

(3) 実験結果と考察

表1に示した住宅基礎モデル10パターンの実験の測定結果を最小二乗法により直線回帰を行い、形状係数 K を求めた結果の一部を図4に示す。

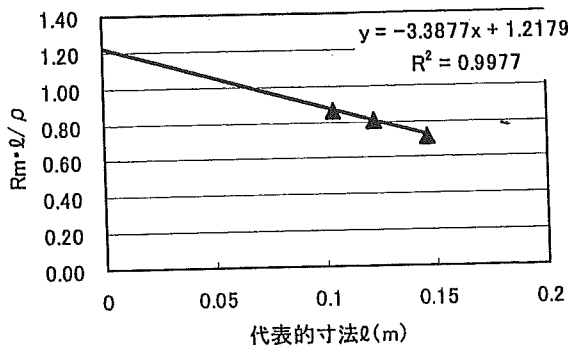


図4 戸建住宅基礎の形状係数 (モデル⑦)

Fig. 4 Shape factor for the foundation of individual house (model 7)

この図より、形状係数 K は y 切片の値である。よって K は 1.2179 である。また、最小二乗法による直線回帰の決定係数 R^2 値は 1.0 に近い値で良好である。①～⑩のすべてのモデルにおいて R^2 値は良好であった。①～⑩の形状係数法によるシミュレーション実験の結果を表3に示す。例として、モデル①の推定接地抵抗値 R_k を求めてみる。表3より、モデル①の形状係数 K は 0.87 である。また、代表的寸法 ℓ は 12.60 である。そこで、(1)式において $K=0.87$, $\ell = 12.60$ を代入すると推定接地抵抗値 $R_k=0.0694 \cdot \rho$ が求まる。

推定接地抵抗値 R_k は大地抵抗率 ρ によっても変化するが、概ね接地抵抗 R_k は、 $0.0611 \cdot \rho [\Omega] \sim 0.0743 \cdot \rho [\Omega]$ の間であることが確認できた。

表3 戸建住宅の形状係数および推定接地抵抗

Table. 3 Shape factor and estimation earthing resistance of individual house

モデル	代表的寸法(m)	形状係数K	推定接地抵抗値 R_k
①	12.60	0.87	$0.0694 \cdot \rho$
②	13.62	0.92	$0.0673 \cdot \rho$
③	14.18	0.94	$0.0663 \cdot \rho$
④	17.80	1.17	$0.0658 \cdot \rho$
⑤	14.18	1.02	$0.0718 \cdot \rho$
⑥	15.75	1.11	$0.0702 \cdot \rho$
⑦	18.23	1.22	$0.0667 \cdot \rho$
⑧	10.26	0.76	$0.0743 \cdot \rho$
⑨	9.23	0.56	$0.0611 \cdot \rho$
⑩	9.18	0.66	$0.0721 \cdot \rho$

2. 4 住宅面積と接地抵抗の関係

表3の推定抵抗値において、大地抵抗率 ρ を $100 \Omega \cdot m$ とした場合の、接地抵抗値と住宅の床面積との関係を図5

に示す。この図より、住宅の規模が大きくなると接地抵抗値は減少することがわかった。

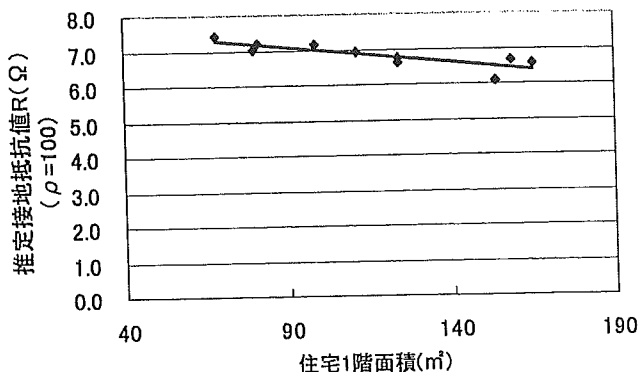


図5 推定接地抵抗 ($\rho=100$ の場合)と床面積の関係

Fig. 5 Relation between estimation earthing resistance ($\rho=100$) and floor area of house

2. 5 鉄筋量を考慮した推定接地抵抗

水槽実験で得られた接地抵抗推定値は、住宅基礎が完全導体として仮定した場合であり、本来の接地抵抗を推定するうえでは、鉄筋コンクリートの電気的特性を考慮に入れて推測する必要がある。

基礎を代用接地極とみなすのは、基礎の中に鉄筋が入っている場合のみであるが、基礎の中にどの程度の鉄筋量が入っているかは、具体的な数値や規定がない。しかし、一般戸建住宅の基礎の形状及び大きさが示してある文献¹⁾から布基礎の形状及び鉄筋の形状、本数を調べ、コンクリート基礎内部の鉄筋量を判断すると、約 0.54% である。

鉄筋量 β は、次式において定義した。

$$\beta = \frac{V_t}{V_0} \times 100 [\%] \quad \dots (2)$$

V_t : 鉄筋の体積 (m^3)

V_0 : コンクリートの体積 (m^3)

また、文献(2)に示したモルタルブロック中の鉄筋がしめる割合の鉄筋量 β を表4に示す。

表4 モルタル中の鉄筋量²⁾

Table. 4 Volume of steel rod in mortar block

		鉄筋の体積 (m^3)	モルタルの体積 (m^3)	鉄筋量 β (%)
鉄筋の本数	1本	1.57×10^{-5}	8.98×10^{-3}	0.175
	2本	3.14×10^{-5}	8.97×10^{-3}	0.350
	3本	4.71×10^{-5}	8.95×10^{-3}	0.526
	4本	6.28×10^{-5}	8.94×10^{-3}	0.702

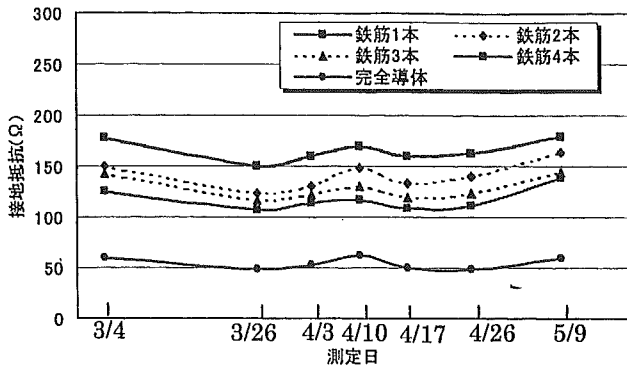


図6 鉄筋1～4本と完全導体の接地抵抗の比較²⁾

Fig. 6 Comparison of earthing resistance of the block with steel rod and perfect conductor of the block

モルタルブロックの周囲に銅板を張付けた物体を完全導体(鉄筋量 100%)とした時の接地抵抗より、鉄筋量を考慮した接地抵抗を推定する。図6に鉄筋1～4本と完全導体の接地抵抗を比較したものを示す²⁾。また、完全導体の接地抵抗を1とした場合の鉄筋1～4本の接地抵抗の比率をプロットし、鉄筋の本数ごとに平均値を求め、その平均値を累乗近似したものを図7に示す。ここで、鉄筋量 β に対する R/R_0 の値を鉄筋係数と定義する。ただし、 R は鉄筋コンクリートの接地抵抗の値で、 R_0 は完全導体の接地抵抗の値である。図7より、鉄筋量 β が増加するほど鉄筋係数(R/R_0)は完全導体(鉄筋量 100%)の1に近づいていき、減少すれば鉄筋0%の比率に近づいていく。

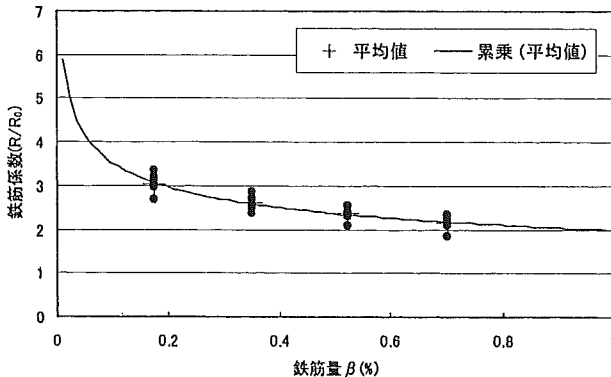


図7 鉄筋量と鉄筋係数の関係

Fig. 7 Relation between steel rod volume and steel rod factor

住宅基礎の一般的な鉄筋量を0.54%とした場合、図6、図7より、鉄筋係数は約2.32である。つまり、鉄筋量を考慮する際には形状係数法で得られた接地抵抗推定値を2.32倍する必要がある。

3. 戸建住宅基礎の接地抵抗実測値とシミュレーション値の比較

3. 1 戸建住宅基礎の接地抵抗の実測⁹⁾

実際に施工されている戸建住宅基礎(場所横須賀市田浦, 田浦開発(株)の協力)の接地抵抗値の測定を行った。

実測を行った土地の大地抵抗率は、ウェンナーの四電極法によって、 $\rho \cdot a$ 曲線データを取り、大地パラメータを解析した結果、当該地はほぼ均質地層であり、深度14mまで約 $21 \Omega \cdot m$ の大地抵抗率であることが推定できた。

住宅A, Bの接地抵抗の測定は、電位降下法によって実測した。補助電極までの距離は電流補助極80m, 電位補助極40mとした。当該地は住宅地であり、電磁的環境に関しては何ら問題がなく、測定電流を2Aとした⁹⁾。

3. 2 形状係数法による接地抵抗推定

戸建住宅基礎の基礎伏せ図を図8, 図9に示す。いずれも布基礎である。これらの住宅基礎を模した木製の模型を製作した。その概観を図10に示す。

木製の模型の側面(外)に銅板を貼り、それを電極とし、前述と同様に接地抵抗を測定し、形状係数を求めた。その結果を図11, 図12に示す。

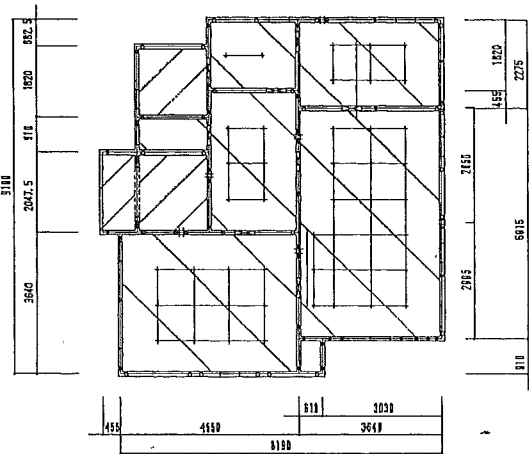


図8 住宅基礎Aの基礎伏せ図

Fig. 8 Foundation of house A

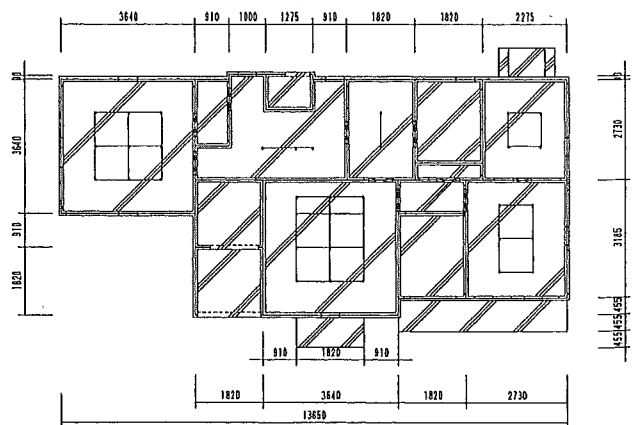
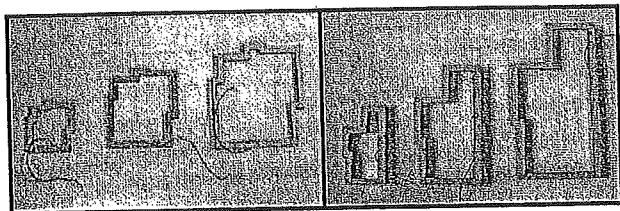


図9 住宅基礎Bの基礎伏せ図

Fig. 9 Foundation of house B



住宅基礎A 住宅基礎B

図10 住宅基礎A,Bの概観図

Fig. 10 Measured model of house A,B

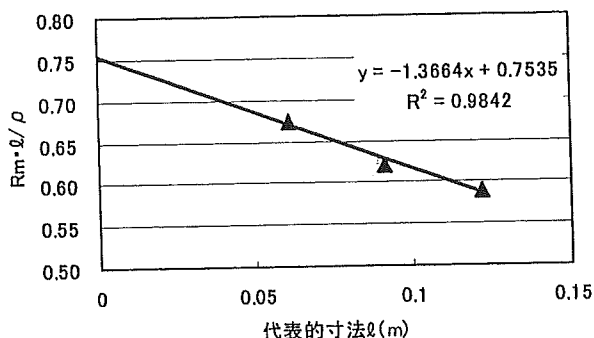


図11 住宅基礎Aの形状係数

Fig. 11 Shape factor for the foundation of house A

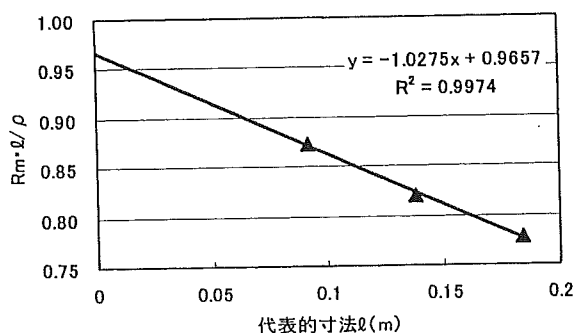


図12 住宅基礎Bの形状係数

Fig. 12 Shape factor for the foundation of house B

3. 3 実測値との比較

形状係数法により求めた推定接地抵抗値に大地抵抗率を代入し R_k を求めた。この R_k は完全導体の場合である。住宅基礎の一般的な鉄筋量を考慮すると、図7より、鉄筋係数は約2.32である。

表5 接地抵抗実測値と推定接地抵抗値の比較

Table. 5 Comparison of earthing resistance of measured values and estimation values

モデル	接地抵抗実測値 (Ω)	接地シミュレーションの場合			推定接地抵抗値 R_T (Ω)
		代表的寸法 (m)	形状係数	推定接地抵抗値 R_k (Ω)	
A	3.3	9.2	0.754	1.72	3.99
B	2.7	13.8	0.966	1.41	3.27

そこで、鉄筋量を考慮した接地抵抗推定値 R_T は、 R_k を2.32倍することにより求まる。その結果表5のようになった。表5に示すように、住宅基礎A, Bの実測値と推定接地抵抗値は近似している。

4. 住宅基礎の代用接地極としての評価

4. 1 鉄筋コンクリートの抵抗率を考慮した場合の接地抵抗

住宅基礎は鉄筋コンクリート造であるが接地抵抗を推定する際、コンクリートの湿潤、乾燥状態をみきわめなければならないが、それらの状態の定量化は困難である。そこで、半球モデルによってシミュレーションを行ってみる。

(1) シミュレーションモデル

鉄筋コンクリート造の物体を半球モデルの体積置換法でシミュレーションできることは既に確認されている²⁾。そこで、住宅基礎を半球状電極に置換したモデルを図13に示す。 r_1 は住宅基礎内に含まれる鉄筋の体積を半球状に置換した場合の等価半径であり、 r_2 は住宅基礎の体積を半球状に置換した場合の等価半径である。

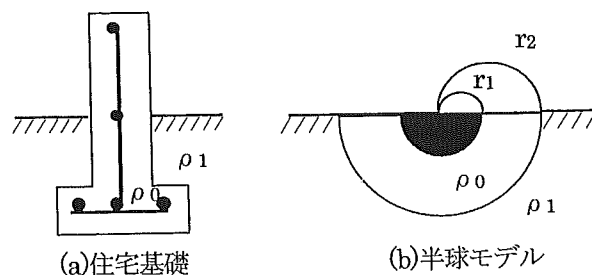


図13 シミュレーションモデル

Fig. 13 The simulation model

(2) シミュレーションモデルの接地抵抗計算式

図13に示した半球状電極の接地抵抗計算式は次式で表される。

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_0}{2\pi x^2} dx + \int_{r_2}^{\infty} \frac{\rho_1}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho_0 r_2 + (\rho_1 - \rho_0) r_1}{2\pi r_1 r_2} \dots (3)$$

(3)式によると、接地抵抗はコンクリートの抵抗率 ρ_0 と大地抵抗率 ρ_1 に左右される。そこで、 ρ_0 と ρ_1 の大きさによる接地抵抗の変化をみる。

$\rho_0 / \rho_1 < 1$ の場合は、大地の ρ_1 に比べてコンクリートの ρ_0 が小さい場合であり、つまりコンクリートが湿潤状態である。それに対して $\rho_0 / \rho_1 > 1$ の場合は、コンクリートの ρ_0 が大きい場合で、いわゆる乾燥状態である。

表6 シミュレーションモデルの等価半径

Table. 6 Equivalent radius of simulation model

代表的寸法 $l(m)$	鉄筋量の等価半径 $r_1(m)$	基礎の等価半径 $r_2(m)$
18.23	0.257	1.501
9.12	0.204	1.191

例として、表1、表3より、形状係数 K が最も大きな住宅基礎の形状であるモデル⑦をもとに推定してみる。(3)式における諸元の中で、 r_1 と r_2 は表6に示す値を用い、 ρ_1 の値は $100\Omega \cdot m$ する。実寸法である $l=18.3$ と、その半分大きさの形状($l=9.13$)の住宅基礎の接地抵抗を試算してみると図14のようになる。

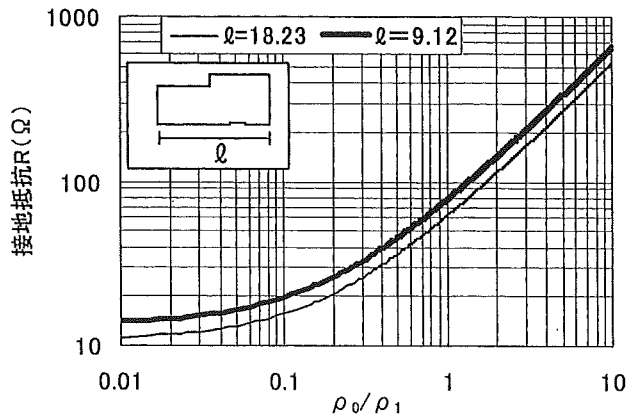


図14 大地の状況と接地抵抗の関係

Fig. 14 Relation between situation of the earth resistivity and earthing resistance

また、図14において $\rho_0/\rho_1=1$ の接地抵抗を1とした場合、 $\rho_0/\rho_1 < 1$ 、 $\rho_0/\rho_1 > 1$ に対する接地抵抗の比を湿乾係数と定義する。 ρ_0/ρ_1 と湿乾係数の関係を図15に示す。

文献(2)において、コンクリートの電気特性についての検討を行っている。それによると、湿潤状態のコンクリートの抵抗率は、乾燥状態の約1/4倍の値($7\Omega/25\Omega$)で一定になっている。このことは、乾燥状態のコンクリートの抵抗率は、最大で湿潤状態の約4倍になることを示している。よって、図15より、乾燥状態 $\rho_0/\rho_1=4$ の場合におけるy軸の値(3.5)が住宅基礎の湿乾係数の最大値と考えることができる。

4.2 住宅基礎の接地抵抗の推定方法

既に述べてきたように、住宅基礎の形状を模した電極を作成し、接地シミュレーションによって、形状係数を求め接地抵抗を推定することができる。この推定接地抵抗を R_k としたとき、 R_k は完全導体の場合である。住宅基礎は鉄筋

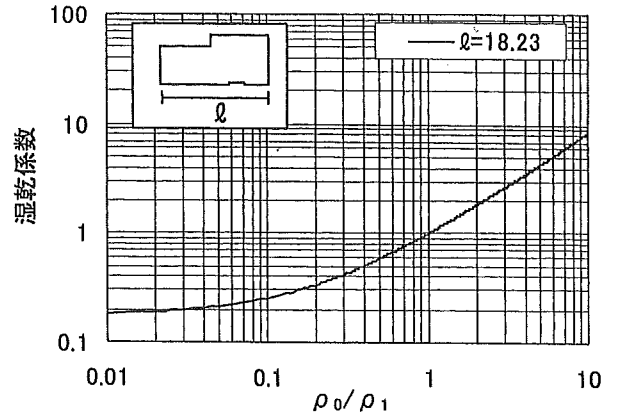


図15 ρ_0/ρ_1 と湿乾係数の関係

Fig. 15 Relation between ρ_0/ρ_1 and wetness and dryness factor

コンクリート造であり、鉄筋量を考慮して接地抵抗を推定しなければならない。鉄筋量と鉄筋コンクリートの接地抵抗(R)との関係は、図7に示したようになっていいる。さらに、鉄筋コンクリートの ρ_0 を考慮した場合、大地の ρ_1 に対して、湿潤状態である場合は何ら問題はない。しかし、最も懸念される乾燥状態の場合、前述したように、湿乾係数は約3.5である。そこで、住宅基礎の接地抵抗 R_B は次式

表7 戸建住宅基礎の推定接地抵抗

Table. 7 Estimation of the earthing resistance for the foundation of individual house.

モデル	基礎の形状 (形状係数)	1階床面積(m^2)	推定接地抵抗 (最大値)(Ω)
		代表的寸法(m)	
①	0.87	111.45	56.4
		12.60	
②	0.92	124.00	54.7
		13.62	
③	0.94	123.98	53.9
		14.18	
④	1.17	164.97	53.4
		17.80	
⑤	1.02	98.35	58.3
		14.18	
⑥	1.11	79.64	57.0
		15.75	
⑦	1.22	158.36	54.2
		18.23	
⑧	0.76	68.30	60.3
		10.26	
⑨	0.56	152.9	49.6
		9.23	
⑩	0.66	81.03	58.5
		9.18	

で推定することができる。

$$R_B = R_k \times (\text{鉄筋係数}) \times (\text{鉄筋コンクリートの湿乾係数}) \dots (4)$$

4. 3 住宅基礎の接地抵抗の目安値

(4) 式によって、表 1 に示した戸建住宅基礎の接地抵抗の最大値を算定してみる。ここで、鉄筋係数は 2.32 とする。また、鉄筋コンクリートの湿乾係数は 3.5 とし、大地抵抗率は $\rho_i = 100 \Omega \cdot m$ とする。

算定結果を表 7 に示す。 $\rho_i = 100 \Omega \cdot m$ とした時、接地抵抗は 49.6~60.3 Ω であり、非常に良好な接地抵抗を得ることができた。

5. あとがき

本論では、戸建住宅基礎の接地抵抗を推定するために、住宅基礎の形状を模した電極を作成し、形状係数法を用い接地抵抗を推定した。また、鉄筋量を考慮した接地抵抗の推定も行った。さらに、鉄筋コンクリートの湿潤、乾燥状態を考慮した場合の接地抵抗を推定した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 形状係数法による接地シミュレーションで完全導体の場合の接地抵抗が推定できる。

(2) 鉄筋コンクリート造である場合、鉄筋量をもとに、接地抵抗が推定できる。標準的な鉄筋量に対して鉄筋係数は 2.32 である。

(3) さらに、鉄筋コンクリートの湿乾状態を考慮した場合、湿乾係数を導入することで接地抵抗を推定できる。実際の土壌中の鉄筋コンクリートの湿乾係数を求めることは不可能であるが、シミュレーションの結果から、湿乾係数は最大でも 3.5 であると予想される。したがって、最も懸念されるコンクリートの乾燥時であっても、住宅基礎の場合は、接地抵抗の安全サイドを考慮して湿乾係数を 3.5 と提案する。

(4) (1), (2), (3) をもとに、戸建住宅基礎の接地抵抗算定式を提案した。

(5) 実際に建設されている全電化住宅の基礎を例にとった場合、大地抵抗率が $\rho = 100 \Omega$ の場合、接地抵抗は 49.6~60.3 Ω の値であることがわかった。

住宅基礎の接地抵抗の推定方法は、まず形状・寸法を考慮した形状係数を求め、鉄筋係数、湿乾係数をもとに推定することが可能であることを明らかにした。今後、代用接地極として実用化するためには、実測データを集める必要があるが、現実には困難を伴うことが多い。関係各位のご理解、ご協力をお願いしたい。

本研究は、平成 16 年度厚生労働科学研究費補助を受けて

いることを付記する。

(受付 平成16年12月10日)

参考文献

- 1) 北村健司, 右田理平, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の接地抵抗の推定」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB04-7-6, 2004 年
- 2) 右田理平, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の代用接地極に関する基礎的検討」, 電気設備学会誌論文号 Vol.24, No.4, pp.296~301, 2004 年
- 3) 右田理平, 高橋健彦: 「導体を入れたモルタルブロックの接地抵抗」, 第 21 回電気設備学会全国大会 A-18 pp.43~44, 2003 年
- 4) 右田理平, 高橋健彦: 「信頼性を考慮した住宅の接地設備」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB03-5-3, pp.11~16, 2003 年
- 5) 高橋健彦: 「住宅における接地設備の課題」, 電気設備学会誌, Vol.23, No.2, pp.116~120, 2003 年
- 6) 中村秀親, 高橋健彦: 「代用接地極としての木造住宅の基礎」, 第 16 回電気設備学会全国大会, E-16, pp.163~164, 1998 年
- 7) 中村秀親, 高橋健彦: 「鉄筋コンクリート代用接地極の導電性」, 第 17 回電気設備学会全国大会, E-12, pp.147~148, 1999 年
- 8) 鈴木秀典, 中村秀親, 高橋健彦: 「戸建住宅基礎の代用接地極としての評価」, 第 18 回電気設備学会全国大会, E-10, pp.173-174, 2000 年
- 9) 鈴木秀典, 高橋健彦: 「戸建住宅の接地抵抗」, 電気設備学会テーマ付研究会, GB02-2-6, pp.25~29, 2002 年
- 10) W.Rudolph: 「EMV nach VDE100」, VDE-verlag, 1996 年
- 11) 住宅金融公庫: 「木造住宅工事共通仕様書」, (財)住宅金融普及協会, pp.20, 2003 年
- 12) 高橋健彦, 川瀬太郎: 「接地電極の形状係数法の推定法」, 電気学会論文誌 Vol.103-B, No.12, pp.854, 1983 年



右田理平

1978年9月1日大阪府生まれ。2004年3月関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程終了。同年4月より(株)大林組勤務。



荒井健司

1979年10月17日神奈川県生まれ。2003年3月関東学院大学建築設備工学科卒業。2005年3月関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程終了。同年4月、(株)山下設計入社予定。



高橋健彦

関東学院大学工学部建築設備工学科教授、工学博士(東京大学)、(社)電気設備学会理事、(社)建築設備技術者協会理事、副会長、雷保護システム普及協会理事、(財)関東電気保安協会評議員、(社)電気学会上級会員。

シリコン加工砂利の抵抗率

准会員 坂間博樹 (関東学院大学) 正会員 高橋健彦 (関東学院大学)

Resistivity of Silicon Coated Gravel
Sakama Hiroki (Graduate School of Engineering, Kanto-Gakuin University)
Takahashi Takehiko (Kanto-Gakuin University)

キーワード: 抵抗率, 体積比濃度, シリコン加工砂利,

In the substation, high resistivity material, such as gravel is spread on the earth's surface above the earthing grid to increase the contact resistance between the soil and the feet of persons. This paper investigates the resistivity measurement method of gravel and the resistivity of silicon coated gravel.

1. まえがき

変電所等の構内では感電保護のために歩幅電圧や接触電圧の低減対策が行われている。この対策のひとつに砂利を敷く手法がある。IEEE の変電所接地設計指針 においてもこの手法が¹⁾提案されているが、指針の中で感電保護対策として砂利の抵抗率の具体的な指標は見当たらない。より抵抗率を高くするためにシリコン溶剤を数ミクロンの厚さで砂利(玉砂利)に焼付けた砂利(以下シリコン加工砂利という)が考案された。これは撥水性、非保水性に優れた特徴をもつ砂利である。そこで、砂利の抵抗率の実力を知るために抵抗率測定を試みたので以下に報告する²⁾。

2. 抵抗率の推定手法

2.1 推定の考え方

流体や粘土のような物体の抵抗率を測定するのは容易であるが固体の抵抗率を測定することは容易でない。しかもシリコン加工砂利を非破壊で測定する方法は見当たらない。

そこで、体積比濃度の考え方をういてシリコン加工砂利等の抵抗率を測定するために以下の方法で行った。

ここで、物体の体積抵抗率(Ωm)を物理系では固有抵抗、比抵抗という表現もあるが、本稿では抵抗率と表現する。

2.2 抵抗率測定の原理

アクリル製水槽(長さ 200×高さ 100×幅 100 mm)の両端に銅製の電極板(100×100×2 mm)を置いた測定装置に商用電源を印加し、回路電流と電極板の両端の電圧により抵抗を測定する。媒質の抵抗率を ρ としたときこの抵抗 R は次式で表される。

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \text{----- (1)}$$

ここで、 ρ : 水槽の媒質の抵抗率、 L : 水槽の長さ、 A : 電極板の面積

被測定媒質が液体や粘土であれば、媒質を水槽の中に入れ、抵抗を測定することで抵抗率が容易に推定できる。しかし、砂利の場合は隙間が生じるため、直接的な測定が不可能である。

そこで、水槽の中に入れる媒質の量を体積比濃度で換算する。体積比濃度 γ の定義は次式による³⁾。

$$\gamma = \frac{V_s}{V_o} \cdot 100(\%) \text{----- (2)}$$

ここで、 V_s : 媒質の体積、 V_o : 水槽の体積

媒質である砂利の体積比濃度が 100% になることはあり得ないため、外挿法によって 100% とみなしたときの抵抗率を推定する。

3. 抵抗率測定原理に基づく砂の抵抗率の測定

測定装置の水槽に水道水を満たし、砂を入れた。その際、水槽からあふれる水(つまり砂の体積)を測定し、あわせて電流を測定し抵抗を求め、抵抗率を求めた。

その結果、体積比濃度 58% で抵抗率 78 Ωm であった。次に、水槽に乾燥した砂を満した場合は、つまり、体積比濃度 100% の抵抗率を測定した結果、7000 Ωm となった。これらの結果を図 1 に示す。

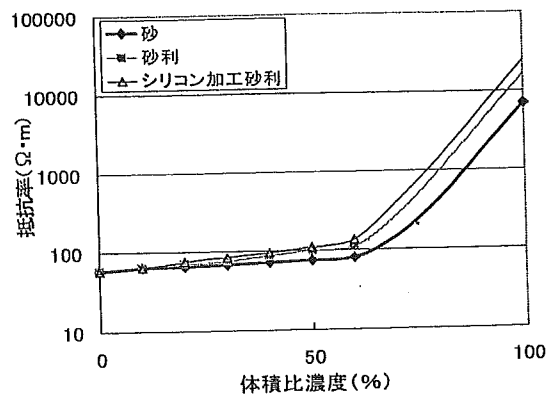


図 1 砂, 砂利, シリコン加工砂利の抵抗率
Fig.1. Resistivity of silicon coated gravel, gravel and sand

前述した砂の測定結果より砂の体積比濃度と抵抗

率の関係式を算出する。Mathcad (2001) を用いて指数回帰によるデータ解析を行った。解析を行う際、砂の抵抗率 y と体積比濃度 x の関係は次式のように仮定した。

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c \text{-----} (3)$$

解析した結果、次の定数となった。

$$a = 4.36 \times 10^{-3}, b=0.143, c=58$$

ちなみに、体積比濃度 $x=0$ の場合は、 $y=c=58$ となり、水槽の水の抵抗率となる。また、体積比濃度 $x=100$ の場合は、 $y=7000$ となり、砂の抵抗率となる。

4. 砂利, シリコン加工砂利の抵抗率の測定

4.1 測定手法

測定装置の水槽に水道水を満たし、砂利を1つずつ投入し、溢れた水の量を測定し、あわせて電流を測定し抵抗率を求めた。砂利が投入できなくなるまでこの行為を繰り返し、体積比濃度と抵抗率の関係を調べた。

4.2 測定結果と抵抗率の推定

砂利やシリコン加工砂利の場合は隙間が生じるため、体積比濃度が60%程度までの実験データしか得られなかった。そこで図1に示したデータを用いて、砂の場合の実験式を参考にして、指数回帰曲線の定数 a を推定した。ここで、(3) 式の b, c は一定とした。

まず、砂利の場合の体積比濃度60%のときの抵抗率 $111 \Omega m$ をもとに a を求めると $a=0.010$ となった。同様にシリコン加工砂利の場合の体積比濃度60%のときの抵抗率 $137 \Omega m$ をもとに a を求めると $a=0.015$ となった。

これらの作業によって砂利とシリコン加工砂利の実験式のパラメータを求めることができた。まとめて表1に表す。

表1 実験式のパラメータ

Table1. Parameters of experimental formula (3)

	a	b	c
砂利	0.010	0.143	58
シリコン加工砂利	0.015	0.143	58

4.3 砂利の抵抗率の推定

砂利やシリコン加工砂利の場合は、体積比濃度100%にはなりえない。そこで(3)式に示した実験式を用い、外挿法によって体積比濃度100%、つまりそれ自体の抵抗率を推定することにした。

(3)式において、 $x=100$ として表1に示した定数を代入すると、砂利は $16000 \Omega m$ となり、シリコン加工砂利は $24000 \Omega m$ となった。これらを図1に示す。

5. 砂利, シリコン加工砂利の含水特性

砂利は水分を含むが、シリコン加工砂利はシリコン溶剤を焼付けているため撥水性、非保水性がある。この特徴をみるため含水特性の実験を行った。

測定装置に水道水を満たし、抵抗率の経時変化をみた。ここで、変化率とは初期の抵抗率に対する変化の割合である。結果を図2に示す。

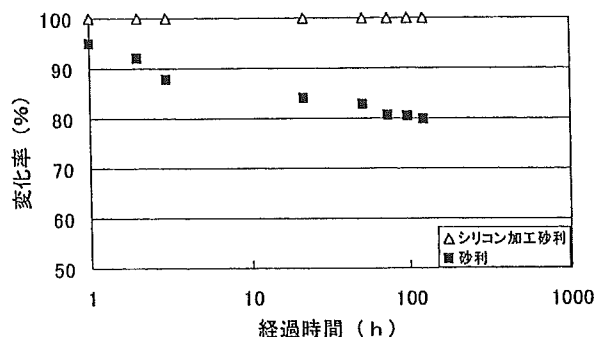


図2 砂利, シリコン加工砂利の含水特性

Fig2. Contained water characteristic of gravel and silicone coated gravel

砂利の場合は、推定した初期抵抗率は $16000 \Omega m$ であるが、水を含み抵抗率が減少する傾向を示し図に示すように約20%の減少の傾向がある。シリコン加工砂利は撥水性があるため水を含まず、推定した抵抗率が初期の $24000 \Omega m$ から減少しない。

6. あとがき

非破壊によって砂利等の抵抗率を推定する手法を提案し、シリコン加工砂利の具体的な抵抗率を知ることができた。また、含水特性により、シリコン加工砂利の抵抗率が変化しないことを確認した。

これらの知見をもとに、シリコン加工砂利による接触電圧、歩幅電圧の低減対策の有効性について検討する予定である。

本研究は、平成17年度厚生労働科学研究費補助を受けていることを付記する。

(受付 2005年12月19日)

参考文献

- 1) IEEE std 80-2000, IEEE Guide for safety in AC substation Grounding, pp20-23
- 2) 坂間 博樹, 鈴木 幸治, 高橋 健彦:「シリコン加工砂利の抵抗率」, 電気設備学会全国大会, pp.165-166, 2005.
- 3) 右田理平, 高橋健彦:「戸建住宅基礎の代用接地極に関する基礎的検討」, 電気設備学会誌 Vol24, No.4, pp.296-301, 2004

坂間 博樹 (准会員)

1981年生まれ。

2005年4月関東学院大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程入学
現在在学中

高橋 健彦 (正会員)

関東学院大学工学部建築設備工学科教授, 工学博士 (東京大学)



低圧配電の昇圧化に伴う 電気火災・感電事故の分析

－100V/200V の日本と 220V/380V 化が終了した韓国との比較－

正会員 本山建雄 (産業安全研究所) 賛助会員 中田健司 (テンパール工業)
非会員 崔光石 (産業安全研究所) 非会員 富田一 (産業安全研究所)

Analysis of Electric Shock and Fire Hazards Expected Associating with Promotion of
Low Voltage Distribution
-Comparative Study between Japan of 100V/200V and Korea completed promotion of
220V/380V power distribution-

Member Tatsuo MOTOYAMA (National Institute of Industrial Safety)
Member Kenji NAKATA (Tempearl Industrial Co.,Ltd.)
Non-Member Kwang-Seok CHOI (National Institute of Industrial Safety)
Non-Member Hajime TOMITA (National Institute of Industrial Safety)

キーワード：配電電圧昇圧，電気火災，感電事故，日本，韓国

In Japan, the present voltage distribution is mainly 100/200V. In the near future, 200/400V will be introduced to save energy and prevent any contribution to the greenhouse effect. However, the promotion of power distribution could lead to an increase in the number of accidents, such as those that occur as the result of electric fires and electric shock. In Korea, the successful promotion of 220V power distribution has been completed after a period of approximately 30 years. This paper is a comparative study of electrical accidents that have occurred in Japan and Korea from the viewpoint of safety engineering. The results of our comparative study indicate that (1) the increase in electric fires are relative to the promotion of power distribution; that is, electric fires increase in number according to usage; and (2) electric shock is not dependent on the promotion of power distribution because of the use of electric leakage circuit breakers (ELCBs).

1. はじめに

エネルギーを効率的に使用して二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量を削減することが、地球温暖化を防止するために必要である。将来、我が国において 20kV 級/400V 配電方式を採用し、低圧電路を現在の単相 3 線式 (100/200V) あるいは三相 3 線式 (200V) から三相 4 線式 (230V/400V) に昇圧するとの案は、配電時のエネルギー損出を低減し、設備・資材を削減できることから注目されている¹⁻³⁾。しかし、昇圧化にあたっては、エネルギーを効率的に使用する

ことの他、電気火災や感電に対する電気安全について十分に検証する必要がある^{4,5)}。

一方、韓国においては、1970 年代から昨年まで国家プロジェクトとして配電電圧の昇圧化事業を行い、単相 100V から三相 4 線式 (220V/380V) への昇圧を完了している。この経験は将来、日本が三相 4 線式 (230V/400V) に昇圧を計画する上で貴重な資料となることが予想される。

本稿では、昇圧化した場合に想定される電気安全上の課題を明確にしておくため、韓国の研究者の協力を得て韓国

の電気災害の発生状況と昇圧化の関連、昇圧期間中の電気火災統計、感電災害統計の分析を試みた。また、同時期における日本の電気災害の発生状況の統計と比較して昇圧化に伴うと考えられる要因を抽出し分析した。さらに、昇圧化が実施された場合の電気安全についても検討した。

2. 電気火災

2.1 電気火災の推移

日韓の電気火災発生数の推移を図1に示す⁶⁻⁸⁾。図に示す電気火災データは、建物、林野、車両、船舶、航空機、その他で発生した件数の合計である。

日本における電気火災は、1980年代の5000件台から近年では7000件台に増加している。電気火災が増加した原因は、電化生活の発展に伴う使用電力量の増加(図2)、需要戸数の増加、小型大容量の電気製品を多数接続するため、延長コードなどの配線用器具に流れる電流値が増加したこと^{9,10)}、工事不良、取り扱い方法不良および維持・管理不適などが考えられる¹¹⁻¹³⁾。

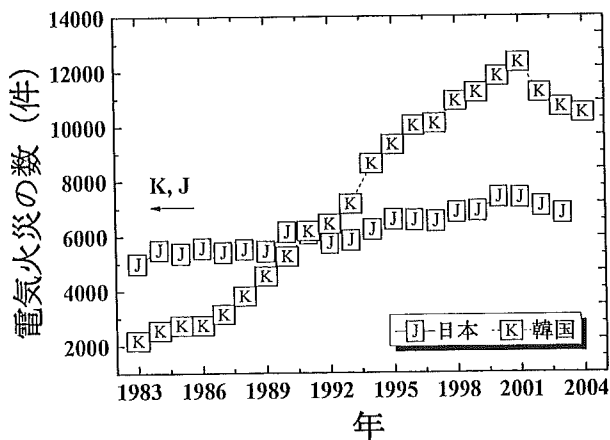


図1 日韓の電気火災発生推移

Fig. 1 Electrical fires over the years in Japan and Korea.

一方、韓国における電気火災は、1980年代の2000件台から近年では10000件台を超えており、約5倍に増加している。この間の韓国の電力需要戸数、昇圧戸数、昇圧率の推移を図3に示す^{7,8)}。三相4線式(220V/380V)への昇圧化は、1973年に開始され¹⁴⁾、1980年代に50%を超え、1999年にほぼ100%に達し、2005年10月に完了した。ただし、昇圧化開始当初の需要戸数は少なかったため、電灯の普及も昇圧化と同時に進んでいった。

電気火災が増加した原因は、使用電力量の増加(図2)、需要戸数および昇圧率の増加(図3)、老朽設備の継続使用などが考えられる。また、昇圧過程の一時期には、漏電対

策の不完全、配線機器の不良、粗悪な単巻変圧器の使用による電力損失増加などから電気事故が増加した¹⁵⁾。

日本の電気火災の増加率は韓国と比べると低く、電気火災件数は微増であるのに対し、韓国の電気火災の増加率は高く、1991年以降は日本の件数を上回っている他、人口に対する割合も高い。

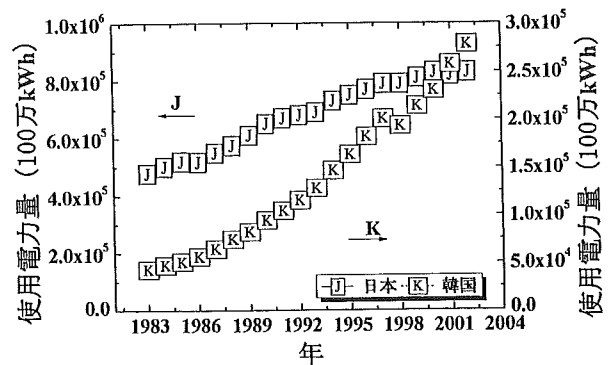


図2 日韓の使用電力量

Fig. 2 Electricity use over the years in Japan and Korea.

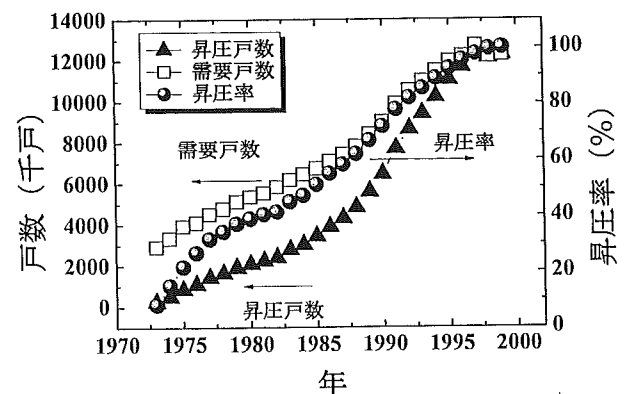


図3 韓国の需要戸数と昇圧戸数及び昇圧率

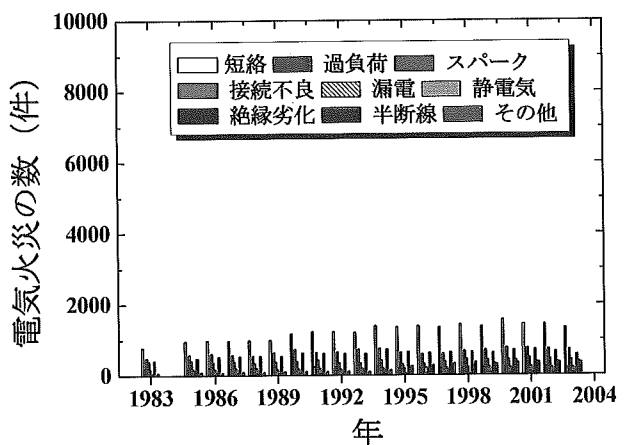
Fig. 3 Electric power demand and promotion rate in Korea over the years.

2.2 電気火災の主な発火要因

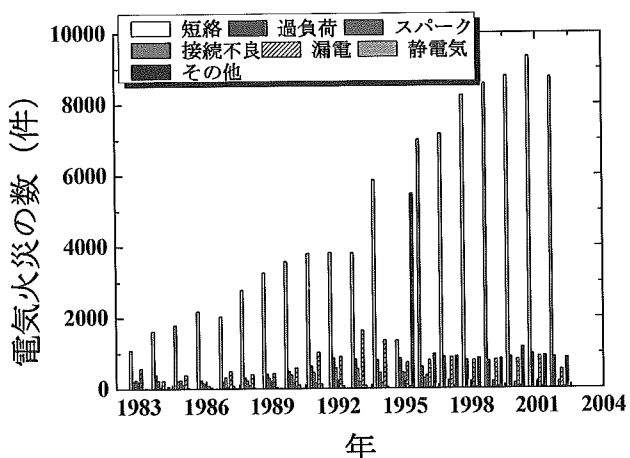
日韓の原因別電気火災発生推移(1983年~2002年)を図4に示す⁶⁻⁸⁾。なお、日本の1984年のデータは入手できておらず、また、韓国の「絶縁劣化」のデータは「漏電」の項目に含めている。

日本においては、電気火災全体の約30%が「短絡」を原因として発生しており、屋内配線、交通機関内配線、配線器具、電気機器、電気装置のいずれの設備においても主な原因となっている^{6,10)}。他の原因で多いのは、「絶縁劣化」、「スパーク」などである。韓国においては、電気火災のほとんどが「短絡」を原因として発生しており、特に屋内配

線および照明装置ではその割合が高い。電気火災の件数は年々増加しているが、特に「短絡」を原因とする件数の増加率が高く、電気火災全体に占める割合も高くなってきている。「短絡」を原因とする火災件数の増加は、使用電力量、需要戸数、昇圧率、コードや配線用器具に流れる電流値の増加、工事不良、維持・管理不適などの影響が考えられる。また、韓国においては、火災原因が不明の場合や短絡と推測されるレベルであっても「短絡」の項目に含める傾向にあるため⁹⁾、その評価方法の影響も考えられる。なお、1995年は例年の評価方法と異なり原因が短絡と確定された場合のみ「短絡」の項目に含めているため、件数の傾向が異なっている。



(a) 日本
(a) Japan



(b) 韓国
(b) Korea

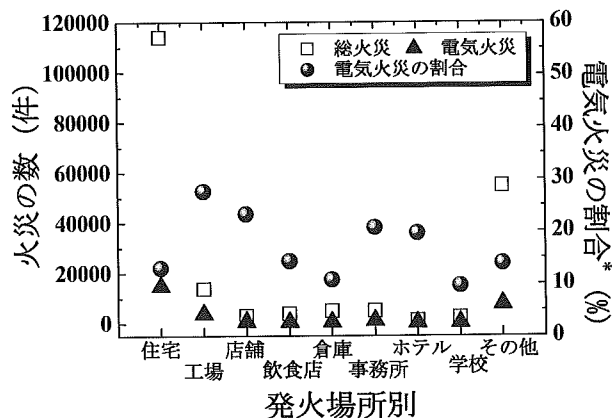
図4 日韓の原因別電気火災発生推移

Fig. 4 Trends noted in electric fires classified by ignition source over the years in Japan and Korea.

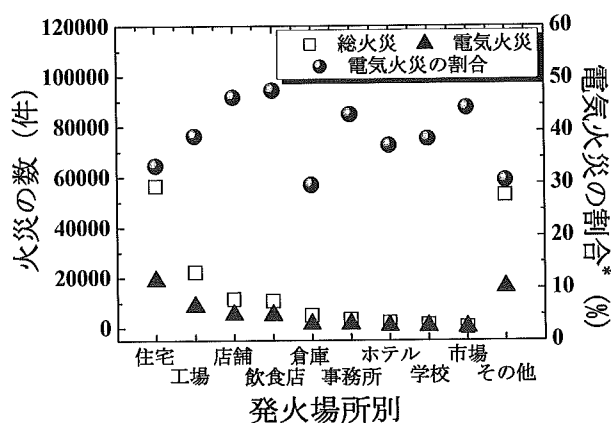
2.3 電気火災の発火場所

日韓の発火場所（建築物）別電気火災（1997年～2002年）を図5に示す^{6,8)}。図に示す電気火災データにおいて、住宅の項目はアパート（マンション）、工場は作業場、ホテルは旅館の件数をそれぞれ含んでいる。日韓両国とも件数に違いはあるものの住宅での火災、電気火災が最も多い。この理由として、住宅戸数が多いこと、住宅での生活時間が長いこと、素人工事や使用方法不良などが考えられる。

一方、火災全体に対する電気火災の割合は、日韓両国とも工場、店舗、事務所、ホテルなど使用電力量が多い場所が高い。また、韓国の電気火災の割合は、日本に比べ2倍以上多い傾向にあり、店舗、飲食店、市場（屋台）の火災の約50%が電気火災となっている。これらの建築物の電気火災は、老朽設備の継続使用、電気機器の未点検などの保守不良によって多くなっていると考えられる⁹⁾。



(a) 日本
(a) Japan



(b) 韓国
(b) Korea

図5 日韓の発火場所別電気火災 (*: 総火災に対する電気火災の割合)

Fig. 5 Electrical fires categorized by location in Korea and Japan (*: percentage of electrical fires from total number of fires).

2.4 電気火災の月別発生原因

日韓の月別電気火災発生推移(1995年～2002年合計)を図6に示す⁶⁻⁸⁾。日韓両国とも発生件数に違いはあるものの冬季と夏季に電気火災が増加する傾向が一致している。

冬季は、移動電熱器を発火源とする電気火災が多く、夏季は、家電機器、モータ、変圧器、配線用遮断器、進相コンデンサーなどを発火源とする電気火災が多くなる。夏季は気温が高いことからエアコンなどの使用により電力使用量^{17, 18)}やインバーターによる高調波電流¹⁹⁾が増加し、これと装置の老朽化¹¹⁾、施工不良、維持管理不適などが重なって火災につながったと考えられる。

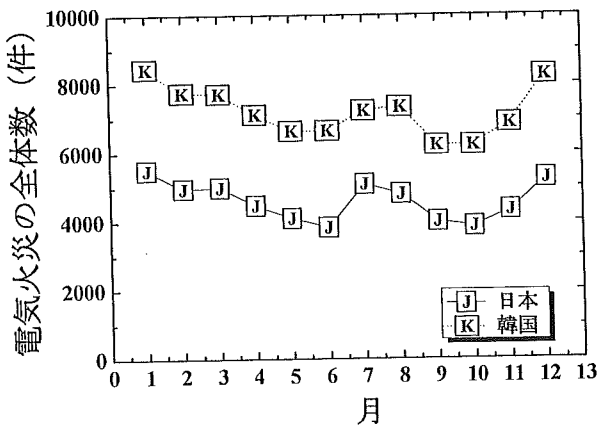


図6 日韓の月別電気火災発生推移

Fig. 6 Electrical fires classified by month in Japan and Korea.

2.5 電気火災と昇圧との関連

電気火災の主な原因として、過電流(短絡, 過負荷)および漏電(線間, 対地間)がある。これらの原因から発生する電気火災は複雑な経過をたどるため厳密な考察はできないが、ここでは昇圧との関連を電気エネルギーの大きさにより検討した。

2.5.1 過電流

短絡や過負荷時には過電流が電線を通ずる。過電流を遮断するためヒューズや配線用遮断器が設置されているが、少なくともそれらが動作するまでには時間がかかり、結果としてエネルギーが供給されることになる。エネルギーは通過する電流の2乗に比例することから²⁰⁾、通過電流に対する昇圧の影響について次の条件の下で検討した。

完全短絡時の短絡電流 I_s は、式(1)で表される²¹⁾。図7は電線、コードの長さを変数として、式(1)と以下の算出条件の下で計算した完全短絡時の推定短絡電流を示す²²⁾。

※算出条件

変圧器 : 二次側 単相3線式, 容量30kVA
 $\%Z = 1.25 + j0.90$ (外線-中性線間 100V)
 $\%Z = 1.50 + j1.70$ (外線-外線間 200V)

引込電線 : サイズ 8mm^2 , 長さ 30m

屋内配線 : サイズ $1.6\text{mm} \phi 2\text{C}$, 長さ 20m

コード : サイズ 0.75mm^2 , 長さ 10m 未満

$$I_s = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{V^2 \%R_T}{100P} + R_L\right)^2 + \left(\frac{V^2 \%X_T}{100P} + X_L\right)^2}} \quad (1)$$

I_s : 短絡電流

E : 相間電圧

V : 相電圧

P : 変圧器の容量

R_T : 変圧器の抵抗分%インピーダンス

X_T : 変圧器のリアクタンス分%インピーダンス

R_L : 電線・コードの抵抗分インピーダンス

X_L : 電線・コードのリアクタンス分インピーダンス

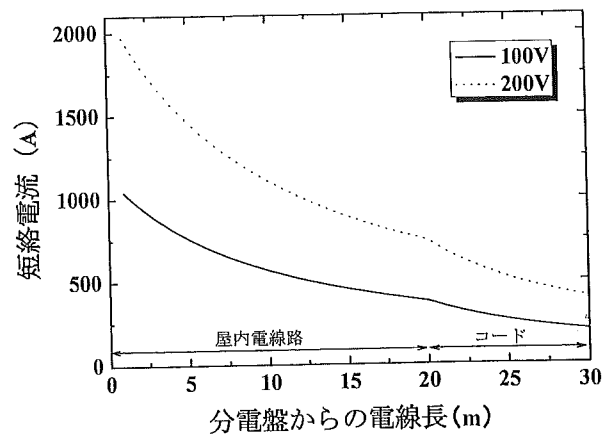


図7 完全短絡時の推定短絡電流

Fig. 7 Leakage current estimated in short-circuit.

式(1)、図7からわかるように、推定短絡電流は電圧に比例することから、火災の発生は、電圧に依存するといえるが、実際には電流に対する過電流遮断器の動作特性やアーク放電などを考慮する必要があり、4.1で詳細に考察する。なお、実際の短絡電流値は、短絡点にアーク抵抗や炭化経路の抵抗などが介在することから完全短絡電流値以下となる^{23, 24)}。

2.5.2 漏電

抵抗 (R) に発生するエネルギー W_1 は式 (2) で表される。

$$W_1 = IVt = \frac{V^2}{R}t \quad (2)$$

(I : 電流, V : 電圧, R : 抵抗, t : 持続時間)

式 (2) において I を一定とすると, 200V において供給されるエネルギーは 100V の場合の 2 倍になり, R を一定とすると, 4 倍になる。絶縁材料は固有の炭化温度あるいは発火温度を有していることから, 原因の除去にかかる時間がこれらの閾値を超えると火災に至ることになる。厳密には, 熱の出入り, R の変化などを考慮する必要があるが, 火災の発生は電圧に依存するといえる。

特に, 韓国の場合, 図 1, 3 に示すように, 電気火災の発生と昇圧戸数 (率) に相関性があることから電圧昇圧の影響があったものと推定される。この理由として, 昇圧化が実施された頃は漏電火災警報器, 漏電火災対応の漏電遮断器等の安全装置が普及していなかったことおよび例え普及していたとしても電線等の絶縁性が悪く, 安全装置が働かない線間漏電 (いわゆる負荷と同等の漏電) が生じていたことが推定される。

3. 感電事故

3.1 感電事故の推移

日韓の感電事故死傷者推移を図 8 に示す^{7,8,25)}。日本における感電死者数は, 1980 年代前半には 100 人を超えていたが, 年々減少し, 2002 年には 21 人となっている。これは, 一般用電気工作物における漏電遮断器の普及率が 1980 年代前半の 40% から近年では 70% に増加したこと, 作業現場における漏電遮断器の普及, 絶縁用保護具・防具に使用される電気材料の高性能化および安全管理・安全教育の徹底などの効果によると考えられる²⁶⁾。

韓国における感電死者数は, 日本と同様に年々減少し, 1980 年後半の 250 名から 2003 年には 72 名まで減少している。なお, 1987 年以前のデータは現在入手できていない。韓国では 1979 年に電気事業法および技術基準を通じて漏電遮断器の設置を義務化していることから²⁷⁾, 昇圧されたにもかかわらず漏電遮断器の普及にともない感電死者数が減少したと考えられる。両国において, 単純に感電死傷者数を比較すると, 日本の感電死傷者数が 100~200 名であるのに対し, 韓国の死傷者数は 800~1000 名であり (1993 年以前のデータは未入手), 大きな差がある。

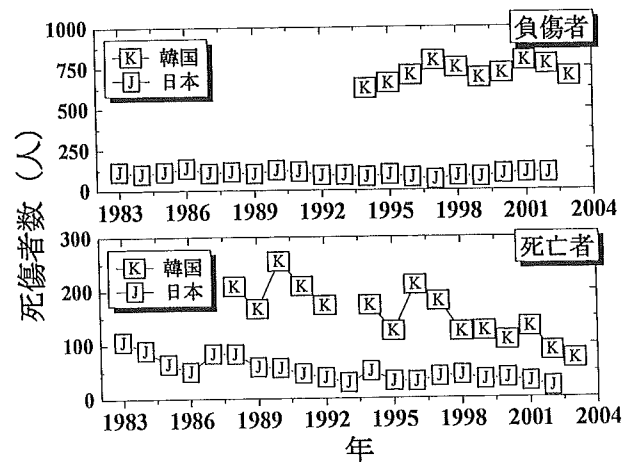


図 8 日韓の感電事故死傷者推移

Fig. 8 Fatal accidents attributed to electrical shock by year in Japan and Korea.

3.2 感電事故の電圧別発生原因

日韓の電圧区別感電事故 (1996 年~2002 年合計) を図 9 に示す^{8,25)}。電圧区別の定義は, 両国とも, 「低圧」は直流 750V 以下, 交流 600V 以下の電圧, 「高圧」は直流 750V を超え 7000V 以下, 交流 600V を超え 7000V 以下の電圧, 「特別高圧」は直流, 交流とも 7000V を超えるものである。

日本の場合「200V」の感電事故は, 「100V」の場合に比べて約 3 倍多い。一方, 韓国の場合, 「220V」の感電事故 (死傷者) が電圧区分の中で最も多い。また, 1999 年に昇圧率がほぼ 100% に達していることから, 「110V」の感電事故は「220V」に比べて少ない。

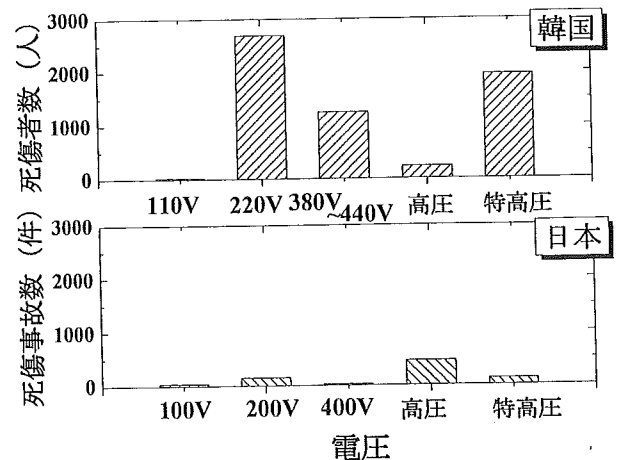


図 9 日韓の電圧区別感電事故

Fig. 9 Electric shock classified by voltage in Japan and Korea.

日韓両国の配電方式や対地電圧は異なっており 100V と 200V あるいは 220V の感電危険性について図 9 の数値の大きさから直接比較することは困難であるが、電圧値だけで単純に比較しても 100V に比べ 200V は危険であり、韓国の場合、重傷および死亡に至るケースが増加し、「220V」の感電死傷者が多くなったと考えられる。

韓国の場合、三相の電圧である「380V~440V」の感電事故件数も多い。韓国におけるサンプリング調査の結果、分岐回路の約 80%には漏電遮断器が取り付けられているが、工場や農業用などの三相の動力系統には漏電遮断器ではなく配線用遮断器が取り付けられていることが多かった²⁸⁾。この影響で感電保護ができず感電事故が多くなったとも考えられる。

日本と韓国では「高圧」と「特別高圧」の感電事故件数が逆転している。これは、需要家の近くまで配電する電圧に、日本においては 6.6kV の高圧を、韓国においては 22.9kV の特別高圧を主に採用していることによると考えられる。

3.3 感電事故の月別発生原因

日韓の月別感電事故推移(低圧：1995年~2002年合計)を図 10 に示す^{8, 29)}。ただし、日本の場合は、統計の都合上、労働災害における感電死亡者数のデータを使用した。日本の統計によると高電圧の場合、季節の影響を受けないことが明らかになっているが、昇圧した韓国のデータにそのような傾向は見られない。両国とも暑さによって衣服が薄く皮膚の露出が多くなり発汗とともに注意力も散漫になる夏季に感電事故が増加する傾向がある⁹⁾。

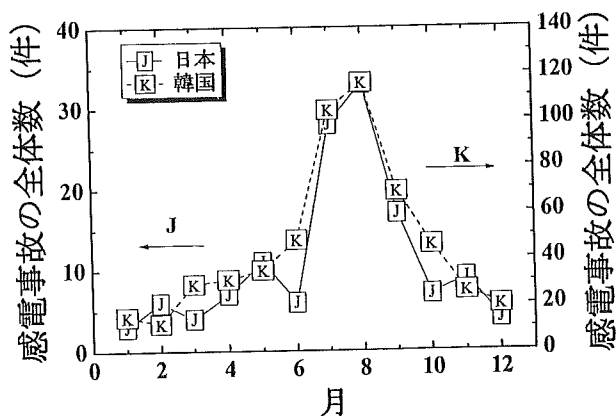
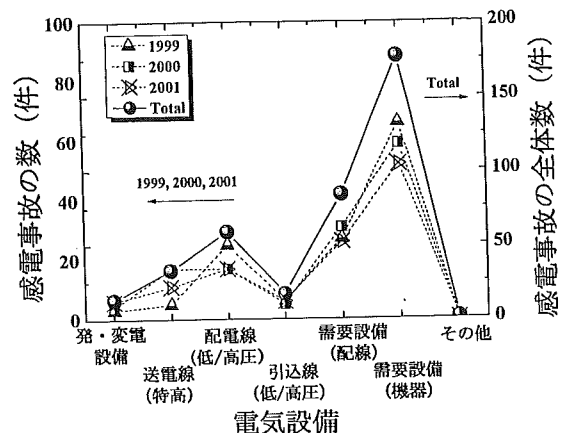


図 10 日韓の月別感電事故推移

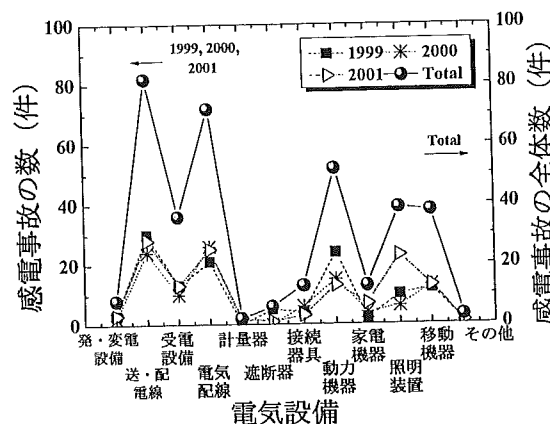
Fig. 10 Accidents attributed to electrical shock by month in Japan and Korea.

3.4 感電事故の電気設備別発生原因

日韓の電気設備別感電事故を図 11 に示す⁶⁻⁸⁾。日本においては、需要設備の配線および機器における感電事故が多い。その他の電気設備(送電線、配電線、引込線)は、一般に公衆が近づく可能性は少なく、作業者の感電がほとんどであるため感電事故件数は少ないが、電圧値および対地電圧値が需要設備の場合に比べて高いため、感電死亡事故に至る場合が多いと考えられる。



(a) 日本
(b) Japan



(b) 韓国
(b) Korea

図 11 電気設備別感電事故

Fig. 11 Electric shock classified by electrical installation in Japan and Korea.

韓国においては、送・配電線での感電事故が最も多く、これは特別高圧 (22.9kV) や高所作業の影響と考えられる。また、分類項目は多少異なるが日本と同様に需要設備の電気配線や機器 (受電設備、動力機器、照明装置、移動機器) における感電事故も多い。理由としては、受電設備は、変圧器の一次側電圧が特別高圧の 22.9kV であること、三相動力系統の保護装置は、対地静電容量による漏電や漏電遮断器の誤作動による製造設備の停止を回避するため配線用遮断器の場合が多いこと、照明装置は、高所作業になること、移動機器は、屋外で使用する事が多く接地を怠りがちになることが考えられる。

3.5 感電事故と昇圧の関連

日本の場合、電技解釈 162 条 (屋内電路の対地電圧の制限) により住宅の屋内電路の対地電圧はいくつかの例外を除いて原則 150V 以下に制限されている³⁰⁾。電灯線は、単相 3 線式 (100V/200V) であるため、100V 線路および 200V 線路の対地電圧は双方とも 100V となる。また、動力線は主に三相 3 線式 (200V) であり、対地電圧は 200V となり 150V を超えるが、電技解釈 162 条により住宅の屋内電路の対地電圧が 150V を超える場合は、電気機械器具は、屋内配線と直接接続して施設し、電路に漏電遮断器を設置することになっている。なお、IEC 規格では日本のような対地電圧の制限事項はない³¹⁾。韓国の場合、低圧配電方式に電灯および動力を同時に供給可能な三相 4 線式 (220V/380V) を採用しているため、線路の対地電圧は 220V となる。

感電事故は、線間にくらべ充電部と大地間の場合が多い。人体のインピーダンスは、皮膚の湿潤によって低下し、電圧の増加に対して低下する特性があることから、電圧が高い場合には、感電時に人体を流れる電流が大きく、人体が受けるショックは予想以上に増す危険性があり³²⁾、転倒や転落などの二次災害にもつながり易くなると考えられる³³⁾。したがって、感電事故の発生は電圧、特に対地電圧に依存すると考えられる。

4. 昇圧に伴う安全上の課題と対応

前述の検討から昇圧に伴う安全上の課題は主に次の 2 点である。

- (1) 過電流、漏電による電気火災の増加
- (2) 対地電圧上昇による感電事故の増加

これらに対する対応について、以下に検討を加える。

4.1 電気火災に対する対応

漏電 (線間短絡を含む) による火災を防止する対策の一

つとして、漏電火災警報器、漏電火災対応の漏電遮断器等による地絡保護がある。漏電火災警報器の場合、漏電の検出、警報の後、人が原因を取り除くために時間を要する。また、これらの安全装置は、ポリ塩化ビニルなどの絶縁材がトラッキング劣化により炭化、グラファイト化^{34,35)}して起こる線間漏電 (いわゆる負荷と同等の漏電) に対しては殆ど対応できないが、最近では、一部であるものの対応できるものもあり、この方面の研究開発が求められている。

一方、過電流による火災を防止する対策として、過電流遮断器による過電流保護がある。

過電流遮断器は、ヒューズおよび配線用遮断器 (以降、「一般型 MCCB」) である。過電流遮断器の保護範囲は、コンセント受け口までの屋内配線であり、コンセントにつながるプラグコードまでは保護の対象に含まれていない。最近、コンセントに接続されたプラグコードの短絡事故に起因する電気火災の発生を防止するコード短絡保護用瞬時機能付の分岐回路用配線遮断器 (以降、「コード短絡保護 MCCB」)³⁶⁾が開発され、一般に用いられるようになった。

電源コードや延長コードを原因とする電気火災は、平成 9 年度東京消防庁の統計によれば、電気火災全体の 15.1% を占める³⁰⁾。コード短絡の背景には、小型大容量の電気製品が普及して延長コードなどの配線用器具に流れる電流が増加したこと、オフィス機器や家具の裏側などに押し込まれることが多いこと、床上で使用し、折り曲げや踏まれることで心線やコード被覆が損傷しやすいこと¹⁷⁾、素人による工事や使用などが考えられる¹⁸⁾。このような背景から、コード短絡に至る主な原因は、過電流、熱蓄積 (電線結束)^{19,37)}、心線の半断線、機械的外傷 (金属体) である。

短絡が発生すると、式(3)に示す通過エネルギー W_2 が増加し、コードの絶縁被覆は耐熱許容温度を超えて溶融し、短絡点からは火花が発生しアーク放電へ移行して式(4)に示す放電エネルギー W_3 が発生する^{36,38)}。

$$W_2 = I_s^2 t \text{ ----- (3)}$$

(W_2 : 通過エネルギー, I_s : 短絡電流, t : 通電時間)

$$W_3 = \int v i dt \text{ ----- (4)}$$

(W_3 : 放電エネルギー, v : 瞬時電圧, i : 瞬時電流)

コンセントに接続したプラグコードの 2~3m 先における完全短絡時の短絡電流 I_s は、2.5.1 に示した条件の下で計算すると単相 3 線式 100V の場合は約 300A、200V の場合は約 600A と推定される。完全短絡電流値 300A (100V) および 600A (200V) を基準とし、一般型 MCCB とコード短絡保護

MCCB で遮断²²⁾して保護した場合の通過エネルギーを式(3)で算出すると表1となる。

表1 コード短絡時の通過エネルギー

Table.1 Let-through energy in code-short.

分岐回路用 配線用遮断器	最大遮断時間 [s]		通過エネルギー [A ² s]	
	100V	200V	100V	200V
一般型	0.20	0.06	1.8×10^4	2.2×10^4
コード短絡保護	0.01	0.009	9.0×10^2	3.2×10^3

過去の文献において、脱脂綿への最小着火エネルギーは、通過エネルギーは 250A²s、放電エネルギーは 50J と報告されている^{39,40)}。

一般型 MCCB の通過エネルギーは、100V および 200V の場合において大きな差はない⁴¹⁾。しかし、通過エネルギーは、双方とも 10⁴A²s を超過することから、コードは異常な温度に上昇して絶縁被覆が溶融し、線間の短絡点が拡大する可能性が高い。短絡点からのアーク放電による放電エネルギーは、電源インピーダンスに大きく依存されない特徴があり⁴²⁾、遮断が遅い場合は、アークや銅線が溶融した赤熱粒子が飛散して周辺可燃物へ着火する可能性が高くなる³⁹⁾。特に、半断線や炭化経路を介した間欠アーク放電⁴³⁾の場合やコードを長くして短絡電流値が低下した場合などは遮断が遅れるため¹⁰⁾、大きな火花とアークを伴って火災へ進展する可能性がある。

一方、コード短絡保護 MCCB の通過エネルギーは、200V の場合が 100V 場合の約 3 倍であるが、約 10ms で高速遮断²²⁾することから一般型 MCCB に比べて低くなる。また、放電エネルギーも高速遮断や遮断時の限流効果などにより低くなる。したがって、コード短絡保護 MCCB の設置は、昇圧化を進めた場合の短絡を原因とした火災の発生の減少対策として有効と考えられる⁴⁴⁾。

なお、TN 接地方式における地絡事故においては、保護導体 PE、PEN 線の使用および等電位ボンディングにより、地絡電流が短絡電流領域に達するので短絡事故と同様な注意が必要である⁴⁵⁾。

4.2 感電に対する対応

図 8 に示したとおり、韓国において感電死亡者の割合は日本と比べて多くなっている。この理由については明確にはないが、低圧における日本での感電死亡者は 100V より 200V の方が多いことから、電圧の影響と推定される。

このような感電事故を防止する対策として、保護装置の使用や接地がある⁴⁶⁾。特に接地は、欧州のように TN 接地の

場合だと対地電圧が昇圧化の影響を直接受けることになり、また、漏電遮断器の使用との関連において検討しておく必要があり、以下に検討を加えた。

4.2.1 各種接地方式と接触電圧

日韓両国の主流となる低圧電路の配電方式および電圧値は異なるが、接地については、同じ TT 接地方式を採用している。

TT 接地方式は、低圧側の一線または中性点に系統接地を施し、負荷機器の筐体に機器接地を施す。系統接地は、高圧からの混触などによる低圧配電線路の対地電圧の上昇を抑制すること、機器接地は、負荷機器の故障による筐体と対地間の故障電圧を低減して人体にかかる接触電圧を抑えること、漏電遮断器などによる地絡保護動作を補完することなどが目的である。また、地絡事故時の地絡電流は、大地を経路とすることから低くなる^{47,48)}。

図 12 に TT、TN 接地における地絡事故例、図 13 に地絡事故例の等価回路を示す。

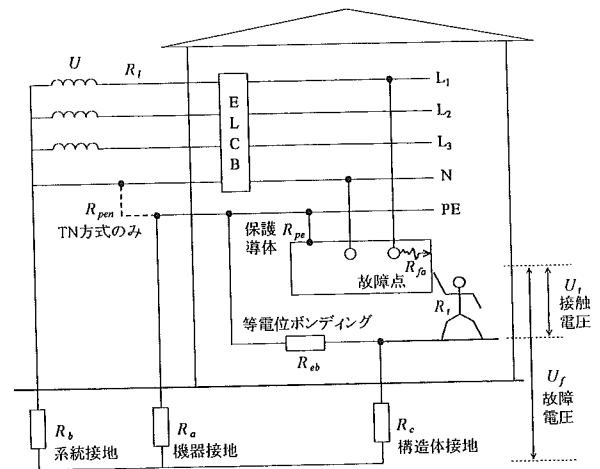


図 12 地絡事故例

Fig. 12 Example of grounding fault.

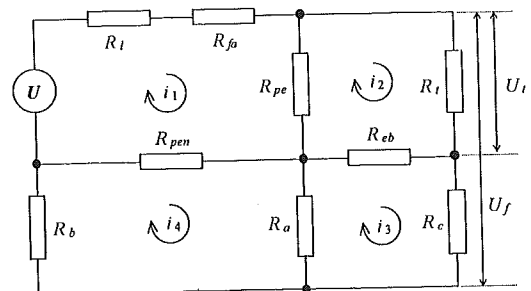


図 13 地絡事故例の等価回路

Fig. 13 Equivalent circuit of grounding fault.

地絡事故例の等価回路は、キルヒホッフの法則より式(5)で表され、人体にかかる接触電圧 U_i は、式(6)で表される。

$$\begin{aligned}
 U &= (R_l + R_{fa} + R_{pe} + R_{pen}) \cdot i_1 - R_{pe} \cdot i_2 - R_{pen} \cdot i_4 \\
 0 &= (R_{pe} + R_l + R_{eb}) \cdot i_2 - R_{pe} \cdot i_1 - R_{eb} \cdot i_3 \quad \text{--- (5)} \\
 0 &= (R_a + R_{eb} + R_c) \cdot i_3 - R_{eb} \cdot i_2 - R_a \cdot i_4 \\
 0 &= (R_{pen} + R_a + R_b) \cdot i_4 - R_{pen} \cdot i_1 - R_a \cdot i_3 \\
 U_i &= R_l \cdot i_2 \quad \text{----- (6)}
 \end{aligned}$$

表2にTT接地の場合の各抵抗値に対する接触電圧の依存性と安全対策を示す。

表2 地絡事故安全対策

Table 2 Safety countermeasures for grounding fault.

抵抗	抵抗値		接触電圧		安全対策 接触電圧を低く抑える方法
	安定性	管理	抵抗値小	抵抗値大	
相導体 R_l	電線長に依存	○	大	小	—
故障点 R_{fa}	故障状態に依存	△	大	小	・機器の絶縁強化。
保護導体 R_{pe}	接続点に依存	○	小	大	・接地端子コンセントの使用。 ・接続信頼性の向上。
人体 R_l	人体の状態に依存	△	小	大	・絶縁用保護具防具の使用。
等電位 R_{eb}	接続点に依存	○	小	大	・接続信頼性の向上
機器接地 R_a	大地抵抗に依存	○	小	大	・機器接地抵抗を低く管理。
系統接地 R_b	大地抵抗に依存	○	大	小	・機器接地抵抗の挿入 ⁴⁹⁾ 。 ・高圧側の電路長を短くして、 系統接地抵抗を高く管理。
構造体 R_c	接触位置に依存	○	大	小	・壁、床、天井の絶縁管理。 ・等電位ボンディング施工。

TT 接地の場合において、以下の算出条件で地絡事故が発生したとすると接触電圧 U_i は式(7)となる。

※算出条件

R_{pen} 無し (TT 接地), R_{eb} 無し (等電位ボンディング無し)
 $R_l=0$ (最悪条件), $R_c=0$ (最悪条件)

$$U_i = \frac{R_{pe} + R_a}{R_l + R_{pe} + R_a + R_b} U \quad \text{----- (7)}$$

ここで $R_l \ll R_a, R_b$ であるので R_l は無視すると式(8)となる。

$$U_i = \frac{R_{pe} + R_a}{R_{pe} + R_a + R_b} U \quad \text{----- (8)}$$

人体抵抗は、電圧に反比例して低下する特性がある。湿った皮膚の状態において、接触電圧が 300(V)の場合、人体抵抗は

約 1000(Ω)^{50,51)}まで低下する。対地電圧 U を 300 (V), 人体抵抗 R_l を 1000 (Ω), ケッペン (ドイツ) の実験から心室細動に至らない人体通過電流を 30mA 以下^{45, 50)}とすると、接触電圧 U_i は式(10)で表され、式(11)の関係が成立する⁵²⁾。

$$U = 300 \quad \text{----- (9)}$$

$$U_i = 0.03 \times 1000 = 30 \quad \text{----- (10)}$$

$$\frac{R_b}{R_{pe} + R_a} \geq 9 \quad \text{----- (11)}$$

系統接地抵抗 R_b の最大値は、150 を高圧側一線地絡電流値で除した値であり、一線地絡電流値が 10A であったとすると式(12)で表される。

$$R_b = \frac{150}{10} = 15 \quad \text{----- (12)}$$

この場合の保護導体抵抗 R_{pe} と機器接地抵抗 R_a の合計値は、式(13)となり、現実には実現し難い値となる。したがって、安全性を確保するため漏電遮断器が必要になる。

$$R_{pe} + R_a \leq \frac{5}{3} \quad \text{----- (13)}$$

なお、漏電遮断器を使用しても機器接地抵抗 R_a を有効に施していない場合は、人が漏電点に接触したときにはじめて漏電遮断器が動作することになる。この場合、漏電遮断器の動作時間内 (高速形で 0.1 秒以内) ではあるが人体を通過する電流値が高い場合があるため、機器接地抵抗 R_a は極力低く保つ必要がある。

TT 接地方式は基本的に等電位ボンディングが不要であるが、IEC 規格ではその必要性を規定している⁴⁹⁾。 $R_{eb}=0$ として等電位ボンディングを施すと式(14)で表され、さらに式(9), (10)の条件とすると式(15)の関係が成立する。接触電圧を低くおさえるためには、保護導体および等電位ボンディングの接続信頼性を確保して抵抗値を低く保てば良いことがわかる。

$$U_i = \frac{R_{pe}}{R_{pe} + R_a + R_b} U \quad \text{----- (14)}$$

$$\frac{R_a + R_b}{R_{pe}} \geq 9 \quad \text{----- (15)}$$

TN 接地の場合は、等電位ボンディングが義務化されているため $R_{eb}=0$, また $R_c=0$ (最悪条件) とすると、式(16)となる。

$$U_i = \frac{R_{pe}}{R_l + R_{pe} + R_{pen}} U \quad \text{----- (16)}$$

TN 接地で等電位ボンディングを施さなかった場合は、式(17)のように表され、変圧器二次側線路長が同じことから $R_l=R_{pen}$, また $R_{pe}=0$ とすると、式(18)のように接触電圧は対地電

圧の1/2となる。したがって、TN接地の場合は、等電位ボンディングが必要であり重要である。

$$U_i = \frac{R_{pe} + R_{pen}}{R_l + R_{pe} + R_{pen}} U \quad \text{----- (17)}$$

$$U_i = \frac{1}{2} U \quad \text{----- (18)}$$

TT接地方式の場合、接触電圧は主に R_a と R_b のバランスで大きく変動し、対地電圧の1/2以下に低減することが難しい。したがって、対地電圧が200Vを超える場合は、接触電圧が通常の人体状態における許容接触電圧の50V以上になる可能性が高く危険である。

TN接地方式の場合、保護導体および等電位ボンディングの接続信頼性を確保して抵抗値を低く保てば、対地電圧が高い場合でも接触電圧は式(16)で表されるように非常に低くなり安全である。TN接地方式の固有の問題点としてPEN導体の断路がある。TN-CおよびTN-CS方式の場合、N線(中性線)とPE線は共用および需要家引き込み口で接続されている。PEN線が断路すると、N線の電位上昇とともに保護導体および機器筐体の電位も電源の対地電圧まで上昇する。この電位上昇による感電を防止するために等電位ボンディングを施す必要があり³¹⁾、TN接地であっても機器接地を施すことが望ましい⁴⁵⁾。

4.2.2 安全対策

日本の場合、主に単相3線式で100/200Vにおける対地電圧は100Vであり、住宅用分電盤の主幹には漏電遮断器が設置されているので感電保護における安全性は同じである^{41, 53, 54)}。ただし、日本における家電機器はクラス0機器およびクラス0I機器が主流でありこれらは接地線、接地端子を有さない。2005年に内線規程が改訂され、接地極付コンセントは、洗濯機、冷蔵庫、電子レンジなど9種類の電気製品については義務化、水まわりのコンセントについては勧告化、住宅に施設するコンセントすべてについては推奨化した。感電保護には、式(8)、式(16)からわかるように保護導体の接続が重要である。今後、接地極付コンセントと同様に接地極付電源プラグ(米国標準⁵⁵⁾)の普及も期待される。

韓国においては、対地電圧が220Vと高いことから接地方式をTTからTN接地方式へ移行する計画である⁵⁶⁾。現在は、TT接地方式で対地電圧が高いため、タイトランスを設け二次側巻線中性点を接地して対地電圧も半減させる方法も採用されている^{27, 57)}。TN接地方式は、TN-SおよびTN-CS方式として、漏電遮断器も併用することが望ましい。また、屋外では等電位ボンディングができないため、二重絶縁器具や漏電遮断器を使用すべきである³¹⁾。接地方式の移行過渡期には同一系統

内にTTとTN接地方式が混在することになり影響が懸念されるが⁵⁸⁾、TN接地の普及により同一系統内におけるTT接地の接地性能が向上するとの研究報告もあり⁵⁸⁾、今後も接地に関しては、感電保護だけでなく雷保護、ノイズ保護なども含めて慎重に検討していかなければならない。

5. まとめ

電気火災および感電事故について、100Vが主流である日本と、昇圧化が完了して220Vが主流となった韓国との比較・分析を行い、日本において、配電電圧を昇圧した場合の電気安全について留意点を抽出した。

主な内容は以下の通りである。

- (1) 配電電圧の昇圧の進展と電気火災発生数には相関性が見られる。その主な発生原因は短絡とされていることから、発生過程の究明と防止対策が電気火災防止にとって重要になる。
- (2) 昇圧化後、老朽設備を継続して使用する場合は、電気火災が発生し易くなるので特に注意が必要である。
- (3) 配電電圧の昇圧の進展と感電による死傷者数には相関性が見られない。これは有効な接地方式の選定、漏電遮断器の普及が感電事故の抑制に大きく影響したためと考えられる。

昇圧による電気事故を防止するためには、配電方式や対地電圧に応じた有効な接地方式の選定や接地技術の開発、電気設備、漏電遮断器の安全性能強化などのハード面の安全対策に加え、電気安全に関する法律の遵守、定期点検の義務化、巡視・普通・細密・臨時・その他点検の推進、老朽設備の改修や更新を適切に判断する基準の整備などのソフト面の安全管理・教育の充実も重要である。

謝辞

本研究は厚生労働省の厚生労働科学研究費補助金により実施したものであり、関係各位に謝意を表す。また、韓国のソウル産業大学校 鄭載喜教授および忠北大学校 金斗鉉教授には、まとめるにあたってご助言を頂いたことに感謝する。

参考文献

- 1) 岩船由美子：配電電圧昇圧による省エネルギー・CO2削減効果の評価、動力、No.259, pp.19-35(2002)
- 2) 今城尚久：20kV級/400V配電方の必要性和普及への期待、OHM, pp.30-37(2002)
- 3) 日本電機工業会：配電電圧昇圧と電線地中化推進のための提言、日本電機工業会、(2001)

- 4) 本山建雄, 富田 一, 崔 光石, 中田健司: 電気事故における日韓の比較, 電気設備学会全国大会, pp.363-366(2005)
- 5) 佐野孝: 感電災害と防止, 電気情報社, (1972)
- 6) 火災年報, 1983年~2003年版, 日本防火研究普及協会
- 7) 電気災害統計分析 (韓国) (1983年~1992年度版), 韓国電気安全公社
- 8) 電気災害統計分析 (韓国) (1995年~2003年度版), 韓国電気安全公社
- 9) 土方忠道: 配線器具からの出火事例, 特徴および問題点と対策, 火災, Vol.46, No.2, pp.13-17(1996)
- 10) 萩本安昭, 渡邊憲道, 木下勝博: 電気配線器具類の火災危険性, 電気学会生産設備管理研究会資料, Vol.PFC-93, No.7-14, pp.21-25(1993)
- 11) 東京消防庁予防部調査課: 最近の電気設備火災の発生状況について, 火災, Vol.52, No.6, pp.21-27(2002)
- 12) 江藤計介: 再生する電気設備, 電気技術者, No.1, pp.23-30(2005)
- 13) 中野弘伸: 電気配線からの発火原因に関する考察, 火災, Vol.46, No.2, p.1(1996)
- 14) 統計庁 (韓国), 火災統計資料 (2004年度版)
- 15) 広瀬淳雄: 統一に向かう世界の低圧配電電圧, 電気評論, p.69(1989)
- 16) 東京消防庁予防部予防課: 屋内配線における電気火災, 火災, Vol.46, No.2, p.6(1996)
- 17) 折原武男: 電気火災からの考え方, 電気設備学会誌, Vol.22, No.12, pp.48-50(2002)
- 18) 東京消防庁予防部予防課: 最近の電気火災と防止対策, OHM, pp.68-69(2002)
- 19) 吉宮弘志: 建物電気設備の安全管理と火災事例, 火災, Vol.52, No.6, p.9(2002)
- 20) 豊田武二: 電流に関する事項 短絡電流と短絡強度, 電気設備学会誌, Vol.16, No.7, p.18(1996)
- 21) 相馬重信, 藤村光雄, 藤村茂: ビニルコード, Fケーブルの短絡による配線用遮断器の動作について, 火災, Vol.32, No.1, p.17(1982)
- 22) テンパール総合カタログ2005, テンパール工業
- 23) 早川進, 渡邊憲道: 電気火災原因と保護ブレーカの働き, 火災, Vol.46, No.2, pp.18-22(1996)
- 24) 電気設備学会: 電源コード等の防火対策調査研究報告, 電気設備学会誌, Vol.17, No.3, p.60(1997)
- 25) 電気保安統計, 1984年~2002年度版, 原子力安全・保安院電力安全課
- 26) 富田一, 最近の感電災害の傾向と事件事例, 電設資材, p.47(2002)
- 27) 高橋健彦, 李炯秀: 韓国における配電電圧220Vへの昇圧について, 電気設備学会誌, p.96(1995-3)
- 28) 産業資源部 (韓国): 人体感電用漏電遮断器の設置基準改善に関する研究(2002)
- 29) 中央労働災害防止協会: 安全衛生年鑑(1999年~2002年度版)
- 30) 電気設備技術基準研究会: 絵とき電気設備技術基準・解釈早わかり, オーム社, pp.392-395(2003)
- 31) 富重豊: 過電流保護, 電気設備学会誌, Vol.22, No.12, pp.18-20(2002)
- 32) IEC479-1, Effects of Current on Human Beings and Livestock(1994)
- 33) 小田原茂雄: 現場における電気設備の施工・安全管理, 火災, Vol.52, No.6, p.28(2002)
- 34) 金原壽郎: 加熱によるコード被覆の絶縁劣化, 火災, Vol.28, No.6, pp.10-15(1978)
- 35) 木下勝博, 萩原隆一, 金原壽郎: 漏電によるFケーブルの発火危険性, 火災, Vol.28, No.3, pp.30-37(1978)
- 36) 日本電機工業会: コード短絡保護用瞬時機能付配線用遮断器, 日本電機工業会, pp.1-2(2000)
- 37) 松本靖夫: コードの過電流による現象, 神戸市消防科学研究所報, Vol.7, pp.22-30(1992)
- 38) 田中久雄: 電気設備技術計算ハンドブック, 電気書院, pp.96-98(1981)
- 39) 萩本安昭, 渡邊憲道, 木下勝博: 電気配線の短絡事故における火災危険性, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.236-239(1995)
- 40) 渡邊憲道, 岡本勝弘, 萩本安昭, 木下勝博: 電気配線短絡による可燃物の着火エネルギー最小値, 日本火災学会研究発表会概要集, p.5(1999)
- 41) 藤井之寛, 住宅負荷の大容量化に対応する最適配線方式に関する調査研究, 電気設備学会誌, Vol.19, No.8, pp.2-4(1999)
- 42) 木下勝博, 萩本安昭, 石井義雄: 電気配線における線間放電現象と火災危険性(1)放電の発生原因と発火過程, 日本火災学会研究発表会概要集, p.211(1991)
- 43) 萩本安昭, 木下勝博, 石井義雄: 電気配線における線間放電現象と火災危険性(2)回路の電気特性と現象の持続性, 日本火災学会研究発表会概要集, p.213(1991)
- 44) 東京消防庁予防部予防課: 平成12年度中の電気火災の状況と予防対策, 電気管理技術, No.258, p.22(2002)
- 45) 高橋健彦: 接地・等電位ボンディング設計の実務知識, オーム社, pp.13-14, p.154(2003)
- 46) 豊田武二: 接地と地絡保護, 電気設備学会誌, Vol.22, No.12, pp.45-47(2002)
- 47) 大崎栄吉: 地絡事故と対応の事例, 電気技術者, No.8, pp.47-63(2005)
- 48) 日本電機工業会: 配線用遮断器の適用及び保守点検指針

- JEM-TR119, 日本電機工業会, p.2(1983)
- 49) 高橋健彦：接地システム入門, オーム社, p.54(2003)
 - 50) 荒木庸夫：感電障害の基本量, 感電障害現象の様相, EMC, p.129(1999-4)
 - 51) 高橋健彦, 川瀬太郎：接地技術入門, オーム社, p.21(1986)
 - 52) 日本電機工業会：漏電遮断器適用指針 JEM-TR142, 日本電機工業会, p.1(2001)
 - 53) 古賀洋一：家庭における 200V の利用について, 鉄道と電気, Vol.42, No.9, p.36(1988)
 - 54) 藤井之寛：100/200V 併用マルチ配線方式の展望, 電気と工事, p.60(2000)
 - 55) 江島伸毅, 山口博由, 渡部耕次：欧米諸国の住宅屋内配線, 電気と工事, pp.28-29(1998-6)
 - 56) 電気設備学会：韓国建築電気設備昇圧実態調査報告, 電気設備学会調査報告, p.201(2000)
 - 57) 電気設備学会：韓国屋内配線実態調査報告書, 電気設備学会誌, p.62(1991)
 - 58) 青山洋一, 山本拓也, 横山洋一：TN, TT 接地システムの接地性能比較, 松下電工技報, pp.72-74(2001)

戸建住宅基礎の接地抵抗の推定

○北村 健司 (関東学院大学大学院工学研究科), 右田 理平 ((株)大林組)
高橋 健彦 (関東学院大学)

Estimation of the Earthing Resistance for the Foundation of Individual House
Kitamura Kenji (Graduate School of Engineering, Kanto-gakuin University)
Uda Rihei (Obayashi Corp.), Takahashi Takehiko (Kanto-gakuin University)

キーワード：戸建住宅基礎，接地抵抗，鉄筋コンクリート造，接地抵抗推定法

1. まえがき

近年の高度情報化社会の進展に伴い住宅の電気設備はますます高機能化されようとしている。住宅で使われている家電機器は単相 3 線式の 200V を電源とする大容量化，情報技術機器等のインターネット化が進んでいる。これらの家電機器には感電防止のための保安用接地，エレクトロニクス機器の稼働を保証するための機能用接地が必要である。さらに，電力線からの雷サージを防護するために分電盤にサージ防護デバイス(SPD)を装備する動きがある。この SPD にも接地が必要不可欠である。

従前から住宅では，保安用接地を主体に電気設備技術基準解釈第 19 条に規定している D 種接地工事が施工されている。

今後の全電化住宅，情報化住宅の普及を考えたとき，住宅の接地設備を整備する必要がある。筆者らは 1998 年頃から，住宅基礎を代用接地極として使用するための基礎的研究を行ってきた。その成果は文献に示すような論文，研究発表等で公表してきた。^{1)~9)}

鉄筋コンクリート造などの建築物の躯体は構造的に一体化され，その電気抵抗も低い。それらの基礎（地下部分）は大きな表面積で自然に大地と接触しており，建築構造体そのものを接地極に代用する，いわゆる「構造体接地」という考え方は，我が国において電気設備技術基準解釈及び日本工業規格（JIS-A-4201）で定義されており，各方面で実用化されている。一方，特にドイツにおいては住宅の基礎に使われている鉄筋コンクリートが代用接地極として利用されている¹⁰⁾。しかしな

がら，我が国においては住宅基礎を代用接地極として実用化した例はない。

そこで本稿では，住宅の基礎を代用接地極として実用化するための住宅基礎の形状と大きさを考慮した接地抵抗の推定について検討した。

2. 戸建住宅基礎モデルの接地シミュレーション

戸建住宅基礎を代用接地極としての接地抵抗を推定するためのシミュレーションを以下の項目で行った。

2. 1 戸建住宅基礎の形状とモデル化

戸建住宅の基礎は建物規模によって多種多様であるが，我が国の標準的な住宅の布基礎の寸法は図 1 のようになっている。

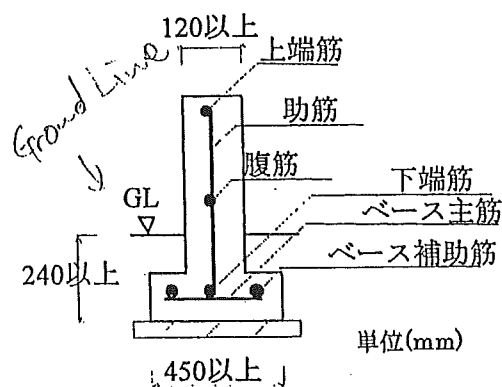


図 1 布基礎詳細図¹⁰⁾

シミュレーションを行うために，戸建住宅の基礎を模した木製の模型を製作した。戸建住宅の概要を表 1 に示す。表に示した戸建住宅モデルは，5 社のハウスメーカーの全電化住宅のパフレットを引用し，それを基に床面積を計算したものであ