

# カルシウム・シリサイド粉の摩擦帯電現象に関する研究

鳥 取 孝 太 郎

Research on Frictional Electrification Phenomena of Calcium-Silicide Powder

Kōtarō TOTTORI

An arrangement shop which was pulverizing calcium-silicide and collecting the powder was exploded by the fire powder at Fusiki Factory of Azuma Kako Co. Ltd. on 19th May, 1957. It is uncertain how the explosion took place, but it may be possible that the ignition was caused by the spark discharge of the static charge given in the course of collecting the powder by the friction, as the calcium-silicide powder as the wheat powder. Static charge given to the powder in the mixer was experimentally studied, and leaf-electrometer connected to the mixer showed that the maximum voltage was over 3000V. The r. p. m. of the blade in the mixer was changed and powders of calcium-silicide, wheat, carbon, aluminium, magnesium and polyvinyl-chloride were used. The calcium-silicide powder was in the range from 100 mesh up to 300 mesh down.

## 〔I〕 緒 言

近来粉体を製造する工業の種類が増加とその量産化に伴い、その工程中摩擦による静電気を発生する機会が多く、従つて静電気を点火源とする爆発火災の事故が起り易く、被害も逐次増加の傾向がある。昭和29年1月22日日清製粉株式会社鶴見工場の小麦粉製品貯蔵タンクの爆発火災事故が発生したので、通産省電気試験所<sup>(1)</sup>が中心となり、該原因の総合的調査研究が実施せられたのが、わが国の粉末帯電現象の実用的研究の最初であろう。その基礎的実験研究では小麦粉に帯電する原因は大部分タンクの壁又は底との摩擦であるとされ、その実験の範囲内で次の最大諸量が測定された。

小麦粉の摩擦帯電量	16.2 $\mu\text{C}/\text{kg}$	空間電荷密度	0.153 $\mu\text{C}/\text{m}^3$
空間電位	3,900V	粉塵密度	11.8 $\text{g}/\text{m}^3$
小麦粉の電位	8,200V		

筆者も本県において最近この種製造工業が増加の傾向にあり、その調査研究を痛感していた際、たまたま去る5月19日東化工株式会社伏木工場のカルシウム・シリサイド粉砕工程に於ける収塵装置の爆発による災害事故が発生したので、偶々筆者に該粉末の帯電現象の有無について研究調査を依頼された。該爆発事故発生による被害箇所はインペラブレーカーで粗粒に粉砕する主工程ではなく、粉砕によつて生じた微粉を回収するため、サイクロン収塵装置に微粉を風送する吸引送風機の吐出側矩形型パイプが最も被害が顕著であつた。斯様な被害状況に鑑み、若しこの災害事故の原因が摩擦による帯電現象によるならば、該送風機で粉体を風送する際粉体とファンとの接触摩擦による静電気であるとの推定で実験を進行した。

尚粉体の爆発現象は起爆条件及び伝播条件の二条件が同時に満足した時に起り、その起爆原因が静電気にあるとすれば、その粉体の帯電エネルギーが最少点火エネルギー以上であるとき爆発の可能性が考慮される。カルシウム・シリサイド粉（以下 Ca-Si 粉）の最少点火エネルギーは明らかにされていないが、その粉末の点火温度が  $600^{\circ}\sim 700^{\circ}\text{C}$  であること並びにその反応の類似性よりみて、

既報の文献に示されている第一表<sup>(1)</sup>のマグネシウム又はアルミニウム粉と同程度の 20~30mjoule と見るのが妥当であろう。従つて本研究においては Ca-Si 粉の帯電性について、そのエネルギーが 20~30mjoule 程度に達する可能性の有無について特に重点をおき、問題となる粒度の影響について比較的詳細に検討すると共に小麦粉その他二、三の粉体とも比較検討を行った。

表-1 空気中に於ける粉体の爆発特性<sup>(1)</sup>

粉 体	粉 塵 の 点火温度 °C	電気火花に よる最小点 火エネルギー mjoule	下 部 爆発限界 g/m <sup>3</sup>	爆 発 最大圧力 atm	圧力上昇速度 atm/sec		電気火花によ つて点火する 場合爆発に必 要な O <sub>2</sub> の最 少量 %
					平 均	最 大	
Zirconium	a	15	40	3.4	99	340	b
Magnesium	520	20	20	4.9	300	320	b
Aluminium	645	20	35	6.1	146	390	3
Titanium	680		45	3.5	51	112	b
Rosin	390	10	15	3.8	85	200	14
Phenolic resin	500	10	25	4.2	92	210	14
Polyethylene	450	80	25	5.6	27	85	15
Allyl alcohol resin	500	20	35	4.6	119	240	—
Cellulose propionate	460	60	25	4.5	92	160	—
P-Oxyaenzaldehyde	430	15	20	3.9	146	210	—
Hard rubber ; Crude	350	50	25	3.9	58	230	15
Coal	510	40	35	3.1	24	54	16
Sulphur	190	15	35	2.8	48	133	11
Phenothiazine	540		15	2.9	41	99	16
Cornstarch modified	470	40	45	4.9	71	146	—
Soap	430	60	45	4.1	45	88	—
Aluminium stearate	400	15	15	4.2	51	140	—

a : Zirconium powder を室温の空气中に散乱させると、或る条件では粒子間の静電気放電のため点火する。

b : O<sub>2</sub> 減量試験は 空気-CO<sub>2</sub> 混合気中で行つた。 Zirconium, Magnesium 及び或種の Magnesium-Aluminium alloy では、純粋な CO<sub>2</sub> 中でも点火が生ずる。

〔Ⅱ〕 実験方法及び実験装置

帯電粉体の爆発火災の点火源となるべきエネルギーは装置の静電容量を一定とすると、粉体の発生静電々圧の自乗に比例する。故に静電気を発生せしめその電圧を測定する為に第1図の如き実験装置<sup>(2)</sup>を考案した。該装置の攪拌部は東芝製ミキサー 100V 140W ガラス容器約 1l のものを改作して

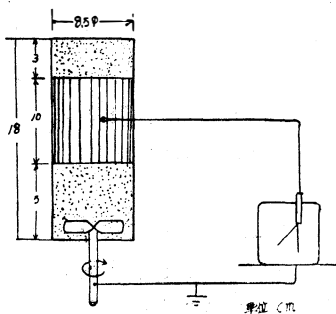


図-1 本実験装置

羽根を送風型に代えた。但し羽根の材質を金属性（鉄製）の場合と絶縁性（P.V.C）の場合とし材料による摩擦帯電現象を比較した。又回転速度は印加電圧により制御し、該ガラス容器内に試料を適量入れて攪拌し静電気を発生せしめ、回転速度に応じ帯電粉末群は容器内で上昇浮遊する。

帯電々圧の測定はガラス容器に約 650cc, 10cm 巾の錫箔帯を附着せしめ、箔検電器を使用して、この攪拌容器内に生じた浮遊帯電粉末群の静電々圧を測定する。静電々圧はこの箔検電器の直読法即ち予め測定すべき静電々圧を印加された時の錫箔の開きとの関係を直流電圧を用いて第2図の如き較正曲線を求めおき、

この錫箔の反撥角度によって求めた。この箔検電器の最高指示電圧は 3000V 程度である。

さて容器外側の錫箔帯と箔検電器とを約 60cm の導線で接続した回路の大地に対する静電容量 C を測定すると約 14pF の値を得た。

容器錫箔帯内に発生した電気量 Q は

$$Q = CV \text{ coulomb} \dots\dots\dots(1)$$

であり、生じた電界のエネルギー W は

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 \text{ joule} \dots\dots\dots(2)$$

の関係があるから、検電器の標示静電々圧と誘導した電気量及び電界エネルギーの関係を示すと第 3 図の如くである。

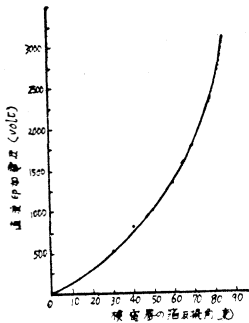


図-2 印加直流電圧と箔の反撥角の関係

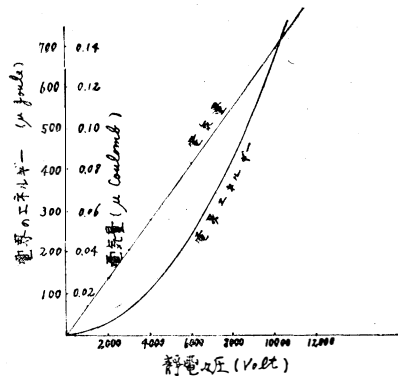


図-3 静電々圧と電気量及び電界エネルギーの関係

又実験に使用した Ca-Si 粉の化学組成は第二表の如くで、その粒度別分布状態は第三表の如くである。

表-2 供試 Ca-Si 粉の分析値

成分	Ca	Si	Fe	Al	C	P	S
%	31.58	56.32	9.36	1.01	0.68	0.02	0.03

表-3 供試 Ca-Si 粉の粒度分布

mesh	20~35	35~60	60~80	80~100	100~150	150~200	200~250	-250
分布 %	0.00	7.03	8.27	4.65	17.06	11.37	30.50	27.12

〔Ⅲ〕 実験結果

(i) 金属性攪拌羽根 (2枚) による Ca-Si 粉の帯電に及ぼす影響

Ca-Si 粉末の粒度分布状態は前記の如くであるので粒度別帯電状態を測定した。先づ該粉末を 100mesh up, 150mesh, 200mesh, 250mesh, 300mesh 及び 300mesh down の 6 種について乾燥篩別したものを 50g を攪拌金属羽根 2 枚の前記ミキサー容器に入れ、回転数 4,900r.p.m, 7,900r.p.m., 9500r.p.m 及び 10,700r.p.m と順次変化させて、その帯電々圧を検電器の箔反撥角度より測定した。結果は第 4 図の如くである。尚測定値は同一試料でも大気湿度、温度等の外的条件で異なるので、日を改めて数回繰返しその平均値を示してある。

以上の実験により Ca-Si 粉の摩擦による静電々圧発生現象につき次の一般常識的事実が確認された。

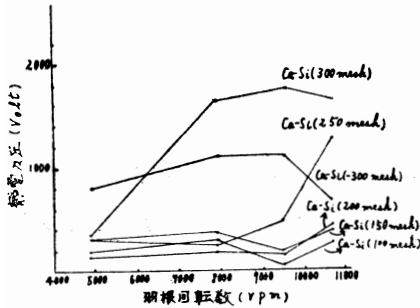


図-4 Ca-Si 粉の粒度による帯電特性 (金属羽根 2枚)

表-4 実験に供した各種粉体の粒度

mesh	小麦粉	P.V.C粉	ブリーズ炭粉	A'粉	Al粒	Mg粒
20					% 44.0	
28					45.0	
35					6.1	
48					3.7	
-48					1.2	
	%	%	%		平均 60mesh	
65	0	2.7	3.7			
100	0	25.0	1.2			
120	0	19.3	1.2			
150	12.0	11.5	3.8	平均 5μ		
200	24.0	8.2	21.3			
250	40.0	16.7	35.0			
--250	24.0	16.6	33.8			

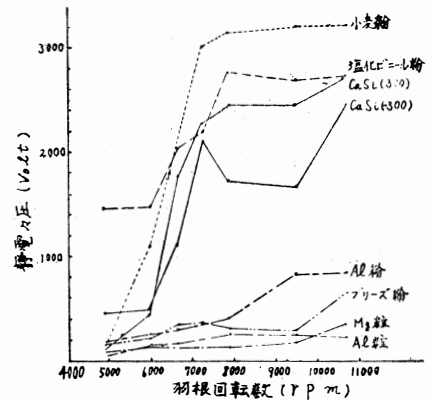


図-5 各種粉体の帯電特性 (金属羽根4枚)

(1) 実験測定結果は測定日より異なるが同一資料、同じ日に於いてはその帯電傾向は何れも同一である。

(2) 羽根回転数の増加、即ち摩擦頻度の多い程静電々は高くなる。

(3) 粉末が微粉化するに従って静電気の発生量が増大し、300mesh前後の粉末が最も帯電する傾向が大きい。

(ii) 金属性攪拌羽根 (4枚) による Ca-Si 粉と二、三の粉体との比較

試料は第四表に示す粒度を有する小麦粉、ポリ塩化ビニール粉、ブリーズ炭粉、Al 粉、Al 粒及び Mg 粒について前記 Ca-Si 300mesh 及び 300mesh down と比較した。この場合試料 30g を前記攪拌容器で金属羽根を 4 枚使用して実験し、その結果は第五図に示す。

実験結果は前項と同様な傾向を示す他、特記すべき事は Ca-Si 粉が小麦粉及び塩化ビニール粉の如き不導体と殆んど同程度の静電々圧を発生している事である。

(iii) 絶縁性羽根 (4枚) による Ca-Si 粉と二、三の粉体との比較

(i) 及び (ii) の実験において、ガラス容器内で攪拌上昇浮遊する場合、粉体と羽根との摩擦帯電の外粉体と容器内壁との摩擦帯電の有無も考慮せられるので攪拌羽根として絶縁性 (p.v.c 製) 材料を用いてその摩擦による静電々圧を測定して、その影響を検討した。

試料は (ii) の実験に用いた Ca-Si 粉 300mesh と -300mesh、ポリ塩化ビニール粉、ブリーズ炭粉及び Al 粒とを比較した。この場合も亦試料は 30g で攪拌羽根はポリ塩化ビニール製四枚羽根を使用し、実験した結果は第 6 図に示す。

この場合 (ii) の第 5 図と比較すると攪拌羽根の 7000~10,000 回転前後における静電々圧は、ポリ塩化ビニール粉では平均 266 % の減少、ブリーズ炭粉では 570 % の増大、Al 粒では 366 % の増大を示し、Ca-Si 粉 300mesh では 118 %、同じく -300mesh では 179 % の増大を示した。この事実より帯電現象は容器壁よりも攪拌羽根の材質の影響の顕著なることが判明した。

更に容器壁の摩擦帯電程度を再確認するために同様の装置の羽根の上部に 50mesh 程度の金網を設



け、羽根を回転送風し乍ら、Ca-Si 粉 250mesh 30g を容器上部より挿入して、羽根の回転数の変化に対する静電々圧を測定したのが第7図である。同図は金網の有無の場合を比較したもので、粉体と容器壁との摩擦帯電現象は本実験程度では極めて微弱なることが判明した。

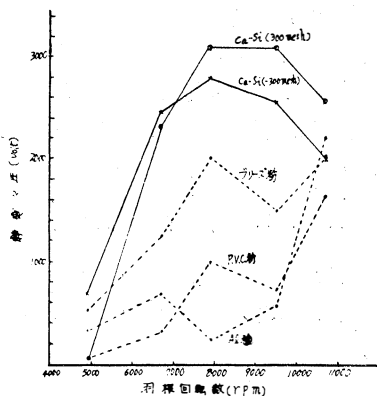


図-6 各種粉体の帯電特性(絶縁羽根4枚)

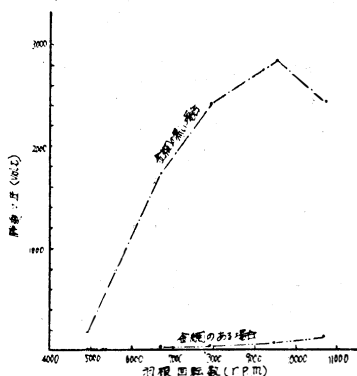


図-7 Ca-Si 粉と羽根との摩擦の有無の帯電特性

(iii) 電気量及び電気エネルギーの計算

Ca-Si 粉の単位体積及び単位重量に対する電気量及び電気エネルギーを実験結果より推定する。例えば〔Ⅲ〕-(ii)の攪拌羽根回転数 7,900r.p.m の場合を検討するとその指示電圧は 2,500V であるから、第3図より箔容器 0.65l 内の電気量  $Q_1$  は約  $0.035\mu\text{coulomb}$ 、電界のエネルギー  $W_1$  は  $50\mu\text{joule}$  であり 1l 当りのエネルギーは凡そ  $77\mu\text{joule}$  となる。また該容器 1l 内における帯電浮遊する粉末を40%程度と推定すると、帯電粉 1kg 当りの電気量  $Q_{K1}$  及び帯電エネルギー  $W_{K1}$  は下記の如く  $4.5\mu\text{coulomb}$  及び  $5.6\text{mjoule}$  となる。

$$Q_{K1} = 0.035\mu\text{coulomb} \times 1000 / 0.65 \times 0.4 \times 30 \approx 4.5\mu\text{coulomb} \dots\dots(3)$$

$$W_{K1} = \frac{1}{2} \times 4.5 \times 2500 \approx 5.6\text{mjoule} \dots\dots(4)$$

然るに電気試験所の研究によると小麦粉の場合最大値として静電々圧8,200V、摩擦帯電量は16.2  $\mu\text{coulomb}$ の値が得られている。〔Ⅲ〕-(ii)の実験において Ca-Si 粉は小麦粉と同様な帯電性質を示している故、仮りにある適合条件の下で 8,200V に達したとすると同じく第3図より  $Q_2 = 0.114\mu\text{coulomb}$ 、 $W_2 = 470\mu\text{joule}$  を得、下記の如く 1kg 当り電気量  $Q_{K2}$  及び帯電エネルギー  $W_{K2}$  は  $14.6\mu\text{coulomb}$ 、 $60.0\text{mjoule}$  である。

$$Q_{K2} = 0.114\mu\text{coulomb} \times 1000 / 0.65 \times 0.4 \times 30 \approx 14.6\mu\text{coulomb} \dots\dots(5)$$

$$W_{K2} = \frac{1}{2} \times 14.6 \times 8200 \approx 60.0\text{mjoule}$$

〔Ⅳ〕 東化工伏木工場使用装置に関する静電氣的考察

さて最後に昭和32年5月19日現在 東化工株式会社伏木工場 Ca-Si 粉碎工場において使用していた第8図に示す粉碎装置について、上述の結果を基礎として静電氣的考察を加えてみる。

該粉碎装置及び粉碎方法は第8図の如くで爆発事故発生の被害個所は 10IP インペラーブレーカーによる粗粒を粉碎する主工程ではなく、粉碎によつて生じた 100~300mesh 前後の微粉を回収するため、7.5IP 吸引送風機で風送している No. 2 及び No. 3 サイクロンの捕集装置である。特に吸引

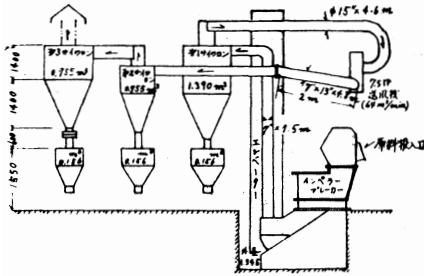


図-8 Ca-Si 粉碎装置概要

粉碎法：インペラーで粉碎されたものは、エレベーターで上に運び、篩機で篩分ける。サイクロンは装置の集塵用であり、エレベーターの下部及び頂部よりファンで排気し排気系統中に設置してある。

1日5時間操業して篩分機にて1,500 kg 処理され -40 mesh が 600kg 8~40mesh サイズが 900kg 採取される。第1サイクロンには 200kg 第2サイクロンには 20~50kg 第3サイクロンでは 5kg 程度が得られる。

平常よりも Ca-Si 粉を一時に吸引したものと推測され、今仮りにその量を平常時の3倍とすると帯電粉塵密度は3倍となつて該捕集系統に充満浮遊し、そのエネルギーは毎分

$$2,500V \text{ のとき } 5.6 \times 0.133 \times 3 \times 0.4 = 0.9 \text{mjoule} \dots\dots\dots(9)$$

$$8,200V \text{ のとき } 60.0 \times 0.133 \times 3 \times 0.4 = 9.6 \text{mjoule} \dots\dots\dots(10)$$

となる。

何れの場合にせよ、補集装置への吸引送風機は6枚羽根64m<sup>3</sup>/minの送風量を有し、風送微粉と羽根との摩擦による帯電電圧及び帯電量は軽視できないことは上記の実験結果より明瞭で、その発生静電気が蓄積されたとするならば、充分放電スパークによる点火源となり得る可能性について考慮に値する結果を示している。尚事故当時の気象状況は第四表の如くで静電気の発生蓄積に全く好条件であり得ることもうかがわれる。

表-4 事故当時の気象状況

5月	3時		9時		15時		21時		天候
	気温	湿度	気温	湿度	気温	湿度	気温	湿度	
16日	8.3	92	15.9	59	19.3	54	12.6	62	晴
17日	8.6	88	22.1	45	25.6	31	17.6	65	"
18日	12.3	82	22.3	51	24.1	49	19.0	69	曇
19日	16.7	73	18.8	79	19.2	72	16.7	87	晴後雨

註 1. 事故時刻は19日10時40分である

2. データーは伏木測候所による

(V) 結 論

送風機の吐出側矩形型パイプが破裂し最も被害も顕著である故、今ここに該パイプにおいて帯電による爆発の原因があつたと仮定しよう。

該パイプは全長2m、ターボファン近くで90°彎曲し且つ10°の傾斜があり、構造上粉末が沈積し易く、事実その底部にCa-Si粉末が6cm程度堆積していた事が証明されている。すると該部分におけるCa-Si粉の見掛比重を1.50とするとその重量は

$$1.50 \times 18 \times 6 \times 2 \times 100 / 100 = 32.4 \text{kg} \dots\dots\dots(6)$$

で、これが絶縁層を通じて帯電していたとし、帯電粉量は実験の場合と同じく40%と仮定するとそのエネルギーは次の如くである。

2,500V のとき

$$5.6 \times 32.4 \times 0.4 = 72.5 \text{mjoule} \dots\dots\dots(7)$$

8,200V のとき

$$60.0 \times 32.4 \times 0.4 = 776.0 \text{mjoule} \dots\dots\dots(8)$$

又 No. 2 及び No. 3 サイクロン装置の一日の(実働5hr)平均処理量を40kgとすれば、偶然当時の作業状況によると、煙突等の粉塵を掃除した直後であつたので

Ca-Si 粉の静電氣的考察について特にその粒度の影響及び他の粉体との比較について若干の基礎的実験を行い、静電気による Ca-Si 粉の爆発の可能性について考察を加えた。Ca-Si 粉は粒度の細かい程帯電性がよく且つ小麦粉の如き絶縁体とほぼ同程度の静電氣量を発生することを明らかにし、該当設備の爆発の原因としては、Ca-Si 粉の帯電による可能性は充分考慮されるべきものであるとの結論を得た。

わが国においても、漸く安全工学が工業教育に重視されるに至っている現況に鑑み、静電現象も亦その重要なるファクターなる事を今更乍痛感し、本実験がその研究の端緒となれば幸である。尚本研究は東化工株式会社の委嘱によつて行つたもので、その発表の機会を与えられた御厚意に対し深く謝意を表する。

#### 文 献

1. 小麦粉貯蔵タンク爆発事故について 電気試験所：研究報告第 549 号（昭和30年 8 月）  
（小麦粉摩擦帯電現象に関する研究）
2. 粉体の静電々圧測定について 鳥取：電気学会北陸連合大会予稿（昭和32年10月）