ハードグローブ試験機による粉砕能測定について

On the Measurement of Grindability by Hardgrove's Testing Machine.

麻生欣次郎*

Kinjiro Aso

森 祐行*

Sukeyuki Mori

1. まえがき

当研究室で粉砕性の測定にハードグローブ試験機を採用上げたのは昭和39年であり、当時問題となっていた炭鉱における粉じんの基礎研究として石炭の粉砕性を調べたのである。

ハードグローブ法は1932年、R. M. Hardgrove によって提案され、その後、1951年に正式にASTM.D-409¹⁾として採択され、試験機、試験法が標準化された。わが国においては、戦後の復興時における電力需要をまかなった石炭の微粉炭燃焼において、その粉砕性が問題となり、ハードグローブ法が測定に用いられた。

筆者らが本法を採用した理由は、まず測定対象が石炭であること、方法が簡単であること、また再現性がかなり良いことなどからであった。ところが実験を進めて行くうちにこの測定法あるいはその考え方自体にいろいろな問題点があることがわかってきた。

もともとハードグローブ法は、粉砕性測定法としては一種の簡便法であり、それも米国の電力用炭、すなわち高品位の比重の似かよった石炭に対して採用された方法であって、わが国のごとく、6500Cal 以上の高品位（低灰分、低比重）の石炭から、2～3,000Cal の低品位炭までを使用するような場合に対して、本法を適用することに問題があったのかも知れない。筆者らの研究対象も、広範囲の比重（1.2～1.9）の石炭であり、その後、炭鉱廃水中の懸濁粒子の問題から、硬中に含まれる鉱物も研究の対象となり、比重の影響その他いくつかの矛盾点に遭遇した次第である。

ハードグローブ法の原理は Rittinger の粉砕理論に基づいており、粉砕性指数（Grindability index） $G. I.$ として次式を基にしている。

$$G. I. = \frac{\left(\frac{\text{所定粒度の試料炭の粉砕による単位粉砕}}{\text{エネルギー当りの比表面積の増加量}} \right)}{\left(\frac{\text{所定粒度の基準炭の粉砕による単位粉砕}}{\text{エネルギー当りの比表面積の増加量}} \right)} \times 100$$

$G. I.$ は試料炭の基準炭に対する比として表わされているが、これは粉砕エネルギー測定が困難なため、これを消去するために比をとったものであり、根本は単位粉砕エネルギー当りの比表面積の増加量でもって粉砕性を表わすものである。消去するためには粉砕エネルギーを一定にしなければならない。このため所定の試験機（小型ボールレース型粉砕機）で、一定荷重、一定速度で一定回転回数（60回）だけ回転粉砕することにより、粉砕エネルギーを一定と見なしている。

試験条件として、試料の粒度をASTMフルイ目No. 16（1190 μ ）～No. 30（595 μ ）〔タイラー標準フルイおよびJIS規格では14～28メッシュとなる〕と一定にし、さらに試料重量を一定50 gとしている。

比表面積の増加量は、粉砕産物のフルイ分け結果から算出するが、この場合、最小フルイ目のフルイ下産物の粒度構成を一定と見なして計算を行なっている。さらに多くの実験結果から、比表面積の増加量 $\Delta A (= \frac{6}{100} \Delta S_v)$ がNo.200フルイ（74 μ ）のフルイ下量 W_g と次の関係があることを利用し、

$$\Delta A = K_1 + K_2 W \quad \cdots \cdots (1)$$

K_1, K_2 : 定数

$G. I.$ を求めるのに次式を用いている。

$$G. I. = 13 + 6.93 W \quad \cdots \cdots (2)$$

問題点を列举すると次のごとくなる。

昭和46年9月23日受理

・九州大学工学部採鉱学教室（〒812 福岡市箱崎町）

TEL. 092-64-1101

図1 粉砕試験機の粉砕部の構造

1.1 試料重量一定

ハードグローブ試験機の粉砕部の構造は図1に示すときのもので、ボールの圧砕によって試料が粉砕される。比重の異なる試料では、重量一定の条件では試料容積が異なり、当然粉砕に関与する粒子の相対的な量が変わることが考えられる。粉砕条件を一定にするためには、試料容積を一定にすべきであろう。

1.2 表面積測定法とくに実験式

粉砕産物の粒度分布から比表面積の算定を行なっている。このこと自体はとくに問題はないが、No.200フルイ通過量から比表面積増加量を出す実験式、引いてはG.I.の計算式については、検討の要がある。すなわちNo.200フルイ下の粒度構成を考慮せずに一定の比表面積を与えているが、この数値に対してSlomanら²⁾も疑問を提出しており、また一定値を与えること自身に問題がある。

1.3 粉砕エネルギー一定の条件

試料の如何に関せず、前述のごとき条件でもって粉砕エネルギー一定としているが、検討する必要はないか。

1.4 Rittinger の粉砕法則

根本問題となるが、粉砕性を表わすのにこの法則に従って良いか否か。

以上の諸点について検討した結果⁵⁻⁸⁾について述べてみる。

2. 試料重量一定に対する検討

ハードグローブ試験機の粉砕機構から考えて、試料容積を一定にすべきであることは当然のことと思われる。この点は吉村³⁾も土井⁴⁾も指摘していることであるが、他の粉砕試験でも同様であり、Bondの仕事指数(Work index)測定の場合でも、ボールミルへの試料装入量は容積一定としている。

筆者らは念のために、試料の量を変えた場合の影響を

図2 試料の重量を変えた場合の影響(比表面積増加量との関係)

図3 試料の重量を変えた場合の影響(増加表面積との関係)

実験してみた。すなわち石炭試料を比重 1.2 から 1.9 まで 0.1 おきに比重分離し、試料重量を 30 g から 10 g おきに 70 g まで変えて粉砕試験を行なってみた。他の試験条件はハードグローブ法そのままであり、比表面積増加量もこれにならって計算した。ただし計算に当たっての各粒度ごとの表面単位(Surface unit, 粒度の逆数)は cm 単位とし、-270 mesh の数値としては 1,000 一定とした。なお形を球とした場合の比表面積(単位容積当り)を算出して比較した。図2に各実験結果を示す。各比重の試料とも試料重量が変わると比表面積増加量が大いに変わることがわかる。図3は試料全体の表面積増加量と試料重量との関係を示したものである。この場合は図2に比較して試料重量の影響は比較的小さい。このことはハードグローブ試験機の粉砕機構をよく示しており、ある量以上になると粉砕に関与する粒子の量がほぼきまってくることを意味している。

ハードグローブ法における比表面積増加量の計算は単

図4 試料の容量を変えた場合の影響

位容積当りである。図2における試料重量変化の影響は、その試料の容積が変化したためであり、この点から当然試料容積を一定とすべき結論がでる。図3の結果を見ると、試料容積を一定とすべきであることはもちろんであるが、全表面積増加量で粉砕性を比較することも測定誤差を少なくする一方法とも考えられる。

試料の量(容積)がある量以上になると、粉砕に関与する粒子数が飽和点に達することが考えられる。この条件では粉砕によって生ずる全表面積増加量が試料の量と無関係に一定となる。すなわち、次式において ΔS_v が一定となるから $\log \Delta S_v$ と $\log V$ とは傾斜-1の直線関係となる。

$$\Delta S_v = \Delta S_t / V$$

$$\therefore \log \Delta S_v = \log \Delta S_t - \log V$$

図4は $\log \Delta S_v$ と $\log V$ との関係を図示したものであり、比重の小さな石炭試料の場合、容積が大きくなると、上述の傾向を示しているようである。

容積を一定とすべき理由として、さらに次のことがいえる。すなわち、比表面積増加量が単位容積当りである以上、加えられる一定の粉砕エネルギーも一定容積の試料に対してでなければならない。

3. 表面積測定法

比表面積の計算法そのものには問題ないが、フルイ分

図5 Permeasizer による-280Mesh 産物の平均粒径
粉砕条件、荷重：601b 試料容量：80cc 回転速度：3.13秒/回

け試験に使用する最小網目のフルイ下の表面単位を一定と見なす点に問題がある。ハードグローブ法ではASTM No.300フルイ下のそれをインチ単位で1,000としているがSlomanとBarnhartはフルイ下粒子をアンドレアゼンピペット法で粒度構成を測定し、その結果から石炭についての表面単位として2,800~3,400の範囲にあることを知りながら実質的には3,000一定として差しつかえないとしている。

筆者らは、前記比重別の石炭試料について、タイラー標準フルイ270メッシュ以下のものについて、沈降天秤法で粒度構成を測定した。その結果からSlomanらと同様の方法で表面単位を計算すると、比重1.2~1.3と、1.3~1.4の試料に対してインチ単位で約1,400となるのに対し、1.4以上の比重の各試料は2,500と相当大きな差があることがわかった。このことから最小フルイ目網下の産物に対して、単純に一定の表面単位を採用することには問題があることがわかる。

以上の試験は回転回数60回と一定で行なったものに対してのものであるが、その後、回転回数をいろいろ変えて(20~400回)粉砕実験を行なったほか、石炭以外の鉱物に対しても実験した。-270メッシュの粒子については、上述の結果から直接比表面積を測定するため空気透過法(島津Permeasizer)を使用した。この方法による比表面積とフルイ分けによる粒度から求める比表面積とは同じではないので、前者から得られる粒径を網目粒径に換算し、これから表面単位を求めた。図5に試料別に粉砕回転回数を変えた場合の空気透過法による比表面積径の変化の状態を示す。C-Mは三井三池炭の比重1.250~1.275のもので、他の鉱物は数種類測定したものの中か

ら1つずつ選んだものである。図から明らかなごとく、試料によって非常に差があり、一定とするわけにはいかず、適当な方法で測定することが必要であることがわかる。

以上のことから、ハードグローブ法における $G.I.$ 計算式の基となった、比表面積増加量と -200 メッシュの重量との関係を表わす実験式(1)は再検討する必要がある。

4. 粉碎エネルギー

粉碎に要したエネルギー測定のため、回転軸にかかるトルクを測定することにした。最初、直接回転軸にトルク変換器をセットすることを考えたが、この場合60lbの荷重が、径8mmの変換器軸にかかるため、強度的に問題があり、補助シャフトを設け、これにトルク変換器をセットした。(本号・ハードグローブ試験機による石灰石の粉碎性、図2参照)すなわち回転軸を上下に切断し、ここにスラストベヤリングを組みこみ、回転力は補助シャフトを経て、粉碎部へ伝わる。この場合、トルク変換器から粉碎部に至る間の伝導損失が考えられるので、試料を入れない場合の空運転状態でトルクを測定し、これを伝導損失として補正した。

実験した試料の中、鉱物ごとに代表的なものを選んで、回転回数とトルクとの関係を図6に示した。図からわかるように、回転回数が増すにつれて一般的にトルクが減少する傾向がある。また試料の種類によってトルク値が異なり、図7でもわかるように60回転で粉碎エネルギー一定とするわけにはいかない。

図6から各回転回数に対する積算エネルギー値を求めたのが、図7である。厳密にはいえないが、積算エネルギーは、回転回数の少ないうちは、ほぼ回数に比例するとみて良いが、回転回数が100～150回を超えると、1回転当りのエネルギーが少しずつ減少してくる。これは粉碎機構が変化してくることを意味するのではあるまいか。

5. Rittinger の法則に対する検討

ハードグローブ法による粉碎性測定は、Rittingerの法則を基としている。粉碎仕事量(粉碎エネルギー)の定義にいろいろ問題の点があるようであるが、筆者らは前記のトルク測定から求めた粉碎エネルギーを採用し、これと比表面積増加量との関係を調べてみた。実験は、同一試料について回転回数をいろいろと変え、上記の関係を求めたものである。図8にこの結果を示す。

図から、この試験機による粉碎の初期の段階では、粉碎エネルギーと比表面積増加量とは比例関係にあるとみなして良いようである。比例関係の成立する範囲は鉱物の

図6 粉碎時の回転軸にかかるトルク値の変化
粉碎条件 荷重: 60lb 試料容量: 80cc 回転速度: 3.13秒/回

図7 回転回数と粉碎仕事量の関係

図8 粉碎仕事量と比表面積の増加量との関係

種類によって変るが、全体を通じて回転回数で100～150回くらいまでは大丈夫のようである。ハードグローブ法で回転回数60回としているのは以上の点から妥当と考えられる。

回転回数を多くして粉碎が進んでくると鉱物によって程度の差はあるが、以上の比例関係が成立せず、エネルギー増加の割には比表面積の増加量が漸次減少してくる傾向が見られる。この原因としては、微粒粉碎物の生成、増加に基づく粉碎機構の変化（ある場合には粘着性の大きい微粉が盛上りがあってボールの通過する道の両側に壁を作っているような場合がある）とも考えられる。また田中による限界比表面積説を表わしているとも考えられる。

6. その他の問題点

以上述べたことのほかに、試料の粒度を 1,190~590 μ に規定してあることにも問題がある。その1つは、原試料からこの粒度の試料を調製する場合、得られた試料が原試料の粉碎性を代表しているか否かである。均質な試料の場合は比較的代表的試料が得やすいが、不均質な場合、調整の過程で砕けやすい部分が -590 μ へ多く逃げたりすることが考えられる。

次に粒度と粉碎性の関係がある。均質な試料（同一鉱物）の場合でも結晶構造、内部き裂などの関係で粒度によって粉碎性（破碎性）が異なってくる。筆者らの経験でも、石灰石の粉碎性測定の際、実験試料を調製する段階で、塊状試料をジョークラッシャーで破碎したが、この場合の破碎しやすさと、ハードグローブ試験機による粉碎性とが逆の場合が見受けられた。

したがってハードグローブ試験機による粉碎性は、あくまでその試料粒度におけるものであり、また粉碎機構が圧力と摩滅による場合であることを十分認識し、他の粒度あるいは他の粉碎機構（たとえば衝撃）の場合には、その数値の適用に注意を払うべきである。

7. あとがき

ハードグローブ法についていろいろ問題点を述べたが、これらの点を改良してもなお、この方法は粉碎性を測定する場合、比較的簡単な方法である。現在当研究室では

次のごとき方法で粉碎性を測定している。

7.1 試料粒度

J I S 14~28メッシュ

7.2 試料の量

容積一定とする。100ccのメスシリンダを80ccで切断し、これをマスとして見掛容積80ccとしている。マスへの供給法を一定条件とすれば、僅少の誤差範囲で一定量の試料が得られる。

7.3 粉碎産物の比表面積

J I S 標準フルイ（28, 36, 48, 70, 100, 150, 200, 280メッシュ）を用いロータップフルイ振とう器でフルイ分ける。この場合試料によっては200, 280メッシュのフルイに別の粗粒子を入れて目詰りを防ぐ。— 280メッシュにつき島津製のPermeasizerで比表面積径(d_{P-280})を求める。これを一定の方式⁸⁾

$$: \left(d_{S-280} = \frac{1.24}{2.06} \times \frac{d_{P-280}}{d_{P+280}} \times d_{S+280} \right) \text{ でフルイ目}$$

粒径 (d_{S-280}) に換算、粒子を球形として単位容積当りの比表面積を算出する。フィードの比表面積との差から比表面積増加量を求める。

7.4 粉碎エネルギー

回転回数は60回とし、粉碎と同時にトルクを記録し、これから粉碎エネルギーを算出する。今後装置を改良して積算計をつける予定である。

7.5 粉碎性指数

粉碎エネルギー(Kg-m)に対する比表面積増加量(cm^2/cm^3)の比でもって粉碎性指数とする。この場合、粉碎エネルギーは一応、見掛容積80ccの試料に対するもので、この値も単位容積当りに直した方が良くとも考えられるが、粉碎エネルギーが果して試料の中のどれだけに対して作用しているかなど問題があり、一応以上のごとくそのままの数値を用いた。

以上の方法で今まで当研究室で測定した石炭、鉱物についての粉碎性指数については本号に別に発表してあるので参照されたい。

引用文献

- 1) A. S. T. M. Designation : D409-51
- 2) Sloman, H. J. and Barnhart, A. C. : *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 56, F. S. P., 773 (1934)
- 3) 吉村慶英 : 燃料協会誌, 39, 722 (1960)
- 4) 土井滋章 : 選炭, 11 [51], 52 (1961)
- 5) 麻生欣次郎, 諫山幸男, 河本徳, 原剛 : 九州鉱山学会誌, 33, 239 (1965)
- 6) 全上, 34, 217 (1966)
- 7) 麻生欣次郎 : 選炭, 17, [92], 383 (1967)
- 8) 麻生欣次郎, 森祐行, 河本徳, 原剛 : 浮選, [40], 31 (1970)