技術解説

静電気概念の再整理

― ものづくり実務を見据えて ―

奈良県立奈良高等学校・京都大学サイエンス連携探索センター　仲野　純章

1. はじめに

静電気は日常生活のあらゆる場面に存在し，瞬間的な痛みを感じる放電現象を始めとして，我々は日々その存在を認識することができる。大半の場合，静電気がもたらす影響は軽微であるが，時に，爆発や火災といった災害の引き金ともなることから，決して無視のできない存在である。2001年には，セルフスタンドで給油中であった自動車の給油口付近から静電気起因の火災が発生し，これを受けて消防庁はセルフスタンドの安全対策・注意喚起を強化してきたが，その後も同様の火災が起こり続けている[(1)]。また，その発生機構や特徴に未解明な部分が多いとされているが[(2),(3)]，我々にとって非常に危険，且つ身近な存在である落雷（雷放電）も静電気によりもたらされる現象の一つである。

このように我々の日常生活と大小様々な関わりを有する静電気は産業活動とも深く関わる。とりわけ，ものづくり現場では，静電気は安全面や品質面に関わる重大な問題と直結することが多く，その存在感は大きい。

例えば，化学・エネルギー産業などでは，静電気を原因とする爆発や火災が例年繰り返し発生し続けており[(4),(5)]，この場合，材料・設備の焼失や被災者発生といったように，影響が甚大化することが珍しくない。最近では，2017年に静岡県の化学工場で発生し，多大な人的被害（死亡者2名，重傷者2名，軽傷者11名）を出した事故が比較的記憶に新しい。これは，樹脂製品の包装作業場付近で静電気を着火源とする粉塵爆発[(6)]が発生し，その火炎が建屋内の危険物・可燃物に引火・類焼し，重大事故に発展したものである[(7)]。また，ホースを使って有機溶剤を小分けする際などに，静電気が有機溶剤に直接的に作用し，爆発や火災を引き起こす事例も多い[(8)]。

一方，電気電子産業でも静電気の影響は大きく，この場合，主に品質問題への影響が際立つ。例えば，光源やディスプレイ関連の製造工程では，塵埃付着による品質異常は大きな問題となり，静電気がその原因の一つとなる[(9)]。図1は，LED照明の廉価品を製造販売する海外企業（中国，広東省）で製造された光源モジュール「マルチチップCOB（chip on board）」において見られた品質異常事例である。マルチチップCOBでは，基板上に配列した多数のLEDチップを金ワイヤで連結し，その上から蛍光体樹脂が充填されるが[(10)]，この事例では，蛍光体樹脂の表面付近（図1中D1）や内部（図1中D2）に塵埃が吸着・混入している。D1のような塵埃は，光源としての光学特性に影響を及ぼしかねず，D2のような塵埃は，光学特性への影響だけでなく，LEDチップや金ワイヤなどと接触して電気回路の損傷を招く危険性もある。図1中の塵埃D1，D2が静電気起因で吸着・混入したとは断定できないものの，このような類いの品質異常が見られる場合，ものづくりの環境としては，静電気対策の意識や体制が不十分な状況であることが大いに疑われる。電気電子産業では，上記のような静電気による塵埃の吸着・混入やそれに伴う電気回路損傷に

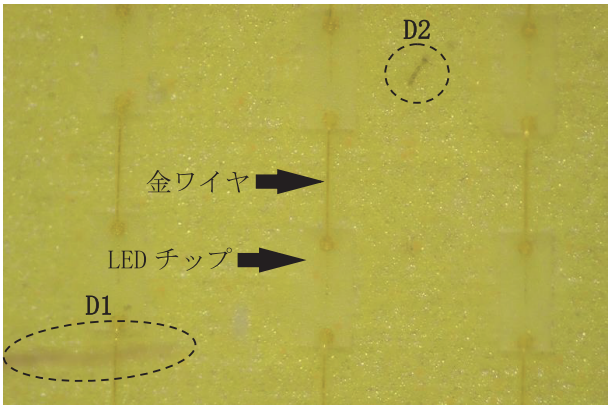

図1　マルチチップCOBの品質異常例;
(D1)樹脂表面付近の塵埃，(D2)樹脂内部の塵埃

加え，ESD（electrostatic discharge：静電気放電）による電気回路損傷も大きな問題となる。昨今，生産拠点，ひいてはそれを抱える企業全体の競争力強化にISO9001やIATF16949といった国際的な品質マネジメントシステム規格の認証取得が半ば必須条件となっており，電気電子産業などでは，これらの規格の要求事項に応える形でESD対策を盛り込むことが一般的であることからも，その問題の大きさがうかがえる[(11),(12)]。

以上触れてきたように，静電気は，静電気放電などの電気的作用と吸着などの力学的作用という大きく二つの側面からものづくり現場に影響を与えているといえる（図2）。

安全で高品質なものづくりを実践していくには，静電気の特性に対する正しい認識とそれに基づく適切な対処が欠かせない。昨今のものづくり現場では，ISOなどの規格認証取得・維持のため，ハード面から静電気対策を講じ，且つその整備・運用状況を内部監査するチェック体制が敷かれることも多

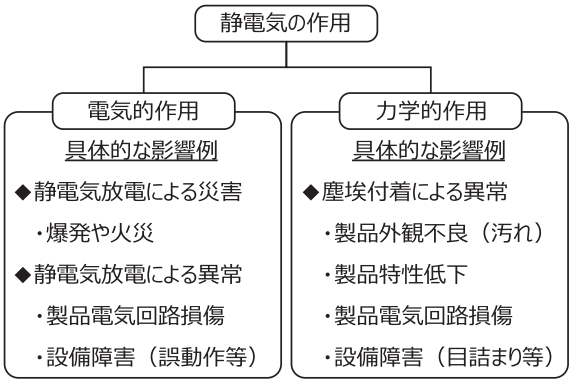

図2　ものづくり現場に影響を与える静電気の作用

い。しかしながら，ものづくり実務者一人一人，あるいは内部監査員一人一人が静電気の基本を理解しているかというと疑問が残る。本稿では，ものづくり実務を意識しながら，静電気についての基本的な内容を見つめ直したい。

2. 静電気概念の基本事項

静電気概念についての詳細な解説は他書に譲り，ここでは，ものづくり実務者の基本リテラシーとして求められる程度の内容を再確認するに留める。

2.1　静電気の発生と帯電

静電気は，帯電した物体（帯電体）に分布している流れのない電気などと定義され[(13)]，動電気とも称される流れのある一般の電気と対義的に捉えられる[(14)]。帯電は，接触した物質間で電子やイオンといった電荷担体が一方から他方に移動することで，過剰電荷が生じ，留まることで起こる。一定の理論的説明が可能な導体や半導体の帯電機構に対して[(15)]，有機高分子材料を始めとする不導体の帯電機構はより複雑で，不明な点も多いとされるが，いずれにしても，電荷担体に働く駆動力は，電荷担体に対するそれぞれの電気化学ポテンシャルの差であると考えられている[(16)]。例えば，2つの異なった金属が接触する場合であれば，仕事関数の小さい金属から大きい金属に向けて電子が接触界面を移動し，電子の電気化学ポテンシャル，すなわちフェルミレベルが一致して電子の移動が終了する。その結果，仕事関数の小さい金属が正に，仕事関数の大きい金属が負に帯電する。

帯電に至るプロセスは様々であり，表1に例示するように，帯電プロセスに基づいて帯電を細分化することがある。このうち，ものづくり現場で多く見られるものとしては，剥離帯電や摩擦帯電が挙げられよう。

剥離帯電はテープ類やフィルム類を剥がす際に帯電が引き起こされるものである。これは接触帯電と根本的には同一であるが，剥離というプロセスにより顕在化する帯電であることから剥離帯電と称され

表1　帯電プロセスに基づく帯電の細分化例

名称	帯電プロセス
接触帯電	接触
剥離帯電	剥離
摩擦帯電	摩擦
衝突帯電	衝突
攪拌帯電	液体または粉体の攪拌
噴出帯電	断面積の小さい開口部からの流体の噴出
流動帯電	伝導率が低い流体の配管を通じた輸送

る。剥離帯電における帯電量は剥離速度に依存するとされ[17),(18)]，図3に相関イメージを示すように，帯電量は剥離速度の増加に伴って増加し，漸次一定値に近づく傾向を示す。

一方，摩擦帯電は接触面を擦り合わすことで起こる帯電である。摩擦帯電の主要な要素も接触帯電であるとされている。物質表面は微細な凹凸が多いため，通常，一回接触するだけでは十分な帯電量に至らない。しかし，摩擦を行うことで接触面積が増加し，帯電が顕在化する。このように，接触帯電の効果を接触面積の増加により顕在化させるものが摩擦帯電であると大まかに捉えることができる。ただし，より詳細に摩擦帯電を見た場合，別の帯電要素として加圧作用による圧電気（ピエゾ電気）の発生や摩擦熱による効果もあるが，本稿では割愛する。

物質には正に帯電しやすいものと，負に帯電しやすいものがあり，それぞれの符号に帯電しやすい物質を実験的な評価に基づき序列化した表を帯電列という（表2[19)]）。帯電列の正側にある物質と負側にある物質を擦り合わせると，前者は正に，後者は負に帯電する。帯電列内で離れている物質同士ほど，発生する静電気は大きくなり，いわゆる「親和性の悪い組み合わせ」となる。ただし，化学反応や汚れ付着により表面状態が変質するなど，帯電列で想定

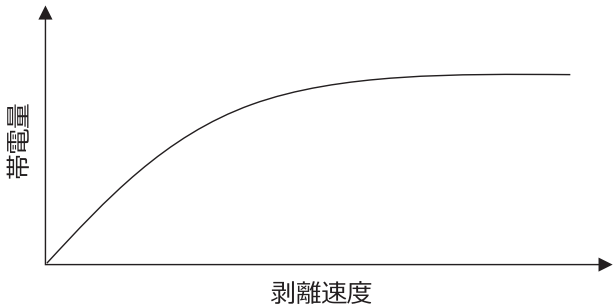

図3　剥離帯電における剥離速度と帯電量の相関イメージ

表2　帯電列

金属	繊維	天然物質	合成繊維
（＋）	（＋）	（＋）	（＋）
		人毛・毛皮	
		ガラス	
	ウール		
	ナイロン		
	レーヨン		
鉛			
	絹		
	木綿	綿	
	麻		
		木材	
	ガラス繊維		
亜鉛			
アルミニウム			
		紙	
			エボナイト
鉄			
銅			
ニッケル			
金		ゴム	ポリスチレン
	ビニロン		
白金			ポリプロピレン
	ポリエステル		
	アクリル		
			ポリエチレン
		セロハン	
			塩化ビニル
（－）	（－）	（－）	（－）

されている状態と等しくない状態になっていることもあり，必ずしも帯電列通りの順序や親和性の程度とならない可能性がある。また，温度や湿度，摩擦方法によっても帯電列で示された序列が変化し得るため[20)]，帯電列はあくまで一つの参考情報として認識するに留めるのが賢明である。

なお，単に接触させるだけでは帯電が起こり得ない同一物質同士であっても，それらを擦り合わせた場合には帯電し得ることを忘れてはならない。これは，同一物質の間で摩擦（あるいは，それに準じたプロセス）を起こす際，互いに全く対称的といえない条件とした場合に起こるもので，非対称摩擦といわれる。例えば，同一物質であるが，その表面粗さが異なるもの同士を擦り合わせる場合などがこれにあたる。また，表面状態や大きさも等しい同一物質同士を擦り合わせる際，図4のように一方を固定し，その一点のみを他方で擦りつけるような場合も非対称摩擦に該当する。この場合，摩擦面積が広い方，すなわち固定側では温度上昇の度合いが小さく，摩擦面積が狭い方，すなわち運動側では温度上昇の

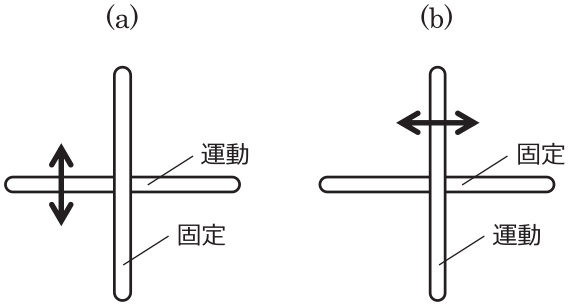

図4　同一物質同士による非対称摩擦の一例；一方を固定し，他方を(a)上下，または(b)左右に運動

度合いが大きくなり，この摩擦熱の差異が電荷担体の移動を生み，帯電に至る。この時，図4の（a）と（b）のように，固定側と運動側を入れ替えると，二物体の帯電の符号はそれぞれ逆になる[21]。

2.2　静電気の電気的作用

静電気の代表的な電気的作用としては静電気放電が挙げられる。これは，正負に分かれた電荷が再結合する現象（緩和現象）が極めて短時間で行われるものであり，一般に閃光と音の発生を伴う。通常の放電と異なり，静電気放電では継続的な電荷供給がない，あるいは極めて少ないため，強い放電の持続は見られない。ただし，こうした閃光や音が確認できる場合は，局部的に3000Vを越す電圧が発生している[22]。例えば，ガソリンの主要成分であるペンタンの蒸気は，空気と1.4～7.8%の範囲で混合すると爆発性となり，エネルギー0.28mJの静電気放電で着火する可能性が生まれるとされるが，これは，人体が2000Vに帯電した場合の静電エネルギーにほぼ等しい[23]。つまり，我々が感知できるような放電があれば，これによってガス・蒸気への着火が十分起こり得るということである。

なお，帯電した電荷が時間の経過に伴いどのように減少するかを具体的に議論する指標の一つに，緩和時間がある。当初（時刻 $t=0$），ある点に電荷密度 ρ_0 で電荷が存在していたとすると，電荷密度 ρ の時間的変化は，電流密度 i を用いて式（1）のように表される（$\mathrm{div}\, i = \partial i_x/\partial x + \partial i_y/\partial y + \partial i_z/\partial z$）。

$$\mathrm{div}\ i = -\partial\rho/\partial t \tag{1}$$

ここで，電界強度を E，抵抗率の逆数を電気伝導率 κ とすると，式（2）が成立する。

$$i = \kappa E \tag{2}$$

一方，電界強度 E と電束密度 D，誘電率 ε の間には，式（3）で示される簡単な関係が成り立つ。また，電磁気現象の基本法則はマックスウェルの方程式と呼ばれる4種の数式で表現されるが，そのうちの一つが式（4）で表される「電界に関するガウスの法則」である。これは，閉曲面 S 全体にわたる電束密度 $D=\varepsilon E$ の面積積分は閉曲面 S の内部にある電荷の総和に等しく，閉曲面 S の外部にある電荷は寄与しない，というものを微分形で表現したものである。

$$D = \varepsilon E \tag{3}$$

$$\rho = \mathrm{div}\ D \tag{4}$$

以上の式（2）～（4）を式（1）に代入すると式（5）を得る。

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\kappa t/\varepsilon\right) \tag{5}$$

ここで，ε/κ が緩和時間であり，式（5）から導かれる式（6）より，電荷密度は時定数 ε/κ で指数関数的に減少することが分かる。緩和時間 ε/κ は帯電している電荷の消失時間や静電気放電の瞬間電流を評価する際の目安となる[24]。

$$\partial\rho/\partial t = -\kappa\rho/\varepsilon \tag{6}$$

2.3　静電気の力学的作用

静電気の力学的作用については，「同符号の電荷間では斥力が，異符号の電荷間では引力が働き，それらの力の大きさは，双方の電荷の量に比例し，電荷間の距離の二乗に反比例する」という，いわゆるクーロンの法則が基本となる。この関係性から明らかなように，静電気による力学的作用を及ぼし合う二物体が存在する場合，それらの力学的作用は互い

に近いほど大きく，距離を隔てていくに従って急激に減衰する。

ある帯電体が存在する場合，それに対する相手物体は，大まかに分類して以下1)～4)の4パターンである。そして，帯電体の相手物体が1)～4)いずれであったとしても，結論的に，それら二物体間に力学的作用が発生することとなる。

1) 帯電した導体
2) 帯電した不導体
3) 帯電していない導体
4) 帯電していない不導体

まず，帯電体の相手物体が1)や2)の場合，二物体間で力学的作用が生じること，すなわち共に同符号の電荷を帯びている時は斥力が働き，互いに異符号の電荷を帯びている時は引力が働くということは，クーロンの法則から直接的に理解できる。

一方，帯電体の相手物体が3)の場合，導体内で起こる静電誘導（electrostatic induction）により，二物体間に引力が生じる。帯電体はその周りに電界を形成するが，それが帯電していない導体を貫くと，導体内の自由電子は電界と逆方向に動く。その動きは導体内に電界が存在している限り継続し，最終的に，導体内には自由電子が偏在することとなる。この時，帯電体に近い導体表面に帯電体と異符号の電荷が，遠い導体表面に帯電体と同符号の電荷が等量現れる。このような現象のことを静電誘導といい，静電誘導の結果，帯電体と帯電していない導体の間には引力が働くこととなる。

そして，帯電体の相手物体が4)の場合，不導体内で起こる誘電分極（dielectric polarization）により，二物体間に引力が生じる。誘電分極は，一見，静電誘導と似ているが，全く別の現象であるといえる。静電誘導は導体内の自由電子により引き起こされる現象であるが，誘電分極を起こす不導体には自由電子が存在しないからである。ただし，不導体内部に存在する原子核と電子は固定されているのではなく，ほんのわずかに変位できる。また，H_2Oなどのように，元々分子中に電荷の分布の偏りがある極性分子もある。いずれにしても，原子核は正の電荷を持つので電界の方向に力を受け，電子は負の電荷を持つので電界と逆方向に力を受ける。その結果，不導体の両端に異符号の電荷が等量現れる。このような現象が誘電分極であり，誘電分極の結果，帯電体と帯電していない不導体の間には引力が働くこととなる。

帯電体と帯電していない導体，そして帯電体と帯電していない不導体という組み合わせでは，以上のように，「引力が発生する」という同様の結論になるが，仮に，引力を作用し合う二物体が接触するに至った場合，その後の挙動には大きな差異が生じることも認識しておきたい。挙動の差異を示すイメージとして，図5，6を示す。図5は負に帯電した帯電体と帯電していない導体球が互いの引力により接近し，接触する前後の位置関係を模式的に示したものであり[25]，図6は負に帯電した帯電体と帯電していない不導体球が互いの引力により接近し，接触する前後の位置関係を模式的に示したものである[25]。帯電体の相手物体が帯電していない導体球の場合，帯電体に引きつけられた導体球は，帯電体との接触後，帯電体の負電荷の一部を受け取り，負に帯電した帯電体との間に斥力が生じる結果，互いに離れる

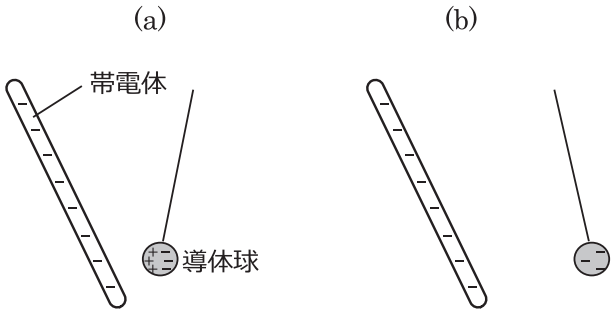

図5　負に帯電した帯電体と帯電していない導体球の位置関係イメージ；(a) 接触前，(b) 接触後

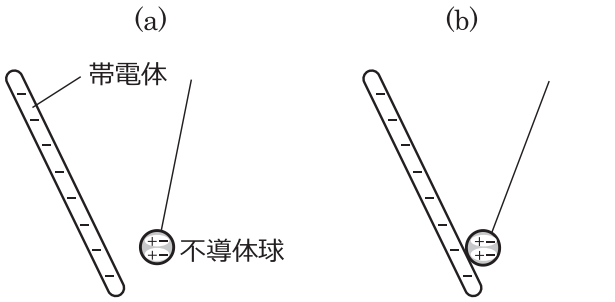

図6　負に帯電した帯電体と帯電していない不導体球の位置関係イメージ；(a) 接触前，(b) 接触後

動きを見せる（図5）。それに対し，帯電体の相手物体が帯電していない不導体球の場合，帯電体に引きつけられた不導体球は，帯電体との接触後，導体球の場合のような電荷の移動が起こらないため，不導体球は帯電体に接触したままとなる（図6）。

3. 静電気概念と理科教育

我々の多くは，義務教育段階から静電気概念に関連する学習を経験してきた。ここでは，静電気概念に関する理科教育での学びを客観的に振り返ると共に，そうした学習を通じて形成されかねない誤った認識の危険性を指摘したい。

3.1 理科教育の中で扱われる静電気概念

日本の理科教育では，比較的早い段階から静電気概念に関連した学習が始まり，系統的に学習がなされる。具体的には，小学校第3学年で電気概念について初めて触れ，中学校第2学年で静電気の概要を学んだ後，高等学校でその学びを発展的に深める。小・中・高等学校学習指導要領には，静電気に関連した単元として，小学校理科第3学年「電気の通り道」[26]，中学校理科第1分野「静電気と電流」[27]，高等学校物理「電荷と電界」[28]が規定されている。表3は，各学校段階でどのような内容を学習するかといったことを示す。表3に示すように，静電気概念の前提知識となる電気概念は，小学校で初めて扱われ，電気を通すつなぎ方と通さないつなぎ方があるということを学ぶ。また，その延長として，電気を通すものと通さないものがあるという，導体・不導体の概念もこの段階で登場する。中学校では，一般的な電気回路における電流の実態は電子の流れであることに初めて触れ，学習範囲が静電気に及ぶ。そして，帯電体が及ぼす力についても具体的に扱うようになる。ただし，そこで扱う力学的作用は，あくまで「帯電体同士」の力学的作用に関するもののみであり，不完全なものである。高等学校になると，静電誘導や誘電分極まで扱うようになり，帯電体が及ぼす力について，より幅広く扱うこととなる。

表3　静電気概念に関連した各学校段階での学び;
○：学習する，△：一部学習する，×：学習せず

学習内容	学校段階		
	小学校	中学校	高等学校
電気	○	○	○
導体・不導体	○	○	○
電子	×	○	○
静電気の発生・帯電	×	○	○
帯電体が及ぼす力	×	△	○

3.2 学習経験に伴う誤った認識の形成の危険性

中学校学習指導要領では，学習内容として「異なる物質同士を擦り合わせると静電気が起こり，帯電した物体間では空間を隔てて力が働くこと」が規定されている[27]。こうした文言，すなわち「異なる物質同士を」や「帯電した物体間では」といった文言が強調された学習を経験した学習者には，「静電気は同一物質同士では発生しない」，あるいは「帯電体同士でなければ，二物体間には力は働かない」といった誤った考え方が形成されることが懸念される。このうち，後者の懸念について実態調査した事例を以下に紹介する[29]。

当該調査は，小・中・高等学校を通した静電気学習の総和的位置づけともなる高等学校において，静電気学習に臨む学習者122人を対象に，帯電体が及ぼす力についての認識状態を調査したものである。調査では，図7のイラストに「中心に回転軸が設けられたストローを負に帯電させ，その一端に別の物体（帯電していない不導体，帯電していない導体，帯電体）を近づけた時，ア～ウのうちどのような動きをするか」という問いを添え，回答を選択肢から選ばせると共に，回答根拠の記述も求めた。同様の認識調査は，指導の進捗に伴い，その後追加で2回実施した（正答やその根拠の提示は最終認識調査後

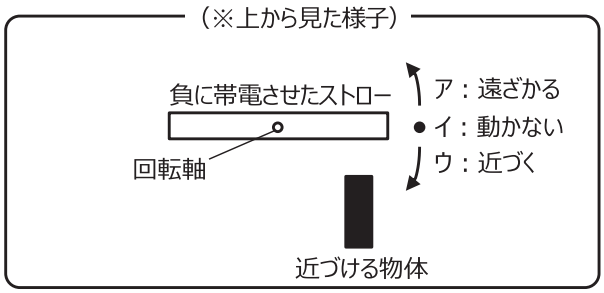

図7　帯電体が及ぼす力に関する認識状態を調査するため使用したイラスト

に行った)。

まず，帯電体と帯電していない不導体の間の関係性については，高等学校での静電気学習を開始する直前段階で，81.8%の者が引力や斥力といった力学的作用が生じないと誤って認識しており，正しい認識の下で正答を導く者は3.3%に留まった。当該関係性は，小学校では勿論のこと，中学校でも扱われないため，このような回答状況は妥当な結果であると理解できる。しかし，この調査の後，静電気に関する基本的事項について知識伝達型の一斉指導を行ったところ，正答率は18.2%に増加したものの，依然として低い水準に留まった。そして，学習前同様の回答根拠に基づいて「動かない」と回答する者が多く残り，知識伝達型の一斉指導を経た後でも，帯電体と帯電していない不導体の間で力学的作用が発生しないという認識が根強く残存する状況が確認された。このように誤った認識が強固に残存することから，学習前の学習者には，単に帯電体と帯電していない不導体の関係性についての知識が欠如していたということだけではなく，これら二物体間で力学的作用が発生しないという認識が形成・保有されている可能性が推察された。つまり，中学校では，静電気の力学的作用として帯電体同士の関係性についてのみ取り上げられ，その関係性が強調されがちであることから，帯電体と帯電していない不導体の間で力学的作用が発生しないという誤った認識の形成に至る，という可能性は十分考えられる。誤った認識を強固に抱いている学習者に正しい科学的概念を獲得させるには，自分の思考や行動を客観的に把握し認識する「メタ認知的活動」に取り組ませることが有効であることは様々な研究で明らかにされている[(30)-(32)]。本事例の場合，帯電体と各種物体間との力学的作用について，個人予想とこれに基づく討論（図8(a)）を通じて自己の考え方を高次な視点から意識化させた上で，実験による検証（図8(b)）を行わせることで正しい科学的概念を練り上げる，というメタ認知的活動を組み込んだ協働学習（以下，協働学習と略記）に取り組ませた。このような協働学習を経ることで状況は改善し，認識調査に対する正答率は18.2%から83.9%へと大きく増加し，その増加度合いに統計的有意差が確認された（$p < 0.001$）。

(a)　(b)

図8　協働学習風景；(a) 討論，(b) 検証

一方，帯電体と帯電していない導体の間の関係性についても，高等学校での静電気学習を開始する直前段階で，24.8%の者が引力や斥力といった力学的作用が発生しないと誤って認識しており，正答率は26.4%とやはり低い状況が確認された。これは，帯電体と帯電していない不導体の間の関係性同様，誤った認識の存在が影響している可能性が否めない。その後，知識伝達型の一斉指導を経ることで，正答率は26.4%から66.1%に増加するが，やはりその増加度合いは限定的である。そして，協働学習後，正答率は66.1%から94.1%へと大きく増加し，その増加度合いに統計的有意差が確認された（$p < 0.001$）。

最後に，帯電体同士の関係性については，高等学校での静電気学習を開始する直前段階から，学習者は概ね正しい認識を持っており，正しい根拠に基づいて正答を導いた者は97.5%に上った。当該関係性は中学校学習指導要領で規定された通りの内容既習であるため，ごく当然の結果であるといえる。

以上のように，「帯電体同士でなければ，二物体間には力は働かない」といった考え方が大規模に確認され，それらは誤った認識として強固に保有されているがゆえに一方向的に知識を伝達されるだけでは容易に修正されないという実態がうかがわれた。静電気概念に関する学習を経験してきた我々としても，自らの中にこうした誤った認識が無意識的に残存していないか，内省的に見つめ直したいものである。

4. ものづくり実務と静電気

ものづくり実務において，静電気に関わる諸問題を回避するには，第一に，静電気を極力発生させ

ない工夫が求められ，仮に静電気を発生させたとしても，帯電させないようにする必要がある。ここでは，静電気に適切に対処するアプローチの概略を作業者側と設備・材料側の両面から確認したい。

4.1　作業者側からのアプローチ

ものづくり現場において物質同士が触れ合う場面は，既述内容から明らかなように，いずれも静電気の発生源となり得る。中でも，作業者が着用する衣服は大きな発生源となる。例えば，表2の帯電列で示したように，衣類の中ではウールとアクリルは非常に悪い組み合わせといわざるを得ない。こうした衣類の摩擦による静電気の発生・帯電を防ぐには，帯電防止服を着用するのが望ましい。その際，帯電防止機能を十分発揮させるためにも，内側に着用しているシャツ等がはみ出さないようにすることや破れのあるような状態で作業をしないということが重要である。また，著しい汚れがある場合も，帯電防止機能の低下を招くため避けねばならない。作業者の帯電については，上記のように作業者自身に静電気の発生源がある場合以外に，作業者と別物体との間に発生源がある場合もある。例えば，作業時に椅子を使用するのであれば，作業者と椅子との間での静電気発生は珍しくない。

作業者の体にたまった静電気を逃すためには，静電靴の使用が簡便である。この際も，靴底の汚れは機能を低下させるために注意を要する。体にたまった静電気を速やかに消滅させるためには作業床を導電化する必要もある。このような床は一般的に帯電防止作業床などと呼ばれるが，100MW以下の漏洩抵抗を有するものでなければならない。適切な機能を発揮するよう，専門業者による設置と保守・点検がなされることが望ましい。

帯電防止作業床の機能が使えないような場合は，帯電防止用リストストラップを利用することで，帯電防止を図ることができる。これを使用する際，リストバンドの金属部分を肌に密着させるなど，基本的な機能を理解して適切に使用する必要がある。金属部分が素肌に密着していない場合や作業服の上から装着するなど，形式的に帯電防止を装っているだけになっていないか，今一度確認したい。

なお，安全性や品質を追求するものづくり現場ではあるが，とりわけ海外などでは，その地域特有の事情にも意識を向ける必要があろう（図9）。

図9　民族衣装が目立つものづくり現場（インド，ウッタラーカンド州）

4.2　設備・材料側からのアプローチ

設備や材料に関しても，まずは，静電気発生防止を心がける必要がある。例えば，設備設計や工程設計の段階で，以下1)～4)に例示するような静電気発生を抑制する工夫も考えたいところである。しかしながら，様々な制約でそのような事前検討は十分なされないことが多く，現実的には，「発生させない」手立てよりも「帯電させない」手立てが主流になるものと推察される。

1) 接触面積や圧力，回数を小さくする
2) 接触分離速度を小さくする
3) 表面状態を清浄に保つ
4) 静電気の発生がより小さい材料を選定する

設備に「帯電させない」手立てとしては，発生した静電気を大地経由で消滅させるよう，アース（接地）をとることが基本となる。帯電防止用の接地極を設けることが難しい場合，既存の構造体や配管（地中の鉄骨や水道管など）を接地極として利用する手段も考えられるが，いずれにしても，帯電防止作業床同様，所定の帯電防止機能が発揮されるように専門業者を通じた施工が望ましい。ただし，設備によっては，大きな動きがある場合や不導体の場合など，アースをとることが適切でない場合も多い。

そのような場合でも，除電器（イオナイザ―）を用いて過剰電荷を中和し，帯電体の除電を行うことは可能である。

5. おわりに

静電気は，ものづくり現場のあらゆる場面で発生し，様々な対象（材料，部品，製品，作業者，設備など）に影響を及ぼす。安全で高品質なものづくりを実践するためには，静電気に対する適切な対処を施す必要があり，そのための対処手段は世の中に多種存在する。しかし，こうした対処手段を活用しながら静電気に関わる諸問題を回避する大前提として，ものづくり実務者が静電気の基本を理解していることが求められる。

本稿では，静電気概念について，その基本事項や我々が抱きがちな誤った認識，あるいはものづくり実務との関連性について概観した。詳細には踏み込めていないため，本稿を契機に，自ら関係する産業にクローズアップして，静電気との付き合い方を改めて深く考えて頂ければ幸いである。

＜参考文献＞

(1) 消防庁危険物保安室：消防の動き，572(2018)，34.
(2) 牛尾知雄：日本物理学会誌，71(4)(2016)，235－238.
(3) 織笠桂太郎：静電気学会誌，32(1)(2008)，37－45.
(4) 松倉邦夫：安全工学，52(5)(2013)，318－323.
(5) 太田潔：住友化学技術誌2018,(2018)，48－59.
(6) 土橋律：粉砕，61(2018)，55－61.
(7) 荒川化学工業株式会社富士工場印刷インキ用樹脂製造棟爆発火災事故調査委員会：荒川化学工業株式会社富士工場印刷インキ用樹脂製造棟爆発火災事故調査報告書,(2018)，1－96.
(8) 遠藤雄大，山隈瑞樹：安全工学，56(5)(2017)，362－373.
(9) 山本稔：クリーンテクノロジー，14(7)(2004)，13－19.
(10) 成田巧，伊藤優輝，下西正太：豊田合成技報，57(2015)，20－26.
(11) 株式会社ジャパンディスプレイ品質保証ガイドライン―車載用JDI供給者様用2017版―（https://www.j-display.com/company/procurement/data_quality/japanese/J0-Quality_Assurance_Guideline_For_Suppliers_VerFY2017_10_AUT.pdf#search=%27ISO9001+IATF16949+%E9%9D%99%E9%9B%BB%E6%B0%97%27）(accessed 2019.9.11).
(12) 一般財団法人日本電子部品信頼性センター―ESD管理システム認証―（http://rcj.or.jp/esd-controlsystem-2）(accessed 2019.9.11).
(13) 國友正和，滝川昇，井上邦雄，牧島一夫，河本敏郎，黒田楯彦，小林雅之，田原輝夫，橋本道雄，増渕哲夫：物理，数研出版，(2014)，202.
(14) 小田哲治：真空，45(8)(2002)，626－632.
(15) 村田雄司：表面技術，56(8)(2005)，436－441.
(16) 葛西昭成：電気学会誌，115(1)(1995)，41－44.
(17) 竹中治夫：高分子，1(8)(1952)，9－15.
(18) 土田英俊，北島昌夫，岡本重晴，篠原功：工業化学雑誌，69(4)(1966)，690－694.
(19) 産業安全研究所：静電気安全指針，産業安全技術協会，(1988)，3.
(20) 大宮哲，佐藤篤司：雪氷研究大会講演要旨集，(2010)，108.
(21) 竹中治夫，荻野孝也；油化学，6(6)(1957)，299－308.
(22) 社団法人日本船舶電装協会：電装作業安全衛生ハンドブック，(1999)，44.
(23) 独立行政法人産業安全研究所：産業安全研究所安全ガイド，(2004)，6.
(24) 伊達広行：北海道大学医療技術短期大学部紀要，10(1997)，85－92.
(25) 数研出版編集部：改訂版フォトサイエンス物理図録，数研出版，(2016)，94.
(26) 文部科学省；小学校学習指導要領，(2008).
(27) 文部科学省；中学校学習指導要領，(2008).
(28) 文部科学省；高等学校学習指導要領，(2008).
(29) 仲野純章：submitted to 理科教育学研究.
(30) 小野寺淑行：千葉大学教育学部研究紀要第1部，42(1994)，299－310.
(31) 仲島惠美，吉野巌：第48回日本教育心理学会総会発表論文集，(2006)，243.
(32) 吉野巌，小山道人：北海道教育大学紀要教育科学編，57(2)(2007)，165－175.