選炭における空気動ジグの操業条件と成績*

田 中 実**

Operating Condition and Performance of Air-Pulsated Jigs in Coal Preparation

Minoru TANAKA

1. 結 言

選炭工場は設備費および運転費の低減を要求する。効率的であっても、複雑であったり、修繕を必要とする機器を選ぶより、多少効率が低くても整備が容易で、1台当りの処理能力が大きく、稼働率が高い装置が望まれる。これらの要求を比較的に空気動ジグは満たしていることから、Friz Baum が発明して以来90年の長い間、いつの時代にも石炭の選別機として最も多く採用されてきた。

近年石炭はエネルギー源として再認識され、今後は電力用炭の選炭が増加すると予想される。したがって益々低コストの選炭が要求され、空気動ジグの採用が増加するであろう。

一方石炭産業における企業の合理化は一層厳しくなり、採炭および積込みの機械化が、今以上に進められ、原炭の性状は悪化すると推察する。他の選別機も同様であるが、とくに空気動ジグは原炭性状の変化によって、処理量および選別精度は変化する。そのため空気動ジグの採用に当って、操業条件に対する選別能力の限界をよく理解して、選定する必要がある。

ここに筆者が試験した実用空気動ジグの操業条件および成績を統計的に総括し、いささか私見を加えて報告する。

2. 選別能力を支配する要因

空気動ジグの処理容量および選別精度は給炭性状、運転調節および機械仕様の3条件に支配される。空気動ジグの作用は給炭の成層と運搬の2つに大別できる。1回の脈動毎に、回分式に成層作用と運搬作用が行われ、脈動の繰返しによって、両作用は漸次進む。したがって

脈動による成層効果と脈動回数が成層精度を決定する。脈動による移動距離が移動速度を決定し、移動速度を速くすると、脈動回数が減少して精度が低下する。

脈動の効果は主として、上下の脈動流における粒子の挙動に関係し、移動速度は水平方向の流れにおける粒子の挙動に関係する。これら粒子の挙動は、一定機械仕様の下で、給炭性状に応じて、給炭量、給水量、空気圧（波高）および空気弁回転数等を調節することにより変化する。

ベッド粒子が成層するには粒子間の相対位置が入れ替える必要がある。したがって、それだけのベッドの空隙率が必要である。上昇ストロークでベッドが浮揚し、ベッドの空隙率が増大する。ベッドの変位が最高になる付近から、下降ストロークの間に、粒子は沈降速度差によって成層が行われる。ベッドの空隙率およびサイクルの時間は粒子の沈降速度に影響し、これらは空気圧（波高）および空気弁回転数によって変化する。

ベッドの箇々の粒子の沈降速度は、粒子混合体としてのベッド全体の干渉を受ける。ベッドの干渉は給炭の空隙率および平均沈降速度に影響され、給炭の空隙率、粒度分布および比重分布等の給炭性状によって変化する。

ベッド粒子は浮揚から着床の間に、水平方向の水流によって移動する。粒子の移動距離は給水量、空気圧（波高）および空気弁回転数によって変化する。

ベッドの箇々の粒子は、粒子混合体としての給炭速度を保ちながら、粒子それぞれの沈降速度およびベッドの干渉に応じて相対速度で移動する。したがってベッド粒子の粒度分布、比重分布等の給炭性状によって変化する。

以上のように、上下の脈動および水平方向の水流において、ベッド粒子は給炭量、給水量、空気圧（波高）および空気弁回転数により、給炭性状に応じて挙動し、成層および移動作用を行う。

* 昭和57年11月18日本会第69回例会において発表

** 株式会社永田製作所
昭和57年10月4日受理

3. 操 業 条 件

3.1 給炭の性状

主要な給炭の性状の分布表を表1に示す。表1の K は式1に示す値である。

$$K = \sum K_i M_i / \sum M_i \quad (1)$$

ここに M_i は着目粒子の重量, K_i は給炭性状のパラメータである¹⁾。ベッド粒子の干渉沈降の状態における沈降速度 (v_N) はニュートンの法則の範囲として考えると, 粒子の粒径 (d_i), 粒子の密度 (ρ_i) および懸濁液の密度 (ρ_s) との関係式は式2で表わされる。

$$v_N = c \{d_i(\rho_i - \rho_s)/\rho_s\}^{1/2} \quad (2)$$

ジグ槽内における係数 c は一定, $\rho_s \div 1.0$ とすると, K_i は式3で示される。

$$K_i = \{d_i(\rho_i - 1)\}^{1/2} \quad (3)$$

3.2 給炭量

試験したジグの給炭量および給炭速度を表2に示す。ベッド粒子は K_i の値に基いた相対速度で移動する。そ

図1 粒子の移動速度

の1例を図1に示す。 K_i の大きい粒子ほど少い脈動回数で成層する²⁾ が, 混粒選炭のジグでは, 脈動回数を多く必要とする K_i の小さい粒子ほど移動速度が速いので, 成層が不十分となり, 精度が低下する。

表1 給炭の性状

要 目	槽別	筒数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
給炭 空 げ き 率	1	53	0.386	0.015	0.414	0.364
	2	53	0.393	0.015	0.419	0.357
給炭 平均粒度 (mm)	1	53	14.71	5.91	32.67	6.38
	2	53	12.52	5.59	31.20	5.47
給炭 平均比重	1	53	1.471	0.127	2.024	1.315
	2	53	1.454	0.098	1.775	1.275
給炭 K	1	53	2.486	0.627	3.882	1.303
	2	53	1.999	0.568	3.866	1.149
廃石 平均粒度 (mm)	1	53	22.04	10.59	55.09	5.29
	2	53	13.48	7.71	45.69	3.47
廃石 平均比重	1	53	2.004	0.216	2.448	1.428
	2	53	1.703	0.229	2.307	1.293
廃石 K	1	53	4.305	1.101	6.312	2.026
	2	53	2.619	0.778	4.663	1.193
廃石量 (%)	1	53	20.71	11.55	46.60	1.80
	2	53	27.31	12.86	60.90	7.00
精炭 平均粒度 (mm)	1	53	12.52	5.59	31.20	5.47
	2	53	11.77	5.44	34.25	5.10
精炭 平均比重	1	53	1.574	0.127	2.024	1.315
	2	53	1.383	0.082	1.727	1.266
精炭 K	1	53	2.486	0.627	3.866	1.149
	2	53	1.762	0.527	3.830	1.103

表2 主要な操作条件

要 目	槽	筒数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
給 炭 量 (t/h)	1	53	141.6	67.7	345.0	41.5
	2	53	113.1	60.3	228.3	33.9
波 高 (mm)	1	53	79.2	18.7	120.0	40.0
	2	53	66.9	27.5	113.0	29.0
空 気 弁 回 転 数 (rpm)	1	53	45.8	4.2	61.0	40.0
	2	53	45.8	4.2	61.0	40.0
給炭平均速度 (m/m)	1	53	2.245	0.819	3.944	1.011
	2	53	1.946	0.847	3.715	0.670

K_i の大きい粒子の分布の多い給炭は K の値が大きい。細粒子に標準的脈動回数を与えると、 K の大きい給炭のベッド平均移動速度は低減する。すなわち K の大きい給炭ほど処理量は低減する。実用ジグの K と給炭速度および槽内滞留時間の関係を図2および図3に示す。ジグの処理量の指標として図2および図3から、選別室面積 (m^2) 当りの処理量 (t/h) を求めると図4となる。ただし選別室深さを0.43m, 第1槽給炭比重を1.57, 第2槽給炭比重を1.45 および給炭の空隙率を0.4として計算

図2 給炭速度

図3 ベッド滞留時間

図4 選別室面積当りの処理量

した。

3.3 給水量

ベッド粒子の運搬エネルギーは水流であるから、 K_i の大きい粒子の存在が多いほど、給水量は多く必要である。実用ジグでは図5に示すように、最大給炭粒度に相関性があり、最大給炭粒度の大きいほど給水量が多い。第2槽は給炭量が減少するので、運搬のための水量は理論的に必要ないが、網下への石炭粒子の迷い込みを防ぐ意味で多少給水する。一般的に第1槽で全給水量の80～75%給水している。

3.4 空気圧(波高)

空気圧は網室幅と空気室幅の比によって異なるが、試験したジグの空気圧は0.175～0.21 kg/cm² である。平均波高の分布を表2に示す。

粒子間の相対位置を入れ替えて成層するために、粗粒

図5 給水量

図6 第1槽の波高

子ほど粒子間の距離を大きくする必要があるので、ベッドの空隙率を大きくする。したがって図6に示すように、実用ジグでは最大給炭粒度 (d_{max}) の大きいほど波高が高い。図6の波高は第1槽の平均波高 (Δh_{w1}) で、 $\Delta h_{w1} = \sum \Delta h_i L_i / \sum L_i$ である。 Δh_i は各区の波高、 L_i は各区の長さである。

第2槽は給炭当りの水量が過大であり、精度を高くする意味から、波高を低くするが、粒子の粒度によって制限され、最大粒度の大きい給炭は第1槽とはほぼ同様である。第2槽と第1槽の波高の比率 ($\Delta h_{w2}/\Delta h_{w1}$) を図7に示す。波高が高いほど成層速度は速いが、精度の収れん性は波高が比較的低い方がよい。通常実用ジグでは給炭口から排出口にしたがって、波高を低く運転する。とく

図7 第2槽と第1槽の波高比

図8 空気弁回転数

に最終区は成層したベッドを正確に分離する目的から、可成り波高を低くする。

3.5 空気弁回転数

空気弁回転数の分布を表2に示す。空気弁回転数はジグ槽内の水の固有振動数の2～3倍で常用されている。処理量および成層速度の面から、固有振動数に対する倍率を比較的小さくして、低速が良いとする意見もある。しかしどの位の低速が正しいかということは、ジグの容量、給炭の性状によって異なるようである。選別室幅と空気室幅の比が、1:0.5のときの選別室幅 (W) と空気弁回転数を図8に示す。

4. 選別成績

4.1 選別精度の表示

現在比重選別に対する選別精度の表示法として、トロンプ配分率曲線と呼ばれる、所謂部分回収率曲線の分布の幅を尺度とする、テラ係数 E_p および不完全度 I が定着した考え方になっている。ジグのトロンプ配分率曲線は横軸を $\log(D-1)$ とする、対数正規分布であるとされ、対数正規分布の直線の確率が75%および25%になる、それぞれの分位点に相当する比重 (D_{75} , D_{25}) の差の半分

$$E_p = (D_{75} - D_{25})/2 \quad (4)$$

また不完全度 I は式5で表わされる。

$$I = E_p / (D_{50} - 1) \quad (5)$$

ここに D_{50} は確率50%の分位点に相当する比重、すなわち分離比重である。

4.1.1 トロンプ配分率曲線の対数正規分布性

試験した実用ジグの選別成績から、回帰検定によって求めたトロンプ配分率曲線の直線について、相関検定を行い、対数正規分布性を検定した。その結果を表3に示す。表3は相対粒度範囲³⁾ (R_d) と相関係数 (r_T) の関係を示した表である。 R_d は上のふるい目と下のふるい目の差を平均粒度で除した値である。

r_T の全平均は箇數430箇で0.962で、総括的に対数正

図9 R_d と r_T の相関図

表3 T 曲線の相関検定表

相対粒度 範囲 R_d	平均 R_d	試料 箇 数	平均相 関係数 r_T	r_T の 標準 偏差	r_T の 最大値 (MAX)	r_T の 最小値 (MIN)	MAX- MIN
0.1-0.5	0.312	29	0.974	0.038	0.999	0.853	0.146
0.5-0.7	0.627	56	0.971	0.031	0.998	0.832	0.166
0.7-0.9	0.773	65	0.966	0.059	0.999	0.686	0.313
0.9-1.1	0.977	95	0.967	0.056	0.999	0.614	0.385
1.1-1.93	1.164	62	0.963	0.041	0.998	0.753	0.245
1.3-1.7	1.556	59	0.957	0.053	0.999	0.836	0.163
+1.7	2.258	64	0.938	0.047	0.992	0.754	0.238
合 計	1.153	430	0.962	—	—	—	—

規分布すると考えてよいようである。しかし表3の R_d と r_T の平均値の相関性は図9に示すように、 R_d が大きくなるにしたがって r_T は低下する。

ジグ選別は粒度差によって分離比重および選別精度は相異なる。前者は分布の平均値であり、後者は分布の幅であるから、広い粒度範囲の粒子のトロンプ配分率曲線は複数の分布の平均値および幅をもつ分布の集合分布となるから、原則的には正規分布にならない。

測点の数を5箇とし、危険率1%以下の有意水準となる相関係数は0.96である。図9から r_T が0.96になる R_d は $R_d \leq 1.15$ である⁴⁾。ジグのトロンプ配分率曲線は $R_d \leq 1.15$ で対数正規分布すると考えられる。ジグの選別下限粒度を0.5mmとすると、対数正規分布する粒度区分は0.5~1.5, 1.5~4.5, 4.5~13.5, 13.5~40.5 mm 程度となる。

4.1.2 テラ係数 E_p および不完全度 I の数学的意味

テラ係数 E_p は正規分布の四分位偏差 (Q_T') である。ジグのトロンプ配分率曲線は対数正規分布であるから、その四分位偏差 (Q_T) は式6となる。

$$Q_T = 1/2 \{ \log(D_{75} - 1) - \log(D_{25} - 1) \} \\ = \log(D_{75} - 1) - \log(D_{50} - 1) \quad (6)$$

したがって、 $Q_T \approx Q_T'$ で、 $E_p \approx Q_T$ であるから、 E_p はトロンプ配分率曲線の分布の幅を正確に示す値とならない。

不完全度 I と Q_T の関係は式7で示される⁴⁾。

$$Q_T = \log \{ I + (I^2 + 1)^{1/2} \} \quad (7)$$

したがって I の値は四分位偏差と一定の関係を有し、 E_p および D_{50} で分布の幅を表示した値である。

確率84%および16%に相当する分位点の比重 (D_{84} , D_{16}) から確率偏差 (σ_T) は式8で表わされる。

$$\sigma_T = 1/2 \{ \log(D_{84} - 1) - \log(D_{16} - 1) \} \\ = \log(D_{84} - 1) - \log(D_{50} - 1) \quad (8)$$

試験から得た、 I , E_p および Q_T の値を横軸に σ_T を

とり、それぞれプロットすると図10となる。図のプロットの点は E_p を示していて、分散して前述の如く分布の幅を示す値でないことが解る。 I および Q_T はそれぞれ σ_T に直線関係にあり、 $Q_T/\sigma_T = 0.66$, Q_T と I は式7の関係となる。

4.2 選別精度の評価

従来空気動ジグの選別精度は操業条件の特性値として、粒度および分離比重等を用い、評価または予想されていた。この方法では運転調節の条件が考慮されておらず、処理量との関係も明らかでない。

選別する高比重粒子と低比重粒子それぞれの1回の脈動による、ベッド内におけるすべり速度⁵⁾ (流体の平均上昇速度に対する粒子の相対速度) から、それぞれの沈降距離 (S_H , S_L) を求め、一方両比重粒子の槽内の平均移動速度から、それぞれの脈動回数 (n_H , n_L) を求め、

図10 E_p , I , Q_T と σ_T の相関図

図11 第1槽の選別精度

下式で定義される成層効果係数 ϕ を操業条件の特性値とした。

$$\phi = S_H n_H - S_L n_L \quad (9)$$

S_H および S_L の計算過程で、粒子の比重および粒度、給炭の平均比重、平均粒度および空隙率、平均波高、空気弁回転数が条件として用いられる。

n_H および n_L の計算過程において、給炭速度、給炭平均比重、給炭の空隙率、粒子の粒度および比重、選別室の幅、長さおよび深さ、空気弁回転数が条件として用いられる。

試験した実用ジグの回帰検定によって求めたトロンプ配分率曲線の σ_T と ϕ の相関関係は式10で表わされる。

$$\sigma_T = \phi \times 10^Y \quad (10)$$

第1槽および第2槽ともに、危険率0.1%以下の有意水準で極めて高い相関関係にある。

式10に試験結果の σ_T を代入し、 σ_T に相当する ϕ の値を逆算して得た値 ϕ_c と ϕ の比 $\gamma (= \phi_c / \phi)$ と分離点高さ H_H (焼石ベッド高さ) の相関検定を行った。その結果両者は相関関係にあることが確かめられたので、 $\phi\gamma$ と σ_T の相関関係を検定した。その相関図を図11および図12に示す。いずれも式10の場合より相関係数は向上し、バラツキが少なくなった。

4.3 分離点高さの影響

分離点高さ H_H の σ_T に及ぼす影響を総括的に示すと、図13および図14の如くである。比較的波高の高い第1槽では細粒子ほど、 H_H の影響が大きく、波高の低い第2槽は粗粒子ほど影響を強く受けるように考えられる。

図12 第2槽の選別精度

図13 第1槽の分離点高さと精度

図14 第2槽の分離点高さと精度

4.4 粒子の粒度と分離比重

粒度差による分離比重の相異は製品の品位および歩どまりに影響する。一般に粒子の粒度が小さくなるにしたがって、分離比重は高くなる傾向にあるが、実際の選別成績は必ずしもそうでない場合がしばしばある。

試験した実用ジグの選別成績から、各ジグ毎に各粒度の D_{50} に等しい比重ですべり速度を計算し、その沈降距離 (S_s) を求め、最小粒度区分 (3~0.5 mm, 平均粒度の平均=1.5 mm) の沈降距離 ($S_{1.5}$) との比 $\delta (= S_s / S_{1.5})$ と粒子の粒度の関係を解析すると、 δ はジグサイクルの下降ストロークの時間、すなわち粒子の沈降時間に影響され、その時間が増加するにつれて、 δ は大きくなるが、10 mm 以上の粒子は δ の値が近似していて、相対沈降距離が等しい。10 mm 以上の粒子は沈降の法則に従って成層しているといえる。10 mm 以下で、とくに5 mm 以下の粒子は、粒度が小さくなるにしたがって、急激に δ が減少する。沈降の法則に従うとするより、分離比重は粗粒子に接近する傾向を示している。

δ を用いた計算例を図15 (第1槽) および図16 (第2槽) に示す。計算はいずれもベッド粒子の平均粒度を12 mm とし、ベッドの比重が1.4, 1.6および1.8, 空気弁回転数 (N_V) が55.2, 46.0および36.8 rpm の各ケースについて、波高の変化による分離比重の変化を求めた。

空気弁回転数、波高およびベッドの平均比重と分離比

図15 第1槽の分離比重

重等によって、粒子の分離比重は極めて複雑に変化するようである。

5. 結 言

空気動ジグの粒子の挙動は非常に複雑な要因に支配されていて、操業条件と成績の関係を正確に把握することは困難である。

本文は空気動ジグの作用を成層と運搬の2つに大別し、操業条件の特性値として、成層効果係数 ϕ を定義し、選別精度との相関検定、ならびに分離点高さの影響および粒子の分離比重について、実用ジグの試験結果から報告

図16 第2槽の分離比重

した。未だ不十分であるが、今後の空気動ジグの設計ならびに運転の一指針となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 田中 実：日本鉱業会誌，92〔1063〕，p. 619 (1976)
- 2) 麻生欣次郎他：25〔9〕，p. 375 (1957)
- 3) 麻生欣次郎：選炭，17〔31〕，p. 209 (1957)
- 4) 田中 実：日本鉱業会誌，96〔1111〕，p. 617 (1980)
- 5) 陣内靖介他：日本鉱業会誌，94〔1088〕，p. 712 (1978)