (平均粒子径 $D_{50}=10\mu\text{m}$) を目開き $20\mu\text{m}$ のステンレス網で行った。比較のために #240 ($D_{50}=62\mu\text{m}$) についての結果を Fig. 8 に示した。ふるい分け性能の比較には、図のように、網上に一定重量の試料を装入して網上残留率の時間的推移を調べるのがよい。

微粉体のふるい分けにおいては、予想とは逆に周波数が低くなるにつれて、ふるい分けが速く進むことがわかる。これに対して、#240 では、 $30\sim 40\text{ Hz}$ 付近にふるい分けが速い周波数が存在する。このことは比較

Fig. 7. Effects of operating frequency on the sieving process. (Al_2O_3 , Grit No. 1200)

Fig. 8. Effects of operating frequency on the sieving process. (Al_2O_3 , Grit No. 240)

的付着凝集性の低い他の粉体でも見られた。

これらのことは、粉体のふるい分けにおいて、粒子群の振動変位が重要であることを示している。音圧を一定にし、周波数を変化させて網上粒子群を振動させると低い周波数では、大きな振幅で激しく運動するが、周波数が高くなるにつれ粒子群の運動は不活発になる。

付着性が低い粉体では、网上的粒子が運動できる適当な空けきを粒子層内に生成させるに充分な振動変位が必要であり、付着性が高い粉体では、粒子群を分散させるためにさらに大きな変位を要するものと考えられる。前者の場合には、振幅が大きいとふるい分けられるチャンスが減少する。後者では、周波数が高くなると粒子同士が微小衝突する回数が多く粒子群の分散が進まず、逆に、凝集粒子が大きな振幅で激しく運動しているときに受けるせん断力や衝突により分散が進むものと考えられる。

4・2 音圧の影響

音圧と振動速度の間には比例関係がある。Fig. 7, 8 には、音圧の影響も示した。Fig. 9 は、装入重量と音圧、周波数の関係を示したものである。いずれの場合も音圧が高くなるにつれてふるい分けが速く進む。これは、気体の振動速度が大きくなり、それに比例してふるい網通過速度が大きくなるためと考えられる。

4・3 高調波の影響

Batel は、ふるい分けにおける倍振動の影響につい

Fig. 9. Effects of operating sound pressure.

Fig. 10. Effect of sound with harmonics.

て調べ、倍振動により振幅を大きくすることが目詰りの防止に効果的であることを示している。

Fig. 10 は、Fig. 4 の周波数成分をもつ音波であるい分けを行い、高調波の影響を示したものである。

高調波のレベルが駆動周波数のレベルより低い場合は正弦音波よりもふるい分けが速い。逆に高調波のレベルが高くなると網上粒子群の運動が不活発になり、正弦音波の方が速くふるい分けられる。

5 Ro-Tap シェーカーとの性能比較

粒度測定に用いられる Ro-Tap シェーカー と音波ふるいとの性能比較については先に報告した⁴⁾。今回、さらに微粉領域で実験を行った。Fig. 11, 12 にその結果を示した。音波によるふるい分けが、とくに微粉領域で有効であることが分る。これは、前述のように音波により粒子が良く分散されること、および自重が

Fig. 11. Comparison of the sieving process with Ro-Tap and Sonic sifter. (Al_2O_3 , Grit No. 1200)

Fig. 12. Comparison of the sieving process with Ro-Tap and Sonic sifter. (CaCO_3)

小さくてそれ自身ではふるい網通過力が小さい微粒子を振動気柱により強制的に通過させるためであると説明できる。

6 結 言

以上の実験から次のことがわかった。

- (1) 音波ふるいにおいて、使用する振動膜の材質、寸法は、網面に照射される音波に大きな影響を与える。また、音源の周波数、音圧によっても周波数成分が異なる。
- (2) 微粉体のふるい分けに用いる音波の周波数は、

20 Hz 付近の低い周波数が良く、この音波周波数は、微粒子群の分散に影響を与える。

(3) 音波にふくまれる高調波は、ふるい分け速度を増大させる。

(4) 音波ふるいのふるい分け性能は、Ro-Tap シェーカーよりもすぐれており、とくに微粉体のふるい分けに有効である。

(昭和52年11月29日 第15回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Hirschhorn, J. S., and G. J. Pearson, Intern. J. Powder Metal, **4**, 7 (1968).
- 2) Sonderman, L. L., Intern. J. Powder Metal, **5**, 23 (1969).
- 3) Suhm, H. O., Powder Tech., **2**, 356 (1962).
- 4) 三輪茂雄, 天野やよい, 上原賢二, 粉体工学研究会誌, **9**, 221 (1972).
- 5) 小橋 豊, “音と音波” (1975) 裳書房
- 6) 井伊谷鋼一編, “粉体工学ハンドブック” (1966) 朝倉書店
- 7) Batel, W., Chemie-Ing-Tech., **26**, 497 (1954).