



Title	静電気と医療環境
Author(s)	伊達, 広行
Description	総説
Citation	北海道大学医療技術短期大学部紀要, 10, 85-92
Issue Date	1997-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37618
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_85-92.pdf



静電気と医療環境

伊達 広行

Electrostatics and the Medical Environment

Hiroyuki Date

Abstract

In dry air atmospheres, electrostatic potentials are often generated by friction resulting in the spurious discharges that occur frequently in our daily life. These conditions are especially common in winter on the island of Hokkaido.

In this paper, a phenomenological study of static electricity generation and some relevant basic theory are summarized. Then, practices recommended for protection against electrostatic electrical hazards and for maintaining comfort in Medical environments are discussed.

要 旨

北海道の冬期間のように乾燥する空気環境では、静電気が発生し易く、それに伴う放電も起こりやすい。本稿では、静電気帯電とその放電現象に関する基礎的な事柄を解説し、病院などの医療環境における静電気の問題を考え、帯電防止対策を検討する。

キーワード：静電気，摩擦帯電，放電，空気環境，帯電防止

1. はじめに

北海道の冬期間などに典型的な乾燥した空気環境では静電気が発生し易く、これに伴い人体

と金属等との接触による放電現象が起こり易い。摩擦帯電によって生じる衣服や体表面の電位は数千ボルト以上にも及び、他の物体（導電体）との接触による放電電流の瞬間的な値は最大でアンペアオーダーとなりうる。きわめて短時間であるために、日常の静電気による放電で感電死に至ったという報告は聞かないが、静電気による予期せぬ放電は我々に刺激的な痛みをもたらし、不快にさせるばかりではなく、ときにはガス漏れ時の着火源となることもある。これらの静電気帯電を抑制するために、湿度を上げ空気の導電性を高める他、帯電防止剤で衣類などの表面をコートする方法がとられている。一方、最近、静電気が空気中の塵埃を吸着し、塵埃密度が一時的に低下する可能性もあることが示唆されており、空気環境という、より総合

的な立場からの検討や対策が、今後の課題としてとらえられるようになった。

本稿では、静電気に関して、特に北海道の乾燥した冬期間における病院内環境を想定し、静電気が発生し易い状況や、病室にある寝具、衣類、履き物などの素材等から予想される発生原因や影響について考察する。患者や医療スタッフが実際に活動する院内の動的な場において、湿度と静電気の発生率および塵埃密度等の関連を調べ、評価することは、例えば、喘息や口蓋裂、塵埃アレルギー等の患者を有する院内の環境設計において、今後重要となると考えられる。ここでは、それら評価の指針となるとと思われる基礎的な事柄を紹介する。

2. 静電気帯電と放電

2-1 静電エネルギー

衣服に化学繊維が多用され、履き物の底にプラスチックなど絶縁性の良いものが使用されるようになった今日、静電気はかつてよりも人体に帯電しやすくなっているといえる。人体は導体であり、乾燥した空気は人体を包むよい電気的絶縁層となりうる。これに加え、導体である大地が履き物や床などによって人体と絶縁されると、衣服や履き物を含めた人体と他の物体との接触摩擦によって発生する電荷は、逃げ道を絶たれ蓄積することになる。このとき、電気的に絶縁された人体と大地をはじめとする他の導体とは、あたかもコンデンサ電極のように静電容量をもつので、これが蓄積する電荷量を評価する目安となる。

一方、人体帯電は人体とそれ以外のものとの摩擦に限らず、着用している衣服同士の摩擦によっても起こりうる。例えば、衣服同士の摩擦によって正負の電荷が帯電したとき、下着に近い電荷は大部分が人体に移るため帯電する。また、衣服に帯電している電荷が人体を移動しない場合でも人体が絶縁されていると、人体がこの電荷によって静電誘導を受け、衣服の電荷の

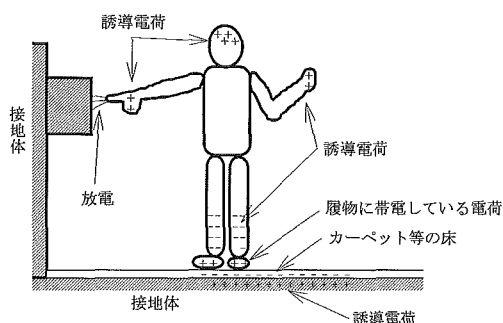


図1 履物に帯電している電荷の誘導による人体の帯電と放電

一部が人体に帯電したと等価になってしまう。カーペットや塩化ビニールなどの張り床を歩行し、これと履物との摩擦によって履物が帯電した場合にも、履物に帯電している電荷によって人体は静電誘導を受け、人体の他の部位、例えば手や頭が他の導体と接触する際に、誘導されている電荷の放電が起こる（図1参照）。

帯電した電荷が他の導体との接触などにより起こる放電は、閃光や音を伴い、着火爆発に結びつく確率の高い放電となることが知られている。災害分析によれば、爆発、火災の15%程度は、原因が人体帯電であると推定されている²⁾。静電容量からこの可能性を確かめてみよう。例えば、人体の静電容量を100 pF程度と見積もり、帯電電圧を3 kVとすると、帯電により蓄えられる静電エネルギーは、

$$E_s = \frac{1}{2} CV^2$$

で与えられるので、 $E_s=0.45$ mJ となる。導電性の比較的高い物体同士の場合、一度の放電により帯電のエネルギーがすべて放射されるとみなして良い。従ってこの放電は、最小着火エネルギー0.2 mJを有するプロパンなどの爆発混合気の着火源と十分なりうることがわかる。

2-2 帯電列

2種の絶縁体を接触あるいは擦りあわせるとき、正負のどちらに帯電しやすいかを実験的に

調べ、順にならべたものが帯電列である。表1の任意の2種類を選び、擦りあわせると、両者は帯電列に従った極性で帯電される。これにより、静電気を帯びた物体の正負は、摩擦相手がどのような材質かで判定することが可能となる。

表1 帯電列 (文献3より抜粋)

(positive end : 正端)
window glass : 窓用ガラス
polyamide 66 : ポリアミド 66 (ナイロン)
wool : 羊毛
silica : 石英
silk : 絹
cellulose (regenerated) acetate : 繊維素スポンジ(再生)
cotton : 綿
polyurethane elastomer : ポリウレタンゴム
natural rubber : 天然ゴム
polyacrylonitrile : ポリアクリロニトリル
polyethylene : ポリエチレン
(negative end : 負端)

3. 静電気帯電と放電の理論

3-1 固体の帯電

本稿で対象とするような日常の静電気現象は、ほとんどが固体の帯電と考えて良いであろう。固体の帯電は粉体や液体に比べて理論的にも実験的にも問題がとらえやすく、帯電機構がかなり明らかにされている。とはいえ、帯電を定量的に予見できるのは金属同士の接触帯電に限られている。摩擦帯電では、物質表面は微視的には凹凸で構成され、摩擦は接触する実効面積を増加させる効果を持つ。この接触により、物体の電荷担体(電子またはイオン)の移動が起こると考えられるが、このとき、物質の電気化学ポテンシャルが移動のし易さを左右する。また物理的な効果としては、圧電・焦電効果(誘電体結晶を加圧したり加熱したりすると表面に分極電荷が現れる現象)なども電荷担体の発生に関与している。しかしながら、物質の電気物性的な種々のデータの不足や、摩擦、変形、破断などの機械的な影響や熱力学的な平衡過程ではなく多くの動的・過渡的過程を含む複雑さか

ら、帯電機構に不明な点が多い。特に、我々の衣服やカーペット、カーシートなどの素材に用いられている高分子材料をはじめとする絶縁体の電気物性的な性質、構造の解明は、金属に比べて遅れており、帯電機構を知る上で重要と思われる表面の電子状態に関しても良く分かっていないのが現状のようである。

3-2 電荷緩和

静電気緩和は、物体表面等に発生した静電気が失われる現象、すなわち正電荷と負電荷の均衡が回復する現象であり、2-1で述べた放電や物体表面あるいは内部の電気伝導によって起こる。帯電した電荷が、時間的にどのような割合で減少していくかを表わす指標として、電荷緩和時間がある。今、ある点に時刻 $t=0$ で ρ_0 の電荷が帯電しているとしよう。この点の電荷密度は

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

に従って時間的に変化する。放電や導電路での電気伝導率を κ として $\mathbf{J} = \kappa \mathbf{E}$ ($\mathbf{E}$: 電界強度) を上式に代入し、さらに $\mathbf{E}$ がその電荷によって発生することから、 $\rho = \operatorname{div} \mathbf{D}$, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ($\mathbf{D}$: 電束密度, ϵ : 誘電率) を代入すると、

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\kappa}{\epsilon} t\right)$$

となる。これを解くと、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\kappa}{\epsilon} \rho$$

が得られる。 $\tau = \epsilon / \kappa$ とすれば、電荷密度は時定数 τ で指数関数的に減少することになる。この τ が電荷緩和時間であり、帯電電荷消失時間の目安となる。この式で、電気抵抗 R と帯電物体の有する静電容量 C を用いれば、 $\tau = \epsilon / \kappa$ の代わりに $\tau = RC$ とすることもできる。放電による帯電電荷消滅の場合には R と C から、帯電物体の表面伝導や内部伝導により静電気が失われるような場合には ϵ と κ から、緩和時定数を見

積もるのがより適切な方法といえるかもしれない。これらから明かなように、 R や C が大きいとき、あるいは誘電率が大きく導電率が小さいとき、緩和時間は長くなる。静電気帯電が起こりやすいかどうか、あるいは放電の瞬間電流がどの程度大きくなるかは、この緩和時間により評価することができる。

3-3 静電気力

日常で検知しうる静電気力を、簡単なモデルで調べてみよう。例えば今、面積 $S(\text{m}^2)$ の 2 枚のシート状物体が平行に $x(\text{m})$ だけ離れていて、その表面に $\sigma, -\sigma$ の電荷密度 (C/m^2) で帯電しているとする。このときシート間に働く静電気力は

$$F = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon} [\text{N}]$$

となり、その間隔距離 x によらない力が作用する。ここでは、シートの端部分の電界歪み効果を見捨てているが、両者の間隔がその大きさに比べて狭いときには良い近似式となる。

一方、点状の電荷 $q(\text{C})$ と距離 $x(\text{m})$ 隔てた十分に広い平板導体との間に働く力は、映像法を用いることによって、

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon(2x)^2} [\text{N}]$$

のように求められる。小さな塵などが金属面に吸着するときの力はこの式で見積もることが可能であろう。なお上記の 2 つの式において、誘電率 ϵ は空気の場合ほぼ真空中の誘電率 ϵ_0 とみなして差し支えない。

3-4 電気絶縁破壊

空気中などにおける気体の電気絶縁破壊現象を説明するものとして、タウンゼント (Townsend) の理論やミーク (Meek) のストリーマ理論がある。タウンゼントの理論をもとに、平行平板ギャップで絶縁破壊がおこるときの、いわゆる火花電圧 $V_s (=E_s \cdot d)$ 、ただし、 E_s : 火花

が起こるときの電界の強さ、 d : ギャップ長) を求めると、

$$V_s = f(pd)$$

で表わされる形となる。これは、平等電界に近いときの火花電圧が、温度が一定のとき、気圧 p とギャップ長 d の積の関数となることを示しており、パッシェン (Paschen) の法則と呼ばれている。種々の気体に対し、 pd の広い範囲で成立すること、また pd の値の変化に対して V_s が最小値を持つことがわかっている。

pd の値が大きくなったり、電極やそれに相当する物体の形状が平面状でないときには、空間に局部的に電界強度の大きい部分が発生する。これは不平等電界と呼ばれ、この場合にはタウンゼント理論が適用できなくなる。タウンゼント理論に、電界の歪みを考慮したミークのストリーマ理論を加えて、絶縁破壊 (火花) 条件を一般化すると、条件式は

$$\int_a^b (\alpha - \eta) dx = K$$

となる。ここで、 α は気体の電子衝突電離係数、 η は電子付着係数であり、 a, b は電離可能領域の範囲を表わしている。 K の値はおよそ 16-20 の値であることが知られている⁴⁾。

日常に起こる静電気の絶縁破壊現象では、帯電物の形状や表面状態は複雑であり、しかも動的な条件の場合がほとんどなので、タウンゼント理論やミークの理論を用いて定量化することは困難である。しかし定性的には、電気絶縁破壊とは、ある程度以上の強度の電界によって加速された電子が気体分子を電離し、そこで発生した電子がまたさらに電離を引き起こすといった電子増倍過程により、絶縁層に電流経路を形成する現象であるといえる。帯電した人体の放電は、人が金属などの導体に触れようとする直前に、わずかな間隙で破壊条件が満たされて起こる。大まかな目安としては、空気中の場合、1 cm の距離でおよそ 30 kV が絶縁破壊電圧で

あると認識しておけば十分であろうと思われる。

4. 電撃と人体の影響

4-1 マクロショックとマイクロショック

マクロショックとは、電流が人体の皮膚表面から体内へ流れ込み他の皮膚表面から出て行く、いわば体表を電流経路とするときに生じるショック（電撃）であり、マイクロショックとは、心臓カテーテル検査などによってその電極などから直接心臓に流れ込む電流によって生じるショックをいう。

健康な人が商用電源に対してマクロショックを受けたときの人体反応によれば⁵⁾、ほとんどの人がピリピリと感ずることができる1 mA の電流を最小感知電流とし、人体に生理的な悪影響を及ぼさない限界電流の5 mA を最大許容電流としている。10-20 mA 程度以上の電流が流れると、生理的にさまざまな障害が発生し、やがては心室細動（心臓の律動を司っている心筋が痙攣状態になること）を引き起こし、心臓停止に陥るとされている。マイクロショックに関しては、健康犬による試験で、電極を直接右心室に接触させた場合、0.1 mA で心臓の周期的鼓

動がなくなることが報告されている⁶⁾。

4-2 電撃発生領域

帯電した人体と接地導体間の放電、または帯電物体と人体間の放電によってもたらされる電撃の強さは放電電荷量と相関関係があり、一般に放電電荷量が $2-3 \times 10^{-7} \text{C}$ 以上になると電撃を受ける⁷⁾。

帯電物体が不導体である場合は、一般にその帯電電位が約30 kV以上であると電撃を受ける。ただし、以下のような場合は帯電電位が低くても電撃を受けることがある⁸⁾。

- (a) 帯電分布が非常に不均一な場合。
- (b) 不導体の中に局部的に導電率の高い部分があつて、これが帯電している場合。
- (c) 帯電物体の裏側、または近くに接地導体がある場合。

4-3 人体の静電容量

人体の静電容量の測定は、厚さ1-2 cm程度の絶縁台に直立し、素足を包んだアルミニウム箔と大地との間で行われる。通常の場合、ほぼ100 pFと考えると良いと思われるが、椅子に腰掛けたり種々の動作があるときには、より大き

表2 人体帯電と電撃の強さの関係⁷⁾

人体の帯電電位 [kV]	電 撃 の 強 さ	備 考
1.0	全く感じない	かすかな放電音発生 放電の発光を見る 指先から放電発光が延びる
2.0	指の外側に感じるが痛まない	
2.5	針に触れた感じを受け、ピクリとを感じるが痛まない	
3.0	針で刺された感じを受け、チクリと痛む	
4.0	針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む	
5.0	手のひらから前腕まで痛む	
6.0	指が強く痛み、後腕が重く感じる	
7.0	指、手のひらに強い痛みと、しびれた感じを受ける	
8.0	手のひらから前腕までしびれた感じを受ける	
9.0	手首が強く痛み、手がしびれた重みを受ける	
10.0	手全体に痛みと電気が流れた感じを受ける	
11.0	指が強くしびれ、手全体に強い電撃を感じる	
12.0	手全体を強打された感じを受ける	

(注) 人体の静電容量：約100 pF

表 3 静電気対策に必要な基礎知識¹⁾

基本的事項	要 点
電気の性質	(1) 電気は導体（人体）をよく伝わる (2) 電気は電位の高い方から低い方へ流れる (3) 電位が等しければ流れない
電気現象	(1) 導体（人体）を絶縁状態とすると電気を蓄えることができる (2) 導体に帯電した電気は放電しやすく、絶縁物に帯電した電気は拘束されているので放電しにくい (3) 導体に密着した絶縁物は、空気中に置かれた絶縁物よりも、10－100 倍の電気を帯電させる (4) 導体に密着した絶縁物をはがすときには沿面放電（物体の表面で起こる放電）を生ずる
電撃と人体生理	(1) 人体の電撃を感じやすい箇所は、唇、傷口、指先であり、鈍感な箇所は足の裏である (2) 人体自体の帯電により電撃を感じるには、3 kV 以上が必要である (3) 電気抵抗 $10^6 \Omega$ 以下の履き物を着用した人体には帯電しない

な値となると推定される。

5. 静電気防止対策

5-1 観察による帯電の検出

帯電防止の対策の前に、まず帯電の有無を見分ける方法を以下に示す⁹⁾。

- (1) 帯電物体に塵埃が付着する。
- (2) 周辺を暗くした状態で帯電物体にネオン検出器を接近させたとき、これが点灯する。
- (3) 周辺を暗くした状態で帯電物体に針状の接地導体をゆっくり接近させたとき、その先端近くに発光が現れる。
- (4) 帯電物体に可撓性のある導体、例えば導電性繊維・糸を接近させたとき、これが激しく振動する。
- (5) 人が帯電物体に近づいたとき、体毛が吸引されたり、電撃を受ける。
- (6) 作業者の衣服がまつわりついたり、ちくちくした刺激を受ける。

この他、静電気による力学的障害として、布団の側地からわたが吹き出し、毛玉を作るピリング現象と呼ばれる現象がある。この現象の発生原因として静電気帯電による次のような理由が考えられている。すなわち、異種物質同士である側地と中わたの摩擦では正・負に帯電し両者の間には吸引力が、また中わた同士の摩擦で

は、ほぼ同極性の静電気が発生し、内部では反発力が起こるため、これら電気的力の合成で、側地布目に突き当たった中わた繊維の先端が外に押し出され、毛玉の発生を引き起こす¹⁰⁾、というものである。布団に帯電する電荷量は、 $10 \times 10 \text{ cm}$ 大の綿でできた側地袋に 5 g のポリエステル中わたを入れたミニ布団での実験によれば、 10^{-9} C オーダーとなっている。

5-2 導電性の向上

(a) 接地による導体の帯電防止

接地は、一般に帯電が問題となる導体と大地とを予め電線等を用いて電気的に接続することによって、導体の帯電を防止する対策法である。接地の対象は、静電気発生、静電誘導等によって帯電する可能性があり、かつその帯電が静電気災害・障害の原因になるおそれがある導体である。病院などの場合、建造物そのものや医療機器などのため最低接地抵抗基準が定められている。静電気による帯電防止のためには、導電性履き物および導電性床によって、漏洩抵抗が $10^6 \Omega$ 以下であれば十分な帯電防止効果が得られる。

(b) 不導体の帯電防止

不導体といえども電気抵抗が無限大ではない

ので、静電気の発生が停止すると電気伝導によって徐々に電荷が自然緩和し、帯電量が減少する。この効果を利用し、可燃性液体の作業等では、災害や障害の原因となる静電気を逃がすために一定の待ち時間（静置時間）を置いて次の作業を行うなどの措置がとられる。日常生活空間では、不導体の導電性を高めたり、安全な形で放電を促したりするのが適切であろう。最も有効な方法は空気中の湿度を高めることであり、不導体の表面における吸湿量が多くなる結果、表面の電気抵抗が低下し不導体の帯電防止ができる。また、不導体に直接水を添加したり、水と接触させることによって同様な結果となる。次に述べるような、水の代わりに洗剤やスプレー状になった帯電防止剤で不導体を表面コートする方法も効果的であろう。

(c) 帯電防止剤

帯電防止剤は、主として界面活性剤を主成分とする薬剤で、これを不導体を使用すると、不導体の表面に親水性が付与され吸湿性が増加したり、またイオン性が付与されて、結果的に表面の導電性が増し、帯電が防止される。帯電防止剤は、界面活性剤の主成分によって次のように分類される¹²⁾。

- (1) 非イオン性界面活性剤を主成分とするもの。
- (2) アニオン性（陰イオン性）界面活性剤を主成分とするもの。
- (3) カチオン性（陽イオン性）界面活性剤を主成分とするもの。
- (4) 両性界面活性剤を主成分とするもの。
- (5) イオン性高分子を主成分とするもの。

5-3 帯電防止の評価基準

一般に絶縁抵抗、端子間抵抗といった場合、2つの電極一端子間に印加した直流電圧をそこに流れる全電流で割った値であるが、電流は物体内部と表面を流れるので、体積抵抗および表

面抵抗が含まれている。体積抵抗は印加電圧と試料物体内部を流れる電流から得られる値であり、表面抵抗は試料の表面に沿って流れる電流と平行方向の電位差から得られる。両者を厳密に分けて測定することは困難であるが、一般に固体の表面抵抗は体積抵抗に比べて2-3桁低い。ため、帯電防止作用は主として電荷の表面漏洩によると考えられる。

不導体は、加湿・加水によって帯電防止効果が期待できるが、数値目標として、導電率が 10^{-11}S/m （ここで、 $\text{S}=1/\Omega$ ）以上、または表面抵抗率が $10^{11}\Omega$ 以下とすることが必要である。また、空気中へ電荷を逃がすために、室内の相対湿度を、一般に約50%以上とすることが望ましい。さらに、導電性の物体が帯電しないようにする指標として、アース等への漏洩抵抗を $10^6\Omega$ 以下とする。ただし、静電容量が 100pF 以下の場合は、緩和時間を 0.01 秒以下とする。静電気事故の起きやすい作業現場においては、帯電防止用の作業服や静電靴が用いられているが、例えば、静電靴の電気抵抗は導電性ゴムを用い $10^5\sim 10^7\Omega$ の範囲に入るように作られている。この範囲の低い方の $10^5\Omega$ という値は、作業員がうっかり高電圧機器に触れてしまったときに、人体に大電流が流れる（足元から抜けていく）ことの無いよう、安全性の面から決められた値である。同様に、X線発生器や電気メスなどを扱う医療現場では、高電圧に触れてしまったときの人体の影響を考慮し、履き物の導電率は必ずしも高いことが良いわけではなく、高電圧機器との接触事故にも対処しうるものでなくてはならない。

6. む す び

本稿では、日常の静電気現象について、その発生と放電について解説を試みた。帯電や放電に関わる細密な機構は、未だ解明されていない点が多いが、我々が日々の生活の中で遭遇する静電気が引き起こす様々な現象を理解し、ある

程度定量的に捉えることにより、不快な静電気障害への効果的な対策が可能となると考えられる。

今日、病院やデパート、官公庁舎といった巨大なビルの内部では空調施設を有し、防火・防振対策や防犯管理なども含め、いわゆるインテリジェントビルとして、コンピュータ制御による種々の管理がなされている。こうした建物内のアメニティを考えると、当然のことながら、それらが動的な人間の活動の場であり、人間の存在が環境を常時変化させていることを無視することはできない。特に病院のように、多くの患者が24時間生活し、病室へは常時看護婦が出入りするような環境では、温度や湿度管理が難しいばかりではなく、病原菌やアレルギーの蔓延なども当然問題となるであろう。人間の動きによって、物理的に生ずる摩擦とそれによって発生する静電気は、人間がその場で活動している証でもある。その意味では、静電気の発生は、湿度や塵埃密度に関係する空気環境のパラメータといえるかもしれない。

〔謝 辞〕

本総説をまとめるにあたり、有益なご助言を頂いた、本学看護学科宮島直子先生に感謝申し上げます。

〔参 考 文 献〕

- a) — d) は一般的な文献
- a) 静電気学会編「静電気ハンドブック」オーム社(1982)
- b) 電気学会編「放電ハンドブック」オーム社(1983)
- c) 産業安全研究所技術指針「静電気安全指針」RIIS-TR-87-1, 労働省産業安全研究所(1988)
- d) 空気調和・衛生工学会 北海道支部セミナー資料集「建築物における空気環境の評価と制御の新しい動向」空気調和・衛生工学会(1997)
- 1) 宮島：私信
- 2) 田畠：「産業安全研究所技術資料」RIIS-TN-72-1, 労働省産業安全研究所(1971)
- 3) J. Henniker: Nature, 196, 474 (1962)
- 4) 宅間：電力中研報告, No.69015 (1969)
- 5) 南任, 江澤：「医用電子と安全技術」工学図書株式会社(1995), p.138
- 6) 山根：ME 機器の安全性・信頼性の向上, 機械振興, Vol.15, No.9 (1982-9)
- 7) c), p.47
- 8) c), p.48
- 9) c), p.53
- 10) a), p.880
- 11) a), p.882
- 12) c), p.71