RIIS-SD-70-1

産業安全研究所安全資料

SAFETY DOCUMENT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1970

電撃危険性と危険限界

田中隆二
市川健二

労働省産業安全研究所

目　　次

まえがき

第1章　電撃現象と電撃危険因子 …… 1

第2章　電撃電流の大きさと人体への生理的影響 …… 3

2.1　感知電流 …… 3
2.2　可随電流（離脱電流）と不随電流（膠着電流） …… 5
2.3　心室細動電流 …… 7
2.4　反電撃 …… 12
2.5　高温症 …… 13
2.6　その他の電撃障害 …… 13
2.7　総括 …… 14

第3章　人体の電気抵抗 …… 17

3.1　人体各部の抵抗率 …… 17
3.2　皮膚の電気抵抗 …… 17
3.3　内部組織の電気抵抗 …… 20
3.4　人体の電気抵抗の範囲 …… 20

第4章　電撃危険に対する安全限界 …… 22

4.1　安全電圧 …… 22
4.2　危険接触電圧と通電時間 …… 23
4.3　人体へのエネルギーからみた安全限界 …… 23

第5章　水中における電撃危険 …… 24

5.1　水中における電撃現象 …… 24
5.2　水中での電撃危険限界 …… 25
5.3　動物による水中電撃危険の実験例 …… 28

第6章　静電誘導による電撃危険 …… 29

6.1　静電誘導による電撃現象 …… 29
6.2　定常電流による危険性 …… 30
6.3　過渡電流による危険性 …… 34
6.4　人体の生理的影響とエネルギーからみた危険限界 …… 37

第7章　電気火災消火時の電撃危険 …… 38

7.1　消火剤による消火時の離隔距離 …… 38
7.2　注水消火時の電撃危険性 …… 38
7.3　注水時の漏れ電流とフラッシオーバ電圧 …… 39
7.4　注水時の電撃危険距離 …… 40

第8章　高圧電気設備への接近危険 …… 43

8.1　対象危険電圧 …… 43
8.2　高圧に対するフラッシオーバ距離 …… 43
8.3　許容接近距離 …… 44

〔資料 1～14〕 …… 45

〔付録〕　電気災害の発生状況とその特性 …… 51

（付表1）　電気災害年別発生数
（〃 2）　原因別災害発生数および死亡率
（〃 3）　電圧別，職種別感電死亡災害発生率
（〃 4）　月別感電死亡災害発生率

電撃危険性と危険限界

ま え が き

わが国では毎年電撃による死亡者数は数百名に達しており，重傷者数はさらにその数倍にも及んでいる．

電気エネルギーの応用分野の開発，利用技術の多岐化など電力需要の増大のほか，送配電電圧の格上げなどの理由により，電撃防止に対する努力にもかかわらず，電撃による死傷者数は依然として大幅なる減少を示していない．

他の原因による災害の場合と同様に，電撃による災害を防止するには，先ず第一に災害危険性を定量的に把握することである．すなわち，電撃による危険限界を正しく認識することが重要である．

電撃による危険限界については，従来，主として動物による生体実験結果が多く示されているほか，人体による実験結果も報告されている．これらは，ほとんどがアメリカなど外国で行なわれたもので，わが国ではきわめて少ない．

そこで，本文では外国での実験結果を中心に電撃による危険限界について総括して述べることにする．

なお，本文の第1章～第4章に関する部分は，筆者の一人らが以前にまとめた「電撃危険について（1965）」に最近のデータを加筆して修正したものであり，これに以下述べるような，超高圧送電による静電誘導による電撃，海洋開発に伴ない話題となってきた水中での電撃などの諸問題を加えて，新たに当研究所の技術資料として紹介するものである．

第1章　電撃現象と電撃危険因子

電気が現在のように各産業や人々の日常生活に利用される以前から，生物にその作用を及ぼすことが知られていた．たとえば電気うなぎによるショックとか，蛙の足の筋肉が収縮する現象などである．

しかし，人間に及ぼす電撃危険については，落雷による感電死の場合を除くと比較的新しく，わが国では明治 23 年に大阪で最初の電撃死が起こったと報告されている．このような商用周波数の電流による電撃死の原因は，古くから多くの人々によって究明されているが，現在でも必ずしも完全には解明されてはいない．しかし電撃によって起こった火傷とか，ショックによる高所からのつい落による死亡を除くと，一般にはつぎの3つのメカニズムが主なる原因であることが認められている[1]．

（1）　心臓部を電流が流れる結果，心室細動による血液循環機能のそう失によるもの

（2）　脳の呼吸中枢に流れた電流による呼吸機能の停止によるもの

（3）　胸部を電流が流れる結果，胸部収縮による窒息によるもの

これらの主なる原因のうち，かっては(2)の呼吸中枢神経を流れた電流による呼吸停止が普通に起こると思われ，このため電撃時の応急手当として被害者に対する人工呼吸が多く行なわれてきた．しかし，このことは必ずしも適切な処置ではないことが明らかにされてきた．たとえば，表 1-1 は，1962 年と 1963 年に英国において，250 V 以下の電圧による電撃死亡者を電撃電流の体内通路によって分類したものであるが，166 名の死亡者のうち 128 名 (77%) が，腕から足に電流が流れて死亡している[2]．

この場合は，電流が胸部を流れたり，呼吸中枢には直接流れていないから，電撃死の大部分はおそらく，呼吸中枢神経のまひからくる呼吸停止によるのではなく，(1)や(3)の心室細動または呼吸筋肉のけいれん的収縮による窒息死と思われる．しかし，後者の窒息死の場合は被害者が充電部に長時間接触している場合（たとえば，漏電を生じてケースに電圧が加わっている電気ドリルを握っている場合）にのみ起こるもので，このような死亡事故は一般に少なく電撃死の多くは心室細動によるものと思われるようになってきた．

表 1-1　電流の体内通路別死亡者数（英国）

通路別＼年別	1962	1963	合計
腕から足	62	66	128
頭から胴または足	3	2	5
浴槽	6	14	20
その他	2	5	7
不明	1	5	6
合計	74	92	166

以上のほか，電撃を受けた場合には，皮膚や筋肉・内臓などの出血があり，これらが単独に，または組合って電撃死を招くものである．

さて，このような電撃を受けるのは人体に電流が流れるために起こるのであって，電源に接触して電圧が加わっても電流が流れなければ電撃現象は生じない．電圧が人体に加わったとき，果たして電流が流れるかどうか，またどの程度流れるかということは，そのときの通電回路の電気抵抗の大きさによってきまる．

したがって，同一電圧の電源に人が触れた場合でも，人体抵抗が大きい条件になっていれば，単なるショックですんでしまうだけであるが，身体が汗でぬれているなどの理由によって抵抗が小さくなっていると致命的となり得るのである．

以上のようなわけで，電撃危険の主なる因子としてはつぎのようなものがあげられる[3]．

（1）　通電電流の大きさ

（2）　通電径路（電流が身体のどの部分を流れたか）

（3）　電源の種類（交流，直流の別）

（4）　通電時間と電撃印加位相（心臓脈動周期のどの位相で通電したか）

（5） 周波数および波形

その他，間接的には人体抵抗や電圧の大きさなどが関係してくる．

したがって，通電電流が大きく，身体の重要な部分を流れ，しかも長時間流れるほど危険性が大きくなる．

引 用 文 献

1) W.R.Lee : Deaths from electric shock, Proc. IEE, Vol.113, No.1, Jan. (1966).
2) W.R.Lee : Deaths from electric shock in 1962 and 1963, Brit, med. J., Vol.ii, pp.616-619, Sept. (1965)
3) 鶴見：電撃について，電学誌，p.168（昭 28.2）

第2章　電撃電流の大きさと人体への生理的影響

電流が人体に流れた場合には，その大きさにより，種々の生理的影響が現われる．人体の生理的反応に関する実験データは，当然個人差によるバラツキが生ずるが，統計上の処理により，有意の結果が得られるものである．

2.1　感知電流 (Perception current)

人体の通電電流の大きさがある値以下であればなんら通電されているという感覚がなく，この値をこえて電流値がだんだん増加して一定の値に達するとはじめて通電されていることを感ずるようになる．この大きさの通電電流のことを感知電流と呼んでいる．

感知電流の値は，電流が人体に流入しまたは人体から流出する部分，実験をするときの使用電極の形状(電極付近の電流密度)，電流の増加方法，交流・直流の別などによって同一個人でも異なるが，アメリカのカルフォルニヤ大学教授である Dalziel らがこのような感知電流について生体実験を試み，以下のような多くの信頼すべき結果を発表している．

(1)　60Hz 正弦波交流による感知電流

Dalziel は 60Hz の正弦波交流を用い，167 名の男子に，直径 3.66mm および直径 3.25mm の銅線を握らせて実験を行なった．

図 2-1 (縦軸のパーセンタイルランクについては脚注参照) はその実験結果を確率紙にプロットしたものである (女子の場合の破線は推定値を示す)[1]、

これによると，男子の平均値は 1.086mA (実効値) であり，正弦波交流に対する感知電流は男女いずれもほぼ 2mA 以下となっている (注：交流電流の値は以下すべて実効値で表わすものとする)．

また，Gordon，Thompson は，ニューヨークの電気試験研究所 (Electrical Testing Laboratories) において，電極への接触条件が異なる場合についての感知電流を測定し，表 2-1 のような結果を得ている．これによると，手で電極を軽くたたいた場合，挟んだ場合，握った場合，水につけた場合の順に感知電流の

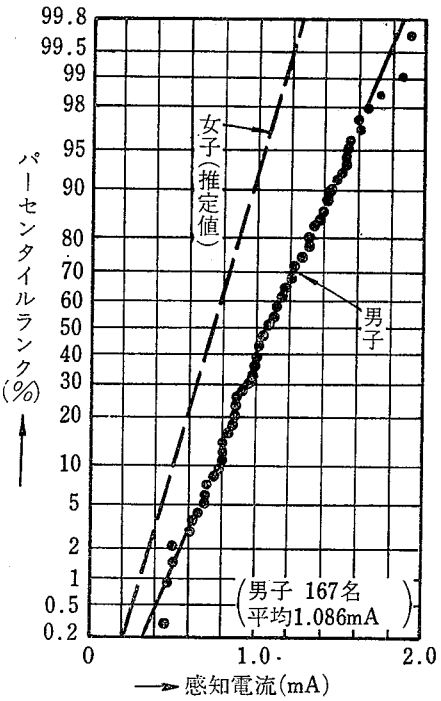


図 2-1　60Hz 正弦波交流による感知電流

表 2-1　60Hz 正弦波交流による感知電流 (mA)

接触条件	男子(42名)			女子(28名)			(女子平均)/(男子平均)
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	
軽くたたく	0.80	0.20	0.40	0.40	0.20	0.27	0.675
挟む	2.40	0.26	0.87	1.20	0.20	0.59	0.678
握る	3.00	0.28	1.19	1.40	0.50	0.84	0.706
水につける	3.00	0.44	1.39	1.80	0.30	0.88	0.633
平均							0.67

パーセンタイルランク (Percentile rank)
得られたデータを大きさの順に並べ，ある数値が全体のどの位置にあるかを統計的に示すものである．

値が大きくなっている．これは，これらの順に電流の人体内への流入密度が小さくなっているためと考えられ，それらの間に数倍の差が認められる．

さらに，女子と男子の感知電流の値を比較してみると，女子は男子の約 2/3 となっている．すなわち，女子は男子よりも電気的に敏感なことがわかる．

この結果に基づき，さきに Dalziel が 167 名の男子について実験した値を女子に換算したものが図 2-1 の破線である．

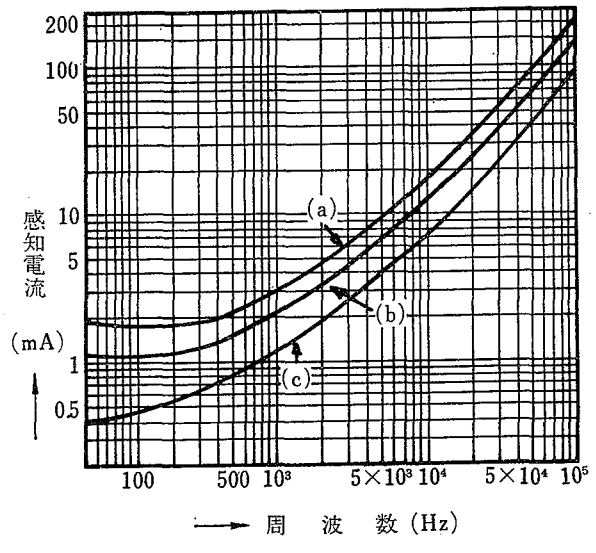
人体で最も電流に対して敏感なのは，眼球で，20μA の電流で反応を示し[2]，次いで舌端が 45μA というきわめて小さな値が示されているが[3]，このような部分を除けばいずれにしても，だいたい商用周波数程度の正弦波交流の場合には 1mA 位になるとはじめて電撃を感ずるということができる．

なお，電撃を感ずる程度は，それを予期しているかどうかで異なり，全く予期していないときに電撃を受けると強く感ずるといわれている．

（2） 感知電流に及ぼす周波数の影響

Dalziel および Mansfield は，感知電流に及ぼす周波数の影響についての実験を行ない，図 2-2 のような結果を得ている[4]．

これによると，周波数を高くしていくと感知電流も増してくる．また周波数の増加とともに電流の刺激はちくちくする感覚よりも熱いという感覚に近くなり，100～200KHz 以上になるとほとんど熱的感覚のみとなる．



(a)：被験者の 99.5%が該当する値
(b)：被験者の 50%が該当する値
(c)：被験者の 0.5%が該当する値

図 2-2　感知電流に及ぼす周波数の影響

（3） 感知電流に及ぼす交流波形の影響

Dalziel が 25 名の男子について直径 3.25mm の銅線を握らせて 60Hz の異なった交流波形に対する感知電流の実験を行ない表 2-2 のような結果を得ている[5]．

表 2-2　感知電流に及ぼす交流波形の影響

波　形	電流 (mA)	
正弦波交流	最小	0.52
	最大	1.77
	平均	1.17
尖頭波交流	最小	0.52
	最大	1.57
	平均	0.96
くぼみ波交流	最小	0.55
	最大	2.06
	平均	1.32
三角波交流	最小	0.52
	最大	1.48
	平均	0.95
矩形波交流	最小	0.91
	最大	2.41
	平均	1.56

これによると，正弦波交流に比較して尖頭波交流や三角波交流の場合の値が小さく，くぼみ波交流や矩形波交流の値が大きくなっている．なお，この実験に用いた交流波形のオツシログラムは〔資料 1〕に示してある．

（4） 直流による感知電流

Dalziel が 115 名の男子について，直径 3.66mm の銅線の上に手を軽くのせ，直流による感知電流を測定して図 2-3 のような結果を得ている[1]．

これによると，平均値が 5.2mA となっており，直流は交流に比較して約 5 倍の数値になっている．

以上述べたような感知電流程度の電流では，とくに人体に直接の危険を伴なうことはほとんどないが，不

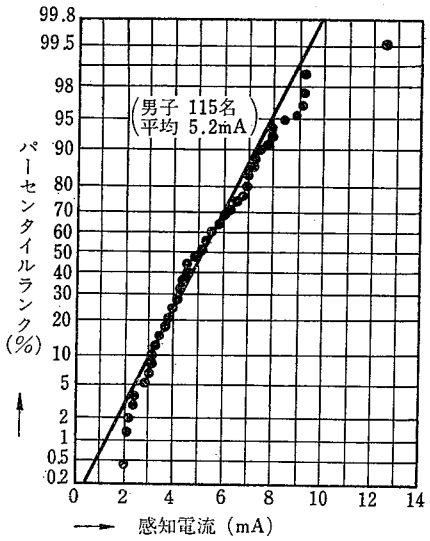


図 2-3　直流による感知電流

安定な姿勢で作業をしている場合などには，この程度の電流でも不意に電撃を受けると，そのショックで驚いて高所からつい落して二次的な死傷災害を発生することがある．

2.2　可随電流（離脱電流，Let-go current[6~11]）と不随電流（膠着電流，Freezing current）

さらに引続いて通電電流を増してゆくと，その電流では直接生命にかかわることがないような値であっても，通電径路の筋肉のけいれんが激しくなり，神経がまひして運動の自由がきかなくなって，電撃を受けたと感じながらも自分の力でその電源から離れられなくなる．そして，ついには長い間苦痛状態に陥って意識を失ったり，呼吸困難のため窒息死したりするので，このような運動の自由がきかなくなる電流の限界が問題となるわけである．

このような大きさの電流を不随電流とか膠着電流とかいっているが，逆に運動の自由を失わない最大限度の電流のことを可随電流もしくは離脱電流といって，安全に自力で接触した電源から離れられる電流値が追究されてきた．

(1)　60Hz 正弦波交流による可随電流

Dalziel は，男子 134 名，女子 28 名について，直径 4.11mm の銅線を一方の手に握らせ，他方の手を真ちゅう板の上にのせ，あるいは塩水で浸された布を上腕にまいて 60Hz の正弦波交流を通電し，他の手を用いないで銅線を自力で離すことのできる最大電流（可随電流）を測定し図 2-4 のような結果を得ている[6]．

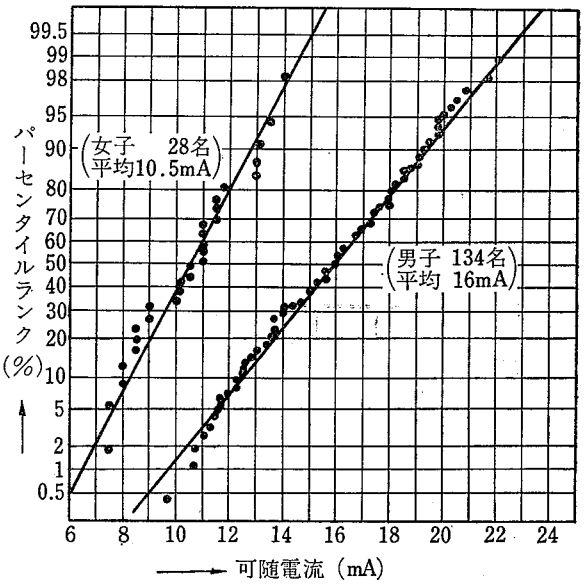


図 2-4　60Hz 正弦波交流による可随電流

これによると，男子の平均値が 16mA，女子の平均値は 10.5mA であった．これも女子の方が男子の約 2/3 の値になっている．この値に関してもその他いろいろの報告があり，たとえば 13.9mA (カルフォルニヤ大学)，15mA (Gilbert) などといわれ，いずれもだいたい 10～15mA となっている．

また，可随電流の平均値のほかに，大多数の人々の可随電流と考えられる 0.5 パーセンタイル値が，電撃危険性のない安全限界として重要な値とされるべきで，図 2-4 からこの安全な可随電流値は，男子で 9mA，女子で 6mA 程度であると考えられる．

この付近の電流についても，その他いろいろの実験報告があり，アメリカの火災保険協会試験所 (UL) の報告によると，両手にペンチを握ってそれに通電してゆくという方法で，男子 13 名について実験をした結果，最大 10mA，最小 6mA，平均 7.8mA で，耐えられなくなったといっている．あるいは，Thompson が多数の人々について調べたところでは，我慢できる電流は男子の平均値が 8.35mA，女子のそれが 5.15 mA で，全体の平均が 7.1mA であると報告している．さらに Greyson が 42 名の男子について，はなはなだしい不快感を覚える電流の限界を示しているのが 8mA である．

以上のようなことから，男子で9mA，女子で6mAが，苦痛を感じながらも安全に自力で離脱できる最大の電流値と考えられている．

（2） 可随電流に及ぼす実験回数の影響

Dalziel, Lagen, Thurston などの実験によると可随電流は同一の人でも最初のテストでは小さいが，実験回数を増すとその電流値も増す傾向がある．図 2-5 は，各被験者について実験回数の増加による可随電流（60Hz の交流）の変化の模様を示したものである．

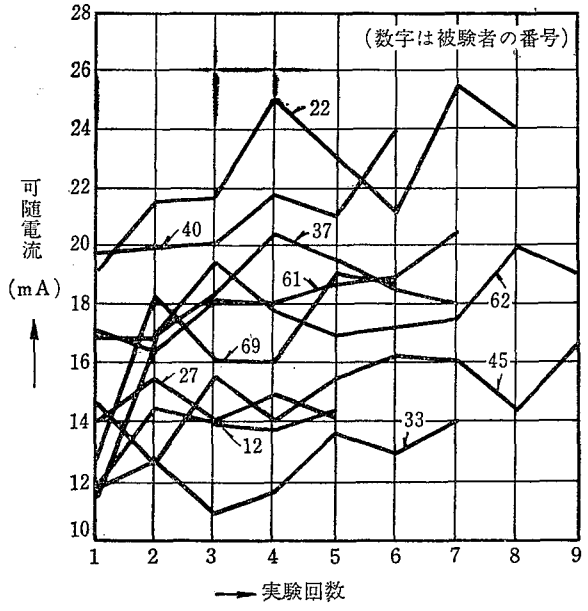


図 2-5　可随電流に及ぼす実験回数の影響

（3） 可随電流に及ぼす交流波形の影響

Dalziel らは 26 名の被験者について，60Hz の交流波形の差による可随電流の大きさの変化に関する実験を行ない，表 2-3 のような結果を得ている[7]．

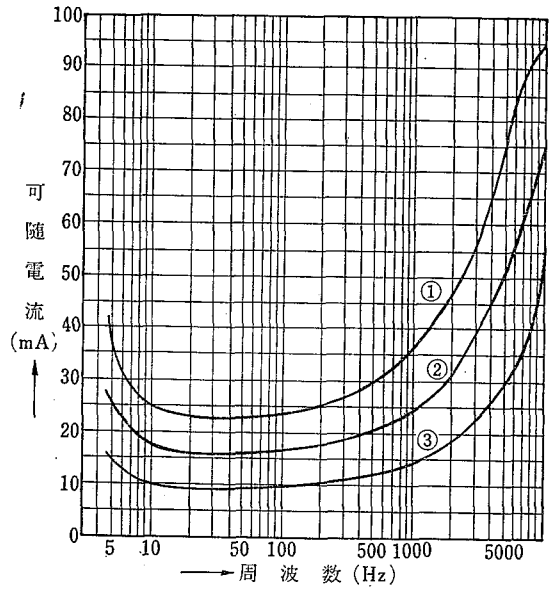
表 2-3　可随電流に及ぼす交流波形の影響

波　形	可随電流 (mA)	
正弦波交流	最小	13.1
	最大	20.0
	平均	16.0
尖頭波交流	最小	9.7
	最大	14.6
	平均	12.2
くぼみ波交流	最小	13.8
	最大	22.8
	平均	17.7

これによると，可随電流についても感知電流の場合と同じように，尖頭波交流，正弦波交流，くぼみ波交流の順に電流値が大きくなっている（実験に用いた各交流波形のオッシログラムについては〔資料2〕参照）．

（4） 可随電流に及ぼす周波数の影響

Dalziel, Ogden, Abbott らは，357 名の男子について，5Hz より 10,000Hz までの周波数における可随電流の測定を行ない，図 2-6 のような結果を得ている[8]．



① 99.5% の確率で起こる可随電流の値
② 50% の確率で起こる可随電流の値
③ 0.5% の確率で起こる可随電流の値

図 2-6　可随電流に及ぼす周波数の影響

（5） 直流による可随電流（解放電流，Release current）

直流については，電流の変化速度 di/dt が電極からの離脱に大きな影響を与え，電流を急変させると筋肉のけいれん収縮を生ずる．

Dalziel らは，前述の可随電流に及ぼす周波数の影響の実験と同時に 28 名の男子に対して直流について離脱できる電流の実験を試みた．

これによると，平均値は 73.7mA で，これを 60Hz の正弦波交流の実験結果に基づいて女子に対して換算すると，約 50mA となる．

なお，直流についての実験の場合には，電極を離した瞬間の不快感が強く，離脱できる限界に近づくと，それ以上の実験を嫌う傾向があるため，交流の場合と

は区別して可随電流（Let-go current）といわずに，解放電流（Release current）と称することがある．

（6）　可随電流に対する脱出時間

Dalziel は，電気牧柵の通電停止時間に関連した実験で，18 才から 50 才までの男子 32 名について，各被験者に対応した 60Hz の交流（各自の可随電流よりわずかに多く，2～4mA をこえない範囲）がしゃ断されてから，握っていた直径 3.25mm の銅線を離すまでの時間を測定し，図 2-7 のような結果を得ている．

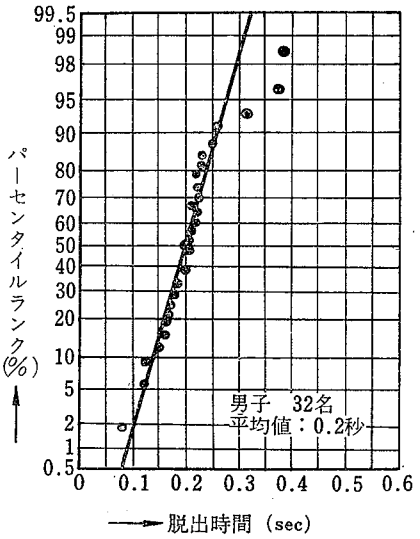


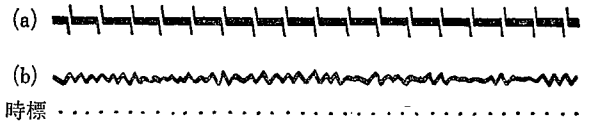
図 2-7　可随電流に対する脱出時間（60Hz）

これによると，電源がしゃ断されても，0.4 秒以内（平均約 0.2 秒）は，腕の筋肉が一時的に凍結した症状を呈し，瞬間的には脱出できないことを示している．

したがって，自力で脱出できる電流値といっても，感電した場合に電源が自動的にしゃ断される装置を有している場合または電気牧柵のようにかなりの通電停止時間のある場合を除き，通電が継続される場合には可随電流でなく不随電流となるおそれも多分にあるので，安全な 60Hz 交流の可随電流値としては，男子で 9mA，女子で 6mA 程度以下とみておくほうがよい．

2.3　心室細動電流（Ventricular fibrillating current）[4,6,12~19]

通電電流を一層増加して，心臓部を流れる電流がさらに増大すると，心臓が図 2-8 の例のようにけいれんを起こし始める．すなわち血液を送り出す心室が正常な脈動を打てなくなり，強度の場合には脈動が停止してしまう．これを心室細動といい，このような状態になると，清浄な血液を送り出す心臓の血液循環の機能が失なわれ，たとえ電源から離れても，自然には正常な脈動に回復することなく数分以内で死亡する．



(a)：正常心電図
(b)：心室細動時の心電図
いずれも胸部導出（時標1/10秒）

図 2-8　心電図の例（犬）

先にも述べたように人が感電して死亡する原因はこの心室細動による場合が大部分で，したがってこの心室細動を起こす限界がどこにあるかということが多くの動物を用いて実験された．この結果，心室細動電流，通電時間および体重の三者の間には，ある一定の関係があることが見出され，これから人間に対する心室細動電流の最小値を推定している．また，心室細動を起こす電流の大きさは，動物の種類や大きさ，通電径路，電源の周波数，通電時間，心臓の脈動に対する電撃印加位相あるいは電流上昇率などにより異なってくる[9]．

（1）　心室細動電流と通電時間の関係

Kouwenhoven は，犬について通電時間を 1/120 秒から 5 秒までの間で種々変化させ，心室細動電流を測定し，表 2-4 のような結果を得ている[10]．

表 2-4　通電時間と心室細動電流の関係（犬）

通電時間 (sec)	心室細動電流 (mA)		通電時間 (sec)	心室細動電流 (mA)	
	0.5% tile	50% tile		0.5% tile	50% tile
1/120	650	2070	1/3	200	740
1/60	800	1450	1	50	150
1/12	240	1800	2	50	150
1/6	550	900	5	25	83

1/120 秒および 1/60 秒のような非常に短い通電時間では実験結果が正規分布性を示したが，それ以上の通電時間の場合は，50 パーセンタイルまでは確率紙上直線となるが，それ以上のパーセンタイルになると直線からはずれてくる．この理由は，心室細動の複雑な性質によるものと思われ，現在でも十分に解明されてはいない．

なお，0.5 パーセンタイルで，心室細動を起こすと

思われる電流を通電時間に対して両対数方眼紙にプロットすると図2-9のような結果となり，心室細動電流 I と通電時間 T の間には，直線の勾配が $-1/2$ であることを考慮して，(2-1) 式なる関係が成立する．

$$I=\frac{K}{\sqrt{T}}\Big|_{\frac{1}{120}\text{sec}}^{5\text{sec}} \quad (K：定数) \quad \cdots\cdots(2\text{-}1)$$

なお，図中に実験によって心室細動を起こした最低電流値も×印で示したが，0.5 パーセンタイル点はこの最低値より小さいことがわかる．

Ferris らが，羊，犬，子牛，豚について，通電時間を 0.03 秒から3秒まで変えた場合の心室細動電流を測定しているが，このうち羊について解析し，やはり同様の結果を得てる[9]（〔資料3〕参照）．

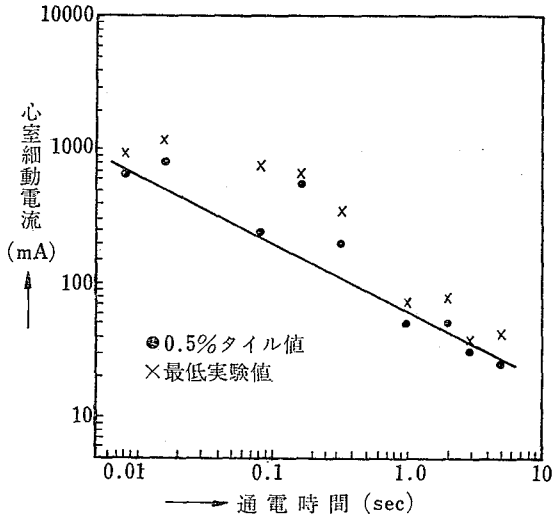


図 2-9　通電時間と心室細動電流の関係（犬，50 または 60 Hz）

また，東京大学医学部においても犬について通電時間（t）を 0.41～9.60 秒まで変化させて心室細動電流（i）を求め，$i=\alpha t^{-\beta}$ なる関係を導き，$\beta=0.54$～0.63 なる値を得ている[11]（〔資料4〕参照）．

（2）　心室細動電流と体重の関係

1963年，ソ連の科学アカデミーの Kiselev は，体重 5～24 kg までの犬 35 匹について，50 Hz の電流を3秒間加えた場合の心室細動電流を測定し，図 2-10 のような結果を得た[12]．また，これ以前に Ferris らは体重 18～26.7 kg までの犬 10 匹について，60 Hz の電流を3秒間加えた場合の心室細動電流を測定し，図2-11のような結果を得ている[9]．

これら両者の 45 匹の犬の3秒間の電撃による心室細動電流と体重の関係を示すと図 2-12[13] のようにな

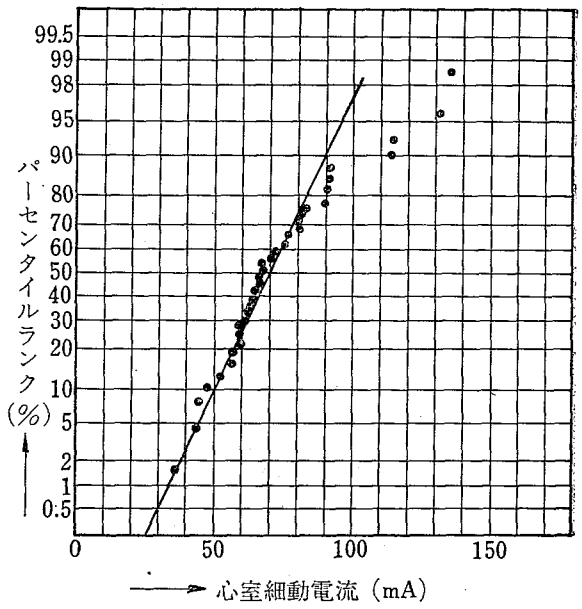


図 2-10　心室細動電流（犬，通電時間3秒，50 Hz）

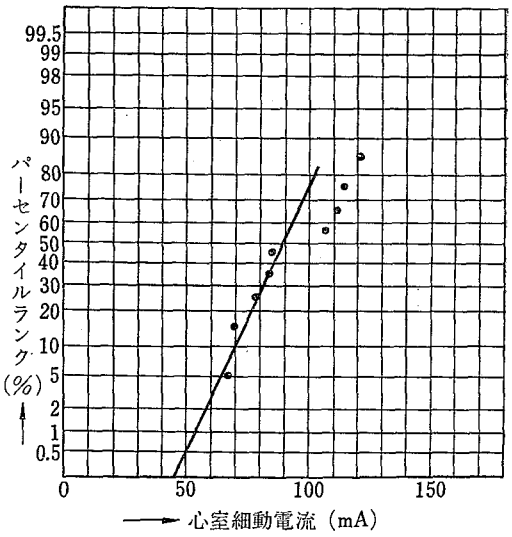


図 2-11　心室細動電流（犬，通電時間3秒，60 Hz）

り，その回帰直線を最小自乗法で計算すると，心室細動電流の平均値（I_{av}）と犬の体重（W）の間には，$I_{av.}=3.68\,W+28.5$（相関係数＝＋0.74）の関係が成立する．

さらに，犬以外の動物で，体重が人間に相当する動物をも含めて，心室細動電流と体重との関係を検討する必要がある．Ferris らは，平均体重がそれぞれ 57.4 kg の羊 25 匹，70 kg の子牛 11 頭および 78.7 kg の豚9頭に 60 Hz の電流を3秒間流した場合の心室細動電

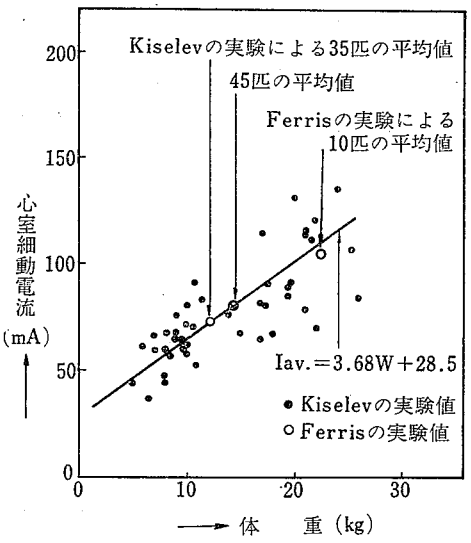


図 2-12　心室細動電流の最小値と体重の関係
(犬，通電時間3秒)

流を測定し，体重に対する心室細動電流をプロットし，図 2-13 のように，一種類の動物のみでなく，人間をも含むと考えられるような大きな他種の動物の間でも，心室細動電流は体重に比例すると結論できるような結果を得た[13]．すなわち，その関係式は $I_{av.}=3.13W+48.6$（相関係数＝＋0.84）である．同図において豚

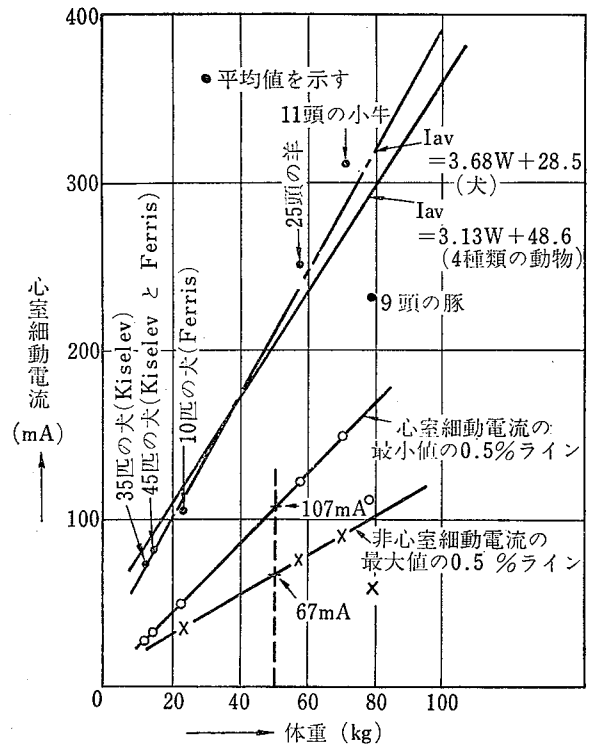


図 2-13　各種の動物に対する心室細動電流と体重の関係（通電時間3秒）

の場合に平均値が直線より低いのは，実験した豚の数が少なかったこと，解剖学上の特徴，すなわち，他の動物に比べ足の部分が占める重量の，体重に対する割合が大きいということによるものと思われる．

(3)　心室細動電流の最小値と非心室細動電流の最大値の関係

同様にして，これらの動物に関する心室細動電流の0.5パーセンタイル点を図 2-13 にプロットすると，中央部分に示された直線となる[13]．その回帰直線の式を最小自乗法で求めると(2-2)式で表わせる．

$$I=2.06W+3.89 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}2)$$

しかし，この心室細動電流は，細動が起こるまで連続的に電撃を加えて求めたものであり，心室細動を起こすに要した実際の最小電流は，この0.5パーセンタイル直線で示される値よりやや少ないものと考えられる．Ferris らは，犬，羊，子牛，豚について，心室細動を起こす直前の電流値，すなわち非心室細動電流の最大値を測定し，表 2-5 および図 2-14 ような結果を得

表 2-5　各種の動物に対する非心室細動電流

動　物	非心室細動電流 (mA)	
	0.5% tile	50% tile
犬	35	80
羊	75	220
子　牛	90	260
豚	60	210

(通電時間：3秒)

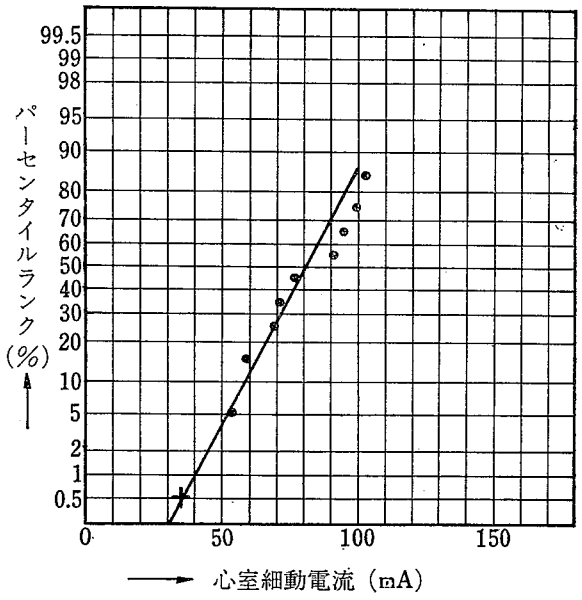


図 2-14　非心室細動電流（犬，通電時間3秒）

た[9]（羊，子牛および豚についての非心室細動電流については〔資料6〕参照）．

そこで，これらの非心室細動電流の0.5パーセンタイル点を前述の図 2-13 にプロットすると，一番下の直線になる．その回帰直線の式を最小自乗法で求めると(2-3)式で表わせる．

$$I=1.15\,W+9.28 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}3)$$

以上のことから哺乳動物に心室細動を起こさせる電流はこれら2つの0.5パーセンタイル直線の間に存在するということができる．

（4） 人間における心室細動電流値の推定

1962年と1963年の2年間に英国で起こった電気事故の例を分析した結果では，事故の 30% が女性であり，26% が 20 才以下の人々である[14]．したがって，以前 Dalziel が電気事故の被害者の体重として，成人男子の平均体重を 70 kg と仮定したのは適切ではなく，もっと軽い体重，たとえば 50 kg 程度を選んだほうが安全の上からは妥当であるといわれるようになった．

そこで，図 2-13 で人間の体重を 50 kg と仮定して，心室細動電流を推定すると，67～107 mA の間にあることがわかる．これらの値を(2-1)式に代入して，人間における通電時間の関数として心室細動電流を求めると，つぎの(2-4)式のとおりとなる．

$$K=\sqrt{T}\,I$$
$$=\sqrt{3}\times107=185\,\text{max.}$$
$$\text{または}\quad =\sqrt{3}\times67=116\,\text{min.}$$
$$\therefore\quad I=\frac{116\sim185}{\sqrt{T}}\Bigg|_{\frac{1}{120}\text{sec}}^{5\text{sec}}\ (\text{mA})\quad\cdots(2\text{-}4)$$

また，同様にして4および5才の子供における心室細動電流は，図 2-13 で体重 18 kg を代入して式(2-5)が得られる．

$$I=\frac{52\sim69}{\sqrt{T}}\Bigg|_{\frac{1}{120}\text{sec}}^{5\text{sec}}\ (\text{mA})\quad\cdots\cdots(2\text{-}5)$$

さらに，(2-2)式および(2-3)式を用いて，任意の体重に対する心室細動電流を求めることができる．すなわち，(2-2)式において体重 W_1 と W_2 における心室細動電流 I_1, I_2 の比を求めれば

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{2.06\,W_1+3.89}{2.06\,W_2+3.89}$$

あるいは

$$I_1=I_2\times\frac{2.06\,W_1+3.89}{2.06\,W_2+3.89}\ (\text{mA})\quad\cdots(2\text{-}6)$$

ここで，$W_2=50$ kg の人間に対する心室細動電流は(2-4)式から $I_2=\frac{185}{\sqrt{T}}$ とすると，これを(2-6)に代入して，

$$I_1=\frac{185}{\sqrt{T}}\times\frac{2.06\,W_1+3.89}{2.06\times50+3.89}$$
$$=\frac{3.56\,W_1+6.73}{\sqrt{T}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}7)$$

つぎに同様にして(2-3)式より $I_2=\frac{116}{\sqrt{T}}$ の場合は，

$$I_1=\frac{116}{\sqrt{T}}\times\frac{1.15\,W_1+9.28}{1.15\times50+9.28}$$
$$=\frac{1.99\,W_1+16.05}{\sqrt{T}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}8)$$

となり，任意の体重における心室細動電流は(2-7)式と(2-8)式から

$$I_1=\frac{(1.99\,W_1+16.05)\sim(3.56\,W_1+6.73)}{\sqrt{T}}\Bigg|_{\frac{1}{120}\text{sec}}^{5\text{sec}}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}9)$$

の間にあることがわかる．

ここで(2-4)式あるいは(2-9)式は，通電時間 1/120 秒から5秒までの間で成立するということであるが，これら以外の時間に対してはどうであろうか．1/120 秒以下の電流とは，60 Hz の交流の半波以下の非常に短い通電時間であり，いわゆるパルス電撃と考えられるものとなる．一方5秒より長い通電時間の場合についても，データはあまり発表されたものがないが，20～30 秒までは，多少電流値も小さく，それ以上長くとも一様に心室細動が存在する (Kiselev)[12] とか，さらに長い時間に対しては窒息が生じてきて，心室細動電流に徐々に影響を及ぼし，さらに電流値が低くなる (P. H. Gerst 他)[15] とかいわれている．

（5） 心室細動電流に及ぼす電流径路の影響

Ferris, King らは，羊の電流径路による心室細動電流の変化について実験し，表 2-6 のような結果を得ている[9]．また，Freiberger らは，人体に流れる電流のうち何パーセントが心臓に流れるかを測定し，表 2-7 のような結果を得ている[16]．

これらによると，心臓に対する分流度は，頭部→後足，前足→後足の電流径路が最も大きく，前足間がこれに続き，後足間は非常に小さいといえる．ただし，後足間の通電は，心臓に対する危険は小さいが，電流

表 2-6　心室細動電流に及ぼす電流径路の影響

電流径路	羊の数	電流 (mA) 心室細動を起こす最小電流 平均	範囲	心室細動を起こさない最大電流 平均
右前足→左後足	20	250	160～390	240
右前足→左前足	10	390	300～370	360
頭　→左後足	10	300	120～430	260
左前足→右胸部	10	240	140～390	200
右胸部→左胸部	11	260	170～410	240
右後足→左後足	5	12.4 A まで心室細動を起こさない		

(60 Hz，通電時間 3 秒)

表 2-7　心臓部を流れる電流比

電流径路	心臓部を流れる電流比		
手　→ 手	1.9～ 4.4%	平均 3.3%	1) 死体についての実験
手　→ 足	4.8～ 8.5%	平均 6.7%	
足　→ 足	0.4% 以下		
頭　→後足	8.3～10.8%	平均 9.0%	2) 生犬についての実験
右前足→後足	6.2～10.3%	平均 7.6%	
左前足→後足	5.3～ 8.0%	平均 7.1%	
後　足→後足	～0		

1) 死後 30 分は電流分布が変化しないことを確認している．(Freiberger)

2) W.B.Kouwenhoven, D.R.Hooker & O.R.Langworthy : Amer. J. Physiol., 100, 344 (1932)

の大きさによっては，壊死のため切断せねばならないことも少なくないので，全般的にみた場合の危険度は決して小さくないことを認識しなければならない．

(6)　心室細動電流に及ぼす周波数の影響

さて，心室細動電流は，その周波数によって異なることは前にも触れたところであるが，犬の心臓に 2 秒間直接矩形波の断続電流を流したとき，断続周波数と心室細動電流の最小値との関係を示したのが図 2-15 である．

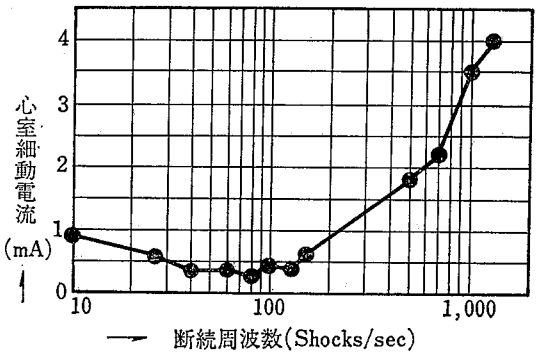


図 2-15　矩形波断続電流の周波数と心室細動電流 (犬，通電時間 2 秒)

これによると，断続周波数が 40～100 Hz の間で心室細動電流が最も小さくなっている．

同様に犬についての実験で，正弦波電流の場合の曲線もこれに似た傾向で，図 2-16 のようである．この結果からも，50 Hz, 60 Hz の周波数は最も都合の悪い周波数といえる．また，Ferris, King らが羊について，一方の前足から他の側の後足に 3 秒間通電して実験した結果が，表 2-8 である[9]．

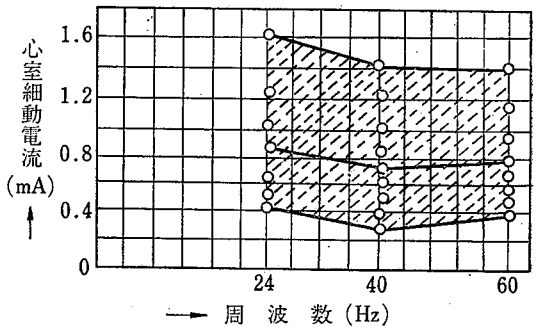


図 2-16　正弦波交流における周波数と心室細動電流との関係 (犬，通電時間 2 秒)

表 2-8　心室細動電流に及ぼす周波数の影響

電流の種別および周波数		羊の数	電流 (mA) 心室細動を起こす最小値 平均	範囲	心室細動を起こさない最大値 平均
直流	前足(+)	6	1,500	1,200～2,100	1,200
	前足(−)	5	1,100	700～1,500	1,000
	合　計	11	1,300	700～2,100	1,100
交流	25 Hz	10	320	190～490	290
	60 Hz	25	250	160～390	240

(通電時間　3 秒)

これによると，交流は直流より危険であり，交流 25 Hz と 60 Hz との差はあまりないことがわかる．なお直流については，極性により多少電流値が異なっており，前足が (−) の場合のほうが小さくなっている．

高周波電流についての実験記録としては，Kouwenhoven 他 2 人の犬に対する結果があるが，1,260 Hz の場合，心室細動を起こす電流値は，60 Hz の場合に比べて 12 倍も大きいことを見出している．

（7） 通電時間と心臓の脈動周期の関係

先に，心室細動を起こす電流値は，電撃の継続時間によって変化し，1/120 秒から5秒までの間では，ある一定の関係があることを示した．さらに，電撃の継続時間と心臓の脈動周期との関係を調べると，図2-17のようになる．これは Ferris らの羊に関する実験結果[9]であるが，心室細動電流は心臓の脈動周期と電撃の継続時間とが等しい点を境界として大きく変化する．通電時間が脈動周期に比べて十分長いと心室細動電流を起こす値が小さくなり，危険性が増すことを示している．

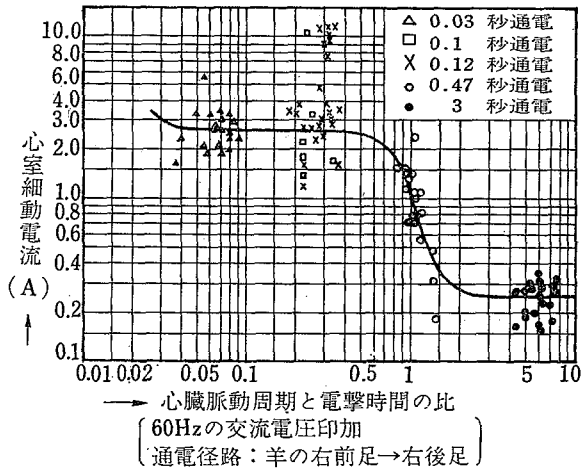


図 2-17　通電時間と心臓の脈動周期の関係

（8） 心室細動電流に及ぼす心臓への電撃印加位相の影響

次いで，心室細動の発生について，心臓脈動周期のどの位相において電撃が与えられるかが重要な因子になっている．

心臓の脈動周期を心電図で見ると，図 2-18 のように，P波（心房の収縮による波形）Q-R-S 波（心室の収縮による波形）およびT波（心室の収縮の終了時に生ずる波形）よりなっており，R-R の間隔を一般に心臓の脈動周期と呼んでいる．

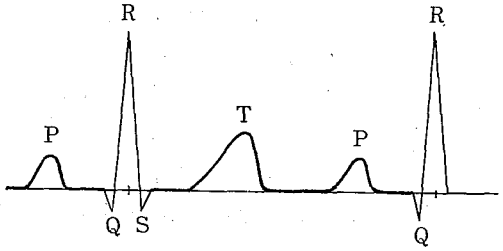


図 2-18　心臓の脈動周期

Ferris, King らは，羊について 60Hz の電流を 0.03 秒間右前足と左後足間に通電し，電撃を印加した位相と心室細動を起こす確率についての実験を行ない，図 2-19 のような結果を得ている[9]．

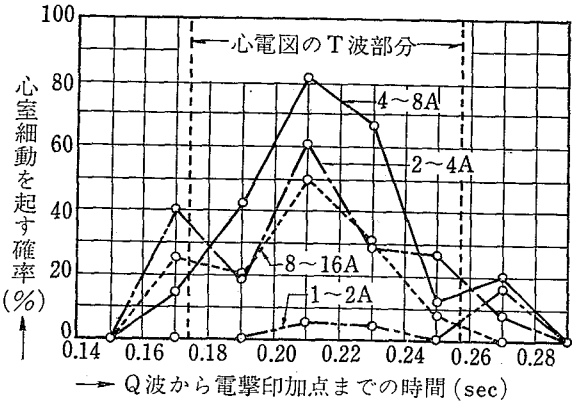


図 2-19　電撃印加位相と心室細動を起こす確率との関係（羊，60Hz，通電時間 0.03秒）

これによると，電撃が心室の収縮が終わるT波部分で印加されると心室細動を起こす確率が大きくなり危険である．また，Kouwenhoven らが同様の実験を犬について行なった結果でも，電撃印加がT波部分であるときが最も危険であることが報告されている[10]．

2.4 反電撃（Counter electric shock）

心室細動電流をこえる通電電流に対しては，心室細動の確率は増加するが，ある程度増加すると極大点に達し，それ以上通電電流を増加するとかえって心室細

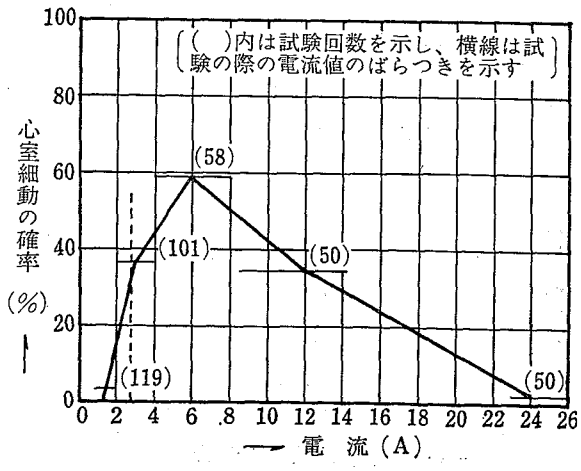


図 2-20　電流と心室細動の確率との関係（羊，60 Hz，通電時間 0.03 秒）

動の確率が減少して起こりにくくなる．この様子を示すと図 2-20 のとおりである[9]．

この原因は，大きな電流によって電撃を受けたときは心臓が細動を起こさずに心臓の筋肉が一時に収縮して脈動を停止するが，それがきわめて短時間であれば電撃後直ちに正規の脈動に戻るためである．したがって，低圧電気で比較的小さな電流が流れる場合のほうが心室細動で死亡する危険性が大きい．なお，この事実を逆に利用して，心室細動を起こした場合の回復のために，大きな電流を短時間流して心臓の脈動を正常に戻す除細動装置（Defibrillator）が用いられている．その概要の一例を示すと，

[電圧：AC 480 V（大人用）および 120 V（子供用）
電流：AC 5 A
通電時間：0.25 秒]

となっており，図 2-21 に例示するように左乳首と胸骨上部との間に，9 平方インチの電極をあて，フットスイッチによってショックを与えるようになっている．

図 2-22 は，除細動装置の使用に成功した例の心電図である．

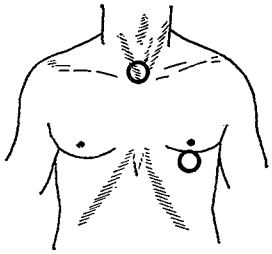


図 2-21　回復ショックを与える電極の位置の例

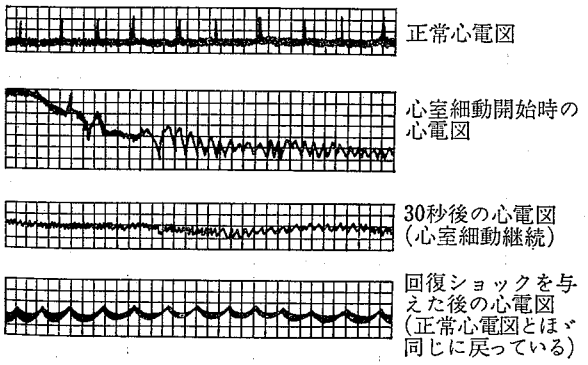


図 2-22　除細動装置使用前後の心電図

2.5　高温症（Hyperpyrexia）[17]

通電時間が長くなると人体抵抗のために体内にジュール熱が発生する．その結果，人体組織の温度が上昇して正常な生活機能が失なわれ，他に障害がない場合でも死亡することがある．とくに高い周波数の電流の場合には，誘電体損失や抵抗の表皮効果なども問題になってくるので高温症で死亡することが多い．しかし直流や商用周波数の交流の場合には高温症となる前に呼吸障害や心臓障害が先に起こるので，直接の死因となることは少ないと考えられる．図 2-23 は，交流の周波数をパラメータとして，電撃時間と電撃電流との関係で高温症の領域を示したものである．

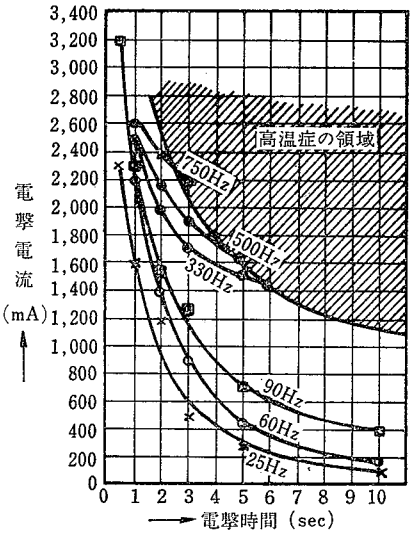


図 2-23　高温症領域

2.6　その他の電撃障害[18]

電撃障害には，これまでに述べた呼吸停止や心臓停止によるショック死の他に，つぎのような障害が認められている．

（a）　失　神

電撃後，短いもので 2～3 分あるいは 20～30 分持続するものもあるが，覚せい後に頭痛や全身のけん怠感を生ずるほか特別の後遺症のないものが多い．失神する率は電圧の高いほど大きい．

（b）　皮膚の鉱性変化

皮膚が暗黒色となり，硬化乾燥して鉱質のような感触となるもので，人体にはとくに大きな影響を及ぼさない．

（c）　表皮はく脱

アーク，スパークなどの際の瞬間的な高熱と電流による機械的破壊作用によって表皮がはく脱するが，手当によって完治する．

（d）　電　絞

電流の流入部から，皮膚の種々の方向に向かって灰白色や，やや紅色の電紋が現われる．

（e）　電流斑

電流の流出入部の表皮が隆起してそう白色あるいは灰白色に変ずるもので，電撃症でもっとも特有の症状といわれている．

（f）　電撃潰瘍

電流の流出入部に傷の周縁が一部炭化して燃焼したような，またえぐられたような潰瘍が生ずる．なおこれは，電撃後2週間前後までに約 30% 程度の潰瘍面の拡大をきたすこともあり，最初の面積が小さくとも安心することはできない．障害度の大きいものは神経や骨の露出を見ることもある．

（g）　手足の運動障害と壊死

手や足が電流の径路となることが多いため，運動機能が失なわれたり，壊死のため手足を切断しなければならないことがある．

（h）　後出血

電撃による損傷では，ほとんど出血はないが，後に多量の出血をみることがある．この場合，とくに内部組織が破壊されていて止血がうまくゆかないこともあるので注意を要する．

その他電流径路にあたった血管のぜい弱に加えて，電撃による血圧の上昇とが重なって，血管が破れて大出血を起こすことが多い．これが脳やせきずいで起これば運動機能の障害も生ずる．さらに筋肉が急激に収縮される結果，骨折，組織の機能障害，神経障害も起こる．

なお，電流が体内を通過すると，生化学的な変化によって生活機能が変調することもあり，感電直後はなんら異常がなくても，これが原因となってある時間経過後または相当日時を経過した後に急死する例もある．したがって，電撃を受けた場合には，たとえそのとき自覚症状が少なくても必ず専門医の診察を受けることがたいせつである．

2.7 総　　括

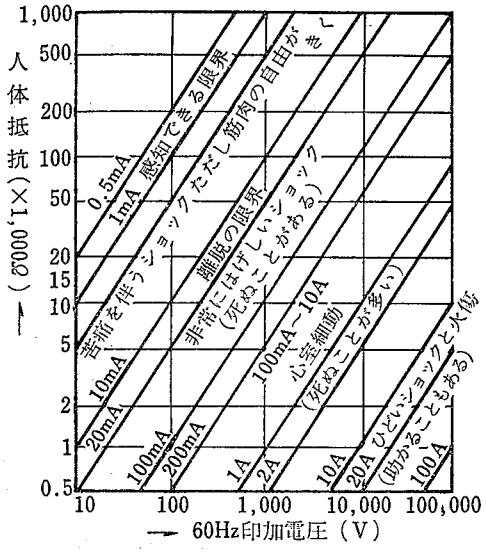
以上，感知電流，心室細動電流など電流の大きさによる人体への影響について，個々に述べてきたが，ここに一括して示すと表 2-9 および図 2-24 のとおりである．

また，S. Koeppen らは過去 1,000 件の電気事故を調査解析し，さらに動物で行なった多くの実験による結果を補足して，50 Hz の電流で，通電径路が手→胴→足，通電時間が1秒の場合の生理的反応を，数 mA から数Aまでの通電電流について観察し，表 2-10 のような結果を得て，生理的反応から電流範囲を4つの領域に分けている[19]．そして彼らは心室細動が表2-10のⅢの電流領域に限定され，Ⅳの領域では十分に観察できなかったと述べている．

また，K. Brinkmann と S. Koeppen による共同研究は人体への生理的作用には通電電流と通電時間とが決定的な要素になることを示し，新たな研究結果に基

表 2-9　人体に対する電流の作用

電撃の影響	直流		交流 60 Hz		交流 10,000 Hz	
	男子	女子	男子	女子	男子	女子
感知電流，少しちくちくする	5.2 mA	3.5 mA	1.1 mA	0.7 mA	12 mA	8 mA
苦痛を伴なわないショック，筋肉の自由がきく	9	6	1.8	1.2	17	11
苦痛を伴なうショック，ただし，筋肉の自由がきく	62	41	9	6	55	37
苦痛を伴なうショック，離脱の限界	74	50	16	10.5	75	50
苦痛を伴なうはげしいショック，筋肉強直，呼吸困難	90	60	23	15	94	63
心室細動の可能性あり，通電時間 0.03 sec	1,300	1,300	1,000	1,000	1,100	1,100
〃　3.0 sec	500	500	100	100	500	500
心室細動が確実に発生する	上記の値を 2.75 倍する．					



（1） Dalziel その他の試験データをもとにしている.
（2） 電流径路は手→足
（3） 子供はこれの半分の電流にしか耐えられない.
（4） 人体抵抗の最低値を 500Ω と仮定している.

図 2-24　60Hz の電流による電撃が成人(男)に与える影響

表 2-10　四区分の電流範囲における生理的反応

電流範囲	生　理　作　用	電流 (mA)
Ⅰ	電流を感知する状態から，自発的に離脱が不可能になる状態 心臓リズムや神経系統には影響がない.	約 25 以下
Ⅱ	まだ耐えうる電流 血圧上昇，心臓の脈動の不規則，回復性心臓停止 50mA 以上では失神	25～80
Ⅲ	失神，心室細動	80～3000
Ⅳ	血圧上昇，回復性心臓停止 不整脈，肺気腫，失神	約 3000 以上

づき，図 2-25 に示すように，表 2-10 の電流範囲Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対応した電流-時間特性曲線 a，b を求めた[20].

この図において，電流範囲ⅡとⅢとを区別する曲線“b”は，通電時間が約10^3ms以下の範囲で電流I_pと時間tとの積Qが，

$Q=I_p\times t=100$(mA-s)（ただし，電流は波高値）

に等しく，その後は通電時間が長くなっても 85mA（波高値，実効値では 60mA）で時間軸に平行な直線になる．同様に電流範囲ⅠとⅡとを区別する曲線“a”

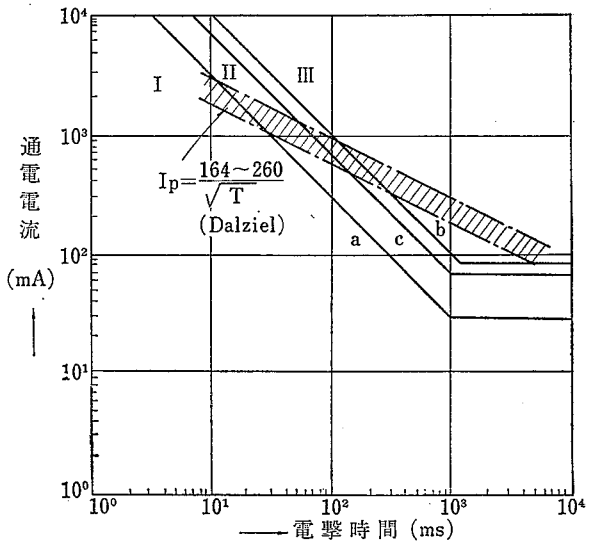


図 2-25　生理的反応からみた電流-時間区分領域

は，通電時間が約 10^3ms 以下の範囲で，電流と時間との積Qが，

$Q=I_p\times t=30$(mA-s)（ただし，電流は波高値）

に等しく，10^3ms 以後は 30mA（波高値，実効値では 21mA）で時間軸に平行な直線になる．この曲線は表 2-10 とは別な研究結果に基づき得られたものであるが，表 2-10 で確立された数字をよく実証しているものと思われる．さらに，S.Koeppen と P.Osypka は，図 2-25 に検討を加え，Ⅱの領域でも，呼吸停止を引き起こし，通電時間が長い場合は心室細動へと移行する可能性をもつ電流領域として曲線“c”を追加した．この曲線“c”は，通電時間 10^3ms 以下の範囲で，電流と時間との積Qが，

$Q=I_p\times t=70$(mA-s)（ただし，電流は波高値）

に等しく，10^3ms 以後は 70mA（波高値，実効値では 50mA）で時間軸に平行になる．

また，C.F.Dalziel が人間の体重を 50kg として心室細動電流と通電時間との関係を導いた次の式

$$I\times t^{1/2}=116\sim185\Big|_{1/120\text{sec}}^{5\text{sec}}$$

を図 2-25 の中に併せて示すと，S.Koeppen らの曲線“b”とは，かなり相異していることがわかる．このため，このような曲線としてはまだ定説がないといえる．

感電事故は，交通事故あるいはつい落事故などのような事故と異なり，災害発生時の詳細な環境の分析が困難であり，また正確な模擬実験なども行ない得ない

性質のものであるところから，致命傷を受けた例と致命傷に至らなかった例との区別をすることが非常に難かしい．

幸いこれに関しては，必ずしも十分とはいい得ないけれども，外国の文献にその一例がのっているので，〔資料7および8〕に紹介しておく．

これらによると，特別の場合を除き，通電時間，電流値およびエネルギーの大小が被害の程度を左右することが示されており，安全限界の判定にはこれらの要素を総合する必要性を裏付けている．

引　用　文　献

1) C.F.Dalziel, J.B.Lagen & J. L. Thurston : Electical Engineering, 60 Trans., 1073 (1941)
2) G.S.Brindley : F.P.R.C. 891, Air Ministry, London (1954)
3) C.F.Dalziel : B.R.A.M./1961/D.2, ILO, Geneva (1961)
4) C.F.Dalziel : AIEE Trans., Vol.60, p.1073 (1941)
5) C.F.Dalziel : Electrical Engineering, Vol.73, No.7, p.625 (1954)
6) C.F. Dalziel, J.B. Lagen & J. L. Thurston : AIEE Trans., Vol.60, p.1073 (1941)
7) C.F.Dalziel : AIEE Trans., Vol.62, p.739 (1943)
8) C.F.Dalziel, E. Ogden, C. E. Abbott : Electrical Engineering, p.745 (1943)
9) L.P.Ferris, B.G.King, P.W.Spence & H.B.Williams : TAIEE, Vol.55, p.498 (1936)
10) W.B.Kouwenhoven, G.G.Knickerbocker, R.W.Chestnut, W.R.Milnor & D.J.Sass : AIEE Trans., Vol. 78, p.163 (1959)
11) 岩林：電力，臨時増刊，電気安全号，p.1749 (昭 32.11)
12) A.P.Kislev : Probl. of Elec. Equipment, Elec. Supply and Elec. Measurements (in Russian), Sb. MIIT Vol.171, p.47 (1963)
13) C.F.Dalziel & W.R.Lee : IEEE Spectrum, p.44, Feb. (1969)
14) W.R.Lee : Brit. Med. J., p.616, Sep. (1965)
15) P.H.Gerst, W.H.Fleming & J.R.Malone, Circulation Res., Vol.19, p.63, July. (1966)
16) H.Freiberger : Der elektrische Widerstand des Menschlichen Körpers gegen technischen Gleich-und Wechselstrom. Springer Verlag (1934)
17) A.G.Conrad : H.W.Haggard, Elec. Eng., p.399(1934)
18) 依田：電力，Vol.48, No.12, p.87
19) S.Koeppen & H.Tolazzi : ETZ-B Bd.18, H.6, p.168 (1966)
20) K.Brinkmann, S.Koeppen & G.Leggemann : Conti. Elektro. Ber. Bd.5, p.265 (1959)

第3章　人体の電気抵抗

電撃の強さは，電撃時に人体に流れる電流によって決まるものであることは最初に述べたとおりであるが，実際の電源は定電圧になっているので，人体に流れる電流に制限を与え，電撃の危害の程度を左右するのはオームの法則により，通電回路の抵抗，なかんずく人体の電気抵抗である．そこで，人体の抵抗というものが取り上げられ，1868 年に Kohlrausch が測定して以来，多数の人々が低電圧による生体実験，電撃事故の解析，電気死刑者の観察，新しい死体についての実験などによって研究を進めてきた．

たとえば，人体に微小電流を流すと，電流はその初期値から急激に減少して一定の値に達するが，これがちようど，絶縁不良のコンデンサに通電した場合に類似していることは，1895 年に Einthoven がすでに指摘しているところである．

人体抵抗の数値も，電源の種類，電圧の大きさ，接触部位，接触圧力，接触面の湿度，皮膚温，接触時間などにより複雑に変化するほか，個人差，心理的影響睡眠前後などによる差も見られる．

3.1　人体各部の抵抗率

人体各部の抵抗率は，その器官の種類によって異なり，低電圧において測定したこれらの値を示すと表 3-1 のとおりである[1,2]．

この表によってもわかるように皮膚の抵抗率が最も大きい．内部組織は著しく低く，その抵抗率および抵抗の温度係数は約1% の食塩水に相当する．血液，リンパ液の多い内部組織の抵抗率は 100～200Ω·cm であり，これに続き筋肉，神経，骨の順序に抵抗率が大きくなっている．

表 3-1　人体各部の抵抗率

	抵抗率 (イ)	抵抗率 (ロ)	抵抗率の比 (ハ)
血液	185Ω·cm	—	—
内部組織	80Ω·cm	—	—
脳	—	2,000Ω·cm	—
肝臓	—	900Ω·cm	—
筋肉	—	1,500Ω·cm	1
神経	—	—	2～ 3
骨	—	900,000Ω·cm	15～ 20
皮膚	2×10^4～$10^5\Omega/cm^2$	4×10^4～$10^5\Omega/cm^2$	100～500

注）(1)（イ） H.Freiberger
（ロ） W.B.Kouwenhoven, O.Langworthy
（ハ） M.Critchley
の各報告による．
(2) 皮膚の抵抗は体積抵抗率（Ω·cm）で表わすよりも，むしろ皮膚表面に接触した電極と内部組織との間の抵抗を，単位面積当りの抵抗（Ω/cm^2）として表わした．

3.2　皮膚の電気抵抗

(1)　部位による相違

人体の電気抵抗の中で，皮膚のもつ大きさは，表3-1で示したように非常に大きいが，工具をもって作業する作業者の手の場合のように堅い皮膚で10,000Ω位，事務労働者の手の場合のように柔らかい皮膚で，約1,000Ω と，皮膚の抵抗はかなり大幅に変動する．また，B.E.Маноилов[3] や芹沢[4,5]の研究によると，手の甲，あご，ほほ，すねには，電気抵抗がとくに小さい皮電点と称せられる部分があるといわれる．この皮電点の大きさは 1～2mm² 程度ではあるが，電気刺激によって，神経が異状に興奮して，多量の皮脂が分泌して，その部分の電気抵抗を周囲の 1/10 程度に小さくするとされている．

このほか，皮膚の電気抵抗は，以下に述べる諸条件によっても異なる．

（2） 湿り度合による変化

Gilbert と Dalziel の実験結果より，皮膚の湿り度合による皮膚抵抗の変化を示すと図3-1のようになる．

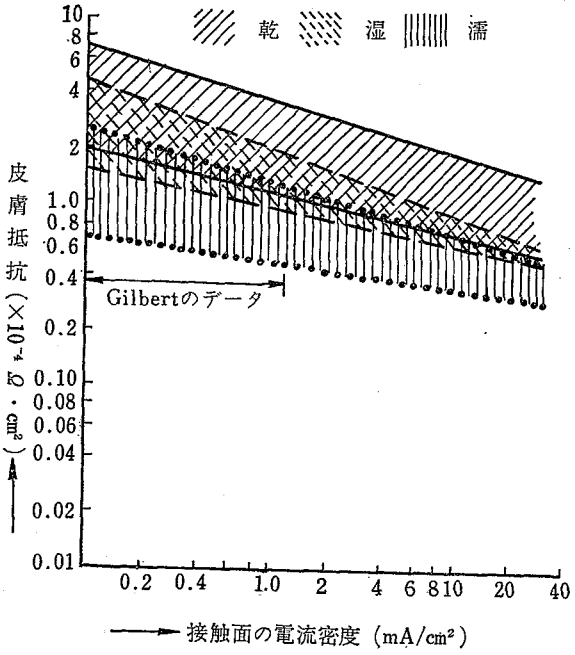


図 3-1　皮膚の湿り度合による皮膚抵抗の変化

これによると，皮膚が濡れている場合には，乾いている場合に比較して 1/10 以上皮膚抵抗が減少する．また，他の人々の研究によると，発汗の場合には 1/22，水に浸した場合には 1/25 に抵抗が減少するともいわれている．いずれにしても，手などが湿っている場合には著しい抵抗の減少が認められるところから，一般的には，そのうちの低い値を予測しておくことがより安全であるといえよう．

（3） 皮膚と電極の接触面積による変化

図3-2は，湿った手について，電流密度，通電電流，接触面積と皮膚抵抗との関係を示したものである．

これによると，同じ大きさの電流が流れても接触面積の大きい程皮膚抵抗は小さくなる．ただし，接触面積が 1cm² より小さい範囲では，皮膚抵抗は大きくならずに，皮膚にキズがついて抵抗がほとんどなくなるので，あまり小さい接触面積の場合は，皮膚が電撃に対する抵抗として十分役立たないことがある．

（4） 印加電圧による変化

a）直流および交流電圧の場合

図 3-3 は，Freiberger が 60 体の新しい死体を材

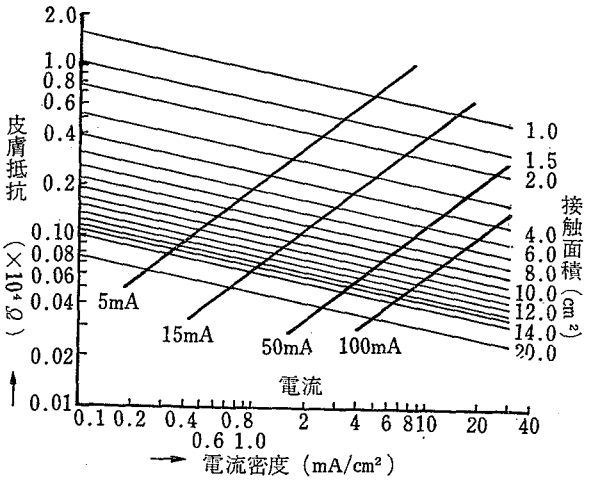
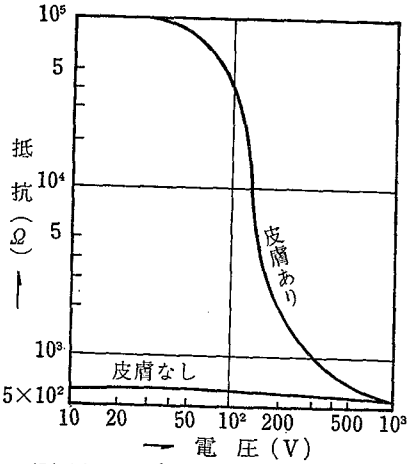


図 3-2　湿った手における皮膚抵抗と電流密度，接触面積との関係

料として直流 440V，交流 50Hz，5,200V までの通電実験を行なって得た結果である[1]．すなわち，両曲線は，皮膚がある場合の手から足への通電径路に対する抵抗値を電圧の変化に対して示したもの および同一条件で皮膚を除去した場合の手から足への抵抗値を示したもので，後者はおよそ一定となっており，両者は 1,000V 付近で一致している．



〔電流径路：手→足、電極：10～12cm²〕

図 3-3　印加電圧による人体抵抗の変化

皮膚がある場合は，1,000V 近くで，皮膚が完全に一種の絶縁破壊をして短絡状態となり，内部組織のみの抵抗となることを意味するものである．

この皮膚の破壊する臨界電圧は，皮膚の部分で異なり，表皮の薄いところでは 100～200V である．

また，抵抗値は接触圧力によりやや変化するが，0.2～0.3kg/cm² の圧力を加えれば一定値になる．

Kouwenhoven が 60Hz の電流を用いて，人体の

手-手間の抵抗を測定し，表 3-2 のような結果を得ている．

表 3-2 印加電圧による人体抵抗の変化

電 圧(V)	抵 抗 (Ω)	
	平 均	範 囲
50	10,000	5,000～18,000
500	1,200	800～ 1,800
1,000	1,100	800～ 1,800

（通電径路：手—手）

b）インパルスの場合

Dalziel は，被験者を塩水に浸した 3/4 インチの厚さの金属板にのせ，直径 3.66mm の銅線を握らせた状態でインパルス (100mA) を通電した後の抵抗を測定し，表 3-3 のような結果を得ている．

表 3-3 60Hz 正弦波とインパルスに対する人体抵抗の比較

被験者番号	60Hz 正弦波通電後の抵抗 (Ω)		インパルス通電後の抵抗 (Ω)	
	右手—両足	左手—両足	右手—両足	左手—両足
1	1,260	1,490	1,190	1,510
2	1,630	1,500	1,390	1,260
3	1,450	1,600	1,410	1,490
4	1,370	1,640	1,300	1,400
5	1,250	1,275	1,200	1,160
6	1,480	1,500	1,710	1,440
7	1,460	1,230	1,135	1,250
8	2,150	1,970	1,730	1,820
9	1,650	—	1,170	—
最小	1,230		1,135	

注）（1） 60Hz 正弦波の可随電流の通電試験の場合には，手—手間で 1,570～4,430(Ω) であった．上表のデータはこれとは別の被験者によるものである．

（2） インパルス通電後の抵抗は，$R=\frac{E}{I}$(Ω) で計算された．

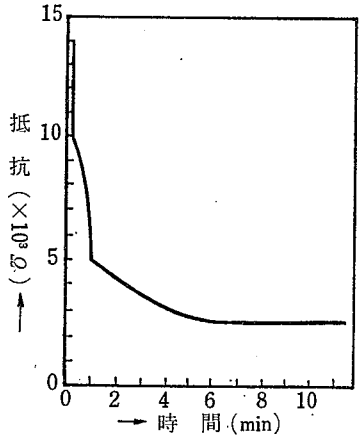
(E=1,750V，Iはインパルス印加後一定値になったときに測定した値)

これによると，インパルス通電後の抵抗は，60Hz 正弦波通電後と比較して 10～25% 低くなっている．これは，インパルスによって皮膚の正常な保護作用が破壊されるためと考えられる．

また，この実験を手およびひじも塩水の中に浸して最悪の条件で行なった結果では，60Hz の交流および 10mA の直流による場合は 400～600Ω (平均 500Ω) であるのに対し，インパルスでは 300Ω 以下という値が出ている．

(5) 印加時間による変化

また抵抗値は電圧の印加時間によっても図 3-4 に示すように変化する．



[交流電圧印加：5V
電流径路：下腿→下腿
電 極：12cm]

図 3-4 印加時間による抵抗の変化

すなわち同図は 5V の交流を印加して測定したもので時間の経過とともに抵抗値は減少するが，それは急激に減少する部分と，緩慢に減少する部分とに分けられる．前者は印加電圧によって皮膚が破壊される時間特性部分であり，後者はそのあとの人体の温度上昇による負の抵抗温度係数にもとずく特性部分である．前者の部分は印加電圧の上昇とともに破壊時間も急激に短かくなる．図 3-5 は，電圧印加時間をパラメータにして印加電圧と抵抗変化の模様を示したものである．

なお，Freiberger は皮膚が抵抗とコンデンサの並列になった容量性インピーダンスをもつものとし，人

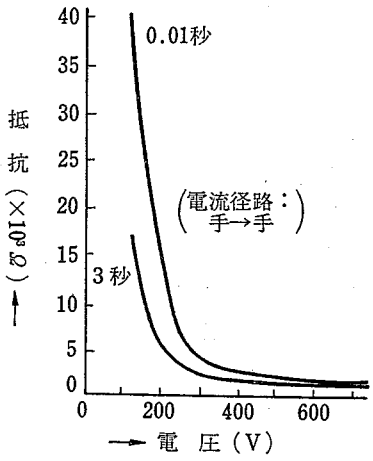


図 3-5 抵抗値の時間的変化

体の等価回路とし図3-6のような回路を提案している．その静電容量は 0.01～0.05 μF/cm^2 程度であって，これは周波数の増加とともに減少する．

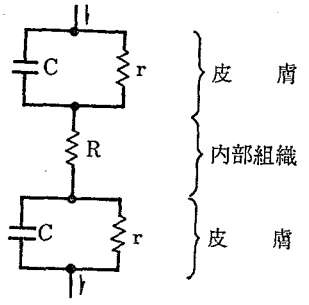
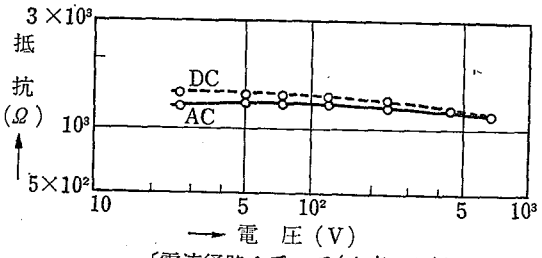


図 3-6　人体の電気的等価回路

3.3　内部組織の電気抵抗

皮膚以外の人体の内部組織の抵抗は前述のとおりほぼ一定で図3-7に示すように交流，直流による差も少なく通電時間が長くなると温度上昇によって抵抗値が減少する．



〔電流径路：手→手(皮膚なし)〕

図 3-7　人体の内部抵抗

なお，関節部分は骨，筋肉，腱などの抵抗率の大きいもので構成されているので局部的に抵抗が大きい．

3.4　人体の電気抵抗の範囲

以上のような皮膚と内部組織の抵抗を加えたものが人体抵抗となる．

アメリカの火災保険協会試験所（UL）で，大人 40 人（男 20，女 20），子供 47 人（男 25，女 22）について，12V の乾電池を用いて，それぞれ 5mA，1mA の電流を流して測定した人体抵抗値を示すと，表3-4（大人）および表3-5（子供）のとおりである．

これらのことから Freiberger は，人体の抵抗として最も一般的感電の電流径路である手から足を対象とし，生体についての推定抵抗値として図3-8に示すような存在範囲を与えている[1]．

以上の諸報告から，手足が濡れていると人体の抵抗

表 3-4　人体の電気抵抗（大人）

（単位　Ω）

抵抗の範囲	通電径路				
	手一手（乾）	手一足（乾）	手一手（湿）	手一足（湿）	右手一足（湿）
最　小	6,600	1,550	930	610	820
最　大	18,000	13,500	2,720	1,260	1,950
平　均	11,300	4,800	1,940	870	1,220

注）（1）年令範囲　18～58 才
（2）身長範囲　152～185 cm
（3）体重範囲　45～94 kg

表 3-5　人体の電気抵抗（子供）

（単位　Ω）

抵抗の範囲		通電径路					
		手一手（乾）	手一足（乾）	右手一足（乾）	手一手（湿）	手一足（湿）	右手一足（湿）
最　小		3,800	1,810	1,900	1,680	860	1,270
最大	白人	50,400	12,950	35,450	11,860	2,420	3,300
	黒人	240,800	55,000	28,000	5,200	4,200	5,700
平　均		26,500	5,050	7,800	2,860	1,440	2,040

注）（1）年令範囲　3～15 才
（2）身長範囲　89～160 cm
（3）体重範囲　14～58 kg
（4）黒人被験者　8 名

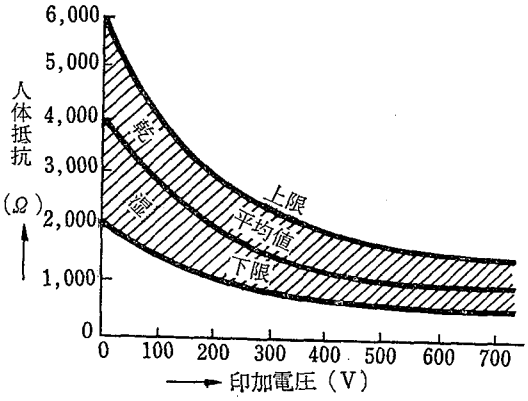


図 3-8　人体抵抗範囲

値が小さくなり，500Ω から 1,000Ω に近い数字になる．乾いていれば数千 Ω になっている．したがって感電した場合に手足が濡れているかどうかによって，単なるショックですむか，あるいは死んでしまうという結果になる．

引　用　文　献

1) H. Freiberger : Der elektrische Widerstand des menschlichen Korpers gegen technischen Gleich und Wechselstrom, Elektrizitätswirtschaft, Vol.33, p.37. (1933)

2) W.B.Kouwenhoven & O.Langworthy : Effect of electric shock, TAIEE, Jan. p.381 (1930)
3) В.Е.Манойлов : "人体の導電率の特性に関する研究", ЗЛЕКТРИЧЕ.СТВО, No.11, pp.9—13 (1963)
4) 芹沢：鍼，灸の科学，医歯薬出版（昭 38.3）
5) 芹沢：点状皮膚電気抵抗低下現象（皮電点）に関する検討，医学の歩み，Vol.34, No.3, pp.119—126（昭 35），および Vol.34, No.4, pp.181～185（昭 35）

第4章　電撃危険に対する安全限界

これまでに，電撃の人体に及ぼす影響あるいは危険度に関する種々の要素について述べてきたが，実際問題としてわれわれに必要なのは，これらの要素を加味した上でのおよその安全限界はどの程度であろうかということである．

これは，非常にむずかしい問題で，すでに述べたように電撃を受けたときの種々の条件により異なるので一概にある値を定めることができないが，一応最悪の電気的条件を基準として，各国で採用されている例などを中心に解説する．

4.1 安全電圧

電撃の危険度を表わす最も大きな要素は，すでに述べてきているように，人体に流れる電流であり，電圧の大きさは二次的なものである．

したがって，一義的に危険電圧を明示することはできないが，人体が電撃を受けた際の電気的条件が最も悪いものとしてつぎのように考えることができよう．

1930 年にアメリカの火災保険協会試験所 (UL) で，両手にペンチを握らせて 60Hz の正弦波電圧を加え，13名の男子について実験をしているが，それによって耐えられる安全な電圧（可随電圧）の値を求めた結果は，最低 20V，最高 40V，平均 27.8V になっている．

この実験において流れた電流および計算による人体のインピーダンスの最大，最小，平均値をも併せて示すと表 4-1 のとおりである．

また，1934 年にインターナショナル・ハーベスタ社で濡れたボイラ内で何Vまで安全でありうるかを調べるため，交流の一方の極を手につなぎ，他方の極は水を満たしたバケツの中の物を拾わせるという方法をとった．22 名の男子がこの実験を行なった結果，12～20V が耐え得る最大電圧であった．したがって，この程度でも条件によっては危険であるということができる．

表 4-1　我慢できる 60Hz 電圧（電流）値

区分 / 範囲	電圧 (V)	電流 (mA)	計算による人体のインピーダンス (Ω)
最大	40.0	10.0	6,670
最小	20.0	6.0	2,330
平均	27.8	7.8	3,560

実際の死亡例をあげるならば，イタリアでは 46V で死んでおり，日本でも 35V というのが過去にあり，昭和 33 年に山口県の某坑内で，50V の電球を取替えようとしてソケットの口金に触れて感電死した例もある．

このようなわけで安全電圧としては，ドイツなどでは 24V を採用している．ボイラ内でハンドランプを使用する場合には，大地に対し 24V 以下にせよと ILO でも勧告している．

表 4-2 は人体の電気抵抗がきわめて低くなる可能性のある場所で作業する場合の安全電圧として，各国で採用している値である．

表 4-2　各国で採用している安全電圧

国名	安全電圧 (V)
チェコスロバキア	20
ドイツ	24
イギリス	24
オーストリア	65 (0.5 秒) 110～130 (0.2 秒)
ベルギー	35
スイス	36
オランダ	50
フランス	24 (A.C.) 50 (D.C.)

絶対に安全な電圧の限界としては，乾いた手で 30V (A.C.)，濡れた手で 20V (A.C.)，浴槽中で 10V (A.C.)，という値が示されているが，これは常人の場合であって特異体質の場合にはこれら以下の値になることもあろう．

4.2　危険接触電圧と通電時間

ドイツの電気規定 VDE 0141/2.64 では，導電部と大地間に人間が接触して電撃を受けたときに，人体にかかる電圧（人体を流れる電流と人体電気抵抗の積）を接触電圧といっている（〔資料9〕参照）．

したがって，この接触電圧について考えるほうが印加電圧あるいは危険電圧についてそれぞれ単独で考えるより危険度の表わし方としては実際的であり，この接触電圧の低いほど人体の危険度は小さくなる．わが国では，これに関する規定はないが，ドイツではこの接触電圧の値を 65V，スイスでは 50V，イギリスでは 40V と定められている．

また，Boll は，Dalziel の研究をもとにして手—手または手—足の径路で通電した場合の通電時間と危険電流との関係を表 4-3 のごとく与えているが[1]，この危険電流値に人体抵抗値の最小を 500Ω と仮定して危険接触電圧を求めると同表下欄のようになる．

表 4-3　種々の通電時間に対する危険電流と危険接触電圧

通電時間 (sec)	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
危険電流 (mA)	180	200	220	250	280	330	400
危険接触電圧 (V)	90	100	110	125	140	165	200

なお，ドイツが VDE 0141/2.64 で規定している通電時間と許容接触電圧の関係を示すと図 4-1 のとおりであるが，これによると 100V では通電時間が 0.3～0.4 秒までが一応の安全限界となっている．

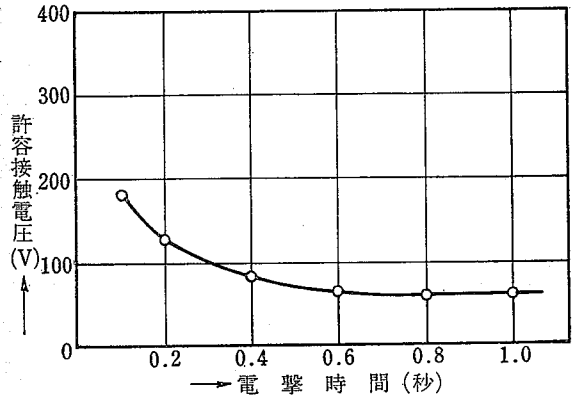


図 4-1　通電時間と許容接触電圧
(VDE 0141/2.64 による)

4.3　人体へのエネルギーからみた安全限界

(1)　商用周波数の交流の場合[2]

安全限界をエネルギーの観点からみてみよう．心室細動を起こす電流と通電時間との関係は，すでに述べたように同一体重の動物については，両対数方眼紙上でその勾配が −1/2 の直線になるが，これを式で表わすと，

$$\log I = -1/2 \log T + K_1 \quad (K_1 = \text{常数}) \quad (4.1)$$

$$\therefore \quad I^2 T = K_2 \quad (K_2 = \text{常数}) \quad (4.2)$$

ここで人体抵抗を R_b とすれば，人体に加わるエネルギー W は

$$W = I^2 T R_b \quad (\text{W-s}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.3)$$

また，心室細動を起こす最小の電流値は，

$I = \dfrac{116 \sim 185}{\sqrt{T}}$ (mA) であるから，これを代入して

$$W = I^2 T R_b = (116 \times 10^{-3} \sim 185 \times 10^{-3})^2 \cdot R_b \quad (4.4)$$

$$= (0.013 \sim 0.034) \cdot R_b \quad (\text{W-s}) \quad (4.5)$$

$R_b \fallingdotseq 500\Omega$ と仮定すれば，

$$W = 6.5 \sim 17.0 \quad (\text{W-s}) \quad (4.6)$$

これが正弦波交流のエネルギー的危険限界である．この値を〔資料7〕および〔資料8〕の災害事例と比較してみると，かなりの安全側となっている．

(2)　直流の場合

つぎに，直流の短時間電撃による安全限界であるが，これまでの感知電流および可随電流についての実験からも明らかなように交流よりも危険度が小さく，その電流比は 1/2 以下であると考えられるので，危険エネルギーとしては，正弦波交流の2倍とみてもよいと考えられている．

引　用　文　献

1) G.Boll : ETZ, H.8, p.253 (1952)
2) C.F.Dalziel & W.R.Lee : IEEE Trans., Vol. IGA-4, No.5, p.467 (1968)

第5章　水中における電撃危険

今後わが国でも，海洋開発が進展するにつれ，作業者が海中にもぐり，いろいろの電気機器を使って作業をする機会が多くなるものと予想される．

それにつれて海中での作業者の感電事故発生の可能性が予期される．この感電事故における電撃の程度は，前の章で述べた陸上での一般的な電撃の場合と同様，主に人体に流れる電流の大きさ，通電時間で判定され，電圧や人体抵抗は電撃の間接的要因と考えられる．しかし陸上での電撃と異なる点は，作業者と電気機器が直接には接触していなくとも海水のような導電性液体によって電気的に接触している点である．そのため，人体が直接充電部分に触れない場合でも感電することがあり，また，人体が濡れているため人体抵抗が小さく，したがって，強度の電撃を受ける可能性も多くなると思われる．

そこで，以下本章では，水中における電撃危険に関するこのような問題について述べる．水中電撃はようやく最近になって注目されたものであり，文献の数も少なく，また，統計的に有意な資料も少なく，淡水プールまたは塩水プールで行なわれた2，3の報告があるにすぎないので，これらを中心に示すことにする．

5.1　水中における電撃現象

陸上での感電のケースとしては，人体の一部が露出した充電部分に触れるとか，または，非充電金属部分すなわち充電されていないはずの電気機器の金属部分が漏電などの原因で充電されていたのを知らずに触れるなど，直接充電部分に人体が触れない限り感電することは一般にありえない．しかし，水中の場合には，人体と電気機器が導電性液体（海水など）を通じて常に接触しているため，充電部分に直接触れなくても感電するケースが考えられることである．

なお，電極が水中のような3次元の媒体中に置かれ，電圧が加えられると電流が漏れ，水中に電位分布ができる．その等電位曲線は，一般に電源を中心とした同心球状であると考えられる．いま，水中にいる人体によって電界がひずまないものとすれば，人体に流れる電流は，人体が横切っている等電位曲線の数に比例するので，水中にある人体の方位によっても電撃の程度は変わってくる．

また，実際には，ほぼ均一な抵抗率の水中に異質の抵抗をもった人体があるような場合，その部分で電界がゆがめられる．たとえば，淡水中の人体のように，水より小さい抵抗率をもつ物体では電流密度を集中させる傾向があり，海水中の人体のように海水より大きい抵抗率をもつ人体では，電流密度を減少させる傾向がある．

米国，U.L. の A.W.Smoot と C.A.Bentel は，淡水プールや塩水プールで生ずると思われる感電のケースとしてつぎの3つを挙げている[1]．

（1）　充電された金属に直接人体が触れた場合

たとえば，人体の一方の手がプールの接地された金属製はしごなどを握り，同時に他方の手や足が漏電により非充電金属部分が充電したプール照明器具などに触れたような場合である．これは，濡れた皮膚となっているためただ電気的に危険であることのほかは，通電電流の通路の一部に水が介入していないから，プール以外で遭遇する手一手，手一足の通電径路の場合の電撃と全く同様である．

（2）　水中を流れる電流によって生じた電界の中に人体が置かれた場合

たとえば，水中電灯のガラスが破損して，水中へ漏れ出る電流や，あるいは，水中照明器具が故障して金属製ガードなどが充電され，そこから排水口のような接地された金属部分へ，プールの水を通して流れる電流によって生じた電界中に人体が置かれると，その電流によって電撃を受ける．この通電電流の大きさは水中

における電界の強さ，電界中の人体の方位に関係する．

（3）　電位の存在する水中に人体があり，そのとき，人体の一部が接地された物体に触れた場合

たとえば，プラスチックのような絶縁材でできているプールで，水中照明器具が故障し，水が大地以上の電位をもっている場合に，プールから出ようとしてプール端の接地体に触れて感電するとか，あるいは絶縁材でできていないプールでも，電流が水中に漏れ，電界が生じているとき，プール中央部の水中の電界は人体に危険のない無視できるほどであっても，プールの隅の接地金属物体に対して電界が十分高くなっていることがしばしばある．この場合，水中の人体が，この接地物体に触れて電撃を受ける．

以上のような感電のケースが考えられるので，水中での電撃危険は，プール以外での陸上で生ずる心室細動や呼吸まひなどの他に，水中を泳いでいるとき人体の頭部を通して流れた電流によって気絶することによる溺れや，泳ぐに十分な運動機能を失なうことによる溺死も加えて考えなければならない．

さらに，水中での電撃は，被害者が比較的長時間電撃の状態に放置されるということも，注目しておかなければならない．このような事情から，数秒以下の短い電撃時間で測定された従来の心室細動電流値の実験結果等も，さらに長い時間の場合について検討されなくてはならないと考えられる．

5.2　水中での電撃危険限界

（1）　水中電位の危険限界

プールの水が対地電位を有する場合の電撃危険を調べるために，前述の A. W. Smoot と C. A. Bentel は，つぎのような実験を行なっている[1]．

実験は図5-1に示すように，被験者を水の入ったタンク内に立たせ，塩水で濡らされた片手あるいは両手をタンクの外に置かれた一方の金属電極（銅平板あるいは $1^1/_8$ インチの銅管）に触れ，他方の電極は 144 平方インチの銅平板で，被験者の足の位置から約 16 イチン離れた水中に鉛直に置いた．これらの両電極間に 60Hz の交流電圧を高抵抗（4,700Ω）を介して加

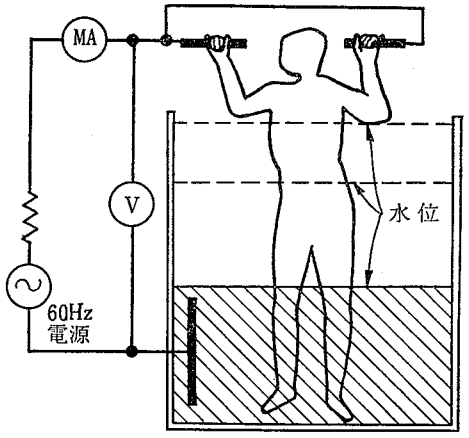


図 5-1　電位測定の試験回路

表 5-1　水中での電位測定結果

被験者					電流 (mA)	水位 (in)		電位 (V)			
								平板電極		棒電極	
番号	性	年令	体重 (lb)	身長 (in)				片手	両手	片手	両手
1	男	49	185	72	5	23	ひざ上	3.50	2.15	4.25	2.40
					5	42	腰				2.30
					5	53	胸				2.10
2	男	32	176	66	5	23	ひざ上	4.20	2.40	4.50	2.60
					5	42	腰				2.30
					5	53	胸				2.25
3	男	19	150	75	2	23	ひざ上	1.78	1.00	1.83	1.00
					2	42	腰				0.93
					2	53	胸				1.05

え，両電極間の電圧を測定した．なお実験は3人の成人男子について行ない，この際の水の抵抗率は，電気的に海水に近似させるために，塩化ナトリウムを加えて 22Ω·cm のものが用いられた．

その結果は，表5-1に示すとおりである．もしも人体に流しうる電流の安全値を水中のような特別の電撃危険状態において 5mA であるとするならば，水中の最大対地電位は表 5-1 の実験値からおよそ 2V (rms) ということになる．なお，この実験は低抵抗率の水で行なわれたが，高抵抗率の水では多少違った結果になるものと思われる．

(2) 水中電界の危険限界

電界の存在する水中に人体がある場合の電撃危険について，A. W. Smoot と C. A. Bentel はさらにつぎのような実験を行なっている[1]．

前節の電位測定の場合は，電源から流れた電流が，すべて人体に流れる簡単な直列回路としての取扱いであったが，この電界測定の場合は，電界を生じている水中に人体があるために，電源から流れ出る電流は，水中で人体と水との並列回路を通る．したがって，人体の胸部に，ある大きさの電流，たとえば 5mA を流すに要するおよその電界値を求めるのは必ずしも容易ではない．

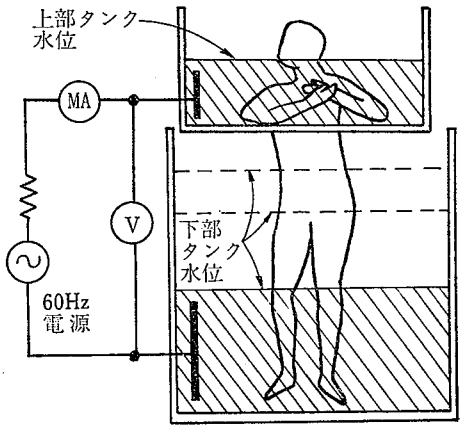


図 5-2　電界測定の試験回路

そこで，実験では図5-2に示すように，水の部分を上，下2つに分割し，上部タンクの水は背，腕，首，口の下から顎をおおうようにしてある．上部タンクの電極は144平方インチの銅平板で身体から $4\frac{1}{2}$ インチ離れて鉛直に置かれた．下部タンクの電極は同一面積の銅平板で，被験者の足から約 18 インチ離れて鉛直に置かれた．これらの両電極間に，先に述べた電位測定の場合と同じく 60Hz の交流電圧が加えられた．この場合，上下タンクの水は人体を通してのみ電気的に接続されるため，電源の出力電流はすべて人体を通過する．なお，被験者は9人の成人男子であり，両タンクの水の抵抗率は 22Ω·cm のものが用いられた．

表5-2はその実験結果で，この場合も人体の胸部に流れる電流の安全値を最大約 5mA と仮定すると，低抵抗率の水中の最大安全電界は約 0.2 V/ft であるといえそうである．また，この場合も，高抵抗率の

表 5-2　水中の電界測定結果

被験者(男) 番号	年令	体重 (lb)	身長 (in)	電流 (mA)	身体の濡れていない部分**) (in)	電圧 (V)	電界 (V/ft)
1	49	185	72	5	31	0.52	0.20
				5	15	0.33	0.26
				5	11	0.30	0.33
1*				5	34	0.67	0.24
				5	18	0.40	0.27
				5	14	0.378	0.32
2	32	176	66	5	35.5	0.66	0.22
				5	20	0.38	0.23
				5	16	0.36	0.27
4	36	127	64	5	34	0.79	0.24
				5	14	0.355	0.30
5	23	190	70	5	34	0.59	0.21
				5	14	0.295	0.25
6	36	164	71	5	34	0.66	0.23
				5	14	0.37	0.32
7	32	190	74	2.5	34	0.295	0.10
				5	34	0.625	0.22
				2.5	14	0.180	0.15
				5	14	0.375	0.32
8	45	211	73	5	34	0.495	0.17
				5	14	0.290	0.25
9	25	165	71	5	34	0.635	0.22
				5	14	0.370	0.32
10	28	123	66	5	34	0.680	0.24
				5	14	0.370	0.32

(注) *) 同一被験者で最初の試験後7ヶ月たって行なわれた2度目の試験
**) 胸の上部の部分から胴までの長さ

表 5-3　犬による水中電撃実験例

プールの容量＝35×10^3 ガロン
一番近い排水口（大地）までの距離＝12.5ft
最大深さ＝9.5ft
プールの大地へ流れる電流＝8.2A
レンズ，ランプなし，120V の電圧線から充電され，他の電線は接続されていない

（水の性質）
濃　度　pH＝6.8
塩　分＝330ppm
抵抗率＝1880Ω·cm
塩　素＝わずか
水　温＝70°F
気　温＝73°F

	試　験　条　件	故　障　状　態	結　　果
Ⅰ	体重 25lb で，長い毛をもつ雄の Cocker Spanil 犬 (dog No. 1)，器具の前 6～8ft から器具に向って泳がせた.	レンズなく，破損した 400W ランプの中央電極とフィラメントが水中に突っこんだ状態で器具は 120V 電源に接続. 中央電極に流れる電流　＝2.17A 受口の金具に流れる電流＝0.92 容器に流れる電流　　＝0.83 プールの大地に流れる電流＝0.42	0.42A がプールの大地へ流れているにもかかわらず，犬の足や鼻が器具の 1ft 以内になっても，電撃の反応を示さない.
Ⅱ	動作電流 37.5mA，全しゃ断時間が 1.4A の電流で 25ms の漏電しゃ断器を付けた回路で，電圧はプールへ流れる電流が 1.4A であるように調整された. 試験Ⅰと同じ犬 (dog No. 1) が器具の前 6～8ft から器具に向って泳ぎ繰返し電撃を受けた.	レンズなく，破損した 400W ランプの中央電極とフィラメントが水中に突っこんだ状態. 中央電極だけが調節できる電圧源に接続され，他の電線は開放. プールの大地に流れる電流＝1.4A	犬の尾が容器に触れるまで電撃の反応を示さず. 触れたとき，ほんの少しひるんだが，その後同じ速度で泳ぎ続けた.
Ⅲ	体重 11lb で，短い毛をもった雄の Terrier 犬 (dog No. 2) がプールへ流れる電流が 8.2A である器具に向って，排水口の上の位置から泳がせられ，22 回の電撃を受けた. 漏電しゃ断器の動作電流は 2A で，全しゃ断時間は 4A で 25ms あった.	レンズ，ランプなし，120V の電源に接続され，他の電線は開放. 大地へ流れる電流＝8.2A	犬の鼻が器具から 12～18in 以内になったとき，犬の頭が畏縮したことによって3回の電撃を受けたことを示した. しかし，通電時間が短かかったので犬の頭の急激な筋肉けいれんはその後の犬の泳ぐ速度を著しく変えるほどではなかった.
Ⅳ	dog No. 1 について，試験条件Ⅲと同一条件で試験された.	故障状態Ⅲに同じ.	犬の前足が器具の 1ft 以内に近づいたとき，頭の筋肉けいれんによって電撃の反応を示した.
Ⅴ	dog No. 1 を，プールへ流れる電流が 8.2A である器具に向って，排水口の上の位置から泳がせた. ただし，通電時間は 10 秒間隔で 1/4～1/3 秒，手で通電された.	故障状態Ⅲに同じ.	犬は器具の 3～4ft 以内を泳がせると，ほえ，苦痛を増していることを示した.
Ⅵ	体重60lbの短い毛の雌 English Pointer 犬 (dog No. 3) を試験条件Ⅲと同一条件で試験	故障状態Ⅲに同じ.	Ⅲと同様であった.

水について実験すれば，また違った結果もでてくると思われる.

また，被験者の足の運動機能を失なう水中の電界を求めるために，２人の成人男子について図 5-3 に示すような実験を行なった.

これは，タンクの底部と水面に電極を置き，被験者は，頭上の支持物にぶら下って電極に触れないように腰ぐらいの高さまで，すなわちほぼ足の裏から 43 インチまで水につかった．電圧測定は底部の電極の上と，水面の電極の下にそれぞれ $1^1/_8$ インチの距離に置かれた金網電極間で測定された.

そして，電圧を除々に増加して，被験者の足の筋肉の自由を失なう水中の電界は，１人の被験者については 2.12V/ft，他の１人の被験者については，2.68V/ft であった.

この実験は，方法，被験者の数，データの数等が少ないが，成人男子の足の筋肉の自由を失なう電界は約 2V/ft であるものと推定される．このような大きさの

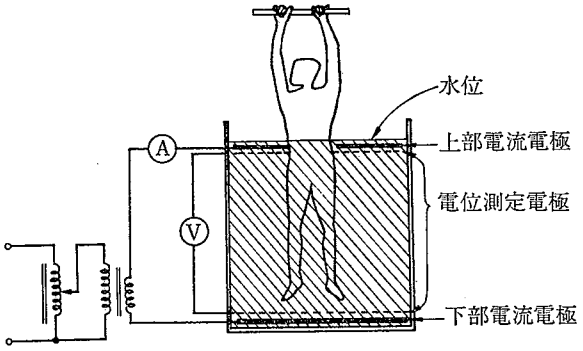


図 5-3　足の自由を失なう電界測定の試験回路

電界中では水中にいる人の泳ぐ能力を失なわさせるのでこの電界が実際の致死レベルであると考えられる.

5.3　動物による水中電撃危険の実験例

C. F. Dalziel は，水中での電撃危険の大きさとその反応を調べるために，故障した状態の 120 V，400 W の照明器具 (medium base) を，プール端から 1ft の水面に置いて，犬をその器具に向かって泳がせる実験を行なった[2]．水中の電流は犬に向って分布し，犬が器具に近づくにつれ増々強い電界にさらされた.

この結果を要約すると表 5-3 のとおりである．そして時間が長くなる程，電撃に耐えられなくなる反応を示し，秒のオーダー以上の電撃時間には耐えられないということが明らかになった．また，試験後，犬をプール周辺のコンクリートを歩かせるとき恐怖状態を示した.

引　用　文　献

1) A.W.Smoot, C.A.Bentel : Electric shock hazard of underwater swimming pool lighting fixtures, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.83, Sep., pp.945～964 (1964)
2) C.F.Dalziel : Electric shock hazards of fresh water swimming pools, IEEE Trans. on Industry and General Applications, Vol. IGA-2 No.4, July/August pp. 263～273 (1966)

第6章　静電誘導による電撃危険

送電線の付近には，送電電圧，送電線の電線配置，電線の構成や相配置などによって決まる電界が発生している．この電界中に，大地から絶縁された物体が置かれると，その物体に電荷が誘導され，電圧が現われる．この現象を静電誘導という．この場合，もし人体がその物体に触れると，人体を通して誘導された電荷が放電し，瞬間的な電撃を受けることがある．また，送電線鉄塔上の活線作業とか変電所母線に接近して作業する場合に，作業者がゴム靴のような絶縁された靴をはいて電力線などに接近すると，やはり電界に入ることになるため，同様な静電誘導によって人体自身が誘導を受け，たまたま身体の一部が鉄塔や機器の外箱に触れると，誘導電荷が大地へ放電して電撃を受ける．

このような電撃は，いずれも誘導電荷に応じたショックを人体に与える．一般にこのショックで，直接人体に大きな生理的障害を与えることはまずないが，転倒するとか，高所作業中に落ちるとかの2次的事故の原因になったり，また，心理的に恐怖感をいだかせるようになる．

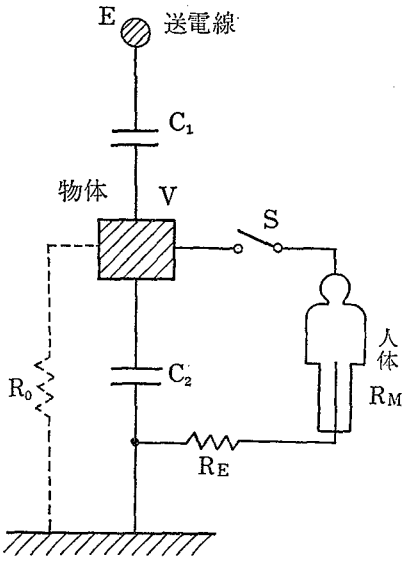
最近の大都市における電力需要の増加は，500kV送電に見られるように益々電圧上昇の傾向にあり，静電誘導障害による問題が注目を浴びている．

6.1　静電誘導による電撃現象

(1)　静電誘導を受けている物体への接触による電撃

送電線の直下の自動車や，さしている傘を例にとると，静電誘導を受ける場合の電気的等価回路は，図6-1のようになる．すなわち，静電誘導は，送電線と自動車または傘など，大地から絶縁して存在する物体との間の相互キャパシタンス（C_1）の存在に基づいている．

この場合，物体に誘導される電圧 V は(6-1)式で表わされる．ただし，図6-1で R_0 は無限大とみて無視した．



C_1：送電線と物体間の静電容量　C_2：物体と大地間の静電容量
R_M：人体抵抗　R_E：人体と大地の接触抵抗　R_0：物体の対地絶縁抵抗　E：送電線の対地電圧　V：静電誘導電圧

図 6-1　物体の静電誘導等価回路

$$V=\frac{C_1}{C_1+C_2}E \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6\text{-}1)$$

もし，このとき人体が物体に触れると（Sを閉じたことに相当），流れる過渡電流は(6-2)式で与えられ，そのまま継続して接触していると(6-3)式で示す定常電流が人体に流れる．すなわち，接触瞬時のごく短い時間では波高値の高いパルス状の過渡電流が流れ，続いて C_1 を通して定常的な商用周波数の交流電流が流れて電撃を受ける．これらの様子を図示すると図6-2

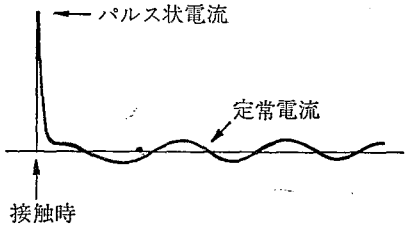


図 6-2　誘導物体への接触時に流れる電流

のようである.

過渡電流

$$I_t=\frac{V}{R_M+R_E}\exp\left\{-\frac{t}{C_2(R_M+R_E)}\right\} \quad (6\text{-}2)$$

定常電流

$$I_n=\frac{j\omega C_1}{1+j\omega C_1(R_M+R_E)}E \quad \cdots\cdots(6\text{-}3)$$

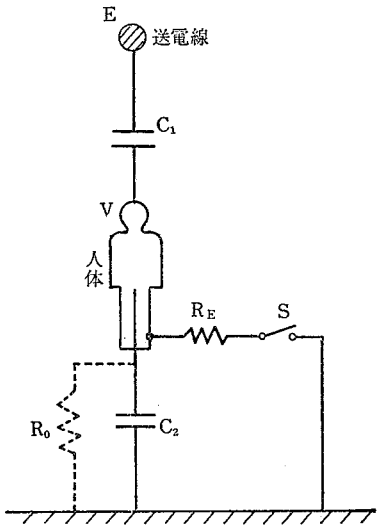
ただし，$\omega=2\pi f$ (f：周波数)

一般に，R_M や R_E に比べて $1/\omega C_1$ は大きく，C_1 のみで人体に流れる電流が定まることが多く，その場合は定常電流はつぎのようになる.

$$I_n=j\omega C_1E \quad \cdots\cdots(6\text{-}4)$$

(2) 静電誘導を受けている人体の放電による電撃

つぎに，送電線の直下や高電圧機器の付近に人体があるとき，あるいは活線作業時のように，人体自身が静電誘導を受ける場合の等価回路は図 6-3 のようになる.



C_1：送電線と人体間の静電容量　C_2：人体と大地間の静電容量
R_E：人体と大地との接触抵抗　R_0：人体の対地絶縁抵抗　E：送電線の対地電圧　V：静電誘導電圧

図 6-3　人体の静電誘導等価回路

もしも，人体が接地体に接すると（Sを閉じたことに相当），(6-5) 式および (6-6) 式によって与えられる電撃電流が人体を流れることになる.

過渡電流

$$I_t=\frac{V}{R_E}\exp\left(-\frac{t}{C_2R_E}\right) \quad \cdots\cdots(6\text{-}5)$$

定常電流

$$I_n=\frac{j\omega C_1}{1+j\omega C_1R_E}E \quad \cdots\cdots(6\text{-}6)$$

特に　$R_E\ll\frac{1}{\omega C_1}$　ならば

$$I_n=j\omega C_1E \quad \cdots\cdots(6\text{-}7)$$

一般に，人体に対する電撃の強さは第2章でも述べたように印加された電圧値でなく，人体を流れる電流値であり，静電誘導による電撃の場合は過渡電流と定常電流の両者の電流についての危険性を検討する必要がある．一般に，過渡電流は瞬間的にはかなり大きいが，時間がきわめて短かく直ちに減衰するので，人体に対する危険性という点では，むしろ，持続して流れる商用周波数の定常電流について考えるべきである.

6.2 定常電流による危険性

(1) 送電線下の物体への誘導の場合

a) 誘導電圧と接地電流

電力中央研究所における 520kV 垂直2回線送電線による誘導実験例では，線路下に，被誘導物体を置いた場合，いかなる物体でも線路が同相配置で，しゃへい線がなく，線路下相直下に置かれた場合に，最も高い誘導電圧を生ずることが表 6-1 の例のように示された[1]．また，同じく 275kV 垂直2回線送電線下における誘導電圧と電流を測定した例は表 6-2 に示すとおりである[1].

これらの実測結果より，送電線下の物体への誘導電圧，接地電流の概略値を知ることができる.

誘導電圧は，送電線の対地電圧，物体の形状，物体と大地間の絶縁抵抗，送電線と物体の相互配置などに

表 6-1　520kV 垂直2回線送電線下における誘導電圧と接地電流（下線地上高 9.5m）

供試物	相順	測定点	誘導電圧 (V)	接地電流 (μA)	供試物の条件	対地静電容量 (pF)
自動車	同	下相直下	2,880	923	線路と平行	1,020
オートバイ	〃	〃	2,950	114	ビニールを敷く	123
自転車	〃	〃	3,480	108	自転車のみ	98
洋傘	〃	〃	18,700	187	傘の上面で地上高 2.3m	31.7

表 6-2　275kV 直垂2回線送電線下における誘導電圧と接地電流（下線地上高 8.6m）

供試物	相順	測定点	誘導電圧 (V)	接地電流 (μA)	供試物の条件	対地静電容量
自動車	同	中心	2,020	434	線路と 45°	683
〃	〃	下相直下	1,960	420	〃	〃
傘	〃	中心	10,450	104	傘の上面で地上高 2.3m	31.7

よってやや異なるが，一番大きな接地電流を生じた自動車の場合でも，商用周波数の交流の感知電流 1mA (=1000μA) 以下であり，この電流による電撃危険はほとんどないと思われる．

b）誘導電圧に及ぼす被誘導物体の対地絶縁抵抗の影響

図 6-4 は，275kV 送電線直下に普通の乗用車（床面高さ 20cm），大型トラック（同 60cm），小型トラック（同 30cm）を駐車させた場合の誘導電圧を求めたものであり[2]，実線は実測値，一点鎖線は電界解析値である．電界解析値が実測値より幾分高くなっているのは，タイヤの金具や自動車床下に突起している物体を理想化したためである．

しかし，このグラフから自動車の対地絶縁抵抗が 20MΩ 以上では，地上面の電界強度に比例した誘導電圧が発生し，たとえば，4kV/m の電界強度では乗用車で 1,000V（実測値），大型トラックで 2,500V，小型トラックでは 1,500V の電圧を誘起するようである．他方，自動車の対地絶縁抵抗が 20MΩ 以下の場合，すなわち，タイヤが濡れているとか，ごみで汚れ

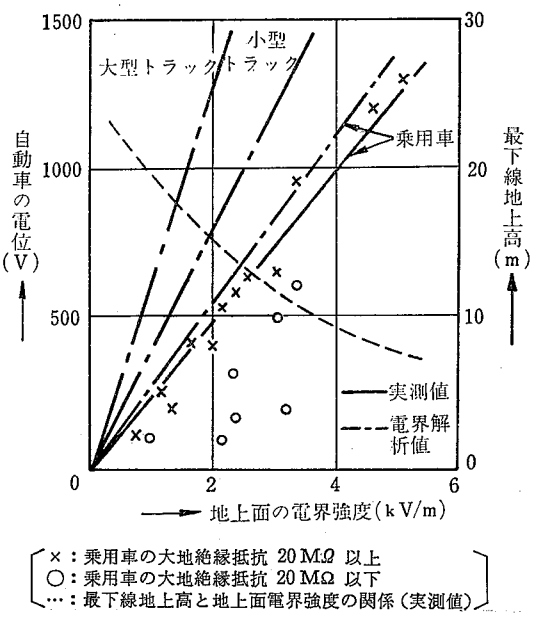


図 6-4　地上面の電界強度と自動車の電位

ている場合は，同じ地上面電界強度でも誘導電圧は低くなる．

c）モデル実験による接地電流

図 6-5 および図 6-6 は，それぞれ 275kV および 520kV 2回線送電線下の大型バスが静電誘導をうけたときの接地電流をモデル実験で測定した例を示す[3]．

なお，このモデル装置で使用された大型バスなどの被誘導物体のモデルは，表 6-3 に示す寸法で，自動車は銅板で箱型を作り，ベークライトで絶縁して，タイヤを模擬したものであり，傘はベークライトの筒の上に銅線で傘型を作ったものである．

これらの接地電流分布曲線は，送電線付近の静電電位分布曲線と類似しており，電位の高いところでは，接地電流も大きい．

また，これらの各種実験結果を取りまとめて，送電

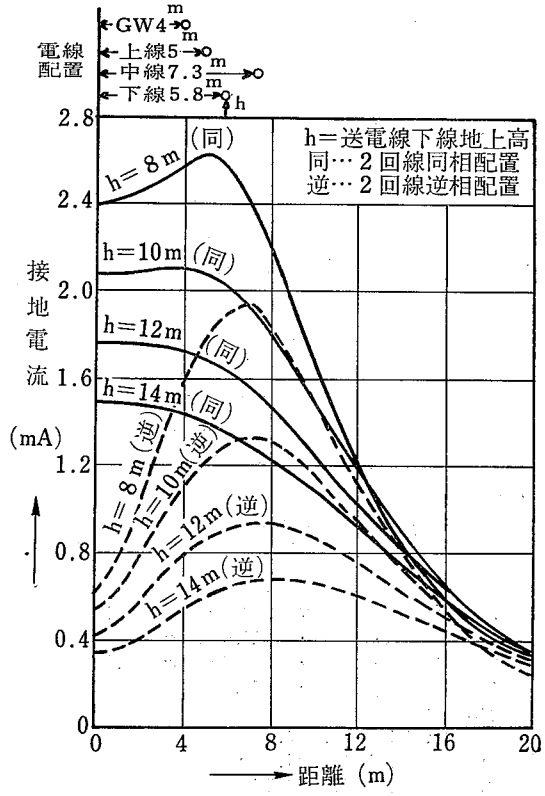


図 6-5　275kV 2回線送電線下の接地電流（モデル：大型バス）

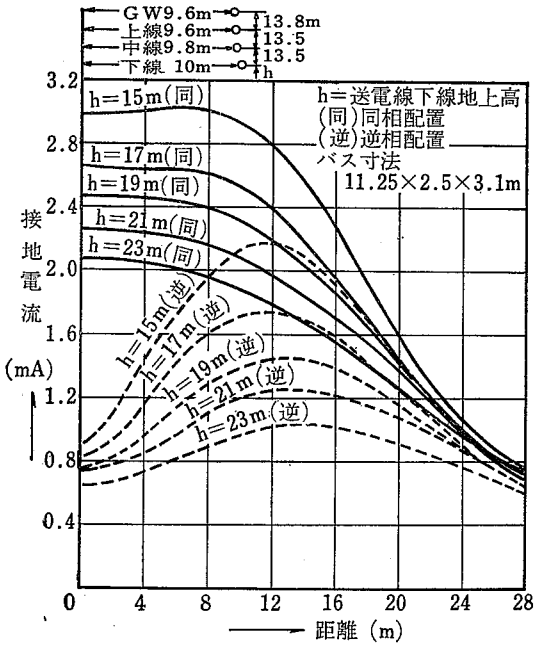
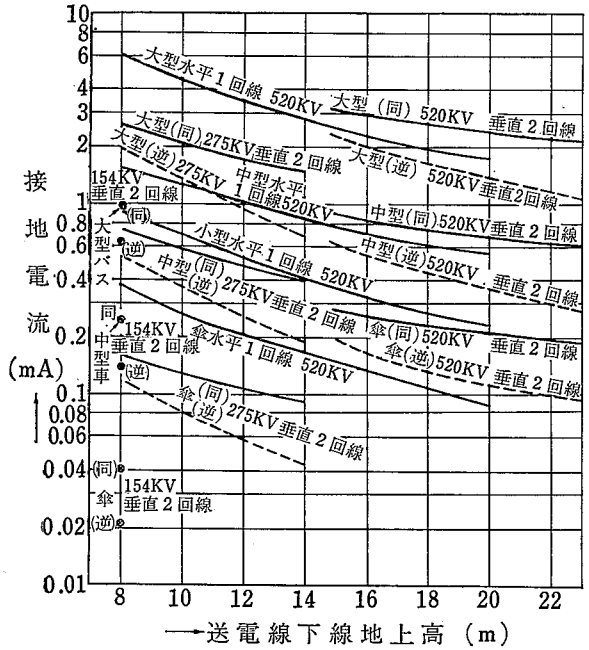


図 6-6　520kV 2回線送電線下の接地電流
(モデル：大型バス)



送電線寸法
154 kV 垂直2回線　下線間隔 8 m　垂直間隔 4 m
275 kV　〃　〃　11.6 m　〃　5.7~6.8 m
520 kV　〃　〃　20 m　〃　13.5m
520 kV 水平1回線　〃　12.8 m
モデル寸法
大型バス (11.25×2.5×3.1)m
中 型 車 (4.65×1.69×1.7)m
小 型 車 (3.14×1.39×1.38)m
傘　(直径 1.2×高 2.5)m

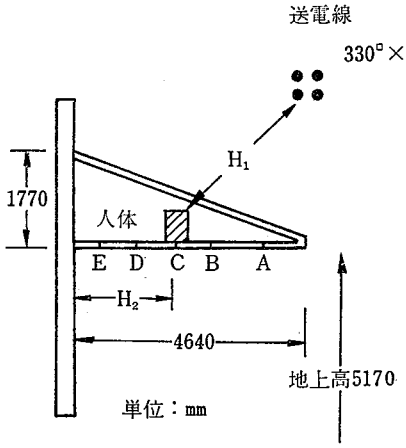
図 6-7　送電線地上高と接地電流

表 6-3　モデルの種類と寸法

大型バス	実寸法	(11.25×2.5×3.1) m	地上高 25 cm
	モデル寸法	(225×50×62) mm	〃 5 mm
中型自動車	実寸法	(4.65×1.69×1.7) m	〃 25 cm
	モデル寸法	(91.2×34×34) mm	〃 5 mm
小型自動車	実寸法	(3.14×1.39×1.38) m	〃 24 cm
	モデル寸法	(63×28×28) m	〃 4.8 mm
傘	実寸法	高さ 2.5 m	〃 1.2 m
	モデル寸法	高さ 50 mm	〃 24 mm

線下線地上高と接地電流最大値との関係を示すと図6-7のとおりであり[3]，下線地上高が高くなれば電界強度が弱くなるため接地電流も低下している．

このように接地電流は，線路の条件，物体の大きさ等によって変化するが，常識的に考えられる状態においては大型バス程度が一番大きなものと見られるので，接地電流の大きさも数 mA 程度と考えられれば十分である．第2章で述べたように，男子の感知電流が1mAであり，可随電流としては 9mA 前後であるから，これを基準とすると，直接生命の危険は無く，感電しても十分手を離すことができる範囲の電流値である．



位置		E	D	C	B	A
H_2(mm)		500	1,320	2,030	2,700	3,300
H_1 (mm)	直立	3,270	2,580	2,050	1,650	1,500
	中腰	3,470	2,850	2,350	2,100	2,200
	かがみ	3,570	2,960	2,550	2,280	2,200

図 6-8　人体誘導実験条件

（2）　活線に接近した人体への誘導の場合

a）誘導電圧

超高圧送電線の活線作業時などのように人体が電線に接近する場合に，人体に誘導される電圧を推定するため，図 6-8 に示すように，330mm²×4 導体（導体間隔 400mm）のジャンパー線の下に腕の長さ 4.6m のアームを地上高 5m に取付け，ジャンパー線には実線路に等しい 275kV/$\sqrt{3}$＝160kV の交流電圧を印加し，アーム上の A～E の各点に，身長 1.6m の作業者を絶縁性地下足袋をはいて，直立，中腰，かがんだ姿勢をした場合について実験を行なった[2]．

測定結果は図 6-9 に示すとおりで，電線に近くなれば当然誘導電圧は高くなるが，姿勢による人体の対地容量の相異とか，かがんだ場合のアーム吊材によるしゃへい効果等によって，一概に線路からのとの距離

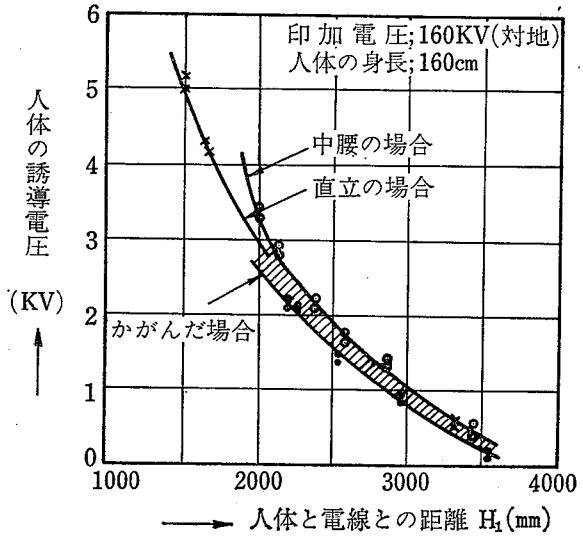


図 6-9　線路からの距離と人体の誘導電圧の関係

(H_1) には反比例せず，中腰の場合が最も高い傾向を示した．

b）人体電流

図 6-10 は，図 6-8 に示した条件下で，作業者が指先で接地物に触れたときの人体電流を示し[2]，H_1=2m では 0.3mA，H_1=3m では 0.1mA と漸減するが，大きな変化はみられない．この値は，男子の感知電流である 1mA にも達していない．

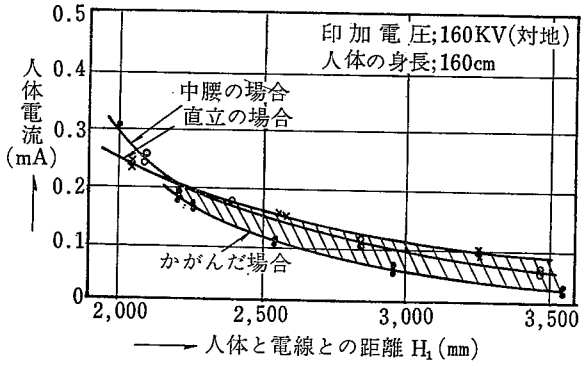


図 6-10　線路からの距離と人体電流との関係

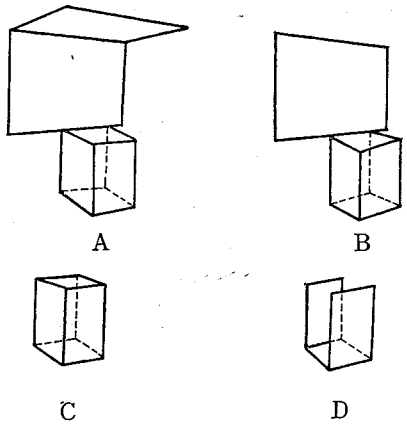
また，表 6-4 は，W.B.Kouwenhoven らによって実験された結果[4]で，138kV と 345kV の送電線における種々の活線作業時に人体に流れる電流を各形状の空中バスケットを使用したときと，しないときについて測定したものである．同表において最大電流密度とは，人体への単位面積当りの充電電流のうちで，一番大きい電流をいい，バスケットのない鉄塔上で作業する場合は胸部，バスケットの中で作業をする場合は頭部がそれぞれ最大電流密度となっている．なお，しゃへい欄の A，B，C，D とは図 6-11 に示すような空中バスケットを使用した場合である．

この表によると，背後と頭上にしゃへいをもつバス

表 6-4　電界にさらされる程度による電流比較

人体の位置	しゃへい	138kV		345kV	
		最大電流密度 (μA/in²)	人体電流 (μA)	最大電流密度 (μA/in²)	人体電流 (μA)
鉄塔上[1]	ナシ	0.18	125	0.42	395
バスケットの中[2]	A ⌐□	0.06	70	0.09	130
〃	B ⌊□	0.34	155	0.67	300
〃	C □	0.50	320	—	—
〃	D ⌊⌋	0.50	375	—	—

（注）1）138kV では，電線から 8ft ぐらい，345kV では，電線から 10.5ft ぐらい離れている．
2）バスケットは，活線に面し，その活線に接続された．



A：背後の壁と頭上のおおいをもつ完全なバスケットしゃへい
B：背後の壁をもつ完全なバスケットしゃへい　C：完全なバスケットしゃへい　D：部分的なバスケットしゃへい

図 6-11　実験的に使用したいろいろなしゃへい方式

ケットしゃへいAの場合には，138kV と 345kV の両線路いずれの場合も，普通の活線工具を用いてしゃへいなしで作業している同じ鉄塔上の作業者より人体電流が小さいことがわかる．

また，背後に壁のあるバスケットしゃへいB内での 138kV の活線作業者は，普通の活線工具を用いて作業する同じ鉄塔上の作業者とほぼ同程度の人体電流が流れる．さらに，バスケットしゃへいC内で素手で 138kV の活線作業する作業者は，普通の活線工具を用いて 345kV の活線作業する鉄塔上の作業者と同じ位の電流か，あるいはわずか少ない電流が流れる．しかし，この値は 138kV の活線で普通の活線工具を用いてしゃへいなしで作業する鉄塔上の作業者の電流よりかなり大きい．

以上のように，最大の人体電流は 345kV の鉄塔上での活線作業の場合で，約 400μA であり，人体が感じうる感知電流（1,000μA）の 1/2 以下である．

6.3　過渡電流による危険性

（1）　送電線下の物体への誘導の場合

a）定常送電中の過渡電流

すでに(6-2)式および(6-5)式で示したように，過渡電流の大きさは，接触抵抗や人体抵抗によって変化することが示され，接触抵抗が0で人体抵抗のみの最悪条件下では，波高値でアンペアオーダー，継続時間でμs 程度の電流が流れる可能性がある．表 6-5 は，275kV 送電線下に置かれた種々の物体について，このような最悪状態のもとで接地されたときの過渡電流の想定値としてまとめられたものである．

b）サージ発生時の過渡電流

外雷や開閉サージなどの内雷によって送電線に過渡異常電圧（〔資料 10〕参照）を生じた場合には，非常に高いパルス状の電圧が線下の物体に誘起される．そして，もし大地に立つ人が，この物体に触れると，非常に高い過渡電流が人体に流れる．そのピーク値はサージの形や電流の人体径路の抵抗によっては数100A までに達することもある．

R.P.Comsa らは，地上高 54ft の 735kV 送電線の下に，それぞれ地上高 1.06，2.47，3.87ft の位置に，大きさ 14.88×14.88×29.7ft の物体を置いたとき，人体抵抗を 100～500Ω とし，人体に流れる電流と，人体内で消費されるエネルギーの大きさを求めた．これによると 1×2000μs の開閉サージ*（過電圧係数として2をとると，対地電圧のピーク値は1.2MV になる）の場合は，図 6-12 に，雷インパルス（5MV，1.5×40μs*）の場合は，図 6-13 に示すとおりで，表 6-6 は，いくつかの特徴あるものを選んで示したものである[5]．

また，人体に流れる誘導電流のピーク値は，サージの波頭長に支配され，波尾長には特に影響されない．

* 波尾長は，ピーク値の 50% でなく，零までの時間で示す．

表 6-5　275kV 送電線における誘導電圧と接触時電流

被誘導物体	誘導電圧実効値（V）	接触時電流			誘導または接触条件		
		パルス状電流		定常電流実効値（mA）			
		波高値（mA）	継続時間（μs）		対地絶縁抵抗（MΩ）	接触時抵抗（kΩ）*	被誘導物体の対地容量（pF）
洋傘(大人用)	2,000	280～2,800	0.2～2	0.1	5～20	10～1	100
洋傘(子供用)	1,000	140～1,400	0.4～4	0.05	5～20	10～1	200
大型トラック	2,500	350	20	0.3～0.4	100＜	10	1,000
乗用車	1,000	140	28	0.2～0.3	100＜	10	1,400

* 接触時抵抗は，鋭敏部（首すじ，手の甲など）で 1kΩ，鈍感部（手のひら，指さきなど）で 10kΩ とする．

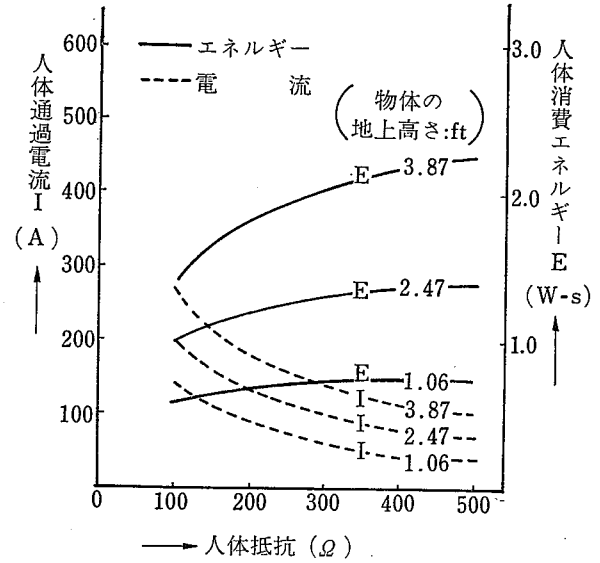


図 6-12　開閉サージ (1×2,000 μs) に対する人体抵抗，人体通過電流，エネルギーの関係

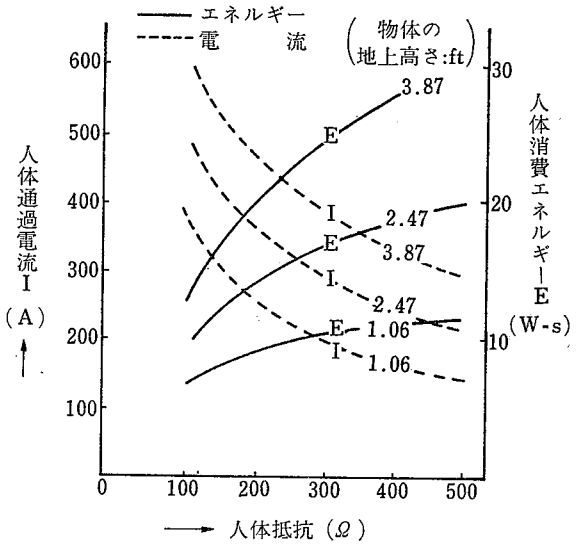


図 6-13　雷インパルス (1.5×40 μs) に対する人体抵抗，人体通過電流，エネルギーの関係

表 6-6　サージ電圧による誘導電圧

サージ電圧	被誘導物体の地上高 (ft)	人体抵抗 (Ω)	誘導電圧波形 (μs)	誘導電圧ピーク値 (kV)	人体通過電流ピーク値(A)	人体内消費エネルギー (W-s)
1×2000 μs 1.2MV	1.06	100	0.15×2.65	14	139	0.005778 R
		500	0.27×9.8	20.6	41	0.00150 R
	3.87	100	0.1 ×1.6	27	267	0.01359 R
		500	0.21×4.7	48	96	0.00445 R
4.3×2000 μs 1.2MV	1.06	100	0.34×4.84	6.36	63.6	0.002676 R
		500	0.76×10.3	14.0	28	0.001155 R
	3.87	100	0.2 ×4.7	9.9	99	0.004641 R
		500	0.52×6.02	26.8	53.6	0.002734 R
45×600 μs 1.2MV	1.06	100	1×46	0.6	5.8	0.000203 R
		500	3×47.5	2.4	4.8	0.000186 R
	3.87	100	0.5×45.5	0.72	7.2	0.000289 R
		500	1.7×47	3.2	6.4	0.000278 R
300×3000 μs 1.2MV	1.06	100	1.4×274	0.1	1.0	0.000031 R
		500	5.1×290	0.44	0.87	0.000030 R
	3.87	100	0.7×277	0.11	1.1	0.000043 R
		500	2.6×290	0.54	1.07	0.000043 R
1.5×40 μs 5.0MV	1.06	100	0.3 ×2.3	36	364	0.065788 R
		500	0.55×5.55	69.5	139	0.022776 R
	3.87	100	0.17×2.2	60	603	0.124554 R
		500	0.4 ×3.4	143	287	0.060132 R

図 6-14 は，人体抵抗をパラメータとして，地上 2.47ft に置かれた物体に対して波尾長を 2,000 μs で一定に保ち，開閉サージの波頭長を変化させて人体に流れる誘導電流のピーク値を測定したものである．

(2)　活線に接近した人体への誘導の場合

図 6-15 と図 6-16 は，図 3-8 で示した試験条件のもとで，活線作業者が接地物体に触れたとき流れる過渡電流，通過時間について測定した結果である[2]．

電流波高値は，電線に最も接近するA位置の直立の場合 (H_1=1.5m) で 700mA とかなり大きい．また姿勢による違いとしては，図 6-9 の誘導電圧の場合と同様，中腰の場合が最も大きい電流波高値となり，次いで，直立，かがんだ場合の順になっている．なお，継続時間は普通の状態ではほぼ 4～6 μs の範囲内である．

(3)　過渡電流に対する感知限界

過渡電流に対する感知限界については，まだ十分な資料はないが，手と足との間に印加された場合の大略の感知電流は表 6-7 に示すように，波尾長が長くなると感知電流は減少する[3]．

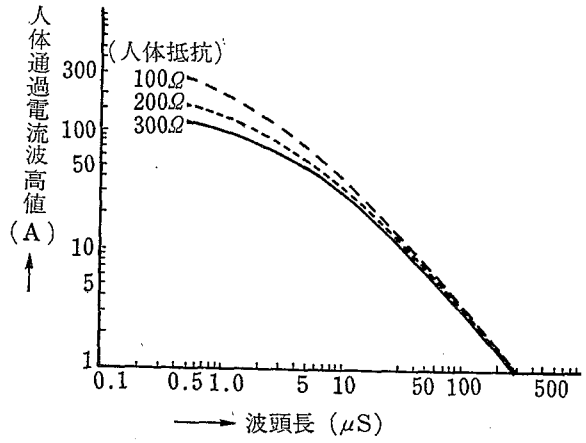


図 6-14　サージの波頭長（波尾長は 2,000μs で一定）と人体通過ピーク電流の関係

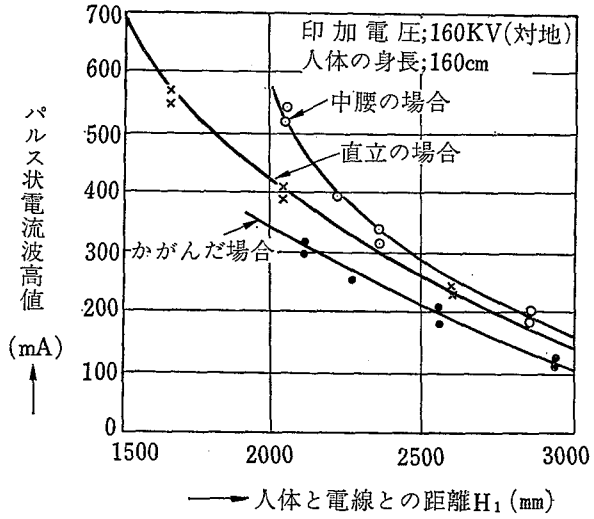


図 6-15　線路からの距離と人体のパルス電流波高値の関係（指先で接触したとき）

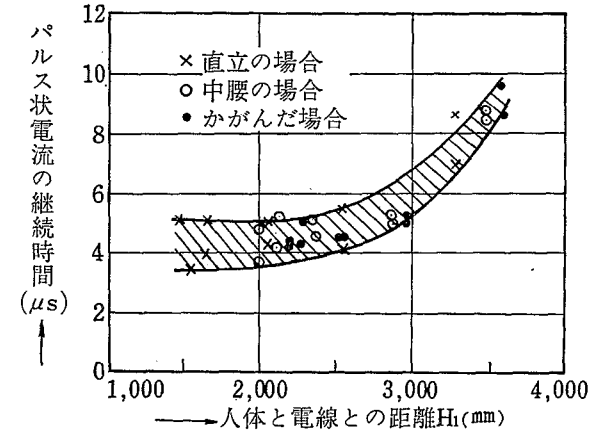


図 6-16　線路からの距離と人体のパルス電流継続時間の関係（指先で接触したとき）

表 6-7　過渡電流に対する感知電流

電圧波形　(μs)	電流波高値 (mA)
7×100	40 以下
5× 65	60 〃
2× 30	90 〃

過渡電流はその波高値が感知電流をこえる大きさであるが，継続時間がきわめて短かいので，必ずしも人体に感知されない場合もある．そして，エネルギー的には小さくて，ほとんど問題にはならない．

なお，表 6-8 は 330，500，1,000pF のコンデンサーを種々の電圧に充電させておき，裸足で銅板上に立った人間が，コンデンサーに指先で接触したときの過渡電流による電撃の感覚をまとめたものである[3]．

表 6-8　衝撃電流による電撃の感覚

静電容量 (pF)	充電電圧 (V)	放電電流 (A)	電荷量 (μc)	電撃の感覚
1,000	600	0.6	0.6	なし
	700	0.7	0.7	指先に微弱な感覚あり
	1,000	1.0	1.0	手首位までショックあり
	1,500	1.5	1.5	ひぢ位までショックあり
500	800	0.8	0.4	なし
	900	0.9	0.45	指先に微弱な感覚あり
	1,600	1.6	0.8	手首位までショックあり
	2,000	2.0	1.0	ひぢ位までショックあり
330	1,000	1.0	0.33	なし
	1,200	1.2	0.4	指先に微弱な感覚あり
	2,200	2.2	0.73	ひぢ位までショックあり

また，さらに高い電圧に充電されたコンデンサーからの過渡電流に対する電撃感覚については，表 6-9 のようであると報告されている．

実際に，送電線下に置かれたプラスチック柄の傘にほほが触れたときの静電誘導の大きさと電撃感覚を調べた報告によると，表 6-10 に示したような結果が明らかにされているほか，つぎのような結果も知られている．

（イ）　感覚は，傘との接触のしかたにより異なり，ゆっくり接触すると強く感じ，手袋などを介して接触

表 6-9　充電したコンデンサーに手を触れたときの感覚

コンデンサー端子電圧	740pFとした場合のエネルギーと電荷量		電撃の程度
1kV	0.4mJ	0.74μc	感覚なし
2	1.5	1.48	少し感ずる
5	9.3	3.70	ちくちくする
10	37	7.40	激しくちくちくする，痛む
15	83	11.1	弱いけいれん
20	149	14.8	〃
25	232	18.5	中程度のけいれん

すると 1/10 以下に低下する．

（ロ）　木製柄の傘などは，晴天時に比べて雨天時は，感覚が 2/3 に低下する．これは，漏れ電流の増加によって傘の誘導電圧が低下するためと考えられる．

（ハ）　感覚は接触部分により異なり，首と“ほほ”は同等であり，指は首やほほの 1/2 程度である．

（ニ）　性別による感覚の差はほとんど認められなく，子供の場合は傘の地上高が低くなるためかえって感覚作用は小さくなるものと推測される．

表 6-10　傘における静電誘導の大きさと電撃感覚

電界の強さ（誘導電圧）	電荷量*（μc）	ほほを触れたときの感じ
約 20V/cm 以下（約 6kV 以下）	0.19以下	ほとんど感じない
約 30～60V/cm（約 6～12kV）	0.19～0.38	やや痛みを感じる
約 60V/cm 以上（約 12kV 以上）	0.38以上	痛みを感じる

* 傘の対地静電容量を 31.7pF と仮定したときの電荷量

表 6-10 は，傘に誘導された電圧だけで，過渡電流の波高値や傘の対地容量が明示されていないため，先の表 6-8，6-9 と比較，検討はできない．そこで，対地容量を 31.7pF と仮定したときの電荷量を示した．

6.4　人体の生理的影響とエネルギーからみた危険限界

東京電力(株)の高木氏らの研究グループは，地表近くの電界の強さを 30V/cm 以下に抑制すれば，肉体的，精神的になんら影響がないことを心電図，血圧などの測定によって明らかにしている[6]．

Dalziel は直流の短時間電撃およびインパルス電撃に対しては，危険エネルギーの限界を正弦波交流の 2 倍とすることを提案している（〔資料 11〕参照）．

そこで，正弦波交流の心室細動電流の最小値として第4章の(4-6)式のようにとれば，短時間電撃およびインパルス電撃に対するエネルギ限界値 W' は

$$W'=2W$$
$$=2\times(6.5\sim17.0)$$
$$=13.0\sim34.0\ (\text{W-s})$$

また，インパルス電流を $i=Ie^{-t/T}$ [T：時定数] とすれば，

$$R_M\int i^2dt=R_M\int I^2e^{-2t/T}dt \cdots\cdots (6.1)$$

$$=R_MI^2\frac{T}{2} \cdots\cdots (6.2)$$

$$=(0.026\sim0.068)R_M \cdots) 6.3)$$

$$\therefore\quad I^2T=0.052\sim0.136\ (\text{W-s}) \cdots\cdots (6.4)$$

この式によって，インパルス電流の理論的危険限界値（電流波高値）を求めると図 6-17 のようである．

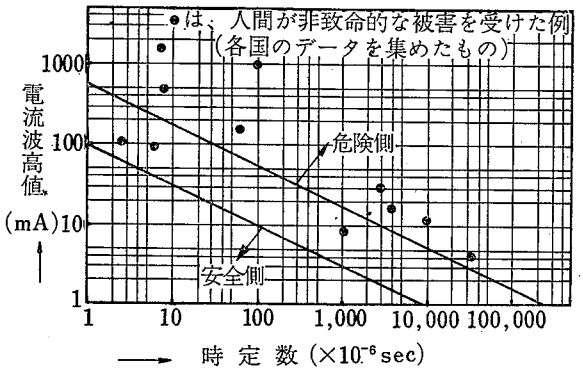


図 6-17　インパルス電流の理論的危険限界

これによると，$I^2T=0.052\sim0.136$ による危険限界は，実例に比較してかなり安全側にあるといえる．

また，静電誘導による電撃については，実地および研究室の実験によれば，0.25(W-s) 程度で感ずることがあると報告されている．

引用文献

1) 上之園：送電線下の静電誘導とその対策，電中研所報，Vol.14, No.4 (昭 39.8)
2) 田中：人体に及ぼす静電誘導障害，電力，Vol.49, No.3 (昭 40.3)
3) 日高，鶴見，木谷，横田：超高圧送電線下の静電誘導，電試研報告 No.667 (昭 41.9)
4) W.B.Kouwenhoven, C.J.Miller, JR., H.C.Barnes, J.W.Simpson, H. L. Rorden, & T. J. Burgess : Body currents in live line working. IEEE Trans. on Power App. and Systems. Vol.PAS-85, No.4, April, pp.403～412 (1966)
5) R.P.Comsa, Luke Y. M. Yu : Transient electrostatic induction by EHV transmission lines, IEEE Trans. on Power App. and Systems. Vol.PAS-88, No.12, pp. 1783～1787 (1969)
6) 高木，武藤：電学誌，Vol.90, No.4, p.554 (1970)

第7章　電気火災消火時の電撃危険

通電中の電力機器や配線の付近で起こる火災の消火時，または電力機器や配線から発生する火災の消火時には，注水による消火作業者への感電や，機器の絶縁劣化ないし低下によるフラッシオーバーによる危険があるので，一般に注意する必要がある．

電源をしゃ断して消火活動を行なうことができる場合は，もちろんそうしたほうが感電などの危険がなく，安全である．しかし，消火活動に必要な照明系統やポンプ系統の電気回路をも同時にしゃ断できないような場合は，通電のまま注水せざるを得ない．したがって，このような充電部に注水した場合の電撃危険性について知っておかなければならない．

以下，本章では，電力設備が存在する工場や作業現場での火災時に，通電部分に接近して消火する場合の電撃危険性について述べる．

7.1　消火剤による消火時の離隔距離

工場や建設現場における比較的小規模な電気火災に対しては，電気火災用として推奨された消火器を近くに常時備えておき，これを使用することが望ましい．これらの消火器は四塩化炭素，一塩化一臭化メタン，炭酸ガス，粉末などの不導電性の消火剤を放出するものである．これに対して，酸アルカリ，泡，塩化カルシゥムなどの導電性の消火剤を含む消火器は，電気火災用としては電撃危険の点から不適当である．

表 7-1　消火剤で消火する場合の離隔距離

消火剤の種類	電流を通じうる最大距離
塩化カルシゥム	6ft
酸アルカリ	4.5ft
泡	5in
四塩化炭素	すべての距離で不導体
炭酸ガス	〃
粉末	〃

表 7-1 は，交流 550V の通電部分を種々の消火剤で消火する場合の離隔距離を実験した一例であり[1]，とくに泡および塩化カルシューム消化剤の場合には，かなりのアークの発生が見られたと報告されている．

7.2　注水消火時の電撃危険性

火災がある程度大きくなったり，適当な消火器が使えない場合には，一般にホースからの注水による消火が行なわれる．このとき，充電部分と消火ホースの間が注水で電気的に接続されることになるので，ホースのノズルには漏れ電流が流れ，この電流の一部が，ホースを握って消火作業をしている人に流れて電撃を与えることになる．

さて，消火ホースから出る水の形状は，(i) 水柱のままの状態，(ii) 落下しはじめて広がる場合，(iii) 放出と同時に広がる場合の3つに分けられる．(i)の場合は，充電部分の電圧，ノズルの直径，注水到達距離，水の導電率がわかれば，注水を通じて流れる漏れ電流の大きさを理論的に計算できる．(ii) の場合は，水の間に空気層ができるので漏れ電流は，水の導電率とは無関係に，電気抵抗が大きくなり，したがって電流が流れにくくなる．そして注水時における各瞬間の注水の長さは，水圧，ノズルの直径，ノズル出口の形状，風向や風速などによって決まるので，電気抵抗も常に変動し，漏れ電流の大きさも不定となる．また(iii)の場合は噴霧ノズルによる消火の場合に相当するものであり，実験によると電流は 10μA 程度で，人体に危険な値ではないといわれているが，活線から直接フラッシオーバしないように，十分な距離を保つべきである．

7.3　注水時の漏れ電流とフラッシオーバ電圧

注水中に流れる漏れ電流はホースの筒先で，人体とホースの両方に分流し，人体に流れる量は人体の接地条件，ホースの種類，水の抵抗率などによって異なる．

（1）　注水距離と漏れ電流

図 7-1 は，C.S.Sprague と C.F.Harding によって，筒先の口径 $1^1/_8$in，筒先圧力 50lb/in²，水の抵抗率 1,900Ω·cm のもとで行なわれた注水実験の結果である．同図で，各電圧における曲線がオームの法則にあてはまらないのは，筒先から充電部までの間で水柱の太さが一様でないからと考えられている．

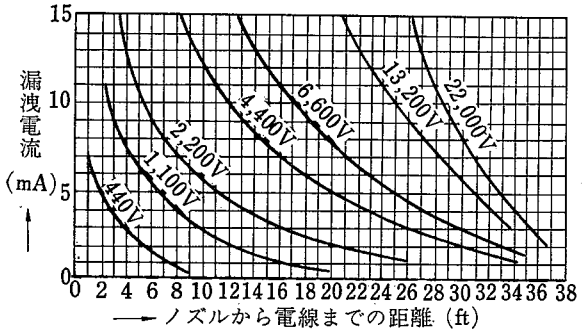


図 7-1　注水距離と漏れ電流

また，図 7-2 は，対地電圧 318kV の超高圧電線に，ノズルの直径が $1^{15}/_{16}$in，$1^1/_8$in，3/4in の3種類，水圧 80lb/in²，水の抵抗率がそれぞれ 1,900Ω·in (4,826Ω·cm)，900Ω·in (2,286Ω·cm)，460Ω·in (1,168Ω·cm) について，ノズルから電線までの距離に対する漏れ電流を測定したものである[2]（この実験は，米国などで，農耕地に硝安などを溶解させた肥料水を噴霧銃によって噴霧することがあり，このとき高圧電線からこの肥料液を通じて電流が流れ，銃をもっている人が電撃を受けたり，また電線と鉄塔の間でフラッシオーバする可能性があるために行なった実験の一つである）．ここで水の抵抗率が 900，460Ω·in のものは，いずれも水に硝安を溶解させたものであり，460Ω·in のものは，肥料に使用するときの最大濃度における抵抗率である．この図において，ノズルの直径が小さい程電流が流れにくくなるのは，水流が早く分割するためと思われる．また，水の抵抗率の大きいものほど電流が小さいこともわかる．

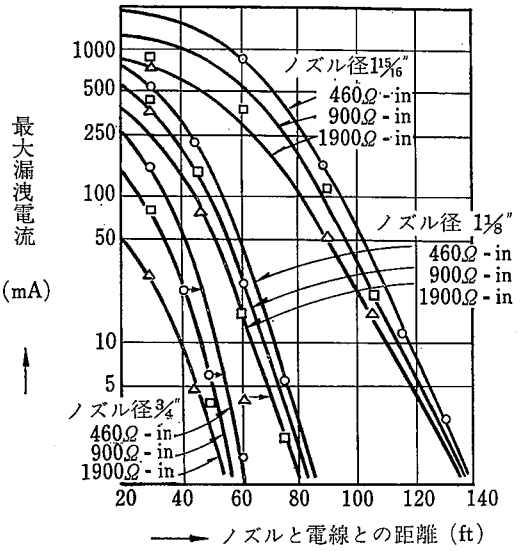


図 7-2　ノズル-電線間の距離と漏れ電流

（2）　対地電圧と漏れ電流（交流）

図 7-3 は，は対地電圧 100，200，318kV の超高圧電線に，ノズルの直径 $1^{15}/_{16}$in，水圧 80lb/in²，水の抵抗率 460Ω·in の条件で注水したときの漏れ電流を測定したものである[2]．この図から対地電圧が高くなるほど，また注水の距離が近づくほど漏れ電流が大きいことがわかる．

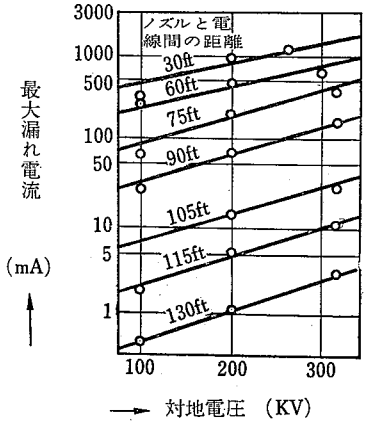


図 7-3　対地電圧と漏れ電流

（3）　水の抵抗率と漏れ電流

図 7-4 は，交流 289kV（波高値 400kV），および直流 400kV の超高圧電線に，ノズルの直径 $1^{15}/_{16}$in，水圧 80lb/in² の条件で種々の抵抗率をもつ水を注水したときの漏れ電流を測定したものである[2]．この図から，水の抵抗率が大きい程漏れ電流は小さい．また

直流と交流とでは，直流のほうが一般に大きい．

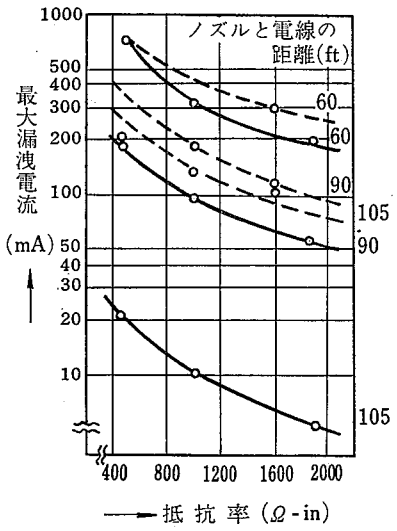


図 7-4　水の抵抗率と漏れ電流
——交流　……直流

(4)　直流でのフラッシオーバ電圧

図7-5は，直流に対するフラッシオーバ電圧を求めた例である[2]．一般に電線が(+)の極性のほうが閃絡しやすく，(−)の極性のときは(+)の場合よりも約20%電圧を高くする必要があるといわれている．そこで，この実験例では電線を(+)極性とし，2種類のノズルの大きさについて，電線と鉄塔との距離を3段階に分けて，最小フラッシオーバ電圧を測定したものである．同図から明らかなように電線と鉄塔との距離が狭いほど，また，ノズルの直径の大きいほど，ノズル-電線間の距離が同じでも閃絡しやすいことがわかる．

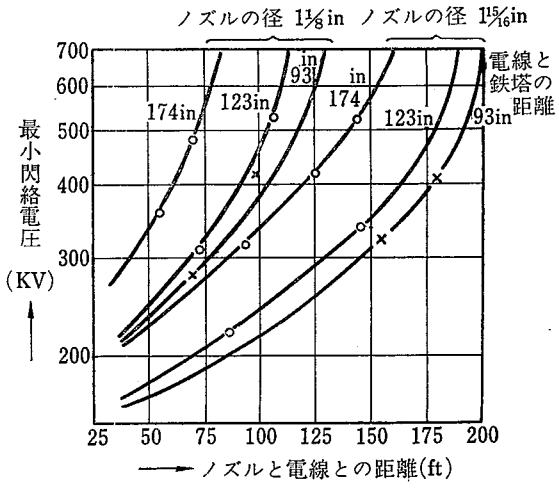


図 7-5　直流でのフラッシオーバ電圧

(5)　ノズルの直径と注水距離の関係

図7-6は，7種類の異なるノズル直径に対して，水圧 80lb/in²，抵抗率 460Ω·in の水で，対地電圧 318 kV の交流の電線に注水したとき，水流中に 1mA の漏れ電流が流れるノズル-電線間の距離を測定したものである[2]．これにより，ノズルの直径が大きいほど，消火時の距離を大きくしなければならないことが示されている．

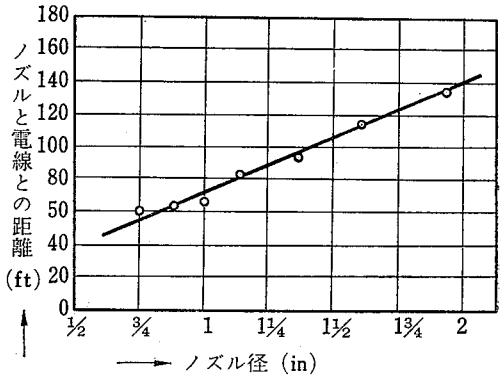


図 7-6　ノズルの直径とノズル-電線間の距離

7.4　注水時の電撃危険距離

前節に述べたような漏れ電流が，放水中を流れることになるので，消火作業をするとき，感知電流である 1mA 程度の電流に抑えるには，実際どれだけ充電部分から離れたらよいであろうか．

図7-7は，わが国の消防研究所で理論値を実験で裏付けして求めた危険距離である[3]．この図の実線で，11 kV 以下の場合は水の抵抗率を 11,000Ω·cm とし，放水流が太さを変えないと仮定したときに電流が 3mA になる距離を示す．1.5kV と 3.3kV との間を線でつないでいないのは，1.5kV 以下の部分は対地電圧で示し，3.3kV 以上は線間電圧で示したためである．また，11kV 以上では放水中の空気の絶縁が失なわれない距離の最小値を実験によって求めたものである．つぎに海水を使用した場合の危険距離であるが，この場合は，放水流が導体として作用する距離は，すべて危険とみてさしつかえなく，危険距離の限界は放水中に空気が混入して，絶縁物とみなしうる場合の距離に

表 7-2　危　険　距　離　(筒先圧力 60lb/in² 以下)
単位：m

口径(in) ＼ 電圧(V)	直　流 600V	直　流 1,500V	交　流 3,300V	交　流 11,000V	交　流 33,000V	交　流 66,000V	交　流 100,000V
5/8	6	6	6	8	8	10	12
6/8	6	6	6	8	10	—	—
7/8	10	10	10	12	—	—	—
1	10	10	10	12	—	—	—

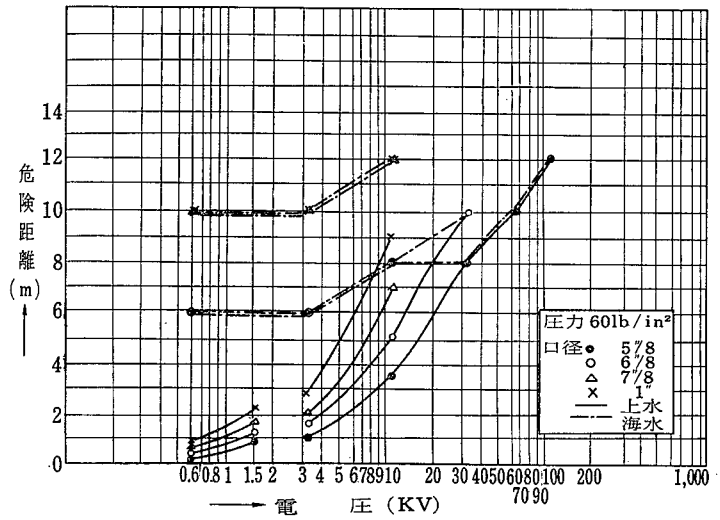


図 7-7　危　険　距　離

なる．

実際に消火放水するときは，その都度使用水の抵抗率を測定することは不可能である．そこで危険距離は各電圧，各ノズルに対して表7-2のようであるとみなしておくとよい．この表は安全側をみて図7-7の海水の場合（抵抗率の小さいもの）をとった数値である．

以上のほか，C. S. Sprague と C. F. Harding の行なった実験（〔資料 12〕参照），フランスで推奨されている最低安全距離（〔資料 13〕参照），G. W. N. Fitzgerald の行なった実験（〔資料14〕参照）等，多々あるが，これらをまとめて示したものが図 7-8 である．

また，噴霧ノズルによる消火では，先に述べたように，抵抗が十分大きくなり，電流はほとんど流れない．したがって，高電圧の場合の消火に適している．Standards for Water Spray Systems for Fire Protection, NBFU No. 15 では，ノズルの先と充電部とは表 7-3 に示した距離以下であってはならないとしている．しかし，Fitzgerld は，このように近い場合は，手持ちのホースによる消火は考えられなく，一般の活線部への安全接近限界を考慮し，安全をみて表7-4 によるべきであるとしている[4]．

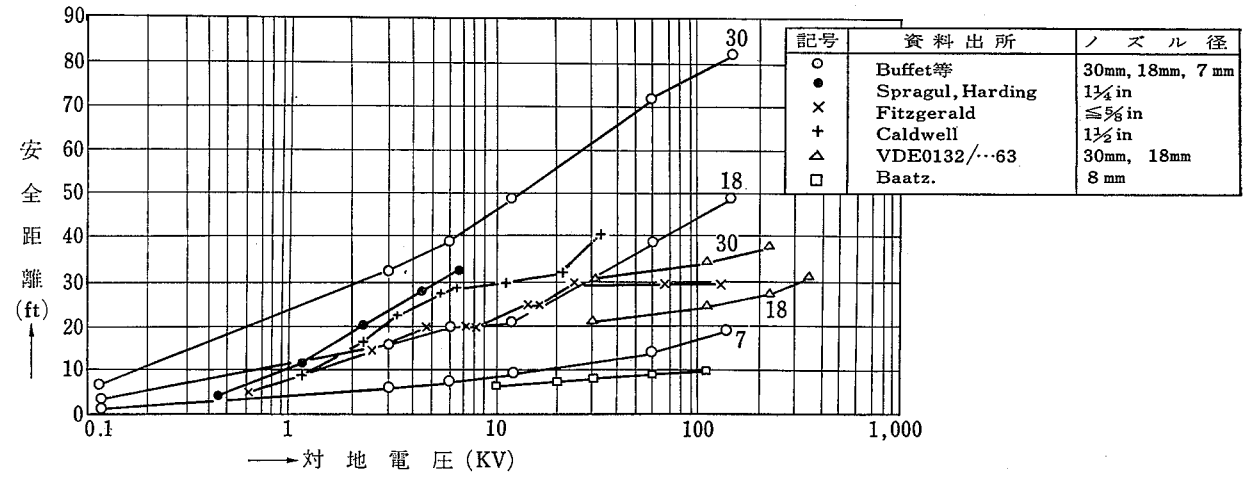


図 7-8　安　全　距　離

表 7-3　噴霧ノズルによる危険距離（淡水）

線間電圧（V）	距離（in）
15,000 以下	6
25,000	8
34,500	12
46,000	15
69,000	23
92,000	30
115,000	37
138,000	44
161,000	52
196,000	63
230,000	76
287,500	98
345,000	120

表 7-4　安全接近限界

対地電圧（V）	線間電圧（V）	最低安全距離（ft）
2,400	4,160	4
4,800	8,320	4
7,200	12,500	4
8,000	13,800	4
14,400	24,900	4
16,000	27,600	4
25,000	44,000	6
66,500	115,000	8
130,000	230,000	14

引用文献

1) 中内：消防研究所報告，Vol.1, No.3 (1950)
2) E.C.Starr, J.J.Mangan, W. L. Boling, A. L. Kinyon & F.Chamber : IEEE Trans., Vol.PAS-88, No.2 (1969)
3) 中内：火災，Vol.2, No.13 (1952)
4) G.W.N.Fritzgerald : Ontario Hydro Res. News, Vol.11, No.2 (1959)

第8章　高圧電気設備への接近危険

高圧では，充電部分に接触すればもちろん電撃による危険性があるが，低圧の場合と著しく異なる特徴は充電部分に接近しただけでもフラッシオーバ（閃絡）によって直接電撃や火傷を受けるおそれが多いことである．フラッシオーバは，電圧の大きさと接近距離が主に関係するので，電圧の大きさに応じてどれだけ接近しても安全であるかということがしばしば問題となる．なお，送配電線作業，変電所作業などにおける活線作業の場合には，一般に種々の活線作業用工具を持った作業者が，身体の位置を変えたり，手足を屈曲させたりして作業にあたるので，作業者の身体の寸法，動作範囲，工具の長さなどを十分に考慮して，フラッシオーバのおそれがない距離を常に保持する必要がある．

8.1　対象危険電圧

さて，送配電線，発変電設備などの高圧施設に接近し，フラッシオーバの危険性を検討する場合，その対象とする電圧は，電路の公称電圧（使用電圧）ではなく，電路に発生しうる異常電圧などの最大電圧を考えなければならない．電路には，よく知られているように，常時は規定の対地電圧が加わっているが，このほかいつ発生するか予想のつかない異常電圧，すなわち雷サージ，開閉サージなどが加わることがあるので，これらのサージ電圧に対しても十分にフラッシオーバしない距離をとる必要がある．サージ電圧の大きさは一般に常規対地電圧の数倍以下（標準電圧の最大値の2.2～3.2倍）であるのが普通である．

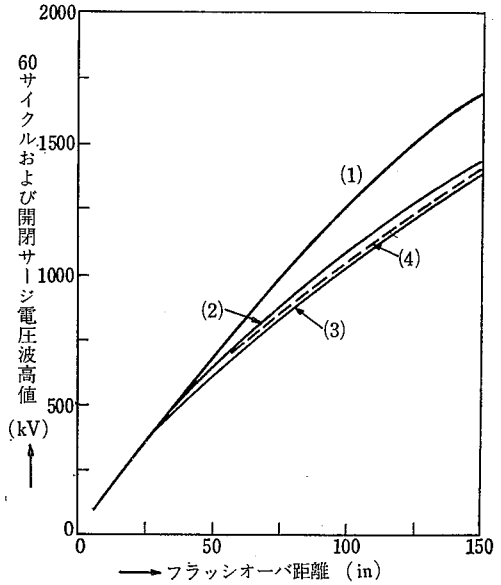
8.2　高圧に対するフラッシオーバ距離

表8-1は，それぞれの公称電圧の電路において発生が予想される異常電圧の大きさに対応したフラッシオーバ距離を示した一例である[1]．同表において BIL（基準絶縁レベル，Basic Insulation Level）とは，電路の電圧に応じた絶縁設計の基準を示すものである．

表 8-1　フラッシオーバ距離

公称電圧 (kV)	BIL (kV)	フラッシオーバ距離 (mm)		
		BIL の 1.2 倍に相当するもの	AC 線間電圧の 2 倍に相当するもの	対地電圧の 4 倍の開閉サージに相当するもの
3	45	44	10	14
6	60	64	22	26
10	90	113	32	38
20	150	234	90	110
30	200	340	130	150
60	350	656	350	380
140	750	1,500	840	970

避雷器や放電ギャップの放電電圧が，この対象電圧よりも低い場合にはこの放電電圧を考える．



（1）　棒-棒 60 Hz フラッシオーバ電圧[2]
（2）　棒-平板 60 Hz および開閉サージフラッシオーバ電圧[3]
（3）　シールドリング-鉄塔　60 Hz および開閉サージフラッシオーバ電圧[4]
（4）　シールドリング-鉄塔　開閉サージフラッシオーバ電圧[5]

図 8-1　フラッシオーバする電圧と距離

なお，図8-1はさらに電圧が高い場合で，電極を変えたときのフラッシオーバ電圧と距離の測定例である．

8.3 許容接近距離

許容接近距離については，いろいろな考え方ができるが，たとえば送電線の活線作業の場合については，つぎのような式が提案されている[6]．

$$D=90+1.25F \quad \cdots\cdots \quad (8\text{-}1)$$

ここで，D：許容接近距離（cm）

F：フラッシオーバ距離（cm）

1.25：安全率（電圧波形，電極形状，気象条件などを考慮したもの）

90：安全マージン（作業者が一時的にフラッシオーバ距離に入り，同時にサージ電圧が発生した場合にも安全を考えたもの）

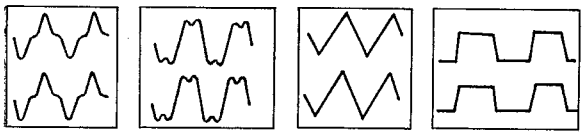
引用文献

1) 藤井：電気安全管理読本．p 122（昭 34）
2) J.H. Hagenguth, A.F. Rohlfs, W.J. Degnan : AIEE Trans., pt.Ⅲ (Power Apparatus and Systems), Vol. 71, pp.455～460, Jan.(1952)
3) N.N. Tikhpdeev, A.N. Tushnov : Elektrichestvo, Moscow, USSR, Vol.79, no.3, pp.33～39, Mar. (1958)
4) N.N.Tikhoclecv & A.N.Tushnov : Ibid., Vol.80, no. 2, pp.6～10 Feb. (1959)
5) A.F. Rohlfs, H.E. Fiegel, J.G. Anderson : AIEE Trans., pt. Ⅲ (Power Apparatus and Systems), Vol.80, pp.463～471, Aug. (1961)
6) A.Elek & J.W.Simpson : IEEE Trans., Power Apparatus and Systems, p.897, Feb. (1962)

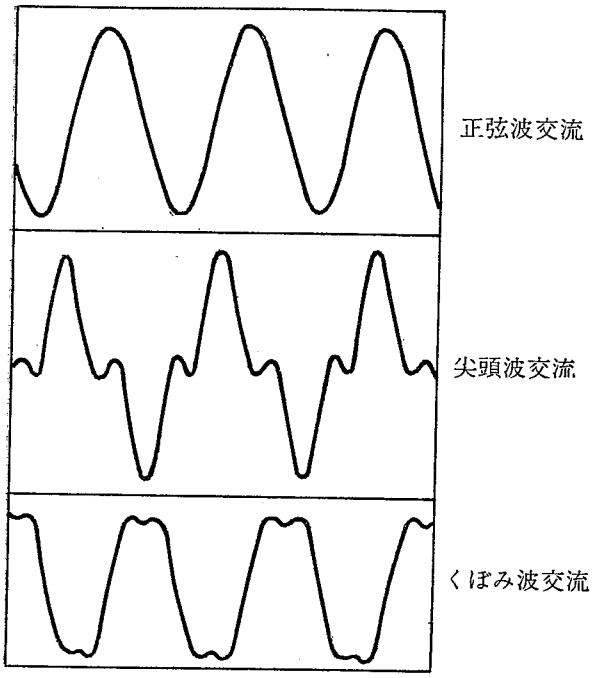
（昭和 45 年 11 月 11 日受付）

〔資　料〕

〔資料 1〕 **Dalziel** が感知電流の実験に用いた交流波形のオッシログラム

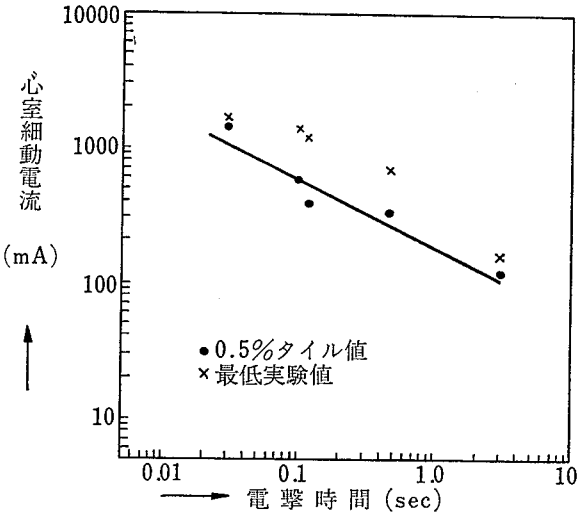


〔資料 2〕 **Dalziel** が可随電流の実験に用いた交流波形のオッシログラム

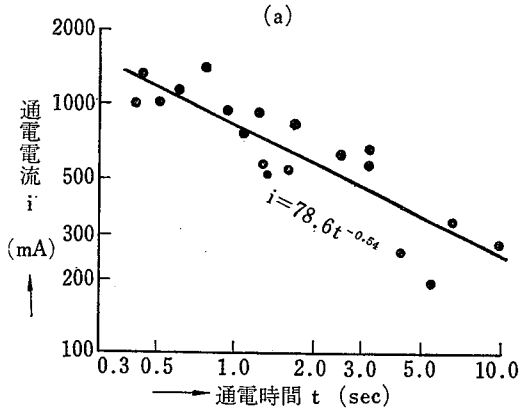


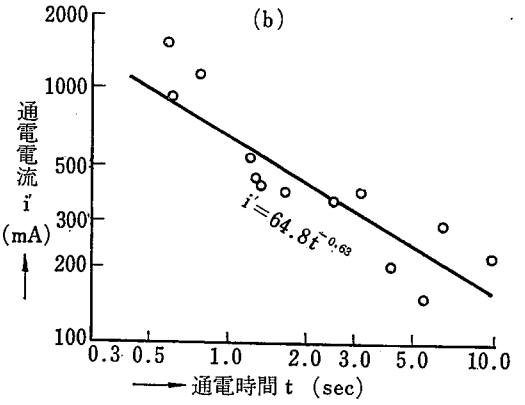
〔資料 3〕 通電時間と心室細動電流の関係（羊）
(Ferris)

通電時間	心室細動電流 (mA)	
	0.5% tile	0.5% tile
30 ms	1,400	2,480
0.10 s	600	2,200
0.12 s	400	3,400
0.47 s	350	1,080
3.00 s	120	240



〔資料 4〕 通電時間と心室細動電流（犬）
（東京大学医学部における実験データ）





(a)：心室細動を起こした最低電流値 i と通電時間 t との関係（犬）

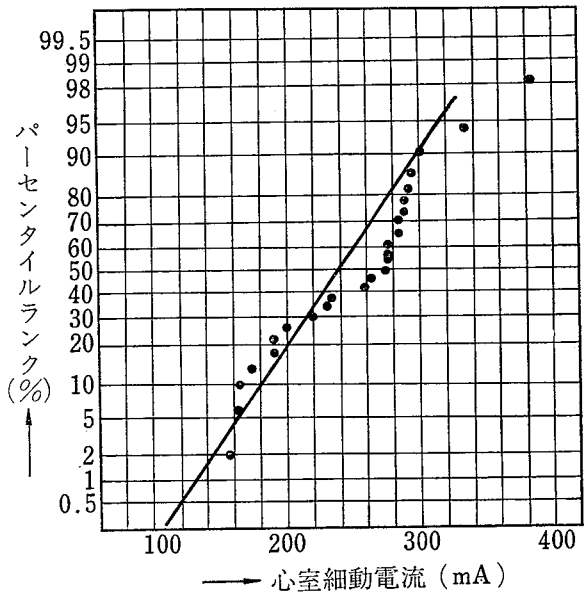
(b)：心室細動を起こすに至らなかった最大電流値 i' と通電時間 t' との関係（犬）

通電時間(sec)	I_{min}(mA)	I_{max}(mA)
0.41	980	—
0.50	1,000	—
0.60	1,100	950
0.76	1,350	1,150
0.90	900	—
1.06	730	—
1.30	510	420
1.60	520	400
2.45	600	370
3.15	540	400
4.10	250	200
5.40	190	150
6.40	320	290
9.60	260	220

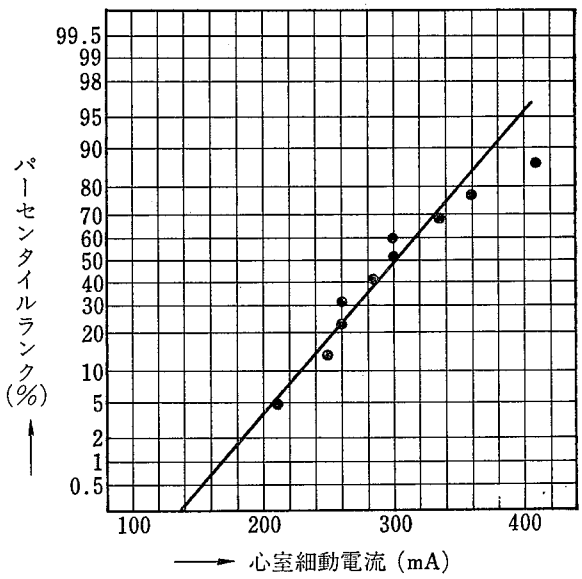
（注）I_{min}：心室細動を起こした最小電流
I_{max}：心室細動を起こすに至らなかった最大電流

〔資料 5〕 3秒間の電撃を受けた場合の心室細動電流

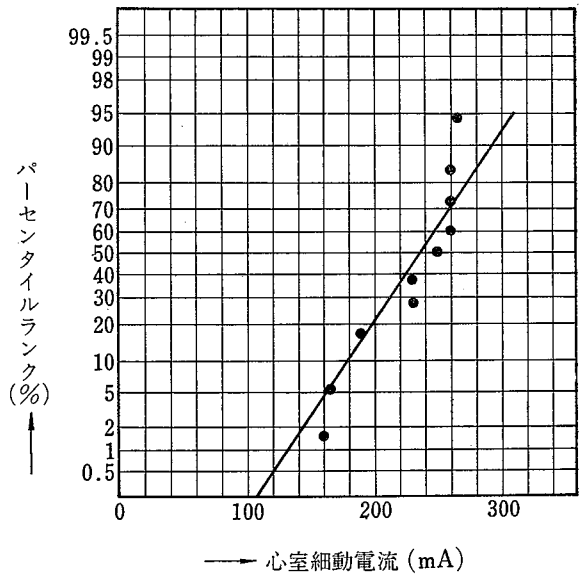
（a） 羊の場合



（b） 子牛の場合

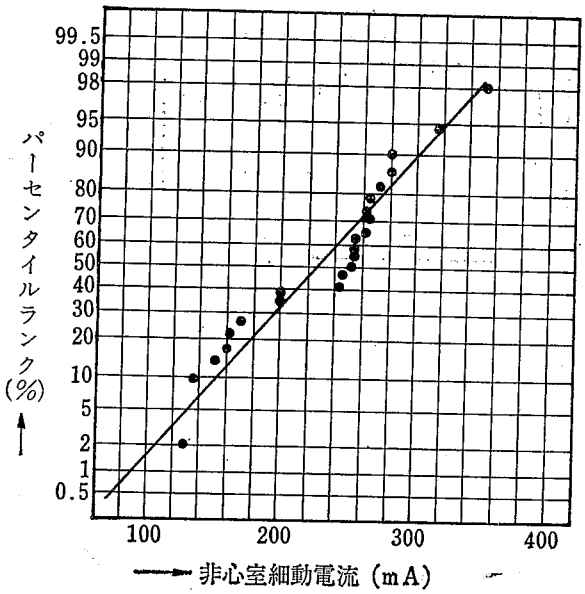


（c） 豚の場合

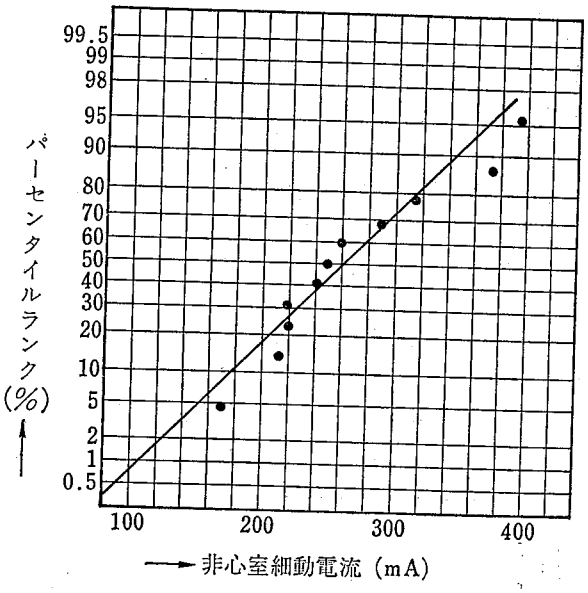


〔資料 6〕　3秒間の電撃を受けた場合の非心室細動電流

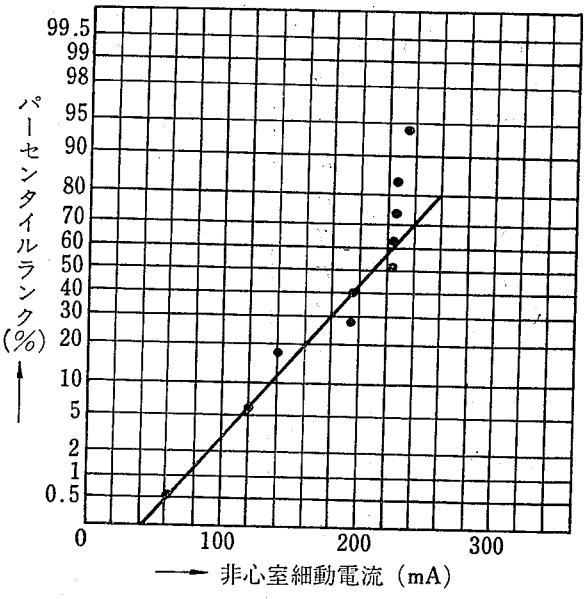
（a）　羊の場合



（b）　子牛の場合



（c）　豚の場合



〔資料 7〕　致命的被害を受けた例

電圧（V）	電撃時間（sec）	身体条件	電流（mA）	エネルギー（W-s）
56	30	乾	12	20
1,900	1	〃	1,300	2,500
250	120	〃	100	3,000
360	90	〃	170	5,500
1,900	5	〃	1,300	12,300
290	10	湿	180	520
280	30	〃	170	1,430
290	30	〃	180	1,560
250	60	〃	140	2,100
290	40	〃	180	2,100
360	30	〃	260	2,800
290	60	〃	180	3,100
500	60	〃	450	13,500
500	5	濡	620	1,550
550	5	〃	690	1,900
400	15	〃	470	2,800
320	60	〃	320	6,100
375	50	〃	420	7,900
360	60	〃	400	8,600
255	150	〃	230	9,100
250	180	〃	230	10,800
360	90	〃	400	13,000
500	120	〃	620	37,500
550	100	〃	690	39,000
1,900	30	〃	2,700	154,000

（注）　電流値は，災害当時の状況から電圧および推定による人体電気抵抗をもとにして計算．

〔資料 8〕 致命的被害を受けなかった例

電　圧 (V)	通電時間 (sec)	身体条件	電　流 (mA)	エネルギー (W-s)
110	1	乾	29	2
125	1	〃	34	4
320	1	〃	150	48
500	1	〃	280	150
360	5	〃	170	300
200	60	〃	66	800
350	45	〃	170	2,700
290	180	〃	130	6,600
160	5	湿	67	53
180	5	〃	82	74
250	10	〃	230	520
290	90	〃	180	4,600
3,300	3	〃	3,300	33,000
150	1	濡	100	15
290	1	〃	290	85
480	1	〃	600	290
500	1	〃	625	310
340	5	〃	360	610
200	30	〃	160	960
320	60	〃	120	6,000
320	120	〃	320	12,000
166	1	びしょ濡	120	20
500	1	〃	625	310
2,900	5	〃	3,600	52,000

〔資料 9〕 接触電圧 (**Berührungsspannung**)

VDE 0141/2.64 では，たとえば図1のような状態で電撃を受けたときに人体にかかる電圧のことを接触電圧と呼んでいる．

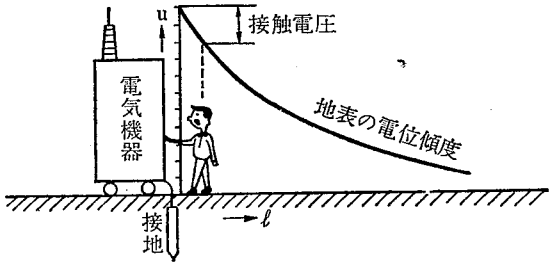


図 1

また，その値は，たとえば図2のような回路で充電部分Ⓐに人体が触れると，接触電圧 U_b は，

$$U_b=\frac{U_e}{\sum R}\cdot R_m=I_f\cdot R_m$$

で表わされる．

このうち，R_0, R_l は小さな値とすれば，U_b に関係するのは，人体抵抗 R_m と足場の抵抗 R_s および対地電圧 U_e である．

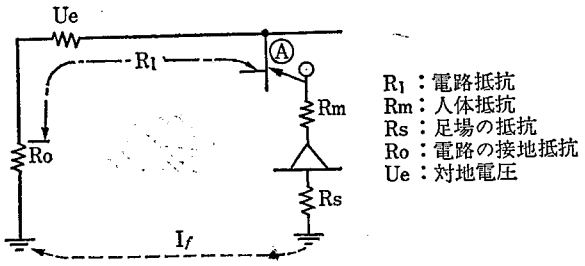
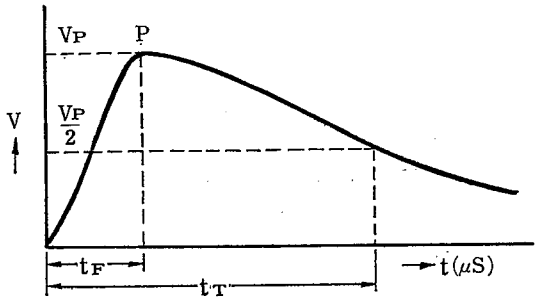


図 2

〔資料 10〕 衝撃電圧波形の表わし方

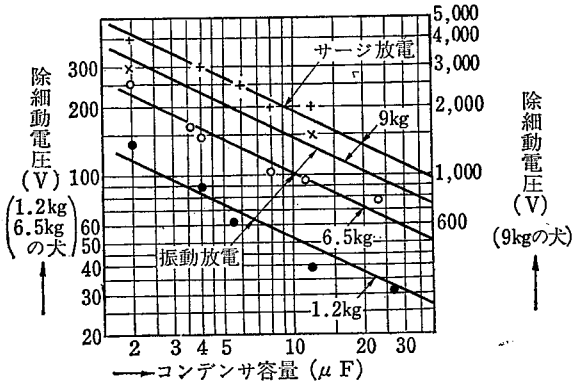


図において，p までの立上り部分を波頭 (Wave Front)，p 以後の減衰部分を波尾 (Wave Tail) と呼ぶ．

また，波頭 V_p までの時間 $t_F(\mu s)$ を波頭長，1/2 V_p になるまでの時間 $t_T(\mu s)$ を波尾長と呼び，衝撃電圧波形をあらわすには，$(t_F\times t_T)\mu s$ の形式をとる．

〔資料 11〕 インパルスによる危険エネルギーの算定

W. B. Kouwenhoven は，コンデンサー放電が心室



放電形式による除細動電圧の変化

細動に及ぼす影響について実験を行ない，インパルスによる危険エネルギーを算定するのに有用なデータを得ている．

たとえば，上図は，心室細動を起こしている犬にコンデンサー放電によるショックを与えて回復させた場合のコンデンサー容量と除細動電圧の関係を示すものであるが，これによると同一効果のショックを与えるにしても，サージ放電の場合と振動放電の場合とでは，そのエネルギー値が変わってくる．

すなわち，$C=12\mu F$ とすれば

サージ放電による場合のエネルギー

$=1/2CE^2$

$=1/2\times12\times10^{-6}\times1,750^2$

$=18.4(W\text{-}s)$

振動放電による場合のエネルギー

$$=1/2CE^2\times\frac{R_b}{R_b+R_c}$$

$$=1/2\times12\times10^{-6}\times1,500\times\frac{75}{75+7.5}$$

$=12.3(W\text{-}s)$

(注：R_b＝身体抵抗，R_c＝回路抵抗，E の値は図より与えられる．)

ここで両者の比をインパルスエネルギー比と定義すれば，

$$インパルスエネルギー比=\frac{18.4}{12.3}=1.5$$

また，$C=2\mu F$ とすれば，

サージ放電による場合のエネルギー

$=1/2\times2\times10^{-6}\times4,250^2$

$=18.1(W\text{-}s)$

振動放電による場合のエネルギー

$$=1/2\times2\times10^{-6}\times3,000^2\times\frac{75}{75+7.5}$$

$=8.2(W\text{-}s)$

$$インパルスエネルギー比=\frac{18.1}{8.2}=2.2$$

その他，ロシアの研究者 N.I.Gurvich と G.C.Uniev による 20 kg の犬などについての同様の研究でも $C=10\mu F$ および $C=4\mu F$ の場合に，それぞれインパルスエネルギー比＝2.0 および 1.8 の値を得ている．

以上のことより，インパルスエネルギー比はおよそ 2.0 前後であり，たとえば，振動放電の場合を交流によるエネルギーと考え，また，サージ放電の場合をインパルスおよび直流の短時間電撃と考えれば，インパルスショックによるエネルギーの危険限界を，交流によるエネルギーの危険限界の2倍と仮定することができる．

〔資料 12〕 注水時に高圧電線から離れるべき最小安全距離（単位：ft）

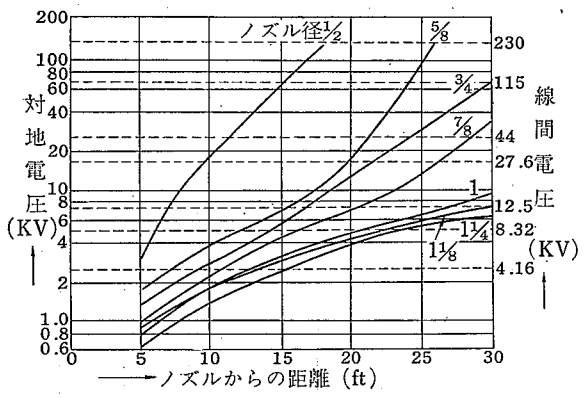
電圧 (V)	水の抵抗率 (Ω·cm)							
	500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
400	11	7	5.5	4.5	3	3	3	3
1,100	30	18	14	12	8.5	6.5	5	5
2,200	×	30	23	20	15	12	9	8
4,400	×	35	31	28	23	19	16	15
6,600	×	×	34	33	30	26	23	22
13,200	×	×	×	×	33	31	29	28
22,000	×	×	×	×	×	×	×	×

(注) 図 7-1 から人体に流れる全電流を 3 mA と仮定し，人体の接地抵抗 0，筒先圧力 50 lb/in²，筒先口径 $1^1/_4$ in として求めたものである．×印は危険な組合わせを示す．

〔資料 13〕 パリ消防隊に推奨された通電中の電気機器とホース・ノズル間の最小安全距離（ft, in）

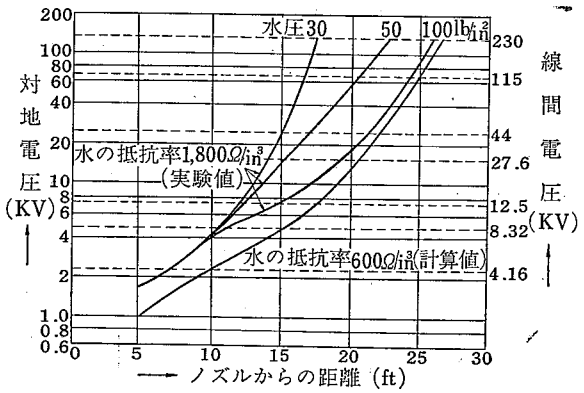
電圧	ノズル口径		
	1/4in	3/4in	$1^1/_4$in
115 V 直流	1′8″	3′3″	6′7″
460 V 〃	2′6″	9′10″	16′5″
3,000 V 交流	6′7″	16′5″	32′10″
6,000 V 〃	8′2″	19′8″	39′4″
12,000 V 〃	9′10″	21′4″	49′3″
60,000 V 〃	14.9″	39.4″	72′2″
150,000 V 〃	19′8″	49′3″	82′0′

〔資料 14〕（a）各ノズルの大きさで，3mA の電流に達する距離



（水の抵抗率　1,800 Ω·in，水圧　100 lb/in²）

（b）　各水圧で，3mA の電流に達する距離



（ノズルの口径 5/8 in）

〔付録〕 電気災害の発生状況とその特性

我が国の最近の労働災害統計から，電気災害には，どのような特性があるのか，また他の災害に比較してどのような特長があるのか検討してみる．

1. 頻発性は低いが，死亡危険性が高い

付表1は，昭和 40 年から 44 年までの5年間，全国における労働基準法の適用事業場において発生した労働者の電気災害を集計したものである．

この表によると，毎年約 350～400 名の労働者が電気災害によって死亡しており，約1,300名が休業8日以上の重傷をこうむっている．

電気災害が，他の労働災害に比較してどのくらいの割合になっているかを見るために，工場，事業場において発生したいろいろな他の災害を含めた全災害に対して電気災害の発生率を算出して示したものが，付表1の一番下の欄である．これによると，死亡は 6.62 %であるのに対し，重傷はわずかに 0.36% である．

付表 1 電気災害年別発生数（昭和40～44年 全国）

死傷別		死亡	重傷	合計
電気災害	昭和40年	373	1,311	1,684
	41	405	1,342	1,747
	42	397	1,340	1,737
	43	355	1,359	1,614
	44	352	1,171	1,523
	計	1,882	6,423	8,305
	平均	376	1,285	1,661
全災害（昭和40～44年）計		28,439	1,800,230	1,828,669
電気災害計／全災害計×100%		6.62	0.36	0.45

（注） 1. 重傷とは休業8日以上のものをいう．
2. 労働省の調査による．

付表 2 原因別災害発生数および死亡率（昭和 42～44 年）

原因別分類	死亡	重傷	計	死亡率(死亡/計×100)
動力伝導装置災害	122	15,419	15,541	0.79
動力揚重機災害	1,124	29,807	30,931	3.63
動力運搬機災害	5,953	100,036	105,989	5.62
一般動力機災害	752	158,047	158,799	0.47
手動揚重機運搬機災害	187	17,538	17,725	1.06
手動機工具災害	28	41,128	41,156	0.07
取扱運搬災害	617	332,339	332,956	0.19
飛来崩壊災害	2,312	121,631	123,943	1.87
撃突踏抜災害	209	97,862	98,071	0.21
つい落災害	3,363	106,026	109,389	3.07
電気災害	1,104	3,776	4,880	22.62
毒劇物災害	212	3,589	3,801	5.58
爆発破裂災害	307	4,674	4,981	6.16
高熱災害	216	19,650	19,866	1.09
火事災害	189	546	735	25.71
倒壊災害	106	969	1,075	9.86
雑災害	448	16,330	16,778	2.67
合計	17,249	1,069,367	1,086,616	1.59

（注） 労働省の調査による．

すなわち電気災害の発生件数は比較的少ないが，そのなかに占める死亡率はかなり高いことを示している．

このことは，別の観点から，電気災害の死亡率と他の災害の死亡率とを比較すると，いっそう明白である．付表2は最近の3年間における労働災害を原因別に分類した場合の災害の発生数と死亡率を示したものであるが，電気災害の発生数は，17 の原因別に分類した災害の 10 位以内に入っていないにもかかわらず，その死亡率は 20% 台を示し，きわめて悪質な災害であることを物語っている．

2.　一般作業者，公衆の災害が多い

付表3は，最近の2年間における労働者の電気死亡災害を職種別および電圧別に分類してその発生比率を示したものである．

付表 3　電圧別，職種別感電死亡災害発生率
（昭和 43，44 年）

職種別＼電圧別	低　圧 (%)	高　圧 (%)	計 (%)
一般作業者	28.85	24.19	53.04
電気作業者	7.50	39.46	46.96
合　計	36.35	63.65	100.00

(注)（1）高圧とは，交流で 600V をこえ，直流で 750V をこえる電圧をいい，特別高圧を含むものである．
（2）労働省の調査による．

この表によると，電気を専門に取扱う電気作業者が 46.96%，これに対して電気に関する専門知識を有しない一般作業者が 53.04% となっている．電気を直接専門に取扱わない一般の作業者にもこのように電気災害が多いのである．

このほか，通産省の調査によれば，一般公衆（電気作業に直接関係のない一般作業者を含む）の感電死亡者もかなり多く，毎年 200 名程度が犠牲となっている．

3.　低圧電気で，夏季に多く発生する

また，付表3から全体の約 37% が低圧電気による死亡者で，なかでもその大半が電気についての専門知識をもたない者で占められている．

この低圧電気による災害を発生した月別に分類してみると，付表4のようになる．これによると，低圧電気による感電死亡者は6～9月に約 80% が集中している．これは発汗現象と密接な関連があり，とくにこの時期には注意しなければならない．

付表 4　月別感電死亡災害発生率（昭和 43，44 年）　(%)

電圧別＼月別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
低　圧	1.17	1.17	1.17	3.89	5.44	8.56	26.46	28.02	16.34	3.89	3.11	0.78	100.0
高　圧	5.66	6.44	8.00	8.67	13.33	9.33	8.23	11.34	10.22	6.44	7.33	5.11	100.0

産業安全研究所安全資料　RIIS-SD-70-1

昭和 46 年 2 月 25 日　発 行

発行所　労働省産業安全研究所
東京都清瀬市梅園1丁目4番6号
電　話 (0424) 91—4512 番 (代)

印刷所　新 日 本 印 刷 株 式 会 社

郵便番号　180—04