

多層大地を考慮した棒状電極の
接地抵抗に関する研究

高橋 健彦



多層大地を考慮した棒状電極の
接地抵抗に関する研究

1 9 9 1

高橋健彦

目次

第1章 緒言	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 本論文の目的と意義	6
1. 3 本論文の構成	8
第1章の参考文献	12
第2章 見掛けの大地抵抗率計算式の解析	15
2. 1 まえがき	15
2. 2 問題の設定と理論式の導出	16
2. 1 地表面の微小電流源による電位の基本式の導出	16
2. 2 水平二層大地モデル	18
2. 3 水平三～五層大地モデル	20
2. 4 水平N層大地モデル	22
2. 5 ウェンナーの四電極法に適用した見掛けの大地抵抗 率計算式の導出	23
2. 3 多層大地における $\rho - a$ 曲線の作成	25
3. 1 大地パラメータによる $\rho - a$ 曲線の特徴	25
3. 2 大地パラメータ推定への応用	29
2. 4 まとめ	34
第2章の参考文献	34

第3章 棒状電極の接地抵抗の解析	35
3.1 まえがき	35
3.2 問題の設定と理論式の導出	36
2.1 地中の微小電流源による電位の基本式の導出	36
2.2 水平二層大地モデル	37
2.3 水平三～五層大地モデル	41
2.4 水平N層大地モデル	45
2.5 電流の扱い	47
3.3 接地抵抗の計算式の導出	48
3.4 数値計算による検討	49
4.1 変曲点の存在	50
4.2 上層と下層の大地抵抗率の影響	51
4.3 地層の厚さの影響	52
4.4 五層大地モデルのR- ℓ 曲線	52
3.5 まとめ	54
第3章の参考文献	54

第4章 ボーリング深埋電極による接地抵抗の実測とその評価	55
4.1 まえがき	55
4.2 実験の概要	56
2.1 実験場所の選定	56
2.2 ボーリング深埋電極の説明	57
2.3 大地抵抗率の測定	57
2.4 接地抵抗の測定	58

4. 3	接地抵抗の計算式	60
3. 1	均質地層大地とした場合の接地抵抗	60
3. 2	層別大地パラメータを用いた多層接地抵抗の計算	61
4. 4	$\rho-a$ 曲線の実測と大地パラメータの推定	62
4. 5	接地抵抗の実測と評価	69
5. 1	$R-l$ 曲線	69
5. 2	接地抵抗の近似誤差率	79
4. 6	接地抵抗予測の基本的要件	85
4. 7	まとめ	86
第4章の参考文献		86
第5章 棒状電極の並列接地抵抗の解析		87
5. 1	まえがき	87
5. 2	並列接地抵抗の計算式	88
2. 1	並列接地の説明	88
2. 2	計算式の導出	89
5. 3	棒状電極の並列接地抵抗の計算式	92
5. 4	数値例による検討	94
4. 1	電位分布計算の近似誤差	94
4. 2	電極配置パターンによる並列接地抵抗	96
4. 3	大地構造による並列接地抵抗の特徴	97
5. 5	まとめ	102
第5章の参考文献		103

第6章 ボーリング深埋電極の並列接地抵抗の実測とその評価	104
------------------------------------	-----

6.1 まえがき	104
6.2 実験の概要	105
2.1 実験場所	105
2.2 大地抵抗率の測定	106
2.3 接地抵抗の測定	106
6.3 実験結果の整理	106
3.1 直線状配置	106
3.2 方形状配置(1)	110
3.3 方形状配置(2)	114
6.4 実験結果の評価	117
4.1 直線状配置	117
4.2 方形状配置(1)	121
4.3 方形状配置(2)	125
6.5 まとめ	127

第6章の参考文献	128
----------------	-----

第7章 棒状電極群による接地設計システムの提案	129
-------------------------------	-----

7.1 まえがき	129
7.2 システム構築の準備	130
2.1 大地パラメータの推定	130
2.2 多層大地に適用する接地抵抗の計算	132
2.3 電極長の経済的評価	135
7.3 接地設計システムフロー	138

7. 4 設計システムのケーススタディ	141
7. 5 まとめ	147
第7章の参考文献	147
第8章 結言	148
8. 1 研究成果の要約	148
8. 2 今後の問題点と発展性	151
謝辞	153
本研究に関する主要発表論文	154

第1章 緒言

1-1 研究の背景

いわゆる「接地」は電力・通信のいずれの分野においても重要な概念であり、それを具体的な形にするのが接地技術である。近年のエレクトロニクス化、高度情報化に伴い、接地の重要性がますます認識され、接地技術の向上が望まれる時代になってきている。

接地とは種々の電気・電子・通信設備機器を大地と電氣的に接続することであり、接続するためのターミナルが接地電極である。この電極が大地との間に電氣的抵抗、いわゆる接地抵抗をもつため、地絡電流によってオームの法則に従い、電位上昇が生じ、いろいろな障害を起こすことになる。理想的には接地抵抗が零であれば何ら障害が生じない。しかし、現実的にはあり得ない。この障害を無くすることが接地の目的の原点である。電位上昇に伴う障害には最悪の場合は人体の感電であり、機器に対しては損傷、雑音発生、誤動作などがある。一方、特に電子・通信機器などのエレクトロニクス機器に対しては接地電極による電位上がりでなく、地上空間における接地システムの電位の変動がそれらに大きな障害を及ぼす。

接地は目的によって系統接地、機器接地、避雷用接地などの強電用とノイズ対策用接地、基準化用接地などの弱電用接地に類別される。前者はいわゆる保安用であり、後者は機能用である。保安用接地は人間および電気関連設備機器の安全の確保のためであり、機能用接地は電気・電子・通信機器の安定な稼働を確保するためのものである。このように目的の異なる両者に対して、それぞれの役割を充分に発揮させ、良好な関係を保持させることが接地技術に課せられた使命である。

そのひとつに、地球（大地）を対象にした接地設計がある。前述したように接地目的の原点である電位上昇に伴う障害の回避を効果的に行うには、接地電極の接地抵抗の予測も含めた接地設計を理論的にかつ体系的に行う必要がある。

近年は電気設備がコンパクト化され、接地施工のための用地の確保が困難な状況にある。このような制約条件があるとき、低い所要接地抵抗を得るためには接地施工法も限られてしまう。すなわち、メッシュ接地工法のような平面的広がりを持つ電極よりは鉛直方向に布設する深埋接地工法のほうが有用であり、棒状電極あるいはボーリング電極による深埋接地工法が一般的になってきている。棒状電極による工法はその機械的強度の面から、打込む深度は数メートル程度である。それに対してボーリング電極による工法は数百メートルもの埋設が可能であり、非常に大掛りな工事を伴う。

いずれにしても、接地設計の段階において接地抵抗の予測を行うことが大きな関心事である。つまり、いかにして接地抵抗の計算を精度良く行うかの問題である。従来から接地抵抗の計算は大地を均質かつ等方性であるとみなして行われてきた。しかし、一般に大地は多層構造を成しており、特にボーリング電極による深埋工法においては接地抵抗の予測をする際にこの多層構造であることが直接的に計算精度に影響を及ぼすことが考えられ、接地設計を行う際に多層問題の解決が従来より増してせまられている。

さて、接地に関する成書は米国の Sunde 氏、英国の Tagg 氏、西独の Koch 氏による 3 編が主な文献であり、特に Sunde 氏、Tagg 氏の成書が接地を研究する者にとっては座右の書として位置付けられている。これらの文献には各種電極の接地抵抗計算式が解析されているが、大部分が均質地層に対応したものである。

多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算法に関する研究の推移をまとめると表 1. 1 のようになっている。1964年に Tagg 氏によって初めて二層大地を考慮した接地抵抗計算式が導出されて以来、Dawalibi 氏、Ewy 氏らはその検証を行なった。その後1985年に筆者らによって多層問題としての解析解が得られた。並列接地抵抗に関しては1985年まで全く検討されておらず1986年に初めて筆者らによって多層の並列接地抵抗解析解が導出されたにすぎない。

このように、内外の文献において、棒状電極の多層大地つまり三層以上の地層を考慮した接地抵抗を検討した例は皆無であり、多層問題の研究が各方面から望

まれていた。

一方、多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算に必要な大地パラメータを得るための見掛けの大地抵抗率計算法に関する研究の推移をまとめると表1、2のようになる。大地パラメータを推定するための正攻法的な方法は多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率の解析解を得ることである。1948年に Sunde 氏が1964年に Tagg 氏が二、三層大地における $\rho - a$ 曲線を検討しているにすぎず、それ以来、多層問題としての見掛けの大地抵抗率は筆者らが解析するまで全く検討されていなかった。

その反面、接地抵抗の測定値から逆算法を用いた大地パラメータの推定は1982年以降 Blattner 氏らによって検討されてきた。しかし、この逆算法は精度的に問題があり一般化するまでには至っていない。前述の接地抵抗計算と同様に大地パラメータの推定にも多層問題の研究が望まれていた。

以上に述べた内容は主として接地抵抗の理論的計算に関するものである。次に接地設計に関する実務的な背景について若干触れることにする。

既に述べたように接地抵抗の予測は接地設計を行う上で不可欠な要素である。従来からの接地設計は均質地層に対応した接地抵抗計算式を用い、並列接地の設計には半球状電極に模擬した並列接地抵抗計算式を用いて行っている。この手法は内外において現在も実用に供している。ただし、これらの接地設計は概略的なものにすぎない。

1964年に Tagg 氏が二層大地を考慮した計算式を発表したにもかかわらず、それは実務的ではなく、あまり広く採用されていないようである。なぜなら、大地を大きく二層構造とみなすことが困難であるという理由である。わが国においては大規模な変電所・開閉所等の接地設計は前述したような均質地層とみなした接地抵抗計算式を用いて行っているのが現状である。一方、米国においては、Dawalibi 氏らが中心となって二層大地を考慮した棒状電極の計算を行い試行錯誤的な接地設計を行ってきているにすぎない。

表 1. 1 多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算法に関する研究の推移

発表年	単極の接地抵抗について	並列電極の接地抵抗について
1964	G. F. Tagg 氏が二層大地を考慮した計算式を解析した。 ⁽³⁾	
1975	F. Dawalibi 氏らが接地シミュレーションにより Tagg 氏の二層解析解を検証した。 ⁽⁴⁾	
1984	K. A. Ewy 氏らが二層大地における接地抵抗計算を映像法によって検討した。 ⁽⁵⁾	
1985・4	高橋らが多層大地を考慮した接地抵抗の解析解について電気学会全国大会で発表した。 ⁽⁶⁾	
1985・8	高橋らが多層大地の接地抵抗計算結果について電気学会東北支部大会で発表した。 ⁽⁷⁾	
1985・9		高橋らが並列接地抵抗計算の基礎となる多層大地における電位分布計算式について電気設備学会研究会で発表した。 ⁽⁸⁾
1986		高橋らが多層大地（五層）の並列接地抵抗の解析解について電気設備学会研究会で発表した。 ⁽⁹⁾
1988	高橋らが多層大地を考慮した接地抵抗計算式の解析解を電気学会論文誌に発表した。 ⁽¹⁰⁾	高橋らが多層大地を考慮した並列接地抵抗の解析解を電気学会論文誌に発表した。 ⁽¹¹⁾
1989	高橋らが多層大地を考慮した接地抵抗の計算について IEEE PES 夏期大会で発表した。 ⁽¹²⁾	SCRIPTA TECHNICA の「Electrical Enginereig in Japan」に文献(11)の論文が紹介された。 ⁽¹³⁾
1990	高橋らが多層大地を考慮した接地設計システムを電気設備学会論文誌に発表した。 ⁽¹⁴⁾	

表 1. 2 多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率計算法に関する研究の推移

発表年	発表者および内容
1948	E. D. Sunde 氏が三層大地までの $\rho - a$ 曲線を検討した。 ⁽²⁾
1964	G. F. Tagg 氏が二層大地を考慮した点電極の電位分布解析解を用いてウェンナーの四電極法に適用した。 ⁽³⁾
1982	C. J. Blattner 氏が二層大地における接地抵抗計算式を用いて逆算法とウェンナーの四電極法による大地抵抗率を検討した。 ⁽¹⁵⁾
1983	高橋らがパソコンを用いた三層 $\rho - a$ 曲線について電気学会全国大会で発表した。 ⁽¹⁶⁾
1984・2	F. Dawalibi 氏が二層の見掛けの大地抵抗率理論式を用いて層別の大地パラメータの推定法を検討した。 ⁽¹⁷⁾
1984・9	A. P. Meliopoulos 氏が棒状電極の計算式を用いて二層大地における大地パラメータの推定法を検討した。 ⁽¹⁸⁾
1985・4	高橋らが多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率の解析解について電気学会全国大会で発表した。 ⁽¹⁹⁾
1985・12	C. J. Blattner 氏がウェンナーの四電極法を二層大地に適用した場合について検討した。 ⁽²⁰⁾
1986	高橋らが多層大地を考慮した大地パラメータの推定について電気学会関西支部大会で発表した。 ⁽²¹⁾
1987	H. R. Seedher 氏が二層大地における電位分布計算式を用いて検討した。 ⁽²²⁾
1989	高橋が多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率の解析解について IEEE PES 夏期大会で発表した。 ⁽²³⁾
1990	高橋らが多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率の解析解について IEEE Trans. Power Delivery に発表した。 ⁽²⁴⁾

1-2 本論文の目的と意義

従来の接地設計は接地工事エリアの大地抵抗率を概略的に把握し、均質地層大地とみなした接地抵抗計算式を用いて1極の接地抵抗を求め、並列接地抵抗を求めるときは半球状電極の集合係数を用いて試行錯誤的に行われてきた。

しかし、近年のように良質な接地抵抗が要求され、接地施工がますます大規模になってくると、より現実に即した接地設計、つまり多層大地を考慮した接地設計をしなければならず、設計システムの構築をはかる必要性が認識されはじめた。

そこで、著者は多層大地を考慮した接地設計システムの基本的な構築を目的とし、棒状電極を主体とした接地抵抗の解析的研究を行うことにした。

ここで、接地抵抗の問題は、それが例えば雷電流を対象にする場合は過渡的な状態を考慮する必要がある。つまり、接地インピーダンスとして解決しなければならない。それはまた、商用周波数帯域であつても厳密には接地インピーダンスとしなければならない。しかし、本論文においては定常状態でかつ直流抵抗とみなして接地抵抗を検討するものである。

接地設計システムの基本的な構築を行うためには、多層大地を考慮した接地抵抗計算式を得る必要がある。前述したように、内外の研究において、三層以上の地層を対象にした多層大地に適用できる接地抵抗計算式は導出されていない。そこで、まず棒状電極1本の場合から接地抵抗の解析を行った。この接地抵抗の解析の基本的概念は Tagg 氏によって与えられ、同氏の二層問題の解法を発展させることで多層問題を解き、さらに接地抵抗解析プログラムを開発した。

次に、解析して得られた接地抵抗計算式を具体的に用いるには、多層大地における地層の厚さ、およびその大地抵抗率つまり、大地パラメータを選定しなければならない。これも、従来は二層大地を基本とした見掛けの大地抵抗率計算式しか存在せず、多層問題として解決する必要がある。そこで、Tagg 氏、Sunde 氏による二層問題を拡張した多層大地における見掛けの大地抵抗率計算のための解析解を導出し、解析プログラムを策定した。この成果を用いて、多層接地抵抗計算が可能になった。

さらに、システムを構築するうえで棒状電極を複数極並列にした並列接地抵抗計算式を解析する必要がある。そこで、多層大地における棒状電極の電位分布計算式を導出、それを用いて並列接地抵抗計算式を組み立て、さらに解析プログラムを開発した。

以上に述べた内容をまとめて模式図にすると図1. 1 になる。つまり、本論文の位置付けは同図に示すように大地パラメータの推定から接地抵抗の計算まで、すべて多層問題として検討するものである。

このようにして、多層大地を考慮した大地パラメータ、棒状電極の1極の接地抵抗および複数極の並列接地抵抗の計算手法を確立することで、接地設計の各要素を得て、さらに経済的要素も組み込んだ設計システムの構築をはかった。

以上に述べたように、本論文は高い信頼性を要求されている接地設計に寄与するために、まず、多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率計算のための解析解の導出、次に、1極および複数極の接地抵抗計算のための解析解の導出等の理論的な検討を述べるものである。また、野外実測データをもとに、導出した解析解を検証し工学的に有効であることを示し、さらに接地設計手法を提案するものである。

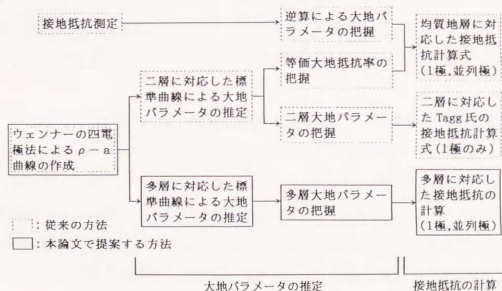


図1. 1 多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算法の模式図

1-3 本論文の構成

本論文は棒状電極に限定して、多層大地を考慮した接地抵抗に関する解析的研究内容をまとめたものである。前述したように従来の接地抵抗の計算式は大地を均質地層と仮定して導出されていたにすぎず、二層構造大地とみなして解析した例も一部にあるのみであった。それを本論文では大地を水平多層構造とした場合の見掛けの大地抵抗率計算式、接地抵抗計算式、並列接地抵抗計算式等を解析したものである。さらに、解析解をもとに数値計算を行い、実測データとの検証を行った。論文の構成は以下の通りである。

第2章では多層接地抵抗を計算するために必要な大地パラメータの推定法について検討している。従来は大地を二層構造とみなし、見掛けの大地抵抗率を計算し、それを $\rho-a$ 標準曲線として大地パラメータの推定に利用していた。この方法では多層大地に適用した場合、推定精度が悪くなるという欠点があった。それを改善するために、多層構造における見掛けの大地抵抗率の理論式を解析した。その結果、いかなる大地構造にも適用することができる、多層の $\rho-a$ 標準曲線を作成することが可能になった。この標準曲線をデータベース化して、実測して得られた $\rho-a$ 曲線データと $\rho-a$ 標準曲線を照合することにより、大地パラメータを推定しようというものであり、実例に基づくケーススタディを行っている。

第3章では棒状電極1本の場合の多層大地に適用する接地抵抗計算式を解析している。従来から棒状電極の接地抵抗計算式は大地を均質かつ等方性とみなして行われてきている。Tagg 氏の成書によると、大地を二層構造とみなして計算式を導出しているが、それ以上の多層構造については検討されていない。実際の大地は多くの地層構造を成しているため、単に均質あるいは二層構造とみなして接地抵抗を計算することは精度的に問題があると思われる。そこで、まず棒状電極による電位の一般解を求め、境界条件によって多層大地における電位計算式を

導出し、接地抵抗計算式を解析した。得られた解析解はベッセル関数を含む二重積分の形であり、計算プログラムを作成し数値計算を試み、多層大地における棒状電極の接地抵抗の特性を数値例によって検討している。

第4章では、ボーリング深埋電極を用いた接地抵抗の実験結果とその評価を検討している。接地抵抗の計算は、従来から大地を均質地層とみなした考え方で実行されてきたが、第3章に述べているように多層大地に対応した棒状電極の接地抵抗計算のための解析解が導出され、多層接地抵抗を計算することが可能になってきている。この多層接地抵抗計算を実行するためには大地パラメータ（地層の厚さとその地層の大地抵抗率）が必要になるが、第2章に示したように多層大地に対応した見掛けの大地抵抗率の解析解も得られており、大地パラメータの推定も可能になってきている。これらの2つの解析結果は多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗を計算する際に必要な基本的知見を与えるものである。しかし、第3章の内容は解析解の導出と数値例による接地抵抗の検討を主体としており、実測データとの検証が大きな関心事である。

そこで、本章では大地抵抗率が高く、接地施工のための敷地が狭いという条件を課せられた場所における接地工法としてのボーリング深埋電極の実用化実験を行い、この実験結果とその評価について述べる。この評価の中では実測データをもとに、従来から行われている均質地層とみなした接地抵抗の計算および多層を考慮した場合の接地抵抗の計算結果を検証している。さらに、実際の接地設計に寄与するための接地抵抗予測の基本的条件についても検討している。

第5章では棒状電極複数本の場合の多層大地に適用する並列接地抵抗計算式を解析している。棒状電極を用いた並列接地工法は接地工事エリアが限定され、かつ低い所要接地抵抗を要求されている場合に有用な方法である。大地を均質地層と仮定した場合の棒状電極の並列接地抵抗の計算法は Sunde 氏、Tagg 氏らによって基本的な検討が既に行われている。しかし、多層問題を検討した文献は全く見当らず、第3章の棒状電極1本の場合と同様に並列接地抵抗の説明が望まれ

ていた。

著者はまず、多層大地における棒状電極の電位分布計算式を解析し、電位の重ねの概念を導入して並列接地抵抗を計算するための解析解を得ることができた。その計算プログラムを作成して数値計算を行い、種々の多層大地モデルを設定し、電極配置パターン、電極長による並列接地抵抗や集合係数などの並列接地の持つ特徴について、数値例によって検討している。なお、並列接地工法において、例えば増設に伴う接地設計の変更の場合、電極長が異なる並列接地抵抗を計算しなければならない場合も生じてくる。この場合でも本章で検討した解析解を応用することで充分に対応することが可能となる。

第6章ではボーリング深埋電極を複数本用いた並列接地抵抗の実測結果とその評価を検討している。棒状電極によって接地抵抗の低減をはかる方法としては、1極の電極を地中深く埋設するボーリング深埋接地工法あるいはそれらを並列に接続して用いる並列接地工法がある。大地抵抗率が高い接地施工エリアで、小さな電極を並列にする並列接地工法を採用することが考えられる。並列接地抵抗の計算は、従来から大地を均質地層とみなした考え方で実行されてきたが、第5章で述べているように多層大地に対応した棒状電極の並列接地抵抗のための解析解が導出され、多層並列接地抵抗を計算することが可能になってきている。この多層並列接地抵抗計算を実行するためには大地パラメータ（地層の厚さとその地層の大地抵抗率）が必要になるが、第2章に示したように多層大地に対応した見掛けの大地抵抗率の解析解も得られており、大地パラメータの推定も可能になってきている。これら2つの解析結果は多層大地を考慮した棒状電極の並列接地抵抗を計算する際に必要な基本的知見を与えるものである。しかし、第5章の内容は解析解の導出と数値例による接地抵抗の検討を主体としており、実測データとの検証が大きな関心事である。

そこで、本章ではボーリング深埋電極を複数本埋設した並列接地工法の実測データを用いて、第5章で得られている解析解による数値計算の検証を行っている。

第7章では多層大地を考慮した棒状電極群による接地設計システムの提案を行っている。最近では電気設備のコンパクト化、用地の縮小化に加えて、小さい所要接地抵抗を要求されることが多く、建設地の大地抵抗率が高い場合は非常に大掛りな接地工事になる。従って、接地設計の段階で接地施工方法も含めた接地抵抗の予測を適切に行う必要性が各方面から望まれていた。上述の制約条件を満足させるには、接地電極を大地に対して鉛直方向に地中深く埋設し、それを多数極並列に接続する、いわゆる棒状電極の並列接地工法を適用することが有効である。しかし、内外において、棒状電極による接地設計は大地を均質地層あるいは二層地層と仮定して実施されているにすぎず、実際の大地は多層構造を成しているため、多層大地を考慮した手法を導入する必要がある。特に大規模接地工事において有効な接地設計を行うためには、多層大地を考慮した接地設計システムを構築することが必要不可欠であると考ええる。

そこで、接地設計に必要な情報として、建設地の接地施工エリアの面積、その付近の $\rho-a$ 曲線およびボーリング電極半径の3つの情報を得ることで、ある電極配置パターンにおける所要接地抵抗を得るための電極長を決定し、なおかつ、その経済的評価を行い、建設地の大地構造に見合った最も有効的な接地施工法を選定しようという設計システムを提案している。これにより、従来は多層大地構造を均質地層に仮定した平均的な大地抵抗率を採用し、電極配置、電極長の決定等について、ややもすれば試行錯誤的に実施されてきた接地設計に対して、建設地の大地構造に見合った適切な接地工法を選定すること、およびその接地抵抗を適切に予測することが可能になった。

本章においては、第2章、第3章、第4章、第5章、第6章で検討した知見をもとに多層大地を考慮した接地設計を行うための実際的な設計フローを提案し、ケーススタディによって、接地設計システムを検討している。

第8章では、本論文の成果、今後の問題点および発展性について述べている。

第1章の参考文献

- (1) 高橋, 川瀬: 「接地技術の最近の動向」電気学会論文誌 B(解説), Vol.110, No.6 (平 2-6)
- (2) E.D.Sunde: 「Earth Conduction Effects in Transmission Systems」(1968) Dover Publication Inc.
- (3) G.F.Tagg: 「Earth Resistance」George Newnes Ltd. 1964
- (4) F.Dawalibi 他: 「Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Structure Part I Comparison Between Theoretical and Experimental Results」IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-94, No.2, 1975
- (5) K.A.Ewy 他: 「A Graphical Explanation of the Resistance and Surface-Potential Calculations for Grounding Systems in Two-Layer Earth」IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-103, No.3, 1984
- (6) 川瀬, 高橋: 「多層大地における接地抵抗の計算式について」電気学会全国大会, 1985-12
- (7) 高橋, 川瀬: 「電気検層データを用いた接地抵抗の予測計算」電気関係東北支部連合大会, 1985
- (8) 高橋, 川瀬: 「多層大地における電位分布計算式について」電気設備学会研究発表会, 1985
- (9) 高橋, 川瀬: 「多層大地における並列接地抵抗の計算」電気設備学会研究発表会, 1986
- (10) 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」電気学会論文誌 B, 108, 5 (昭63-5)
- (11) 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の並列接地抵抗の解析」電気学会論文誌 B, 12 (昭63-12)

- (12) T.Takahashi, T.Kawase: 「Calculation of Earth Resistance for a Deep Driven Rod in a Multi-Layer Earth Structure」 IEEE Power Engineering Society, SM 406-9 PWRD, 1990
- (13) T.Takahashi, T.Kawase: 「Analysis of Combined Earth Resistance for Parallel Driven Rods in Multi-Layered Earth」 Electrical Engineering in Japan, SCRIPTA TECHNICA, Inc. Vol.109, No.1, p40~p46, 1990
- (14) 高橋, 川瀬: 「多層大地を考慮した棒状電極による接地設計システムの提案」電気設備学会論文, Vol.10, No.6, p434~p441 (平2-6)
- (15) C.J.Blattner: 「Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Tests」 IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-101, No.8, 1982
- (16) 川瀬, 高橋, 渡部: 「パーソナルコンピュータによる三層 ρ - a 曲線の解析」電気学会全国大会, 1983-9
- (17) F.Dawalibi: 「Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques」 IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-103, No.2, 1984
- (18) A.P.Meliopoulos 他: 「Estimation of Soil Parameters from Driven Rod Measurements」 IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-103, No.9, 1984
- (19) 川瀬, 高橋: 「多層大地における大地抵抗率の推定について」電気学会全国大会 1985-9
- (20) C.J.Blattner: 「Analysis of Soil Resistivity Test Methods in Two-Layer Earth」 IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, Vol.PAS-104, No.12, 1985
- (21) 高橋, 川瀬: 「多層大地パラメータの推定について」電気関係学会関西支部連合大会, 1986

- (2 2) H.R.Seedher 他: 「Finite Expressions for Computation of Potential in Two Layer Soil」 IEEE Trans. Power Delivery, Vol.PWRD-2, No.4, 1987
- (2 3) T.Takahashi,T.Kawase: 「Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure」 IEEE 1989 Summer Meeting
- (2 4) T.Takahashi,T.Kawase: 「Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure」 IEEE 1989 Transaction on Power Delivery, Vol.5, No.2, p604~p612, April 1990

第2章 見掛けの大地抵抗率の解析

2-1 まえがき

大地パラメータ（水平多層大地における地層の厚さとその大地抵抗率を称す）を推定する方法には接地抵抗逆算法、電気検層法、 $\rho-a$ 曲線法などがある。接地抵抗逆算法は棒状電極を大地に打込み、接地抵抗を測定し、それから接地抵抗計算式を変形した逆算式により逆算して大地抵抗率を得るものである。この方法は概略的な値を得るには有効である。一方、電気検層法は大地にボーリングにより穴を設け、その中に検層法のソンドを入れ、接地抵抗を測定し、大地パラメータを得るものである。この方法はミクロな値を得るためのものである。以上に述べた二つの方法は、大地を実際に破壊してデータを得ようとするものであるが、 $\rho-a$ 曲線法は大地の地表面から大地パラメータを推定する、いわゆる非破壊的であり、地中の深い所までの情報を知るための最も簡便な方法である。

$\rho-a$ 曲線法は周知のようにウェンナーの四電極法によって得られる ρ （大地抵抗率）の実測値と a （電極間隔）の関係をグラフで表し、多層の標準曲線および補助曲線を用いて照合することによって、大地パラメータを推定するものである。 $\rho-a$ 曲線を解析する方法には Sundberg 氏、Tagg 氏らの標準曲線照合法などがある。いずれの方法も大地を水平二層構造と仮定しており、三層以上の場合は二層構造の解析に帰着させて行うものである。これらは標準曲線や補助曲線を用いて照合させて行うもので、ある種の経験が必要とする。また、標準となる曲線が多層構造を意図したものではなく、三層以上の地層に対しては解析が困難な場合が多いと言われている。

ウェンナーの四電極法から得られる $\rho-a$ 曲線を用いる大地パラメータの推定方法は簡便であり、その有用性は古くから認められている。しかし、多層構造に対応したものではない。著者は水平多層構造大地におけるウェンナーの四電極法を用いた場合の見掛けの大地抵抗率を計算し、任意地層の $\rho-a$ 標準曲線を作成することを検討してきた。それにより、様々な大地パラメータによる $\rho-a$ 曲線

の特長を把握することができ、大地パラメータ推定へ応用する手法を検討することが可能になった。その成果、すなわち大地を層別に解析できることにより、著者が提案している多層大地における棒状電極の接地抵抗計算に必要な大地パラメータの情報を導入することができるようになる。

本章では、 ρ - a 曲線を作成するための大地抵抗率計算の理論式の導出、多層における ρ - a 曲線の特徴、大地パラメータ推定の実例などの検討結果を述べ、多層大地における大地パラメータの推定方法を提案する。

2-2 問題の設定と理論式の導出

2-2-1 地表面の微小電流源による電位の基本式の導出

地表面に存在する微小電流源による地中の任意の点の電位は一般に次のように表現される。以下、これを半空間という。

図 2. 1 に示すように、大地が均質かつ等方性の大地抵抗率（以下、 ρ とする）をもつと仮定し、地表面上に存在する微小電流源から電流 I が流れた場合に電流は地中に均等に放射状に流出していくものと考えられる。

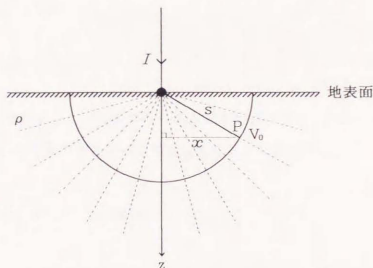


図 2. 1 地表面の微小電流源による電位

点電極から半径 s の半球面上における電流密度 i は

$$i = \frac{I}{2\pi s^2} \quad (2 \cdot 1)$$

となり、球面上の電界は

$$E = \rho i \quad (2 \cdot 2)$$

である。電界中の任意の点 P の電位 V_0 は無限遠点を基準として次式で与えられる。

$$V_0 = - \int_{s=\infty}^{s=s} E ds \quad (2 \cdot 3)$$

したがって、図 2. 1 において、地中の電位 V_0 は次式のように表される。

$$V_0 = - \frac{\rho I}{2\pi} \int_{s=\infty}^{s=s} \frac{1}{s^2} ds = \frac{\rho I}{2\pi s} \quad (2 \cdot 4)$$

ここで $s = \sqrt{x^2 + z^2}$ であるから

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi \sqrt{x^2 + z^2}} \quad (2 \cdot 5)$$

となる。さて、後述するような境界条件の適用を容易にするために、(2. 5) 式を Lipschitz の積分公式を用いて表現を換えると次式を得る。

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda|z|} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2 \cdot 6)$$

ただし、 $z \neq 0$ 。 ρ : 大地抵抗率、 $J_0(\lambda x)$: 零次の第一種ベッセル関数

2-2-2 水平二層大地モデル

図2. 2に示す水平二層大地モデルにおいて、第一層の厚さを h 、各地層の大地抵抗率を ρ_1 、 ρ_2 とする。地表面にある微小電流源から地中に電流が流出すると地中に電位が分布する。上層の電位を V_1 、下層の電位を V_2 とすると、それらは ρ_1 で均質な場合の電位と、他の地層の存在によって生じる修正項 V_1' 、 V_2' の和として表せる。

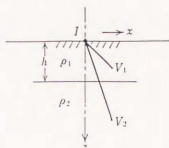


図2. 2 二層大地モデル

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 + V_1' \\ V_2 &= V_0 + V_2' \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 7)$$

ここで、 V_0 は大地が ρ_1 で均質の場合の電位であり、(2・6)式の基本式より次式で表される。

$$V_0 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\lambda |z|} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2 \cdot 8)$$

ここで、 z 軸は原点から下向きの場合を正としているから $|z| = z$ とする。

(2・7)式における V_1' 、 V_2' は未知関数 $f(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ を用いて次のように表現する。

$$\begin{aligned} V_1' &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} \{f_1(\lambda) e^{-\lambda z} + g_1(\lambda) e^{\lambda z}\} \\ &\quad \times J_0(\lambda x) d\lambda \end{aligned} \quad (2 \cdot 9)$$

$$V_2' = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \{f_2(\lambda) e^{-\lambda z} + g_2(\lambda) e^{\lambda z}\} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2 \cdot 10)$$

これらの式を整理し、(2・7)式の形に表すと

$$V_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \{[1 + f_1(\lambda)] e^{-\lambda z} + g_1(\lambda) e^{\lambda z}\} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2 \cdot 11)$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \{[1 + f_2(\lambda)] e^{-\lambda z} + g_2(\lambda) e^{\lambda z}\} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2 \cdot 12)$$

(2・11)、(2・12)式の未知関数 $f(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ は、次に示す境界条件によって決定される。

- (i) $z \rightarrow \infty$ では $V_z \rightarrow 0$
- (ii) $z = 0$ では $\partial V_1 / \partial z = 0$
- (iii) $z = h$ では $V_1 = V_2$
- (iv) $z = h$ では $(1/\rho_1) (\partial V_1 / \partial z) = (1/\rho_2) (\partial V_2 / \partial z)$

上記の境界条件により未知関数を解くと、

$$f_1(\lambda) = \frac{k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}}$$

$$g_1(\lambda) = f_1(\lambda)$$

ただし、 $k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$

これらを(2・11)式に代入して整理すると、地表面($z=0$)における電位 V_1 は次式で表される。

$$V_x = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} (1 + F_2(x)) \quad (2 \cdot 13)$$

ただし,

$$F_2(x) = 2x \int_0^\infty \frac{k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

2-2-3 水平三～五層大地モデル

前節で述べた二層大地モデルを拡張して水平三～五層大地モデルを設定する。電位の一般化を求めるには(2・7)式で表現したと同様に、他層の影響に対する修正項を考慮し、境界条件である、(i)無限下層では電位が零に等しい、(ii)地表面を通過する電流は零、(iii)地表の境界においては電位が相等、(iv)地層の境界においては電流が連続という基本事項によって、未知関数を決定する必要がある。この場合、目的は地表面における電位を求めることである。従って、計算する過程はすべての未知関数が必要であるが最終的には第一層目の地層に関する電位の式 V_1 の未知関数を決定するだけでよい。

さて、以上を踏まえ、電位を表す方程式から境界条件により、第一層目の電位式に含まれる未知関数を決定すると表2・1ようになる。ここで、 $g(\lambda)$ と $f(\lambda)$ はいかなる大地構造においても相等しくなる。

表 2. 1 未知関数 $f(\lambda), g(\lambda)$

大地構造	$f_1(\lambda)$	$\rho_1(\lambda)$	備 考
二層	$\frac{k_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h_1}}$	$f_1(\lambda)$	$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$
三層	$\frac{K_{31} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{31} e^{-2\lambda h_1}}$	同上	$K_{31} = \frac{k_1 + k_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 \cdot k_2 e^{-2\lambda h_2}}, k_2 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}$
四層	$\frac{K_{41} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{41} e^{-2\lambda h_1}}$	同上	$K_{41} = \frac{k_1 + K_{42} e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 \cdot K_{42} e^{-2\lambda h_2}}$ $K_{42} = \frac{k_2 + k_3 e^{-2\lambda h_3}}{1 + k_2 \cdot k_3 e^{-2\lambda h_3}}, k_3 = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$
五層	$\frac{K_{51} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{51} e^{-2\lambda h_1}}$	同上	$K_{51} = \frac{k_1 + K_{52} e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 \cdot K_{52} e^{-2\lambda h_2}}$ $K_{52} = \frac{k_2 + K_{53} e^{-2\lambda h_3}}{1 + k_2 \cdot K_{53} e^{-2\lambda h_3}}$ $K_{53} = \frac{k_3 + k_4 e^{-2\lambda h_4}}{1 + k_3 \cdot k_4 e^{-2\lambda h_4}}, k_4 = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$

表 2. 1 に示した未知関数を第一層目の電位式に代入し整理すると、地表面の電位を求めることができる。例えば三層大地の場合は次式ようになる。

$$V_3(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_3(x)] \quad (2 \cdot 14)$$

ただし、

$$F_3(x) = 2x \int_0^{\infty} \frac{K_{31} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{31} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

2-2-4 水平N層大地モデル

水平N層大地モデルを図2.3のように設定する。前述の三～五層大地モデルと同様な方法で未知関数を求めることによって、地表面に存在する点電極に電流Iが流入したときの地表面上の任意の点xの電位は次式で表される。

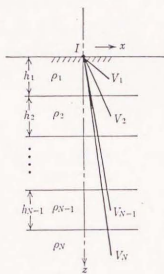


図2.3 N層大地モデル

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} (1 + F_N(x)) \quad (2 \cdot 15)$$

ただし、

$$F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

ここで,

$$\begin{aligned} K_{N1} &= \frac{k_1 + K_{N2} e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 K_{N2} e^{-2\lambda h_2}}, \\ K_{N2} &= \frac{k_1 + K_{N3} e^{-2\lambda h_3}}{1 + k_2 K_{N3} e^{-2\lambda h_3}}, \\ \dots K_{Ns} &= \frac{k_s + k_{Ns+1} e^{-2\lambda h_{s+1}}}{1 + k_s K_{Ns+1} e^{-2\lambda h_{s+1}}} \dots \\ K_{NN-2} &= \frac{k_{N-2} + K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}{1 + k_{N-2} K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}, \\ K_{NN-1} &= k_{N-1} \end{aligned}$$

また,

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \dots k_s = \frac{\rho_{s+1} - \rho_s}{\rho_{s+1} + \rho_s} \dots k_{N-1} = \frac{\rho_N - \rho_{N-1}}{\rho_N + \rho_{N-1}}$$

2-2-5 ウェンナーの四電極法に適用した見掛けの大地抵抗率計算式の導出

図2.4にN層大地におけるウェンナーの四電極法の電極配置を示す。電極間隔をaとし、電極c₁とc₂間に電源を接続して大地に電流Iを流し、電極p₁とp₂の間に生じた電位差をVとしたとき、見掛けの大地抵抗率ρ_aは次式で表される。

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (2 \cdot 16)$$

いま、電極に番号を付け、電極1~4としたとき、電極1から流出する電流Iが作る電位と、電極4から流出する電流-Iが作る電位がそれぞれ独立に存在していると考え。これらの電位は、N層大地を想定しているため、既に導出した(2・15)式を用いて計算される。電極2において、電極1(I)が作る電位をV₂₁、電極4(-I)が作る電位をV₂₄とすると(2・15)式を用いて次式のように表される。

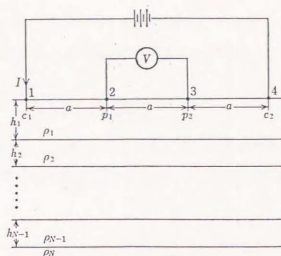


図 2. 4 N層大地におけるウェンナーの四電極法

$$V_{21} = V_N(a) = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + F_N(a)] \quad (2 \cdot 17)$$

$$V_{24} = V_N(2a) = \frac{\rho_1 (-I)}{4\pi a} [1 + F_N(2a)] \quad (2 \cdot 18)$$

同様に、電極 3 においては、

$$V_{31} = V_N(2a) = \frac{\rho_1 I}{4\pi a} [1 + F_N(2a)] \quad (2 \cdot 19)$$

$$V_{34} = V_N(a) = \frac{\rho_1 (-I)}{2\pi a} [1 + F_N(a)] \quad (2 \cdot 20)$$

従って、電極 2、電極 3 に生じる電位差 V は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_N &= V_2 - V_3 = (V_{21} + V_{24}) - (V_{31} + V_{34}) \\ &= \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \end{aligned} \quad (2 \cdot 21)$$

(2・21) 式を基本式 (2・16) に代入することによって、水平N層大地における見掛けの大地抵抗率 ρ_a の理論式を得ることができる。

$$\rho_a = \rho_1 [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \quad (2 \cdot 22)$$

ただし、 $F_N(x) \mid_{x=a, 2a}$ は前述の (2・15) 式の場合と同形である。

(2・22) 式が水平多層大地における見掛けの大地抵抗率を計算するための理論式である。

2-3 多層大地における $\rho-a$ 曲線の作成

水平二層大地における $\rho-a$ 曲線は Hummel 氏によって検討され、標準曲線として作成されている。著者が提案する $\rho-a$ 曲線の解析解 (2・22) 式の数値計算を実施するに際し、ベッセル関数は Hitchcock による近似式を用い、半無限の数値積分は二重指数関数形の積分公式を用いて本学の計算センターで行った。まず、最初に既知の二層標準曲線と比較するために (2・22) 式において $N=2$ 、すなわち二層の場合を計算してみた。その結果、 $\pm 0.1\%$ 以下の誤差であった。そこで、本計算プログラムを用い多層の $\rho-a$ 曲線を作成し、種々の観点から大地パラメータと見掛けの大地抵抗率の関係を調べ、大地パラメータ推定への適用を検討してみる。

2-3-1 大地パラメータによる $\rho-a$ 曲線の特徴

(1) 四層大地モデル

地層の厚さをある値に固定して、表 2・2 に示す大地パラメータを用いて四層大地モデルにおける $\rho-a$ 曲線を作成すると図 2・5 のようになる。パラメータの数値により、 $\rho-a$ 曲線の特徴が表れているが、特に曲線 A、B、E では極値が2箇所存在している。これは、 ρ の値の変化によるものである。一方、 ρ が漸次増加 (C)、減少 (D) の場合は曲線に極値が存在せず、明確な層別の傾向は表れていない。

表2. 2 四層大地モデルの大地パラメータ

地層の厚さ (m) : $h_1=5, h_2=10, h_3=20$ 大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$) :				図2. 5の曲線名
ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
10	500	10	100	A
100	10	100	10	B
10	50	100	500	C
500	100	50	10	D
500	50	100	10	E

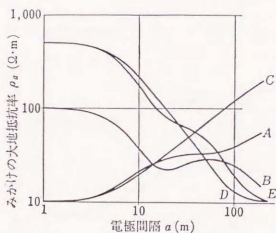


図2. 5 四層大地の $\rho - a$ 曲線

(2) 五層大地モデル

表2. 3に示す大地パラメータを用いて五層大地モデルにおける $\rho - a$ 曲線を作成すると図2. 6のようになる。いかなる地層においても $\rho - a$ 曲線は最終的には最下層の ρ の値に収束するが、その場合の電極間隔の値は大地パラメータによって様々である。図示するように、極値の存在の傾向は(1)項で述べたと同様である。すなわち、C、Dでは存在せず、それ以外の場合は、 ρ が高かつ h が大きい場合は明確に極値の存在がわかる。

表 2. 3 五層大地モデルの大地パラメータ

地層の厚さ (m) : $h_1=5, h_2=10, h_3=20, h_4=40$ 大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$) :					図 2. 6 の曲線名
ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	
10	100	10	100	10	A
100	10	100	10	100	B
10	50	100	500	1,000	C
1,000	500	100	50	10	D
500	50	100	10	100	E
500	50	1,000	100	10	F

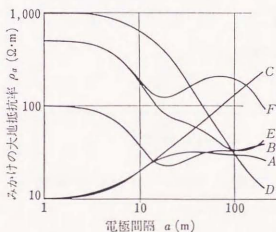


図 2. 6 五層大地の $\rho - a$ 曲線

(3) 地層別による大地モデル

これまでの $\rho - a$ 曲線は地層の厚さをある値に固定して作成してきた。

大地パラメータを推定するためには上層から順次推定していくため、地層別による $\rho - a$ 曲線を検討する必要がある。そこで、地層を順次増やしたとき、各層の ρ の大小関係による $\rho - a$ 曲線の特徴をみることにする。

(i) ρ が小→大→小→大に変化する場合

二層から五層までのモデルにおいて、図2.7に示す大地パラメータによる ρ - a 曲線を作成すると同図になる。図示するように、 ρ の大小関係によって層別の特徴が表されている。例えばA（二層）の場合は第一層の ρ_1 の値に収束しているが、B（三層）では第二層の ρ_2 の影響で ρ_a が大きくなり極値をもつようになる。しかし、 a を大きくすると第三層 ρ_3 の値に収束する。

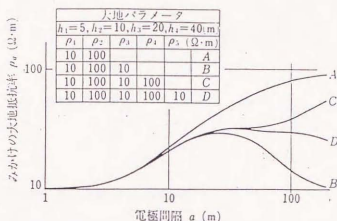


図2.7 地層別による ρ - a 曲線 (ρ 変化: 小→大)

(ii) ρ が大→小→大→小に変化する場合

(i) 項とは逆に、図2.8に示す大地パラメータによる ρ - a 曲線を作成すると同図になる。変化の様相は (i) 項と対称にはなっていないが、最下層の ρ の値に収束する傾向は認められる。例えばA（二層）の場合は第二層の ρ_2 の値に収束し、B（三層）では第二層の ρ_2 の影響で ρ_a が小さくなり極値をもつが、 a を大きくすると第三層の ρ_3 の値に収束する。

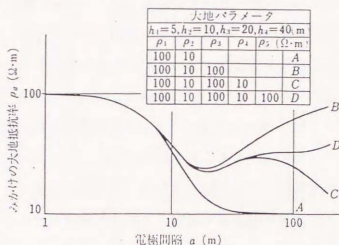


図2. 8 地層別による $\rho-a$ 曲線 (ρ 変化: 大→小)

2-3-2 大地パラメータ推定への応用

これまで述べてきたように、導出した理論式を基にして、種々の大地パラメータによる $\rho-a$ 曲線を作成することが可能になった。これらの曲線は標準曲線とも言えるもので、曲線をパターン化することにより層別の特徴を把握することができ、実測の ρ 曲線と対応することにより大地パラメータ推定へ応用することが考えられる。そこで、大地で実測した $\rho-a$ 曲線データに対して、任意の大地パラメータによる $\rho-a$ 曲線を作成して実測データに対応させるという手法が可能かどうかを検討してみる。著者が提案する手法は、具体的には次のような方法である。ウェンナーの四電極法で得られた実測データを両対数方眼紙にプロットし $\rho-a$ 曲線を描く。それに任意の大地パラメータを入力して計算した値を照合させる。その時、曲線が一致した場合の入力パラメータが推定する大地パラメータということになる。ケーススタディとして、数箇所得られた実測データを用いて本手法を試みる。

(1) 文献(5)のデータ

志村氏の著書(p. 113)に掲載されているデータを参考にする。二層標準曲線を用いて行った $\rho-a$ 曲線の解析(以下、二層解析法と呼ぶ)と、本論文で提案している多層大地における見掛けの大地抵抗率の理論式による計算手法(以下、本手法と呼ぶ)を比較した結果は図2. 9のようになる。同図で●印は実測データ、実線Aは二層解析法により得られた大地パラメータを(2. 22)式に代入して計算した結果、実線Bは本手法によるものである。比較すると、実線Bが実測データに近い傾向を示している。推定した大地パラメータを同図中に示す。本手法による $\rho-a$ 曲線の作成は、推定する大地パラメータを入力することにより行うものである。図2. 9に示した実測データに照合させるために、ファイルしてある多層標準曲線の形状を参考にしながら、種々の大地パラメータを入力して、 $\rho-a$ 曲線を作成すると同図Bを得た。曲線Bを得るにあたっては、5ケースの大地パラメータ入力の作業を行った。ちなみに、一つの曲線を得るのに約3分(CPU時間)程度である。二層解析法では、志村氏の文献によれば、三層までの大地パラメータを推定するに止めており、その大地パラメータを用いて、(2. 22)式により $\rho-a$ 曲線を作成したのが図2. 9の(A)である。一方、本手法では五層までの大地パラメータが推定でき、それによる $\rho-a$ の曲線は同図(B)である。図2. 9に示しているように、実測データに対して二層解析法と本手法では差異が生じている。そこで、実測データを真値 ρ_0 とし、推定値を ρ としたとき、これらの手法による誤差 ε を

$$\varepsilon = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \times 100 (\%) \quad (2. 23)$$

と表し、推定値と実測データの差異をみると表2. 4のようになる。同表によると、実測データに対して本手法では誤差が6%以下である。二層解析法では、三層までしかできなかったことが要因で大きな誤差が生じている。測定深度が浅いところではほぼ一致しているが、深いところでは誤差が大きくなっている。このことは、現行の二層解析法に限界があることを示唆しており、志村氏が指摘しているように、層の数が多くなると誤差が生じるということが確認された。

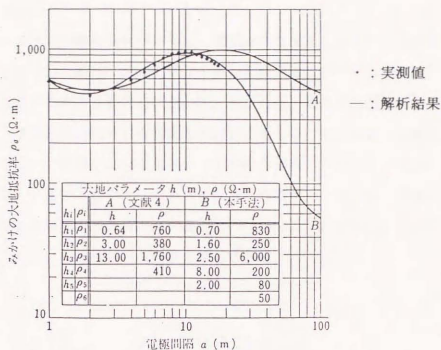


図 2. 9 実例 1 [文献 (5) より]

表 2. 4 電極間隔 a による推定誤差

電極 間隔 a (m)	推定誤差 ε (%)		電極 間隔 a (m)	推定誤差 ε (%)	
	二層解析法	本手法		二層解析法	本手法
1	+ 2.46	+2.11	10	- 8.51	-0.53
2	+ 5.78	+1.11	11	- 3.76	-1.29
3	- 6.47	+2.53	12	+ 2.44	+2.00
4	- 8.47	+4.08	13	+ 6.82	+3.32
5	-11.18	+5.88	14	+12.71	+4.82
6	-13.90	+2.60	15	+20.20	+5.12
7	-14.40	+0.30	16	+24.36	+6.07
8	-15.16	-3.30	17	+26.62	+5.45
9	- 0.87	-1.95			

(2) 群馬県A地点のデータ

当地においては $\rho-a$ 曲線の実測データおよび長さ4.2 mまでのボーリング電極（半径0.028 m）の接地抵抗のデータを採った例がある。これらを基にして、本手法を検証してみる。多層大地において、棒状電極の長さ l と接地抵抗 R の関係をみると、地層の境界面で接地抵抗の変曲点が生じる。この変曲点は地層の厚さの情報を与える。実測データにより $R-l$ 曲線を作成すると図2.10になる。変曲点をみると図中に示すように、九層以上と推察する。すなわち大地パラメータの一つである地層の厚さ h (m) は $h_1=3$, $h_2=7$, $h_3=2$, $h_4=5$, $h_5=9$, $h_6=1$, $h_7=3$, $h_8=9$ と推定できる。

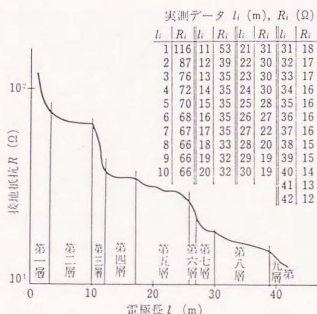


図2.10 $R-l$ 曲線 (群馬県A地点)

(1) 項のケースでは、厚さと大地抵抗率の二つの変数を考慮して推定してきたが、ここでは、 $R-l$ 曲線データがあるため、大地抵抗率のみを変数にすればよい。二層解析法と本手法により $\rho-a$ 曲線を作成し、実測データと合わせた結果を図2.11に示す。 a が大きくなるに従い両者の差異が大きくなるという

(1) 項と同様な傾向を示す。本手法が実測データとよく一致している。従って、当地において推定した大地パラメータは同図中に示す値となる。次に、これらの大地パラメータを多層における接地抵抗計算式に代入して計算した結果、接地抵抗は $\ell=10$ で 70.6, $\ell=20$ で 36.3, $\ell=30$ で 18.1, $\ell=40$ で 11.9 [単位 ℓ (m), (Ω)] である。図 2.11 に示す実測値と比較すると実用上十分な精度であり、本手法による大地パラメータが妥当であることを示唆している。

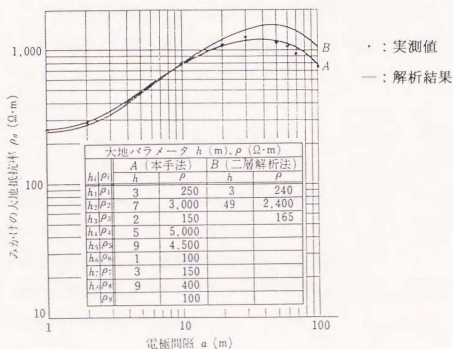


図 2.11 実例 2 (群馬県 A 地点)

従来は、二層における見掛けの大地抵抗率の理論式しか存在しなかったために、多層問題を解くための地層別の大地パラメータの情報を得ることが困難であった。これを改善するために、多層構造大地における見掛けの大地抵抗率を求める理論式を解析的に得て、それにより任意の地層構造における $\rho - a$ の標準曲線を作成することを検討してきた。その結果、多層構造大地における $\rho - a$ 曲線の特徴を把握することができた。更に、応用として大地パラメータを推定する手法の可能性を検討してみた。2例ではあるが、本手法が有用であることを確認した。本章で提案する手法は、任意の地層構造大地に適用することができ、かつ手作業によらないことから、解析者による誤差を省くことができるという有意性がある。

第2章の参考文献

- (1) 高橋, 川瀬: 「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電学論 B, 108, 383 (昭63-8)
- (2) 高橋: 「接地技術の動向」, 電学誌, 106, 69 (昭61-4)
- (3) 高橋, 川瀬: 「電気検層データによるボーリング電極の接地抵抗の簡易推定法」 昭62電気学会全大, No.1097
- (4) G. F. Tagg: 「Earth Resistance」, George Newnes Ltd. (1964)
- (5) 志村: 電気探査法 (昭45) 昭見堂
- (6) 川瀬, 他: 「多層大地における大地抵抗率の推定について」
昭60電気学会全大, No.1085

第3章 棒状電極の接地抵抗の解析

3-1 まえがき

近年にみられるように、電気設備のコンパクト化に伴い、接地施工のための敷地が制限され、かつ良質の接地抵抗を要求されている場合、接地電極は大地に対して鉛直方向に布設せざるを得ない状況にある。つまり、接地電極に棒状電極を用い、地中深く打込む、いわゆる深打工法を選ぶことである。この工法は大地をボーリングして、その穴に電極（本論文ではボーリング電極と称す）を埋設するものであり、非常に大掛りになる。従って、接地設計の段階における接地抵抗の予測は大きな関心事である。棒状電極の接地抵抗計算は基本的には大地を均質かつ等方性とみなして行われてきている。Tagg氏の成書によると、大地を二層構造とみなして計算式を導出しているが、それ以上の多層構造については検討されていない。実際の大地は複雑な地層構造を成しているため、単に均質あるいは二層構造とみなして接地抵抗を計算することは精度的に問題があると思われる。

雷インパルス問題や誘導雑音問題などを含む接地に関する論文では、接地抵抗ではなく接地インピーダンスとして取り扱っている。保安用接地において、それが商用周波数帯域であっても接地抵抗を計算する場合は、厳密には接地インピーダンスを考慮しなければならない。しかし、本論文においては原理に基づいた考えとして、接地抵抗は直流抵抗とみなすことのできる周波数を対象とする。更に、棒状電極の表面ではすべて等電位であるとみなして、電極の内部インピーダンスは無視することとする。また、各地層においては棒状電極は微小電流源の集合体とみなすこととする。以下に述べる内容においては、これらの仮定のもとに接地抵抗の解析を行うことにする。

本章では大地を水平多層構造とみなした場合の棒状電極の接地抵抗を上述の仮定のもとで理論的に解析した接地抵抗計算式を導出、および数値計算による接地抵抗の様相について述べる。

3-2 問題の設定と理論式の導出

3-2-1 地中の微小電流源による電位の基本式の導出

地中に存在する微小電流源による地中の任意の点における電位は、一般に次のように表現される。以下、これを全空間問題という。

図3. 1に示すように、大地が均質かつ等方性の大地抵抗率（以下、 ρ とする）をもつと仮定し、地中に存在する微小な電流源から電流 I_0 が地中に均等に放射状に流出していくものと考えられる。

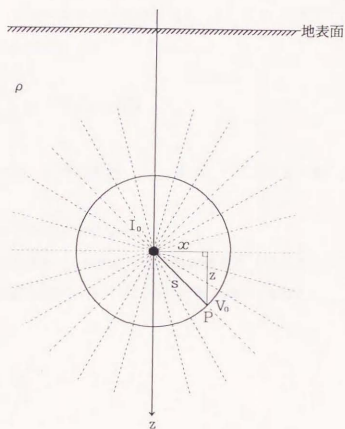


図3. 1 地中の微小電流源による地中の電位

電流源から半径 s の球面上における電位は第2章の2-2-1で述べたと同様な手順、つまり半径 s の球面上の電流密度、電界を求めることによって与えられるが、ここでは図示するように全空間の領域であるので、地中の電位 V_0 は次式

のように表される。

$$V_0 = -\frac{\rho I_0}{4\pi} \int_{s=\infty}^{s=0} \frac{1}{s^2} ds = \frac{\rho I_0}{4\pi s} \quad (3 \cdot 1)$$

ここで $s = \sqrt{x^2 + z^2}$ であるから

$$V_0 = \frac{\rho I_0}{4\pi \sqrt{x^2 + z^2}} \quad (3 \cdot 2)$$

となる。ここで、前章で述べたと同様に (3・2) 式を Lipschitz の積分公式を用いて表現すると次式を得る。

$$V_0 = \frac{\rho I_0}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda|z|} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3 \cdot 3)$$

ただし、 $z \neq 0$ 。 ρ : 大地抵抗率、 $J_0(\lambda x)$: 零次の第一種ベッセル関数

3-2-2 水平二層大地モデル

第 m 層の地中に電流源 I_m を想定する。地表面から t の深さに円筒座標系の原点 O を設定 (地表面は $z = -t$) し、大地抵抗率が ρ_m であるとき、電位 V_0 は (3・3) 式より、

$$V_0 = \frac{\rho_m I_m}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda|z|} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3 \cdot 4)$$

となる。これは、大地が ρ_m で均質である場合の電位である。ところが、図 3・2 に示すような水平二層大地 (上層が ρ_1 、下層が ρ_2) の場合、電位は他の地層の影響を受け、次のように表される。

(1) 電流源が上層に存在する場合

図3.2に示すように、上層の電流源を I_1 、上層の電位を V_{11} 、下層の電位を V_{12} とすると次式を得る。

$$V_{11} = V_0 + \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{11}(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi_{11}(\lambda) e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 5)$$

$$V_{12} = \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{12}(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi_{12}(\lambda) e^{\lambda z} \} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 6)$$

ここで、

$$V_0 = \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda |z|} J_0(\lambda x) d\lambda$$

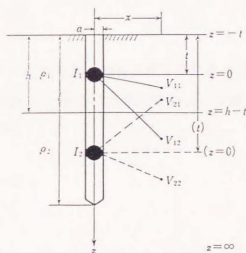


図3.2 二層大地モデル

これらの式で z 軸は原点から下向きの場合を正、上向きの場合を負とする。

(3・5), (3・6) 式の未知関数 $\phi_{11}(\lambda)$, $\phi_{12}(\lambda)$, $\Psi_{11}(\lambda)$, $\Psi_{12}(\lambda)$ は次に示す境界条件により決定される。

- (i) $z \rightarrow \infty$ では $V_{12} \rightarrow 0$
- (ii) $z = -t$ では $\partial V_{11} / \partial z = 0$
- (iii) $z = h - t$ では $V_{11} = V_{12}$
- (iv) $z = h - t$ では $(1/\rho_1)(\partial V_{11} / \partial z) = (1/\rho_2)(\partial V_{12} / \partial z)$

これらの条件により未知関数を解き整理すると、 V_{11} は次式で表される。

$$V_{11} = \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty \left\{ e^{-\lambda |z|} + \frac{e^{-2\lambda t} + k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} e^{-\lambda z} \right. \\ \left. + k_1 \frac{e^{-2\lambda h} + e^{-2\lambda(h-t)}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} e^{\lambda z} \right\} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 7)$$

ただし、 k_1 は第一層と第二層の地層の境界面における反射率であり、次式で表される。

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

反射率 k は大地が不均質である場合、地層の境界面における接地電流の流れ具合を表す指数である。一般に、上層の大地抵抗率を ρ_i 、下層を ρ_{i+1} としたとき、反射率は次式で表される。

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i}$$

この k_i の値は ρ_i と ρ_{i+1} の大小関係に応じて $-1 \leq k_i \leq 1$ の範囲にある。上層の ρ_i が下層に比べて大きい場合は k は 0 と 1 の間の値をとり、下層の ρ_{i+1} が非常に大きい場合 ($\rho_{i+1} \rightarrow \infty$) は $k = 1$ になる。その逆の場合は k は 0 と -1 の間の値をとり、下層の ρ_{i+1} が非常に小さい場合 ($\rho_{i+1} \rightarrow 0$) は $k = -1$ になる。

地表面の電位は $z = -t$ を代入すれば次式になる。

$$V_1 = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t} + k_1 e^{-2\lambda h} e^{\lambda t}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 8)$$

(2) 電流源が下層に存在する場合

図3. 2に示すように、地表面から t の深さに原点0を設定し（図中では破線で表す）電流源を I_2 、上層の電位を V_{21} 、下層の電位を V_{22} とすると次式の関係になる。

$$V_{21} = \frac{\rho_2 I_2}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{21}(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi_{21}(\lambda) e^{\lambda z} \} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 9)$$

$$V_{22} = V_0 + \frac{\rho_2 I_2}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{22}(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi_{22}(\lambda) e^{\lambda z} \} \\ \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 10)$$

ここで、

$$V_0 = \frac{\rho_2 I_2}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda |z|} J_0(\lambda x) d\lambda$$

(1) 項に示したと同様な境界条件により未知関数を決定し、 V_{21} を求め、それに $z = -t$ を代入し整理すると地表面の電位は次式になる。

$$V_2 = \frac{\rho_2 I_2}{2\pi} \int_0^\infty \frac{(1 - k_1) e^{-\lambda t}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 11)$$

以上に示した電位は微小電流源に対するものである。これを棒状電極に適用するには式中の x を電極半径 a とし、深さ t 方向に電極長 l で積分することによって電極表面の電位を求めることができる。水平二層大地における棒状電極が作る地表面の任意の点 x の電位 $V_{s2}(x)$ は次式になる。

$$\begin{aligned}
 V_{xz}(x) &= \int_0^h V_1 dt + \int_h^l V_2 dt \\
 &= \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \left[\int_0^h \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t} + k_1 e^{-2\lambda h} e^{\lambda t}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \right. \\
 &\quad \left. + (1 - k_1) \int_h^l \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \right] \quad (3 \cdot 12)
 \end{aligned}$$

ここで, $\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2$

3-2-3 水平三～五層大地モデル

前節で述べた二層大地モデルを拡張して図3. 3に示す水平三, 五層大地モデルを設定する。電位の一般解を求めるには, 電流源が存在する地層の電位と, 他の地層の影響に対する修正項の電位を加え合わせることによって得られる。また, 境界条件である (i) 無限下層では電位が零に等しい, (ii) 地表面を通過する電流は零, (iii) 地層の境界面においては電位が相等, (iv) 地層の境界面においては電流は連続, という基本事項によって未知関数を決定する必要がある。

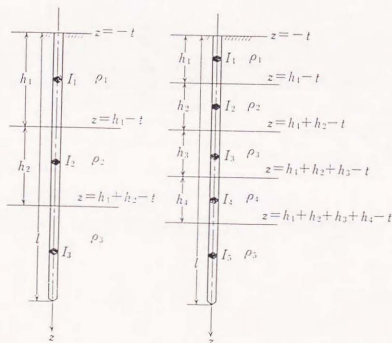


図3. 3 三, 五層大地モデル

この場合、目的は地表面における電極表面の電位を求めることである。計算する過程ではすべての未知関数が必要であるが、最終的には第一層目に関する電位式の未知関数を決定するだけでよい。

さて、以上のことをふまえて電位の方程式から境界条件を用いて解き、第一層目の電位式に含まれる未知関数を決定すると表3. 1 のようになる。

表3. 1 未知関数 $\phi(\lambda)$, $\Psi(\lambda)$

	三 層	四 層	五 層
$\phi_{11}(\lambda)$	$\frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}$	$\frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}$	$\frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}$
$\phi_{21}(\lambda)$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{e^{-\lambda_1 t} + k_1 e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2)}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}}$
$\phi_{31}(\lambda)$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{(1 - k_1) e^{-\lambda_1 t}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \times \frac{e^{-\lambda_1 t} + k_1 e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3)}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_3}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \times \frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}}$
$\phi_{41}(\lambda)$		$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{(1 - k_1) e^{-\lambda_1 t}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_3}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}} \times \frac{e^{-\lambda_1 t} + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_4}}$
$\phi_{51}(\lambda)$			$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}} \frac{(1 - k_1) e^{-\lambda_1 t}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_4}}$
$\Psi_{11}(\lambda)$	$\frac{e^{-\lambda_1 k_1} + e^{-\lambda_1 (k_1 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} K_{11}$	$\frac{e^{-\lambda_1 k_1} + e^{-\lambda_1 (k_1 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} K_{11}$	$\frac{e^{-\lambda_1 k_1} + e^{-\lambda_1 (k_1 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} K_{11}$
$\Psi_{21}(\lambda)$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 + k_1 e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2)}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}}$
$\Psi_{31}(\lambda)$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - k_1}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_2}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 + k_1 e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3 + t)}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_3}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 + K_{11} e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3 + t)}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}}$
$\Psi_{41}(\lambda)$		$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 - k_1}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_3}}$	$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}} \times \frac{1 + k_1 e^{-\lambda_1 (k_1 + k_2 + k_3 + t)}}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_4}}$
$\Psi_{51}(\lambda)$			$\frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_2}} \frac{1 - K_{11}}{1 - K_{11} e^{-\lambda_1 k_3}} \frac{1 - k_1}{1 - k_1 e^{-\lambda_1 k_4}}$

表中の k_{NS} は次式で表す。

$$K_{11} = \frac{k_1 + k_1 e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 k_1 e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}} \quad K_{11} = \frac{k_1 + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\alpha_{11} k_1 + \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{\alpha_{11} + k_1 \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}} \quad K_{11} = \frac{k_1 + k_1 e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 k_1 e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}}$$

$$K_{11} = \frac{k_1 + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\alpha_{11} k_1 + \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{\alpha_{11} + k_1 \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}} \quad K_{11} = \frac{k_1 + K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 K_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\alpha_{11} k_1 + \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}}{\alpha_{11} + k_1 \beta_{11} e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}} \quad K_{11} = \frac{k_1 + k_1 e^{-\lambda_1 k_1}}{1 + k_1 k_1 e^{-\lambda_1 k_1}} \frac{\beta_{11}}{\alpha_{11}}$$

(1) 三層大地モデルの電位

図3. 3に示すモデルにおいて、各地層の厚さを h_i 、大地抵抗率を ρ_i 、地層に存在する電流源を I_i としたとき電位の方程式を作り、境界条件によって未知関数を求める。表3. 1に示した未知関数を用いて式を整理すると次式を得る。

$$V_1 = V_{1|z=-t} = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\alpha_{31} e^{-\lambda t} + \beta_{31} e^{-2\lambda h_1} e^{\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 13)$$

$$V_2 = V_{2|z=-t} = \frac{\rho_2 I_2}{2\pi} (1 - k_1) \times \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t} + k_2 e^{-2\lambda H_2} e^{\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 14)$$

$$V_3 = V_{3|z=-t} = \frac{\rho_3 I_3}{2\pi} (1 - k_1)(1 - k_2) \times \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 15)$$

ここで、 $H_2 = h_1 + h_2$

従って、水平三層大地における棒状電極が作る地表面の任意の点 x の電位 V_{x3} は次式に(3・13)～(3・15)式を代入して得られる。

$$V_{x3} = \int_0^{h_1} V_1 dt + \int_{h_1}^{H_2} V_2 dt + \int_{H_2}^t V_3 dt \quad (3 \cdot 16)$$

すなわち、

$$V_{x3} = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \left[\int_0^{h_1} \int_0^\infty \frac{\alpha_{31} e^{-\lambda t} + \beta_{31} e^{-2\lambda h_1} e^{\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} \times J_0(\lambda x) d\lambda dt + (1 - k_1) \times \int_{h_1}^{H_2} \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t} + k_2 e^{-2\lambda H_2} e^{\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} \times J_0(\lambda x) d\lambda dt + (1 - k_1)(1 - k_2) \times \int_{H_2}^t \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{\alpha_{31} - \beta_{31} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \right] \quad (3 \cdot 17)$$

(2) 五層大地モデルの電位

図3. 3に示すモデルを用いて、三層の場合と同様にして各独立電位 V_1, V_2, \dots, V_5 を求め整理すると、水平五層大地における棒状電極が作る地表面の任意の点 x の電位 V_{xs} は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 V_{xs} = & \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \left[\int_0^{h_1} \int_0^\infty \frac{\alpha_{51} e^{-\lambda t} + \beta_{51} e^{-2\lambda h_1} e^{\lambda t}}{\alpha_{51} - \beta_{51} e^{-2\lambda h_1}} \right. \\
 & \times J_0(\lambda x) d\lambda dt + (1-k_1) \\
 & \times \int_{h_1}^{H_2} \int_0^\infty \frac{\alpha_{52} e^{-\lambda t} + \beta_{52} e^{-2\lambda H_2} e^{\lambda t}}{\alpha_{51} - \beta_{51} e^{-2\lambda h_1}} \\
 & \times J_0(\lambda x) d\lambda dt + (1-k_1)(1-k_2) \\
 & \times \int_{H_2}^{H_3} \int_0^\infty \frac{\alpha_{53} e^{-\lambda t} + \beta_{53} e^{-2\lambda H_3} e^{\lambda t}}{\alpha_{51} - \beta_{51} e^{-2\lambda h_1}} \\
 & \times J_0(\lambda x) d\lambda dt + (1-k_1)(1-k_2)(1-k_3) \\
 & \times \int_{H_3}^{H_4} \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t} + k_4 e^{-2\lambda H_4} e^{\lambda t}}{\alpha_{51} - \beta_{51} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \\
 & \left. + (1-k_1)(1-k_2)(1-k_3)(1-k_4) \right. \\
 & \left. \times \int_{H_4}^l \int_0^\infty \frac{e^{-\lambda t}}{\alpha_{51} - \beta_{51} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \right] \quad (3 \cdot 18)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$H_i = \sum_{j=1}^i h_j, \quad k_i = (\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i)$$

電位式を検証するにあたり、例えば三層を二層問題に置き換えた場合について試みた。方法は第一層と第二層を同一地層にする場合と、第二層と第三層を同一地層にする場合が考えられる。前者は $\rho_1 = \rho_2$ とすると $k_1 = 0$ であり、 $\alpha_{31} = 1$, $\beta_{31} = k_2 e^{-2\lambda h_2}$ となり、これらを (3・13), (3・14) 式に代入した結果 $V_1 = V_2$ となる。後者は $\rho_2 = \rho_3$ とすると $\alpha_{31} = 1$, $\beta_{31} = k_1$ となり、(3・14), (3・15) 式に代入した結果 $V_2 = V_3$ となる。すなわち二層問題になることが確認された。

これらの検証は次に述べる N 層問題でも同様に行い、導出した式の確認をした。

3-2-4 水平N層大地モデル

図3.4に示すような水平N層大地モデルを仮定する。電流源が各地層に存在する場合、電位の一般解は次のように表される。

[1] I_1 による電位: $V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1N}$

[2] I_2 による電位: $V_{21}, V_{22}, \dots, V_{2N}$

[N] I_N による電位: $V_{N1}, V_{N2}, \dots, V_{NN}$

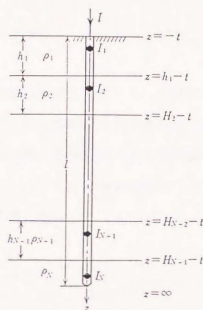


図3.4 N層大地モデル

例えば [1] の場合,

$$V_{11} = V_0 + \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{11}(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi_{11}(\lambda) e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 19)$$

$$\vdots$$

$$V_{1N} = \frac{\rho_1 I_1}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{1N}(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi_{1N}(\lambda) e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 20)$$

[N] の場合,

$$V_{N1} = \frac{\rho_N I_N}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{N1(\lambda)} e^{-\lambda z} + \psi_{N1(\lambda)} e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 21)$$

$$V_{N2} = \frac{\rho_N I_N}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{N2(\lambda)} e^{-\lambda z} + \psi_{N2(\lambda)} e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 22)$$

⋮

$$V_{NN} = V_0 + \frac{\rho_N I_N}{4\pi} \int_0^\infty \{ \phi_{NN(\lambda)} e^{-\lambda z} + \psi_{NN(\lambda)} e^{\lambda z} \} \times J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 23)$$

上述の式中、未知関数は前述したような 4 種類の境界条件を用いて決定する。
未知関数が n 個あれば n 元の方程式で決定されることは自明である。

境界条件により求めた第一層目に関する未知関数 ($\phi_{11}, \dots, \phi_{1N}, \psi_{11}, \dots, \psi_{1N}$) を用い、地表面 ($z = -t$) の各独立電位 ($V_1 = V_{11}|_{z=-t}, \dots, V_N = V_{NN}|_{z=-t}$) を整理すると次式になる。

$$V_1 = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\alpha_{N1} e^{-\lambda t} + \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 24)$$

⋮

$$V_N = \frac{\rho_N I_N}{2\pi} (1 - k_1)(1 - k_2) \cdots (1 - k_{N-1}) \times \int_0^\infty \frac{e^{-2\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3 \cdot 25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha_{N1} &= \alpha_{N2} + \beta_{N2} k_1 e^{-2\lambda h_1} \\ \alpha_{N2} &= \alpha_{N3} + \beta_{N3} k_2 e^{-2\lambda h_2} \\ &\vdots \\ \beta_{N1} &= k_1 \alpha_{N2} + \beta_{N2} e^{-2\lambda h_1} \\ \beta_{N2} &= k_2 \alpha_{N3} + \beta_{N3} e^{-2\lambda h_2} \\ &\vdots \end{aligned}$$

以上により、N層大地における棒状電極が作る地表面の任意の点 x の電位 V_{xN} は次式のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 V_{xN} &= \int_0^{h_1} V_1 dt + \int_{h_1}^{H_2} V_2 dt + \cdots + \int_{H_{N-1}}^l V_N dt \\
 &= \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1-k_i) \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda t} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda dt \right] \quad (3 \cdot 26)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 H_s &= \sum_{i=1}^s h_i, \quad H_0=0, \quad H_N=l \\
 \alpha_{NN} &= 1, \quad \beta_{NN}=0
 \end{aligned}$$

3-2-5 電流の扱い

大地が均質かつ等方性である場合、棒状電極表面から大地へ流出する電流は均等であると仮定してきた。ところが多層構造の場合、大地抵抗率が地層によって異なってくるので、上述の仮定は成立しなくなる。しかし、電極表面の電界（E）が一定であると仮定すると $E = \rho \cdot i$ の関係から電流（ i ）は大地抵抗率（ ρ ）に逆比例すると考えることができる。

いま、各地層内において、棒状電極表面から流出する電流は近似的に均等であると仮定する。特に本論文の第5章で検討する棒状電極の並列接地抵抗を検討する際に、電極相互の離隔距離が非常に近接した場合、この仮定は重要な意味をもつものであるが、本論文においては電極長に対して離隔距離が非常に小さくなることは想定していない。したがって、上述したような仮定のもとで電流の扱いを検討するものである。

図3・4に示す水平N層モデルにおいて、第N層に存在する微小電流源を I_N 、その地層の大地抵抗率を ρ_N とおくと次の関係式を得る。

$$\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2 = \cdots = \rho_N I_N \quad (3 \cdot 27)$$

さらに、同図において、棒状電極に流れる電流を I 、各地層に存在する単位長さ

あたりの微小電流源と地層の厚さ h_N の関係を表すと次式になる。

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + \cdots + I_N (l - h_1 - h_2 \cdots h_{N-1}) = I \quad (3 \cdot 28)$$

(3・27)，(3・28) を解くことによって次式のように表される。

$$\rho_1 I_1 = \frac{I}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \quad (3 \cdot 29)$$

ここで，

$$H_{N-1} = \sum_{i=1}^{N-1} h_i$$

3-3 接地抵抗の計算式の導出

棒状電極の接地抵抗は電極に流入する電流と電極の地表面上の電位の比で表される。そこで， N 層大地における棒状電極の電位式(3・26)式と電流式(3・29)式を用いて接地抵抗計算式を導出する。(3・26)式において，電極の地表面上の電位は電極の半径を a としたとき， $x = a$ とすることによって求められる。また，同式において $\rho_1 I_1$ は電極に流出する電流 I を用いて表した(3・29)式を用いることができる。これらをまとめて整理すると，棒状電極(半径 a ，長さ l)の接地抵抗は大地パラメータ (ρ_i, h_i) を用いて表すと次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
R &= \frac{V_N(a)}{I} \\
&= \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_N} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1-k_i) \right. \\
&\quad \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda t} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\
&\quad \left. \times J_0(\lambda a) d\lambda dt \right] \quad (3 \cdot 30)
\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
H_s &= \sum_{i=1}^s h_i, \quad H_0=0, \quad H_N=l & k_i &= (\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i) \\
\alpha_{N1} &= \alpha_{N2} + \beta_{N2} k_1 e^{-2\lambda h_1} & \beta_{N1} &= k_1 \alpha_{N2} + \beta_{N2} e^{-2\lambda h_1} \\
\alpha_{N2} &= \alpha_{N3} + \beta_{N3} k_2 e^{-2\lambda h_2} & \beta_{N2} &= k_2 \alpha_{N3} + \beta_{N3} e^{-2\lambda h_2} \\
&\vdots & & \vdots \\
\alpha_{NN} &= 1 & \beta_{NN} &= 0
\end{aligned}$$

3-4 数値計算による検討

(3・30)式を計算するために、ベッセル関数を含む二重積分を有限区間はロンベルグ法、無限区間は二重指数形減衰の積分公式を用い、倍精度で行った。計算は本学情報処理センターの電算機を使用した。Tagg氏によって得られている二層大地の計算式を用いた結果と、(3・30)式を用いて計算した結果を比較すると、10⁻¹%のオーダーの誤差で一致をみた。そこで、本プログラムを用いて各種条件の場合の接地抵抗を計算し、多層大地における接地抵抗の特性を検討する。

接地抵抗 (R) と電極長 (l) の関係 (以下 $R-l$ 曲線という) について, 大地が多層で層状を成している場合, 棒状電極がそれらの地層に達したときに境界面で変曲点を生じることが言われている。また, 大地パラメータ (地層の厚さとその地層の大地抵抗率) との関係について, 上層に比べ下層の ρ が低い場合は接地抵抗の変化が大きいこと, 下層の ρ が高い場合は変化が小さいことなどが言われている。本節では, これらに含めて理論的に検討するものである。なお, 計算例において, 供試電極の半径は 0.03 m とする。

3-4-1 変曲点の存在

表3.2に示す大地パラメータを用いて $R-l$ 曲線を作成すると図3.5のようになる。均質大地, 二〜四層大地をモデルにしている。設定モデルでは地表面から 7.5 m ごとに地層の境界面を設けているが, 同図ではその境界面において変曲点が存在していることが確認できる。なお, 曲線の傾きは近接している地層の ρ の大小に関係するものである。実際の大地においては, 地層が層状を成しているても, 近接している地層の ρ が極端な値であることはまれであり, 変曲点を明確に認識できるデータを得ることは数少ないようである。

表3.2 大地パラメータ

地層の数	大地抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}$)				曲線
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
1	10^4				A
2	10^4	10^3			B
3	10^4	10^3	10^2		C
4	10^4	10^3	10^2	10	D

$$h_1 = h_2 = h_3 = 7.5\text{ m}$$

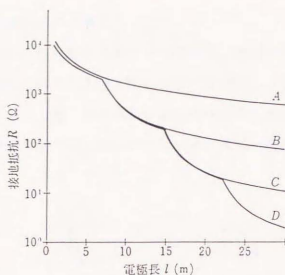


図 3. 5 接地抵抗の変曲点

3-4-2 上層と下層の大地抵抗率の影響

二層大地モデルにおいて、地層の厚さを 15 m とし、上層の ρ_1 を $1000 \Omega \cdot \text{m}$ としたとき、下層の ρ_2 を変化させた場合の $R-l$ 曲線を見ると図 3. 6 のようになる。前述したように、 ρ_1 に比べ ρ_2 が低い場合、接地抵抗は変曲点から急激に減少し、その傾きも大きい。逆に ρ_2 が高い場合は変曲点もはっきりつかめず接地抵抗の減少の割合も小さい。

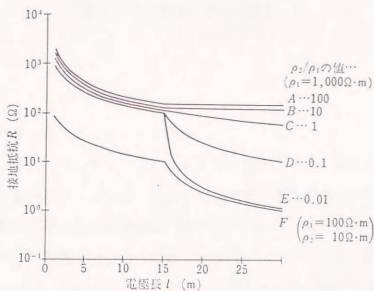


図 3. 6 大地抵抗率の影響

3-4-3 地層の厚さの影響

五層大地モデルにおいて各地層の ρ は同値で、地層の厚さを変化させた場合のR- ℓ 曲線を見ると図3. 7のようになる。 ρ の低い地層が厚ければ接地抵抗の低減の割合は大きくなる。各地層の ρ の組合せが同じ場合、電極が最下層まで到達したとき地層の厚さの違いにもかかわらず、接地抵抗はほぼ同じ値に収束する。

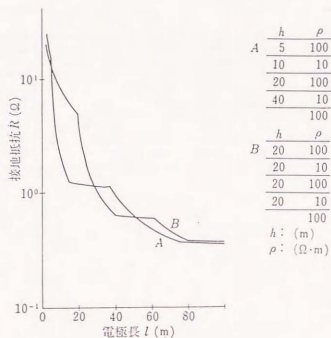


図3. 7 地層の厚さの影響

3-4-4 五層大地モデルのR- ℓ 曲線

大地パラメータのうち、表3. 3に示すように地層の厚さを固定し、各地層の ρ を変化させた場合のR- ℓ 曲線を作成すると図3. 8のようになる。図中のE、Bをみると、第五層目の ρ が第四層目に比べて高いため、接地抵抗の低減の割合が小さい。Eのほうが若干ではあるが高目に出ているが、これは上層部の ρ が高いことの影響である。Cについては下層になるほど ρ が高い場合であり、従って接地抵抗があまり減少していない。それに対してDは下層の ρ が低い場合であり、

接地抵抗は急激な減少の傾向を呈している。E, Fについて、第二層目までの大地パラメータは同じであるため、R- l 曲線の様相も似ているが、三層目からの ρ の大小によってその様相は大きく変わってきている。

表 3. 3 五層大地のパラメータ

地 層	地層の厚さ (m)	大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)					
		A	B	C	D	E	F
第一層	5	10	100	10	1,000	500	500
第二層	10	100	10	50	500	50	50
第三層	20	10	100	100	100	100	1,000
第四層	40	100	10	500	50	10	100
第五層		10	100	1,000	10	100	10

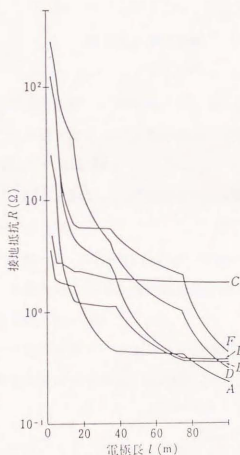


図 3. 8 五層大地における接地抵抗

本章では、水平多層大地における棒状電極の接地抵抗の計算式を得るための導出過程を主に述べ、若干の数値例による検討を行い、多層問題に対する棒状電極の接地抵抗の挙動を把握することができた。更に、本章で示した手法を応用して、電気検層データを用いた接地抵抗の計算やR- ρ 曲線法による大地パラメータの推定などを検討することができた。

本章で導出した計算式を用いることによって、所要の接地抵抗を得るための、例えばボーリング工法においてはボーリング深埋電極の長さを、深打工法においては接地棒の長さを予測することが可能になり、接地設計の一部に寄与できると思われる。

第3章の参考文献

- (1) 高橋：「接地技術の動向」，電学誌，106，69（昭61-4）
- (2) 高橋，川瀬：「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」
電学論 B，108，5（昭63-5）
- (3) 高橋，川瀬：「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電学論 B，108，8（昭63-8）
- (4) G.F.Tagg：「Earth Resistance」George Newnes Ltd.（1964）
- (5) 川瀬，他：「多層大地における接地抵抗の計算について」
昭60電気学会全大，No.1084
- (6) 高橋，川瀬：「電気検層データを用いた接地抵抗の予測計算」
昭60電気関係学会関東支部連大，No.1H3

第4章 ボーリング深埋電極による接地抵抗の実測とその評価

4-1 まえがき

棒状電極によって接地抵抗の低減をはかる方法としては、多数の電極を並列に接続して用いる並列接地工法あるいは1極の電極を地中深く打込む深打接地工法がある。接地施工のための敷地が制限されている場合、並列接地工法では電極間隔が狭くなり接地抵抗の低減効果が薄らぎ不適であり、後者の深打接地工法が有効な手段である。

接地抵抗は、周知のように、大地抵抗率と接地電極の物理的寸法の関数として表される。つまり、大地抵抗率に比例し、物理的寸法に逆比例するわけである。特に大地抵抗率が高い地域において、所要接地抵抗を得るためには電極寸法、棒状電極の場合は電極長を大きくする必要がある。関東ローム層等においては市販の接地棒を連結しても容易に深打接地工法が可能である。しかし、 N 値(土の硬さを表す指標値)の大きい大地に対しては、この工法にも限界が生じる。その場合は大地を削孔して、その孔に接地電極を埋設する、いわゆるボーリング深埋電極が有用である。

そこで、大地抵抗率が高く、接地施工のための敷地が制限されているという条件のもとで所要接地抵抗を得るためにはボーリング深埋電極による接地工法の実用化が望まれる。しかし、この工法は工費、工期の面で大掛りとなるため、接地設計の段階で正確な接地抵抗の予測が必要不可欠である。

接地抵抗の計算は、従来から大地を均質地層とみなした考え方で実行されてきたが、第3章に述べているように多層大地に対応した棒状電極の接地抵抗計算のための解析解が導出され、多層接地抵抗を計算することが可能になってきている。この多層接地抵抗計算を実行するためには大地パラメータ(地層の厚さとその地層の大地抵抗率)が必要になるが、第2章に示したように多層大地に対応したみかけの大地抵抗率の解析解も得られており、大地パラメータの推定も可能になってきている。これらの2つの解析結果は多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗

を計算する際に必要な基本的知見を与えるものである。しかし、第3章の内容は解析解の導出と数値例による接地抵抗の検討を主体としており、実測データとの検証が大きな関心事である。

本章では大地抵抗率が高く、接地施工のための敷地が狭いという条件を課せられた場所における接地工法としてのボーリング深埋電極の実用化実験を行い、この実験結果とその評価について述べる。この評価の中では実測データをもとに、従来から行われている均質地層とみなした接地抵抗の計算および多層を考慮した場合の接地抵抗の計算結果を検証している。さらに、実際の接地設計に寄与するための接地抵抗予測の基本的条件についても検討している。

4-2 実験の概要

ボーリング深埋電極によるフィールド実験は、東京電力株式会社の協力のもとで行ったものである。本節では実験に係わる概要について述べることにする。

4-2-1 実験場所の選定

実験場所は関東地方の栃木県下で5箇所、群馬県下で4箇所、合計9箇所を選んだ。いずれも洪積台地、溶岩台地と称される地帯であり、地質的には凝灰岩、安山岩、火山砂れきの地層をもつ大地抵抗率が高い地帯である。今回の実験はボーリング深埋電極が1極の場合であり、接地抵抗測定のためのエリアも比較的容易に確保することができる。そのため、大地構造も水平地層に近い場所を選ぶことができた。周知のように大地が水平地層であることの確認は $\rho-a$ 曲線のデータを東西南北の2方向について採取し、これらのデータが同値であれば、それは水平地層とみなすことができる。この作業を行い、水平地層であることを確認して図4.1に示す9箇所を実験場所として選定した。



図4.1 実験場所

4-2-2 ボーリング深埋電極の説明

大地に鉛直方向に埋設する棒状電極のなかで最も規模の大きいものがボーリング深埋電極である。これはボーリング機で削孔し、その中にパイプ状の接地電極を埋設するもので、大規模になると300～500mの電極長にもなる。本実験では電極長に対する接地抵抗の変化をみるのが主目的であるため、ボーリングロッド（鋼管）を接地電極とみなすことにした。鋼管の半径は0.033mで1本あたり3mである。これを連結して深埋電極を構成するものである。

4-2-3 大地抵抗率の測定

実験場所を選定するために大地抵抗率を測定したがもうひとつの目的は $\rho-a$ 曲線をもとにした地層別の大地パラメータを推定するためのデータを得ることである。本実験で用いた測定手法はウェンナーの四電極による方法である。測定器は一般的に用いられる大地比抵抗測定器（YEW3244）である。前述したようにボーリング深埋電極が1極であるため、エリアは比較的に小さくて済み、電極間隔（ a ）を最大120mとした。

4-2-4 接地抵抗の測定

ボーリング深埋電極の接地抵抗 (R) と電極長 (l) の関係を表す $R-l$ 曲線データを採るためには接地抵抗を精度良く測定する必要がある。そこで、本実験では図4. 2に示す回路を用いて電位降下法による測定を実施した。電極長が最大100m程度になることを予想して、電流補助極を約400m、電位補助極を電流補助極と反対方向にして被測定電極から約400mの地点に設けた。測定のための回路電流は10A程度とした。

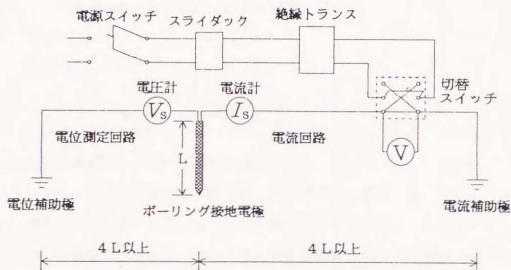


図4. 2 接地抵抗の測定回路

図4. 2の測定回路において、

I_s : 電流回路の接地電流 (A)

V_s : デジタル電圧計の読み (V)

とすると、接地抵抗 R は、

$$R = \frac{V_s}{I_s}$$

となるが、電圧回路に対する誘起電圧の影響および接地電流その他による大地浮遊電位の影響に基づく誤差を除くため、接地系の電位上昇の真値 V_{s0} を次式により求める。

$$V_{s0} = \sqrt{\frac{(V_{s1}^2 + V_{s2}^2) - 2 \times V_0}{2}}$$

ここで、 V_{s1} ：測定時のデジタル電圧計の読み(V)

V_{s2} ：電流の極性を逆転した時のデジタル電圧計の読み(V)

V_0 ：電流回路の接地電流 $I_s = 0$ におけるデジタル電圧計の読み(V)

したがって、真の接地抵抗値 R は次式により算出する。

$$R = \frac{V_{s0}}{I_s}$$

ボーリングロッド削孔時にボーリングロッドを被測定電極として、埋設深さ 3 m 毎に接地抵抗を測定し、 $R-l$ 曲線を作成した。

ボーリングロッドは当然のことながらボーリング機と一体化になっている。そのため、接地抵抗を測定する際にボーリング機自体も測定対象になる懸念が生じる。そこで、本実験では特にボーリング機と大地を絶縁するために基礎台に絶縁ゴムシートを巻きつけ、絶縁を強化した。この加工を施したため、ボーリング削孔時に連続してすみやかに埋設深さ 3 m 毎の接地抵抗を測定することができた。

4-3 接地抵抗の計算式

従来から行われている均質地層大地とみなした場合と本論文で示している多層大地とみなした場合の接地抵抗計算式を以下に示す。

4-3-1 均質地層大地とした場合の接地抵抗

この接地抵抗の計算を行うためには多層を均質地層とみなした場合の大地抵抗率が必要である。そこで、この大地抵抗率の求め方と接地抵抗計算式を示すことにする。

(1) 等価大地抵抗率の算定

接地抵抗は周知のように大地抵抗率と電極寸法の関数になっている。この接地抵抗を計算するためには大地抵抗率を導入する必要があるが、均質地層大地に対応した接地抵抗計算式に対しては地層別の大地パラメータではなく、平均的あるいは等価的な大地抵抗率が用いられている。本論文においては、大矢氏らの論文で用いていると同じ手法で等価大地抵抗率を算定し、それを用いることにする。

地層別の大地パラメータ (h_i, ρ_i) があつたとき電極が埋設されている深さ (l) までの等価大地抵抗率 ρ_a は次式で求められる。⁽³⁾

$$\rho_a = \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{h_{n-1}}{\rho_n}} \quad (4 \cdot 1)$$

本章の4-4で解析する地層別の大地パラメータ (表4.2) を用い、等価大地抵抗率を算定した結果を表4.1に示す。

表4. 1 等価大地抵抗率の算出

場 所	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
等価大地抵抗率 $\rho_s (\Omega \cdot m)$	958	537	728	600	4450

場 所	G 1	G 2	G 3	G 4
等価大地抵抗率 $\rho_s (\Omega \cdot m)$	4926	5178	7157	2758

(2) 等価大地抵抗率を用いた多層接地抵抗の計算

均質地層大地に対応した接地抵抗計算式は回転円筒電極における計算式が基本になっている。この式は Tagg 氏のそれと同形である。本論文においては、棒状接地電極（半径 r ，長さ ℓ [m]）が等価大地抵抗率（ ρ_s [Ω・m]）の大地に埋設されている場合の接地抵抗（ R ）を計算するのに次式を用いることにする。

$$R = \frac{\rho_s}{2\pi\ell} \ln \frac{2\ell}{r} \quad (4 \cdot 2)$$

4-3-2 層別大地パラメータを用いた多層接地抵抗の計算

ρ - α 曲線から推定した大地パラメータを直接的に対応させるには接地抵抗計算式も多層大地を考慮したものではない。棒状接地電極（半径 r ，長さ ℓ ，[m]）が大地パラメータ（ h_i ， ρ_i ）をもつ多層大地に埋設されている場合の接地抵抗（ R ）は既に第3章で解析したように次式で計算することができる。

$$R = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \right. \\ \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda t} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\ \left. \times J_0(\lambda a) d\lambda dt \right] \quad (4 \cdot 3)$$

(4・3)式の導出および妥当性の検討は既に第3章で詳述している。(4・3)式を計算するためには種々の数値計算を行う必要があるが、本章における数値計算は第3章で得られている計算プログラムを用いて接地抵抗の計算を実行した。

4-4 ρ -a 曲線の実測と大地パラメータの推定

ウェンナーの四電極法によって得られた大地抵抗率と電極間隔をもとに ρ -a 曲線を作成した。実験場所毎に図4・3にまとめて示す。同図をみると、栃木県下のT1～T4でも大地抵抗率が最大 $10^3 \Omega \cdot m$ 前後であり、高い値である。ところが栃木県のT5、群馬県のG1～G4はそれよりも1桁大きい値を呈しており、高大地抵抗率地帯であることがわかる。

図4・3にプロットした ρ -a 曲線の実測値をもとに大地パラメータを推定するために第2章で検討した多層大地に適応した標準曲線をもとに照合法によって行うことにした。具体的には、第2章の2-3で詳述しているように任意の地層に適応した ρ -a 曲線をデータベース化した標準曲線を用いている。プロットした実測値にあてはまるまでデータ(大地パラメータ)の入力を繰り返し、そのときの見掛けの大地抵抗率をコンピュータによって計算してCRT画面で照合する方法である。この作業は多少の経験が必要とするが、データベース化した標準曲線によって半自動的に作業を行うことができる。この手法によって従来の二層標準解析曲線を用いた手作業による照合法に比べ五層～七層程度までの大地パラメータを推定することができる。推定した大地パラメータを表4・2に示す。

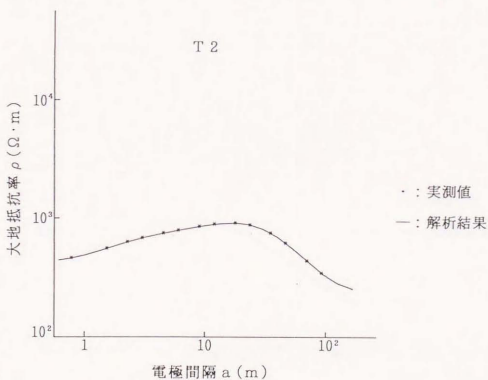
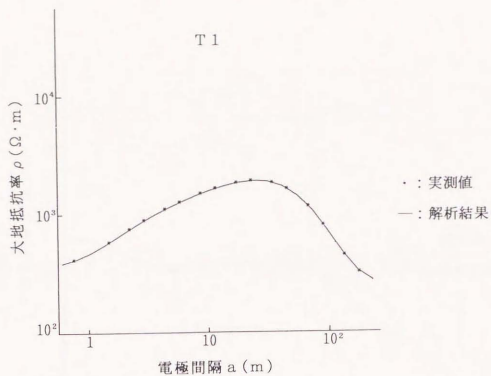


図4.3 $\rho - a$ 曲線の測定結果 (T 1, T 2)

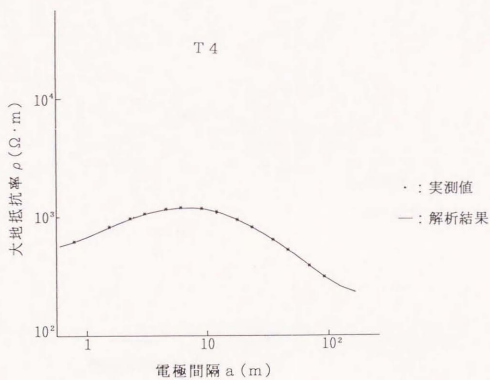
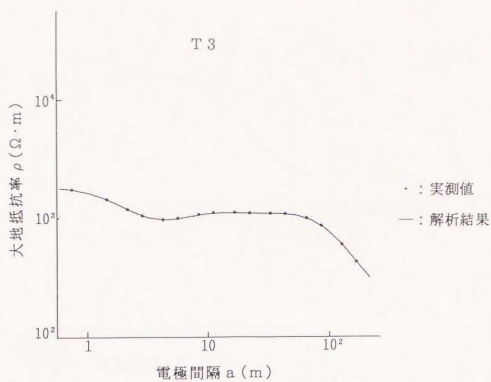


図4. 3 $\rho - a$ 曲線の測定結果 (T 3, T 4)

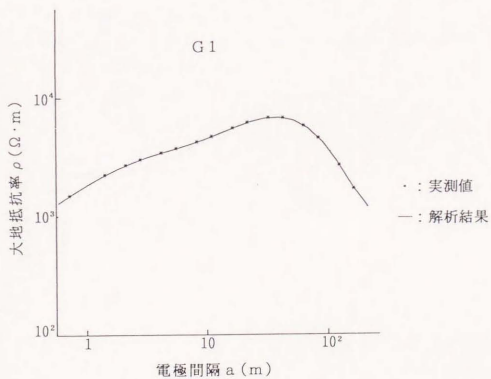
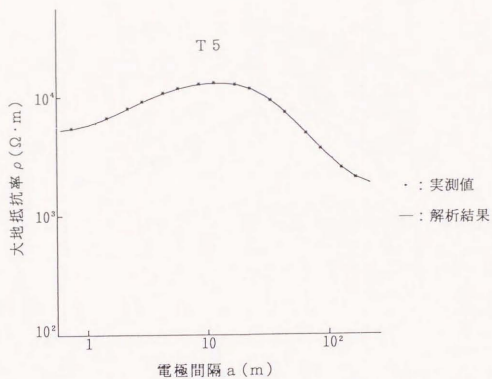


図4. 3 $\rho - a$ 曲線の測定結果 (T 5, G 1)

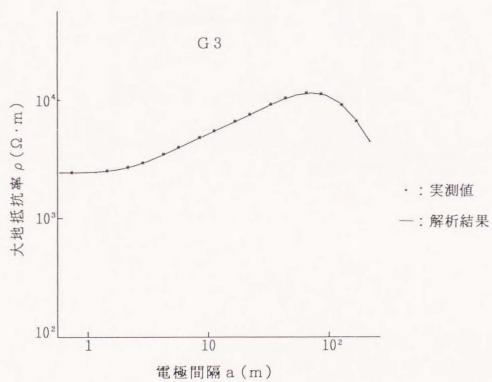
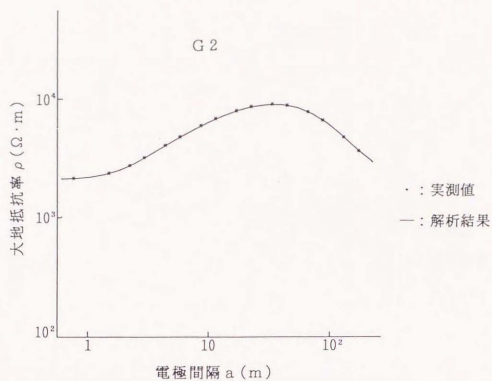


図4. 3 $\rho - a$ 曲線の測定結果 (G 2, G 3)

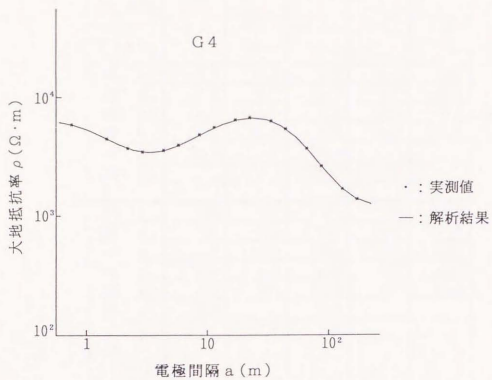


図4. 3 $\rho - a$ 曲線の測定結果 (G 4)

表4. 2 推定した大地パラメータ

場所 地層パラメータ		場所				
		T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
地層の厚さ (m)	h_1	0.8	0.7	1.0	0.6	1.0
	h_2	6.0	5.0	2.0	6.0	16.0
	h_3	14.0	11.0	7.0	14.0	27.0
	h_4	12.0	21.0	8.0	20.0	29.0
	h_5	23.0		23.0		
	h_6			45.0		
地層の大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)	ρ_1	360	370	1730	520	5210
	ρ_2	1730	710	690	1380	15700
	ρ_3	2710	1090	1420	700	5240
	ρ_4	1640	410	590	470	2870
	ρ_5	570	200	1920	200	1750
	ρ_6	230		530		
	ρ_7			190		

場所 地層パラメータ		場所			
		G 1	G 2	G 3	G 4
地層の厚さ (m)	h_1	0.3	1.8	2.4	0.7
	h_2	7.0	8.0	10.0	3.0
	h_3	22.0	15.0	17.0	14.0
	h_4	19.0	8.0	10.0	13.0
	h_5	11.0	25.0	14.0	25.0
	h_6		23.0	15.0	
地層の大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)	ρ_1	1530	2080	2530	6410
	ρ_2	3950	8820	6880	2720
	ρ_3	10800	11700	12300	11200
	ρ_4	6350	5880	7250	3120
	ρ_5	2300	7420	11480	1840
	ρ_6	810	3630	4720	1070
	ρ_7		1910	1030	

4-5 接地抵抗の実測と評価

4-5-1 R- ℓ 曲線

電極長 (ℓ) と接地抵抗の関係を R- ℓ 曲線に表現してみた。実験場所毎にそれぞれ図 4. 4 にまとめて示す。同図には実測データ、均質地層に対応した接地抵抗計算式 ((4・2) 式に既出)、多層に対応した接地抵抗計算式 ((4・3) 式に既出) を用いた接地抵抗値を合わせて示している。R- ℓ 曲線は片対数のグラフにプロットしている。

均質地層に対応した計算式による R- ℓ 曲線は単に ℓ の関数のみになっており、漸次減少の傾向を呈しており、変曲点には存在していない。ちなみに、この場合の大地抵抗率は等価大地抵抗率 (表 4. 1 に既出) を用いている。

それに対して、多層に対応した計算式による R- ℓ 曲線は大地パラメータ (表 4. 2 に既出) の影響を受け、変曲点が存在し、なおかつ地層の厚さ h 、大地抵抗率 ρ の値の違いにより R- ℓ 曲線の傾きも変っている。実験場所毎に 9 ケースを示したが、全体的にみて、実測データと多層に対応した計算結果が良好な一致をみている。それに対して、均質地層に対応した計算結果は、ある電極長の範囲では一致しているケースもあるが、相当の違いを呈しているケースもある。これらの違いは大地パラメータである h 、 ρ のそれぞれの値の相違によるものである。ここで、電極長が短い場合に、多層接地抵抗計算結果と実測データに若干のひらきが生じてくるケースもあるが、この理由としてはボーリング掘削時の水処理の問題がある。周知のように掘削する場合、外壁の保護およびボーリングヘッドの掘削時の摩擦熱を放散するためにペンナイト溶液を循環させるわけであるが、通常は地表面に水が漏れてしまい、その付近の大地抵抗率を低くしてしまう。そのために、実測値は小さくなる。ちなみに、計算で使用する大地パラメータはボーリング掘削前のデータであり、このために若干の差異が生じるわけである。

栃木県那須町

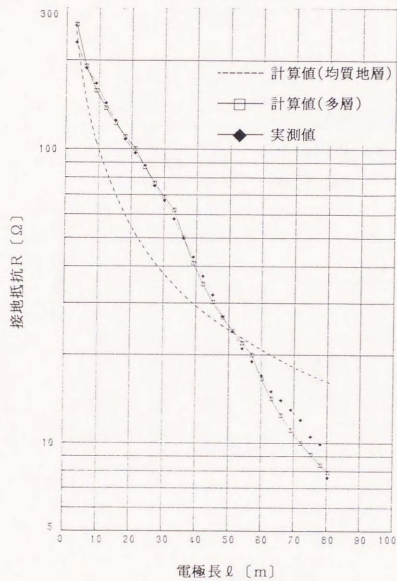


図4.4 R- l 曲線 (T1)

栃木県西那須野町

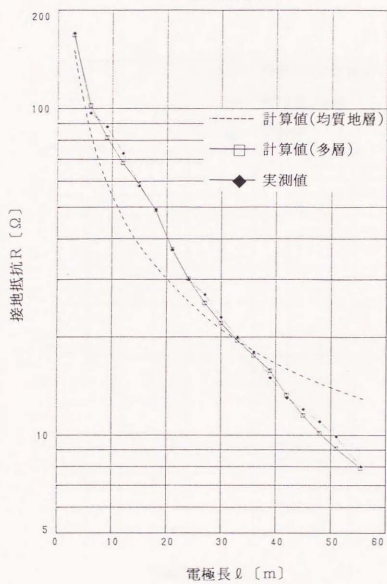


図4.4 R- l 曲線 (T2)

新不具藤原司

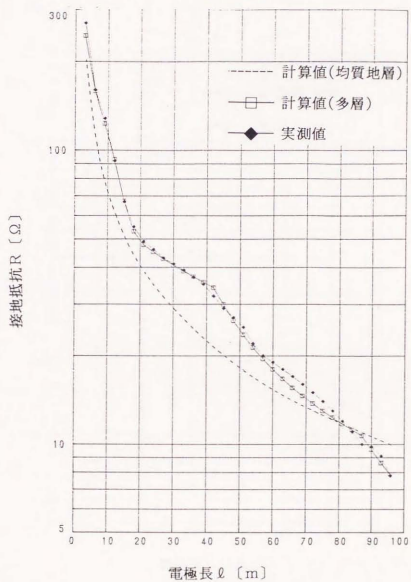


図4. 4 $R-l$ 曲線 (T3)

栃木県足尾町

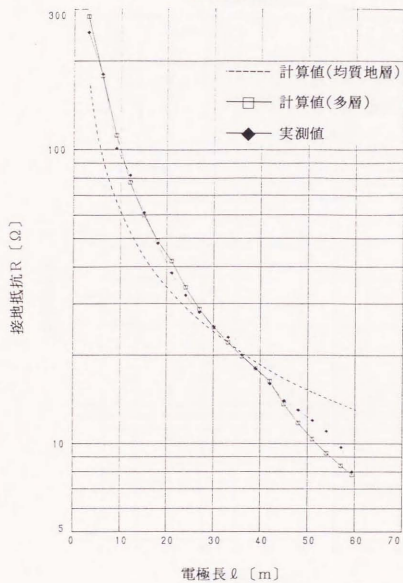


図4. 4 $R-l$ 曲線 (T4)

栃木県日光市

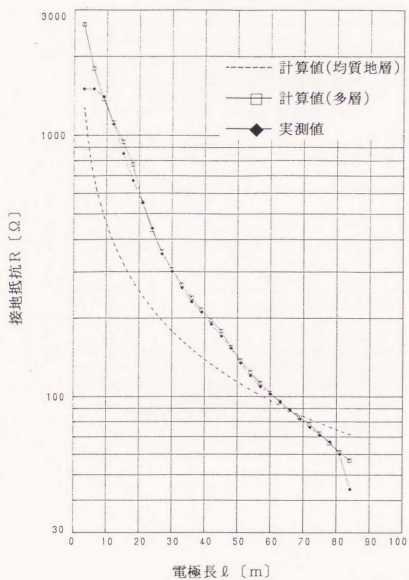


図4.4 R- l 曲線 (T5)

群馬県吾妻郡嬬恋町

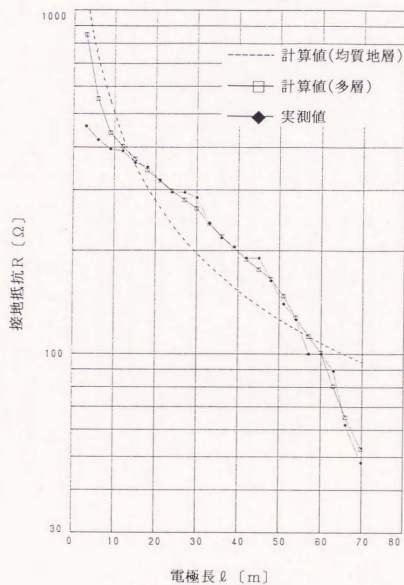


図4.4 R- l 曲線 (G1)

群馬県水上町

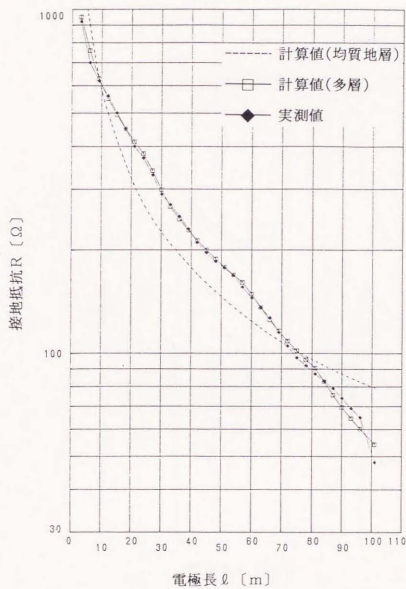


図4.4 R-l 曲線 (G2)

群馬県勢多郡宮城村

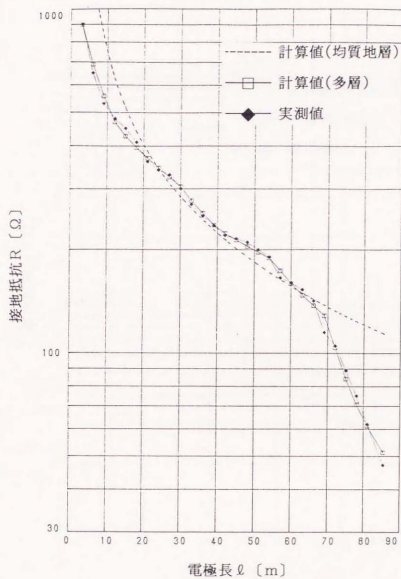
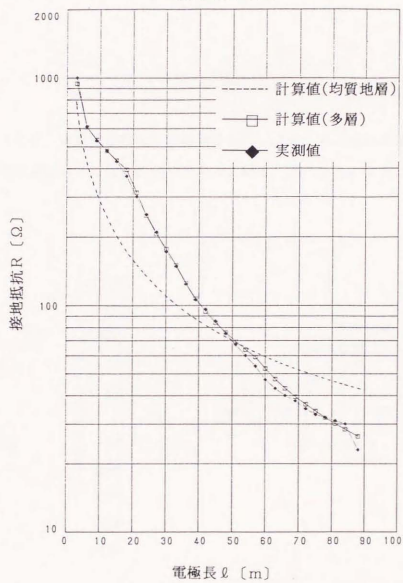


図4.4 $R-l$ 曲線 (G3)

図4.4 R- l 曲線 (G4)

4-5-2 接地抵抗の近似誤差率

既に図4.4に示した $R-l$ 曲線において、実測データに対して、均質地層および多層に対応した接地抵抗計算結果がどの程度の誤差をもつかを検討するために近似誤差率 ε を用いて評価してみる。

接地抵抗の実測データを R_0 、計算値を R としたとき、近似誤差率 ε を次式で算定する。

$$\varepsilon = \frac{R_0 - R}{R_0} \times 100 \quad (\%) \quad (4.4)$$

図4.4に示した接地抵抗の計算結果をもとに(4.4)式により近似誤差率を求め、電極長に対する近似誤差率をみると図4.5のようになる。

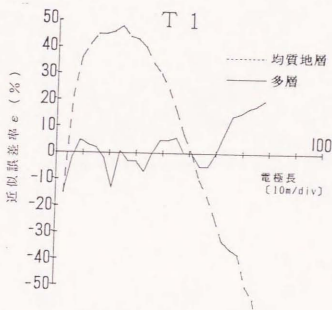


図4.5 接地抵抗の近似誤差率(T1)

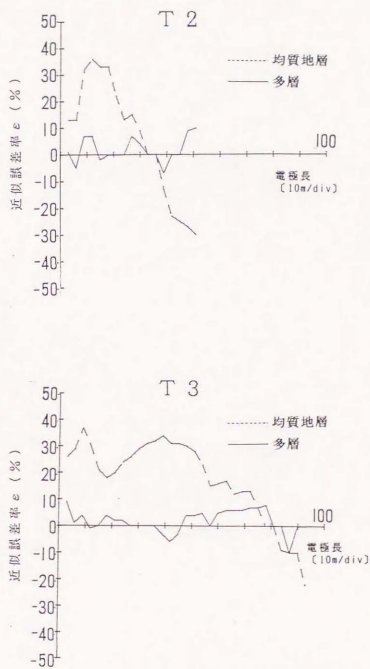


図4. 5 接地抵抗の近似誤差率 (T 2, T 3)

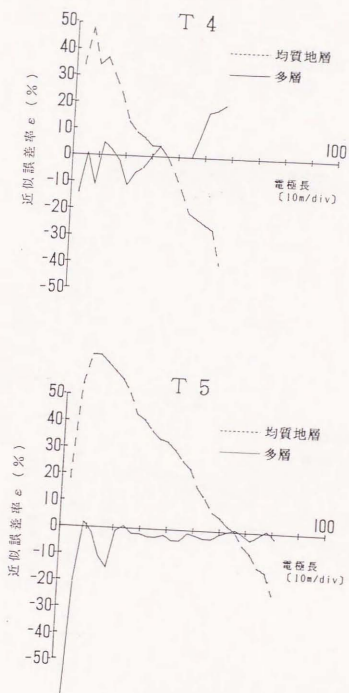


図4. 5 接地抵抗の近似誤差率 (T4, T5)

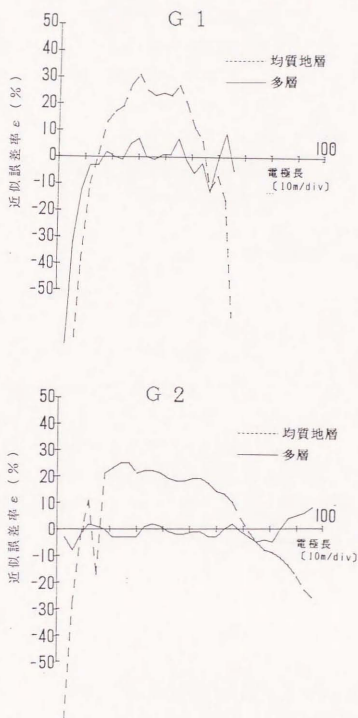


図4. 5 接地抵抗の近似誤差率 (G1, G2)

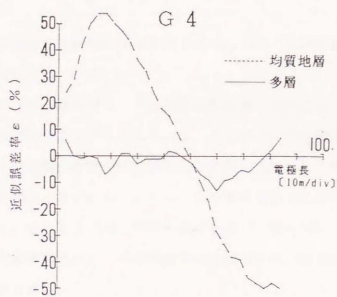
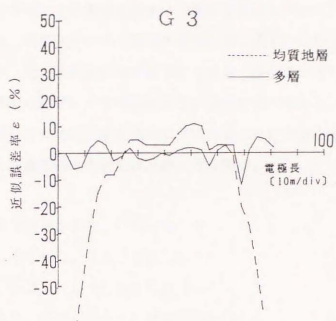


図4. 5 接地抵抗の近似誤差率 (G 3, G 4)

大地構造、つまり大地パラメータによって異なるが、多層に対応した接地抵抗計算式による結果は実測データに対応して近似誤差率は±10%の範囲にある。

しかし、均質地層に対応した計算結果は大きな誤差率を呈している。

多層大地において、隣接している下層の大地抵抗率が高くなる場合、つまり反射率が正の場合をU、逆に大地抵抗率が低くなる場合（反射率が負）をDとしたとき地層の大地抵抗率の影響による近似誤差率の様相を調べてみる。ここで、UあるいはDは第一層目の大地抵抗率を基準にして表すことにする。表4、2より各実験場所における大地抵抗率の変化は次のようになる。

T1:UUDDDD, T2:UUDD,
T3:DUDUDD, T4:UUDD
T5:UUDD, G1:UUDDDD,
G2:UUDDDD, G3:UUUDDD
G4:DUDDDD

これらを見ると、中間層で大地抵抗率の高低はあるものの、下層になるに従って大地抵抗率は漸次低くなっている。

T4, T5, G4（第一層目は0.7mであるため省いて考える）の大地構造は、大地抵抗率の値は異なるが、良く似ている。このような大地構造において、均質地層に対応した接地抵抗計算値は、図4.5に示したように、電極長が長くなるに従い近似誤差率は小さくなる。しかし、ある電極長以上になると再び誤差が大きくなる傾向を示す。T1, G1も第一層目を省いて考えれば、T4, T5, G4と同じような大地構造であり、近似誤差率の様相も前述と同じ傾向を示す。G2, T2もしかりである。

このように、D→Dの大地構造の場合は均質地層に対応した接地抵抗計算式を用いても、ある電極長の範囲であれば誤差率は小さくなる。しかし、設計の段階で明確に把握することは不可能である。

4-6 接地抵抗予測の基本的要件

通常の連結式接地棒も打込めないようなN値の大きい場所において、接地施工を行うにはボーリング深埋電極に頼らざるを得ない場合が多い。今回の実験は大地抵抗率の高い地域を選び、ボーリング深埋電極による接地工法の実用化を目的として行った。その結果、実測データと多層大地を考慮した接地抵抗計算式による値の良好な一致をみた。接地抵抗の予測を行う場合に、許容誤差を $\pm 10\%$ 程度にした場合、多層接地抵抗計算式は充分に実用に供することを、数例ではあるが確認した。

そこで、ボーリング深埋電極を用いる接地設計において、接地抵抗予測のための基本的条件を示すことにする。

(1) 大地パラメータの把握

多層接地抵抗計算を実行するために必要な入力データであり、できるだけ精度良く $\rho-a$ 曲線を作成し、それをもとに大地パラメータを推定する必要がある。電極長にも依るが、本実験で試みたように100m程度の電極長の場合はウェナーの四電極法の電極間隔を100m程度にすれば充分である。

(2) 多層接地抵抗計算式の採用

第3章で検討した計算プログラムは大型計算機に適用したものであるが、近年のマイコンの発達により汎用性をもたせるため、例えばPCフォートランを用いたプログラムでマイコンで計算可能になった。計算時間は3倍程度になるが計算精度は全く支障がない。ちなみに、単位長あたりの接地抵抗を計算するのにマイコンで約10分かかる。

図4.5に示したように、接地抵抗の近似誤差率が正の場合は接地設計の観点からは安全サイドになるが、経済的にはマイナスである。逆に、誤差率が負の場合は設計電極長で所要接地抵抗が得られない場合も生じ、危険である。均質地層に対応した計算では上述のケースが多くみられる。しかし、多層接地抵抗計算式では充分に実用に供している。

多層大地を考慮したボーリング深埋電極の接地抵抗について、実験を行い種々の考察を試みた。本研究の目的はボーリング深埋電極の実用化をはかること、接地設計における接地抵抗予測の高精度化をはかることであつた。以上に述べたように大地抵抗率が高く、接地施工のための敷地が限定されている条件のもとでのボーリング深埋電極は有用であり、その接地抵抗の予測も多層接地抵抗計算式を採用することで充分に対処することができることを明らかにした。

第4章の参考文献

- (1) 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」
電学論 B, 108, 5 (昭63-5)
- (2) 高橋, 川瀬: 「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電学論 B, 108, 8 (昭63-8)
- (3) 大矢, 他: 「多電極並列接地による接地抵抗の低減化」
電学論 B, 106, 10 (昭61-10)
- (4) G.F.Tag: 「Earth Resistance」 Georg Newnes Ltd. (1964)

第5章 棒状電極の並列接地抵抗の解析

5-1 まえがき

大容量送電（例えば，UHV）に伴う変電所や開閉所の接地設計を行うとき，GISなどの設備のコンパクト化が進んで接地施工エリアが縮小される傾向にあること，更に大容量のため接地系に流れる想定地絡電流が大きくなり，所要接地抵抗が $10^{-1}\Omega$ 以下の値を要求されることなどの問題点を解決しなければならない場合がある。

建設地の大地抵抗率が高く，施工エリアが制限され，小さな接地抵抗を要求されるなどの制約条件がある場合，従来から行われてる接地工法（例えば，メッシュ接地）では不十分な場合がある。

接地抵抗を低減するには，低減剤による土壌の化学的処理をする方法，あるいは接地極の物理的寸法を大きくするという考え方があるが，一般的には後者の方法を採用している。接地極は水平方向に布設するメッシュ電極，棒状電極などと鉛直方向に埋設する棒状電極の二つの形態がある。上述した三つの制約条件がある場合は，接地極を鉛直方向に施工する深埋設工法が有効である。更に，より低い接地抵抗を得るためには棒状電極（本論文ではボーリング電極）を深埋設し，それを多数極並列に接続する並列接地の方法もある。棒状電極の並列接地抵抗の計算法は，Sunde氏，Tagg氏らによって基本的な検討が行われている。これらの検討例は大地を均質地層と仮定した場合である。一般に大地は多層構造を成しており，並列接地抵抗の計算でも多層問題を導入して検討する必要がある。

多層構造大地における棒状電極の接地抵抗に関して，第3章では接地抵抗計算式の解析，第2章では接地抵抗計算式に適用するための大地パラメータの解析および推定法などを検討してきた。これら一連の検討は棒状電極一本の場合である。

多層問題として，棒状電極の並列接地抵抗を検討するには電位の重畳の概念を導入して行うことが考えられる。それには，多層大地における電位を求めるための計算式を導出する必要がある。第3章に示した接地抵抗計算式を導出する過程

において、電位計算の解析解の一部が得られている。そこで、それを応用することにより多層大地の棒状電極の電位が計算でき、ひいては並列接地抵抗の計算も可能になる。

本章では、多層大地における棒状電極の並列接地抵抗の計算式を検討して、任意の地層や電極配置パターンにおける並列接地抵抗の解析解を示すものである。更に、多層大地モデルを設定し、電極配置パターン、電極長による並列接地抵抗や集合係数などの並列接地のもつ特徴について、数値計算例によって検討した結果を述べる。

5-2 並列接地抵抗の計算式

5-2-1 並列接地の説明

同一形状、寸法の電極を複数個集合させ、それらを連結線で並列に接続することとを並列接地という（図5.1）。一個の電極の接地抵抗を R としたとき、 Z 個並列にした場合の合成接地抵抗、いわゆる並列接地抵抗 R_0 は次式に従う。

$$R_0 = \eta \frac{R}{Z} \quad (5.1)$$

ここで、 η は並列接地の効果を表す指標となる係数で集合係数と呼ばれている。

並列接地の特徴は電極間の距離の大小によって合成接地抵抗の低減の様相が異なることである。つまり、電極長 l と電極間距離 S の比を $\alpha (= S/l)$ としたとき、 l を固定した場合、 α が小さくなると電極から流出する接地電流の通路が狭くなり、電極の相互干渉により電流線が密になる。一方、電極の電位分布の観点からいうと、 α が小さくなるに従って電位の重畳の度合が大きくなる。これらの理由で、合成接地抵抗の低減が悪くなるとされている。

集合係数は α の関数として表され、常に1より大きな値をもつものである。例えば、ある一定の長さの電極を無限大の分離距離で並列接地をした場合、電極の相互干渉は無視でき、電位の重畳が零になるため集合係数は限りなく1に近づく。

しかし、現実には有限の距離であるため1よりも大きな値となる。

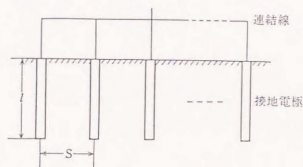


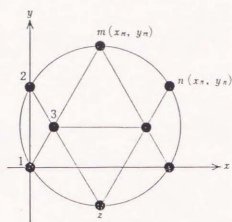
図5. 1 棒状電極の並列接地

5-2-2 計算式の導出

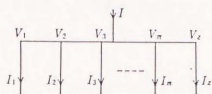
いま、均質地層大地における図5. 2のような並列接地モデルを設定する。接地電極の頂部における電位はすべて等電位とし、各々の電極には電位を等しくするような異なった電流が流入するものと仮定する。

任意形状の接地電極に電流 I が流入したときに生じる電位 V_x は接地電流値、大地抵抗率 ρ 、電極寸法および電極からの地表面距離 x [$F(x)$] などの関数として表され、一般には次の概念式で示される。

$$V_x \equiv \rho F(x) I \quad (5 \cdot 2)$$



(a) 電極配置



(b) 電極電位・電流の表現

図5.2 並列接地モデル

図5.2に示したように Z 本の棒状電極があるパターンで配置されている場合を考える。便宜上、電極に1～ Z の電極番号を付け、1番目の電極を基準〔座標は $(0, 0)$ 〕として、各電極に (x_j, y_j) の相対座標を与える。いま、 n 番目の電極に I_n の電流が流入したとき、この電極から地表面距離 S にある m 番目の電極の電位上昇 V は、(5・2)式の考え方と同様に次のように示される。

$$V \equiv \rho F(S) I \quad (5 \cdot 3)$$

ここで、

$$S = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}$$

接地抵抗 R をもつ m 番目の電極の電位上昇は、自極の電位上昇と他極の電流によって生じる電位上昇の総和で示される。

$$V_m = \sum_{j=1}^{m-1} \rho F(S_{mj}) I_j + \rho R_f I_m + \sum_{j=m+1}^{\infty} \rho F(S_{mj}) I_j \quad (5 \cdot 4)$$

ただし、 S_{mj} は電極間距離 $\sqrt{(x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2}$ は電極 j の相対座標である。また、 R_f は接地抵抗計算式の形状項であり、 $R_f = R / \rho$ の関係にある。

(5・4)式において、第2項は自極の電位を表し、第1、第3項は他極の影響によって生じる電位である。この式をマトリックス表示にすると、

$$V = \rho F I \quad (5 \cdot 5)$$

ただし、

$$V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_z \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_z \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} R_f, & F(S_{12}), & \dots & F(S_{1z}) \\ F(S_{21}), & R_f & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ F(S_{z1}), & \dots & \dots & R_f \end{pmatrix}$$

並列接地においては、すべての電極の電位が等電位であると仮定しているので、

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_z = V$$

となる。従って、

$$V = V \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad I = F^{-1} V$$

また、各電極に流入する接地電流 I は

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_z = (1, 1, 1, \dots, 1) I$$

となる。

並列接地抵抗 R_0 は電極電位 V と接地電流 I との比であるから、上記の関係式をまとめると次式のように表すことができる。

$$R_0 = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{[1, 1, 1, \dots, 1] F^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}} \quad (5 \cdot 6)$$

なお、 F マトリックスは電極の寸法、配列によって定まるもので、(5・6)式は任意寸法の棒状電極を任意形状の電極配置パターンに適用することができる。

5-3 棒状電極の並列接地抵抗の計算式

図5.3に示すような水平多層構造大地において、棒状電極が任意配置パターンで並列接地を施している場合を設定する。

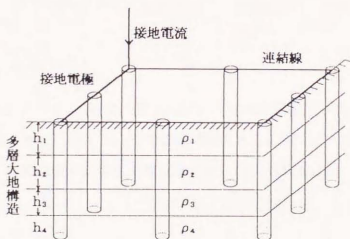


図5.3 多層大地における並列接地

多層の大地パラメータ (h_i, ρ_i) が与えられているとき、1本の棒状電極の接地抵抗計算式および1本の棒状電極の電位分布計算式は第3章で既に得られている。更に、並列接地抵抗の計算は電位の重畳によって行われ、任意の電極配置パターンの場合の計算式も (5・6) 式で得られている。

多層大地における並列接地抵抗の計算には、多層に適用する電位分布の計算と並列接地抵抗の計算の二つを組み合わせることによって可能になる。従って、多層問題としての並列接地抵抗の解析をまとめると次のようになる。

多層大地に棒状電極 (半径 r , 長さ l) を電極間隔 S_{mj} に N 本任意のパターンで配置した場合の並列接地抵抗 R_0 は次式で表される。

$$R_0 = \frac{1}{(1, 1, 1, \dots, 1) G^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}} \quad (5 \cdot 7)$$

ここで、 G マトリックスは次のように抵抗行列で表される。

$$G = \begin{pmatrix} R_N & G(S_{12}) & \dots & G(S_{1N}) \\ G(S_{21}) & R_N & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ G(S_{N1}) & \dots & \dots & R_N \end{pmatrix} \quad (5 \cdot 8)$$

また、上式において、 R_N は N 層大地における棒状電極 1 本の場合の接地抵抗計算式である。また、 $G(S_{mj})$ は電極間距離 S_{mj} を用いた N 層大地における棒状電極の場合の電位分布計算式の電流項を省いた式である。

$$\begin{aligned}
 R_N &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \right. \\
 &\quad \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \frac{\alpha_{NS} e^{-\lambda t} + \beta_{NS} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\
 &\quad \left. \times J_0(\lambda a) d\lambda dt \right] \\
 G(S_{mj}) &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \right. \\
 &\quad \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \frac{\alpha_{NS} e^{-\lambda t} + \beta_{NS} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\
 &\quad \left. \times J_0(\lambda S_{mj}) d\lambda dt \right]
 \end{aligned}$$

ここで、上述した式の式中の記号の条件は第3章の(3・25)，(3・26)式で示した場合と同じである。

5-4 数値例による検討

本論文で解析した並列接地抵抗計算式の数値計算を行うに際して、(5・8)式で示した G の逆マトリックスはガウス・ジョルダン法を用い、 R_N および $G(S_{mj})$ の計算はベッセル関数を含む二重積分を、有限区間はロンベルグ法、無限区間は二重指数形減衰の積分公式を用いた。いずれも倍精度で計算した。

5-4-1 電位分布計算の近似誤差

本章で用いる棒状電極の電位分布計算式の妥当性の確認は、ほかに多層に適用する式がないために、均質地層に置き換えた場合の多層の電位分布計算式 ($N=1$) と均質地層の偏長回転円体状電極の電位分布計算式を比較して、近似誤差を次式で示す近似誤差率 ε で評価してみた。

$$\varepsilon = (V_{Nx} - V_x) / V_x \times 100 (\%) \quad (5 \cdot 9)$$

ここで、 V_{Nx} ：第3章で示した棒状電極の多層の電位分布計算式（再掲）

$$V_{Nx} = \frac{1}{2\pi} \frac{I}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{i=0}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \right. \\ \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda z} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda z}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\ \left. \times J_0(\lambda x) d\lambda dz \right]$$

ここで、 V_x ：偏長回転円体状電極の電位分布計算式

$$V_x = \frac{\rho I}{4\pi K l} \ln \frac{1+T}{1-T} \\ K = \sqrt{1 - \frac{r^2}{l^2}}, \quad T = \sqrt{\frac{l^2 - r^2}{x^2 + l^2 - r^2}}$$

電極半径を 0.033 m、電極長を 2.0 m としたとき、電極からの距離 x （電極長の 5 倍）に対して、近似誤差率は図 5.4 に示すように $\pm 0.3\%$ 以内にあり、棒状電極の多層電位分布計算式は実用に供し得るものとした。

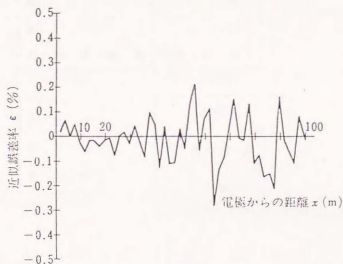


図 5.4 電位計算の近似誤差率

5-4-2 電極配置パターンによる並列接地抵抗

電極間距離 ($S=10\text{ m}$) を等しくした棒状電極 (半径 0.033 m) の8本並列接地を考える。図5. 5に示すような (a) 直線形, (b) L字形, (c) コ字形, (d) 口字形, (e) 電学マーク形 (近似等距離) の配置パターンを設定した。大地構造は三層大地で大地パラメータは次のようにした。第一層目の厚さ $h_1=5\text{ m}$, 第二層目を $h_2=10\text{ m}$, 三層大地モデルAでは, 第一層目の大地抵抗率 $\rho_1=10^2$, 第二層目を $\rho_2=10^3$, 第三層目を $\rho_3=10^2$, 三層大地モデルBでは $\rho_1=10^3$, $\rho_2=10^2$, $\rho_3=10^3$ (ρ の単位は $\Omega \cdot \text{m}$ である)。ここで, 電極が第二層目の中間に達している場合 (電極長 10 m) と第三層目をつき抜けている場合 (電極長 $20, 30\text{ m}$) を想定した。

電極長および電極間隔を一定にしたとき, 配置パターンによる接地抵抗の違いを, 三層大地モデルと均質地層大地モデルと比較してみると表5. 1のようになる。口字形の場合が最も大きい。これは, 並列接地の特性である電極の相互干渉の影響によるものである。電学マーク形は電極間隔が若干異なるためと, 配置パ

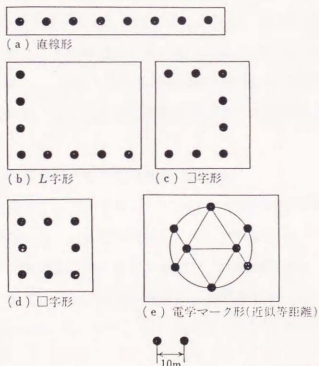


図5. 5 電極配置パターン

ターンが複雑であるため、他のパターンよりも並列接地抵抗の値が大きくなっている。

次に、均質地層と三層大地モデルで計算した場合の接地抵抗の差異について比較してみる。均質地層と仮定した場合では、計算に用いる ρ を各地層の最大値 ($10^3 \Omega \cdot m$) と最小値 ($10^2 \Omega \cdot m$) の二種類、および電極が存在している地層までの等価大地抵抗率 ρ_m の二つの場合を考えた。 ρ_m の求め方は馬淵氏らの考え方を参考にした。まず、 ρ_m を用いる均質地層モデルと三層モデル *A* は、電極長が 10 m、つまり第二層中に存在している場合に差異は小さい。その理由は、第一層より第二層のほうが ρ が低い、つまり上層より下層のほうが ρ が低いため、多層を均質地層 (ρ_m) に置換しても現実的には支障がないということである。しかし、三層モデル *B* ではモデル *A* の逆であり、均質地層に置換すると接地抵抗の差異が大きくなる。また、各地層の ρ の最大値と最小値を基に、均質地層と仮定した場合と三層大地の場合を比較するとモデル *A*、*B* とともに、それらの接地抵抗値は ρ の最大値と最小値で計算した値の範囲内に含まれて入るが、いずれも差異が大きい。つまり、下層になるに従って ρ が低くなる大地においては、等価大地抵抗率 ρ_m を用いて均質地層と仮定して計算することが、並列接地計算においても実用に供する。しかし、下層ほど ρ が高い場合には ρ_m を用いて均質地層と仮定することが困難である。以上に述べた接地抵抗の差異は、電極配置パターンにかかわらず、多層問題としての接地抵抗計算の特有の現象である。

5-4-3 大地構造による並列接地抵抗の特徴

棒状電極を間隔 20 m で口字形のパターンに 4 本配置した場合、四層大地モデルにおける並列接地抵抗および集合係数について検討した。ここで、モデルの大地パラメータは、各地層の厚さを 10 m とし、大地抵抗率は、集合係数を検討するためにモデルを *C*、*D* の二種類を設定し、第三層目の ρ_3 のみを変ええることにした。他の地層の ρ は、 $\rho_1 = 100$ 、 $\rho_2 = 500$ 、 $\rho_4 = 5000 \Omega \cdot m$ の共通の値を用いた。

(1) 四層大地モデルC

第三層目に ρ の高い地層 ($\rho_3 = 1000 \Omega \cdot m$) がある場合を想定した。棒状電極1本および4本並列の接地抵抗の変化の様相 ($R-l$ 曲線) を図5.6に示す。地層の境界で変曲点が生じ、それぞれの地層の ρ に応じて接地抵抗が低減している。 $R-l$ 曲線から、接地抵抗 10Ω を得るのに単独接地では電極長 $30m$ とするが、並列接地では各々の電極長が $3m$ ですむ。また、 5Ω を得るのに単独では $110m$ 、並列では $9m$ ですむことがわかる。

(2) 四層大地モデル

第三層目に ρ の低い地層 ($\rho_3 = 250 \Omega \cdot m$) がある場合を想定した。 $R-l$ 曲線を図5.7に示す。 ρ_3 の影響のため、第三層の境界付近から接地抵抗がモデルCよりも小さくなる傾向を呈している。つまり、電極が第三層目の地層に達してから、突き抜けるまでの地層の ρ が低いため接地抵抗も小さくなるわけである。モデルDでは、接地抵抗 10Ω を得るのに単独接地で電極長 $22m$ 、並列接地で $2m$ 、 5Ω を得るのに単独で $100m$ 、並列で $8m$ を必要とする。これらの電極長の値はモデルCに比べて小さな値である。

表5. 1 電極配置パターンによる並列接地抵抗

電極配置パターン 大地モデル		(単位: Ω)														
		直線形			L字形			コ字形			ロ字形			電学マーク形		
		電極長(m)			電極長(m)			電極長(m)			電極長(m)			電極長(m)		
		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
三層大地モデルA $h_1=5, h_2=10$ (m) $\rho_1=10^3$ $\rho_2=10^3$ $\rho_3=10^3$ ($\Omega \cdot m$)		3.08	1.96	1.23	3.15	2.03	1.28	3.22	2.09	1.32	3.41	2.23	1.41	4.53	2.89	1.78
三層大地モデルB $h_1=5, h_2=10$ (m) $\rho_1=10^3$ $\rho_2=10^3$ $\rho_3=10^3$ ($\Omega \cdot m$)		8.56	5.37	5.20	8.92	5.61	5.43	9.26	5.84	5.65	9.88	6.23	6.03	11.90	7.44	7.17
均質大地と仮定した場合 (i) $\rho=10^3$ 一定 (ii) $\rho=10^3$ 一定 (iii) $\rho_m=18$ 一定 ($\Omega \cdot m$)		1.90 19.02 3.44	1.26 12.59 2.27	1.04 10.38 1.75	1.95 19.50 3.53	1.30 13.01 2.35	1.05 10.50 1.87	1.97 19.66 3.56	1.34 13.42 2.43	1.09 10.91 1.95	2.10 21.04 3.81	1.43 14.29 2.59	1.18 11.82 2.08	2.69 26.90 4.87	1.81 18.14 3.28	1.44 14.35 2.51

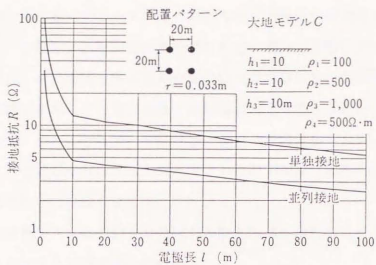


図 5. 6 四層大地モデルCの接地抵抗

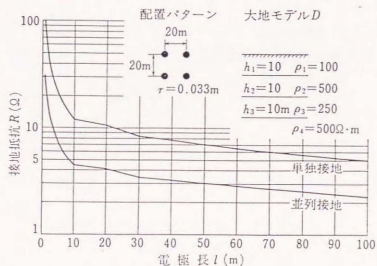


図 5. 7 四層大地モデルDの接地抵抗

(3) 集合係数

集合係数は、既に本章の5-2で述べたように並列接地の効果を表す指標となる係数であり、1極および複数極の接地抵抗の比と極数の関数で表される。均質地層大地の場合、接地抵抗を得るための電位分布の計算は電極間隔と極数および大地抵抗率で決定されるが、集合係数が接地抵抗の比で示されるため大地抵抗率には依存しない。それに対して、多層大地の場合は電位分布の計算に大地パラメータを考慮する必要がある、この大地パラメータの様相が1極あるいは複数極の場合の電位分布計算に影響を及ぼす。

そこで、大地構造による並列接地抵抗の特徴を把握するために集合係数を検討した結果、次のような知見が得られた。

均質地層大地や四層大地モデルにおいて、棒状電極を4本並列に接地した場合に、電極長と集合係数（以下、 η と略記）との関係を図5.8に示す。

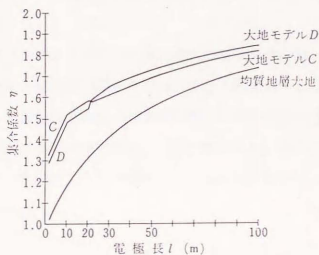


図5.8 並列接地の集合係数

均質地層に対して四層のほうが η は大きな値を呈している。また、第三層目でモデルCとモデルDの η が逆転していることに着目すると、次のようにいえる。モデルCでは第三層目に ρ の高い地層があるため、電極が第二層に存在している場合は η が大きい。しかし、第四層目の ρ_4 が ρ_3 よりも低いため、第三層以降の場合は η が小さくなる。一方、モデルDでは第三層に ρ の低い地層があるため、第二層までは η が小さいが ρ_4 が ρ_3 より高いため η は大きくなる。

このように、多層における η は均質地層の場合とは全く様相が異なり、大地パラメータと強い相関があることが明らかになった。

5-5 まとめ

低い接地抵抗を要求される接地施工において、棒状電極を単独施工しても所要接地抵抗を得ることが困難な場合、それを複数本集合した並列接地工法を採用することが多い。従来は棒状電極の接地抵抗を計算する場合、均質地層大地に対する計算手法のみであった。

本章では、多層地層大地における棒状電極の電位分布計算と並列接地の計算を組み合わせた並列接地抵抗の解析を行い、多層大地に対する並列接地抵抗計算式を示した。更に、数値計算例により多層問題としての並列接地抵抗、および集合係数の特徴を把握することができた。これらの知見は、接地工法の選定の過程で電極長を決定するための大きな手掛かりとなると思われる。

第5章の参考文献

- (1) 高橋：「接地技術の動向」，電学誌，106，357（昭61-4）
- (2) E.D.Sunde:「Earth Conduction Effects in Transmission Systems」
（1968）Dover Publiation Inc.
- (3) G.F.Tagg:「Earth Resistances」（1964）George Newnes Limited
- (4) 高橋，他：「並列接地の集合係数について」
電気学会電力応用研究会資料，EPA-78-5（昭53）
- (5) 高橋，川瀬：「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」
電学論 B，108，229（昭63-5）
- (6) 高橋，川瀬：「ビル接地システムに関する考察」
電気設備学会論文，Vol.7，No.10，p638～647（昭63）
- (7) 高橋，川瀬：「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電学論 B，108，383（昭63-8）
- (8) 高橋，川瀬：「多層大地における棒状電極の並列接地抵抗の解析」
電学論 B，12（昭63-12）
- (9) 高橋，川瀬：「多層大地における並列接地抵抗の計算」
電気設備学会研究会，B-6（昭61-9）
- (10) 高島，他：「棒状電極の接地インピーダンスの数値計算」
電学論 B，103，183（昭58-3）
- (11) 馬淵，高木：「棒状接地極の接地抵抗値の算定について」
電力技研報，6（昭31-1）

第6章 ボーリング深埋電極の並列接地抵抗の実測とその評価

6-1 まえがき

棒状電極によって接地抵抗の低減をはかる方法としては、多数の電極を並列に接続して用いる並列接地工法あるいは1極の電極を地中深く打込む深打接地工法がある。接地抵抗は、周知のように、大地抵抗率と接地電極の物理的寸法の関数として表される。つまり、大地抵抗率に比例し、物理的寸法に逆比例するわけである。特に大地抵抗率が高い地域において、所要接地抵抗を得るためには電極寸法、棒状電極の場合は電極長を大きくする必要がある。関東ローム層等においては市販の接地棒を連結しても容易に深打接地工法が可能である。しかし、N値（土の硬さを表す指数値）の大きい大地に対しては、この工法にも限界が生じる。その場合は大地を削孔して、その孔に接地電極を埋設する、いわゆるボーリング深埋電極が有用である。

大地抵抗率が高い接地施工エリアで、小さな所要接地抵抗が要求されている場合、1極の電極だけでは不十分であり、多数の電極を並列にする並列接地工法を採用することが考えられる。既に第5章において、多層大地を考慮した棒状電極の並列接地抵抗の解析解の導出と数値例による接地抵抗の検討を行っているが、これらの検討結果と実測データとの検証は大きな関心事である。

そこで、本章ではボーリング深埋電極の並列接地の実用化実験を行い、この実験結果とその評価について述べている。この評価の中では実測データと第5章で検討した理論的な計算手法との比較を行っている。

6-2 実験の概要

検証のためのデータは3箇所を実施して実測値とした。まず文献(3)の大矢氏の論文からの引用データ、つぎに文献(4)の報告書からの引用データおよび東京電力株式会社の社内資料から引用した実験データを用いることにした。ここでは、実験についての概要を示すことにする。

6-2-1 実験場所

実験場所は関東地方で大地抵抗が比較的に高い場所である。図6.1に実験場所を示す。まず、文献(3)の大矢氏の論文データは福島県下のA地点である。この地層は花崗岩地帯と片岩地帯の境界といわれている所である。つぎに東京電力(株)の協力によって得られたデータは群馬県下のB地点、茨城県下のC地点である。B地点は溶岩大地と称される地帯であり、地質的には火山砂礫の地層を持つ所である。またC地点は典型的な関東ローム地層の所である。この実験場所は前出のA、B地点に比べて大地抵抗率は比較的低い地層である。



図6.1 実験場所

6-2-2 大地抵抗率の測定

大地抵抗率の測定の目的は $\rho-a$ 曲線を作成し地層別の大地パラメータを推定することである。本実験で用いた測定手法はウェンナーの四電極法による方法である。測定器は一般に用いられている大地比抵抗測定器 (YEW3244) である。実験場所によっては接地工事エリア内の数箇所 で測定し $\rho-a$ 曲線を作成したところもある。

6-2-3 接地抵抗の測定

ボーリング深埋電極の電極長は小規模で 50 m 程度、大規模になると 200 m 以上にもなる。これが、並列に接続されて並列接地電極を構成するわけで電極規模は相当に大きくなる。そこで、接地抵抗の測定も補助極の位置に十分に留意する必要がある。本実験では既に第 4 章で示したと同様な電位降下法による測定を実施した。第 4 章の図 4.2 に示した測定回路において、測定電流を可能なかぎり大きくとることにし、電流補助極を電極長の 4 倍程度、電位補助極を電流補助極と反対方向にして被補助極から電極長の 4 倍程度の地点に設けた。

6-3 実験結果の整理

既に図 6.1 で示した 3ヶ所の実験場所における実験結果を並列接地電極の配置形状によって整理して示すことにする。

6-3-1 直線状配置

A 地点の実験結果である大矢氏の論文 (文献 (3)) を引用) によるとボーリング深埋電極をほぼ直線状に配置し、合計 10 極の電極をそれぞれ 2 極 ~ 10 極まで組み合わせて並列接地電極を構成し、接地電極を測定している。

(1) 大地パラメータ

文献(3)には $\rho-a$ 曲線が掲載されていない。ただ、 $\rho-a$ 曲線を解析した結果の大地パラメータのデータがあるだけで、それによると当地の大地構造は表6.1に示す大地パラメータを持つものである。

表6.1 推定した大地パラメータ(文献(3)より引用)

地層の厚さ	h_1	h_2	h_3	h_4	
$h(m)$	2.7	5.3	5.0	17.0	
大地抵抗率	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5
$\rho(\Omega \cdot m)$	162	243	340	250	500

(2) 並列接地抵抗

図6.2に電極の配置図を示す。電極に番号を付けNo. 1~No. 10までの電極を間隔30m毎に配置している。これらの電極の接地抵抗の測定結果を表6.2に示す。同氏の論文によると10箇所のボーリング地点の削孔深さを20mとする目標であったが岩盤の存在のため岩盤部分を1m削孔したところまでとし、そこまでの深さを電極長とした旨である。したがって同表に示すように電極長が7.6m~18.7mと様々である。

表6.2に示した電極を組み合わせて2極, 3極, ..., 10極までの並列接地電極を構成し、それぞれの接地抵抗を測定している。その結果を引用して図6.3に示す。

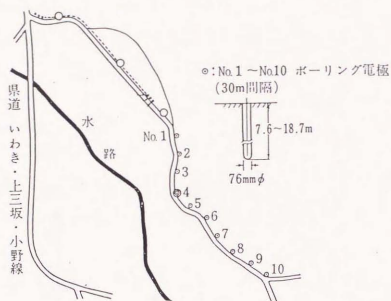


図 6. 2 電極配置図 (文献 (3) より引用)

表 6. 2 ボーリング電極の接地抵抗 (文献 (3) より引用)

電極 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
深さ (m)	8.3	18.7	7.6	13.0	14.0	14.0	10.0	13.0	13.0	11.0
電極抵抗 (Ω)	24.5	18.5	31.0	16.0	19.0	25.0	19.2	15.5	11.8	11.5

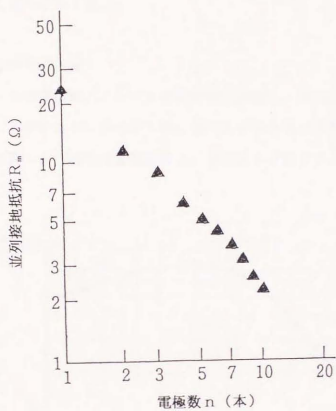


図6. 3 並列接地抵抗の実測値(文献(3)より引用)

6-3-2 方形状配置(1)

B地点の実験結果である。当地は高原地帯であり周囲150m四方がほぼ平坦な場所である。4極のボーリング電極を方形状に間隔20mに配置し、4極の電極長を同時に変えて並列接地抵抗を測定した。ここで、接地抵抗の測定に際しては、補助極の距離を充分に得るために、平坦な場所から若干はずれた位置に補助極を設けざるを得なかった。

(1) 大地パラメータ

ウェンナーの四電極法によって大地抵抗率を測定し、図6.4のような $\rho-a$ 曲線を得た。それをもとに第2章で既に述べた手法を用い大地パラメータを推定した。その結果、当地の大地構造は表6.3に示す大地パラメータをもつことがわかった。

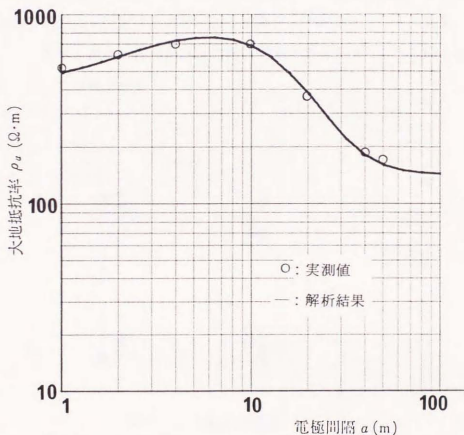


図6.4 $\rho-a$ 曲線⁽⁴⁾

表 6. 3 推定した大地パラメータ

地層の厚さ	h_1	h_2	
h (m)	1.2	8.2	
大地抵抗率	ρ_1	ρ_2	ρ_3
ρ ($\Omega \cdot m$)	452	951	140

(2) 並列接地抵抗

図 6. 5 に電極の配置図を示す。4 極の電極を B 1 ～ B 4 とし、それぞれの電極の電極長と接地抵抗の関係を図 6. 6 に示す。同図のデータは電極 1 極の R - l 曲線である。本章では並列接地抵抗を主体に検討しているので 1 極の接地抵抗については割愛する。

さて、方形に配置した 4 極の並列接地抵抗は 4 極の電極長を同時に変えて、それらの合成接地抵抗を測定することによって得ることができる。その実測データを図 6. 7 に示す。接地抵抗の測定は 4 極の電極長が 1 0 m になった時点から 3 m 毎に行ったものである。

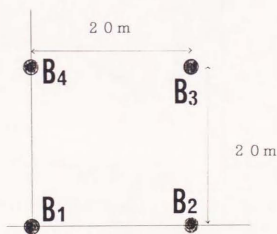
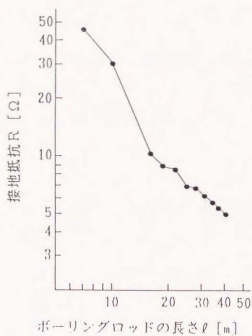
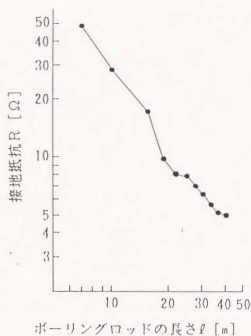


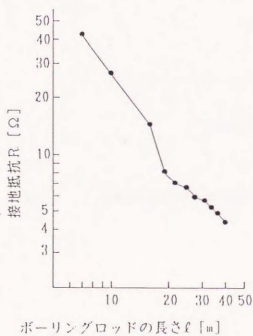
図 6. 5 電極配置図



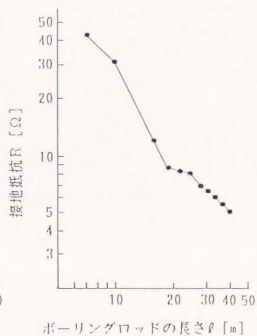
B₁地点の接地抵抗



B₂地点の接地抵抗



B₃地点の接地抵抗



B₄地点の接地抵抗

図 6. 6 各電極の大地抵抗の実測値 (文献 (4) より引用)

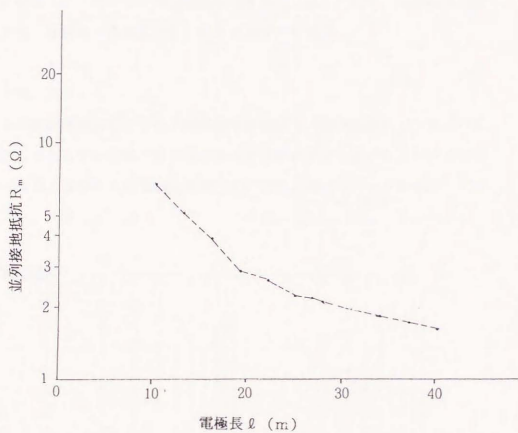


図 6. 7 並列接地抵抗の実測値 (文献 (4) より引用)

6-3-3 方形配置(2)

C地点の実験結果である。当地は関東平野にあり、周囲が平坦な場所である。そこに、4極のボーリング深埋電極を不等辺の方形状に配置し4極の電極を埋設深度250mとしたとき同時に並列接地抵抗を測定した。ここで、接地抵抗の測定に際しては、補助極の距離を充分に得ることができた。

(1) 大地パラメータ

ウェンナーの四電極法によって大地抵抗率を測定し、図6.8のような $\rho-a$ 曲線を得た。それをもとに第2章で既に述べた手法を用い大地パラメータを推定した。その結果、当地の大地構造は表6.4に示す大地パラメータをもつことがわかった。

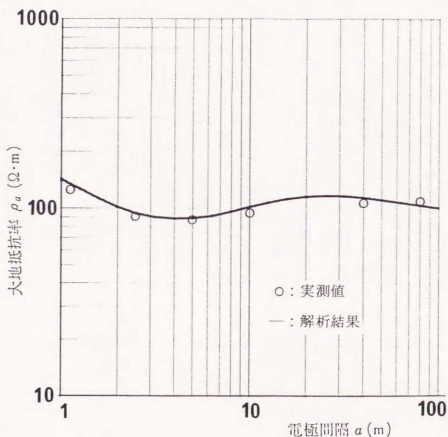


図6.8 $\rho-a$ 曲線

表 6. 4 推定した大地パラメータ

地層の厚さ	h_1	h_2	h_3	h_4	
h (m)	0.7	6.3	8.0	171	
大地抵抗率	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5
ρ ($\Omega \cdot m$)	190	80	180	100	43

(2) 並列接地抵抗

図 6. 9 に電極の配置図を示す。4 極の電極を C1 ~ C4 として電極の最終的な埋設深度 250 m のときの 1 本の接地抵抗を測定した値をそれぞれ表 6. 5 に示す。さらに、方形に配置した 4 極合成の並列接地抵抗の実測データも合わせて同表に示す。

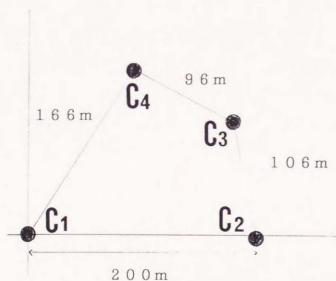


図 6. 9 電極配置図

表 6. 5 並列接地抵抗の実測値 ($l = 250$ m の場合)

電極番号	接地電流 I (A)	浮遊電圧 V_o (V)	正回路電圧 E_n (V)	逆回路電圧 E_i (V)	接地抵抗 R (Ω)
C_1	30	1.84	8.57	9.45	0.297
C_2	30	1.00	13.34	13.70	0.450
C_3	30	1.41	15.54	16.30	0.529
C_4	30	1.355	8.908	9.839	0.310
合成 $C_1+C_2+C_3+C_4$	30	0.525	3.405	3.310	0.111

$$\text{ただし, } R = \frac{V}{I}, \quad V = \sqrt{\frac{(E_n^2 + E_i^2) - 2 \cdot V_o}{2}}$$

6-4 実験結果の評価

前節で述べた3ヶ所における実験結果について検証してみる。多層大地を考慮した並列接地抵抗の計算においても、まず大地パラメータを決定しなければならないが、その決定は既に前節で示したように第2章で述べた大地パラメータ推定の手法を用いて行うことができた。従って本節においては第5章で述べた多層並列接地抵抗計算のプログラムを用いて理論値を求め、実験結果の比較を行いその評価を試みることにする。

6-4-1 直線状配置

(1) 評価の準備

並列接地抵抗を計算するには多層大地の大地パラメータ、電極半径、電極長、電極本数、および電極位置の座標が必要である。

まず大地パラメータは既に表6.1に示したように文献(3)より引用している。電極半径は0.038mであり、電極長は表6.2に示してあるように電極によって異なる長さである。図6.3に示したように接地抵抗と電極本数との関係を検討しており、ここでも電極数が2本、3本、…、10本の場合の並列接地抵抗を評価することにする。

さらに図6.2に示した配置図から電極配置の座標を読み取ることにする。以上の準備の結果、接地抵抗を計算するための入力データとしては表6.6に示す諸元となった。

表 6. 6 並列接地抵抗計算に使用した入力データと
計算結果の一例（電極数 10 本の場合）

入力データ		
地層の厚さ (m)		
GH(1)=	2.70	
GH(2)=	5.30	
GH(3)=	5.00	
GH(4)=	17.00	
各地層の大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)		
ρ (1)=	162.00	
ρ (2)=	243.00	
ρ (3)=	340.00	
ρ (4)=	250.00	
ρ (5)=	500.00	
電極半径 (m)		
r=	0.038	
電極番号	電極長 (m)	配置座標 (m)
ROD(1)	BL = 8.3	(X,Y) = (0.0, 0.0)
ROD(2)	BL = 18.7	(X,Y) = (30.0, 0.0)
ROD(3)	BL = 7.6	(X,Y) = (60.0, 0.0)
ROD(4)	BL = 13.0	(X,Y) = (90.0, 0.0)
ROD(5)	BL = 14.0	(X,Y) = (111.0, 21.0)
ROD(6)	BL = 14.0	(X,Y) = (132.0, 42.0)
ROD(7)	BL = 10.0	(X,Y) = (159.0, 54.0)
ROD(8)	BL = 13.0	(X,Y) = (180.0, 81.0)
ROD(9)	BL = 13.0	(X,Y) = (198.0,108.0)
ROD(10)	BL = 11.0	(X,Y) = (219.0,132.0)
計算結果		
電極に流れる接地電流分布		
I(1)=	0.0273	8.7 %
I(2)=	0.0446	14.2 %
I(3)=	0.0223	7.1 %
I(4)=	0.0306	9.7 %
I(5)=	0.0310	9.9 %
I(6)=	0.0313	10.0 %
I(7)=	0.0264	8.4 %
I(8)=	0.0323	10.3 %
I(9)=	0.0336	10.7 %
I(10)=	0.0332	10.6 %
並列接地抵抗 (Ω)		
RN=	3.1932	

(2) 並列接地抵抗の計算および評価

第5章で検討した多層並列接地抵抗の計算は並列される接地電極の電極長が全て等しい場合である。しかし、ここで検討しようとする並列接地抵抗は既に表6.2に示したように各電極の電極長が異なる場合のものである。したがって、第5章の計算プログラムをそのまま用いることができない。

電極長を考慮した多層並列接地抵抗の計算法は第5章での内容を発展させて検討することができるものでその手法が確立している。そこで、本節における並列接地抵抗の計算はその計算プログラムを用いて行うことにする。

表6.6に示した入力データを用いて計算した結果の一例を同表に示す。これは10本並列した場合であり、計算結果は3.19Ωとなる。ちなみに同表に示した接地電流分布の結果は電極長が異なる場合の特徴を示しているものである。並列接地抵抗を2本、3本、…、10本並列の場合毎に計算した結果を図示すると図6.10のようになる。同図の実測データは既に図6.3に示したものの再掲である。ちなみに、10本並列の場合の並列接地抵抗の実測値は同図より読みとると約2.5Ωである。図6.10に示したように実測値と多層大地を考慮した計算値の様相をみると電極が7本並列の場合までは概ね一致しているといえる。しかし、それ以上の電極数の場合は差異が生じている。この理由としては接地抵抗を測定する際に電極数が多くなるとそれに従って測定のための補助電極の位置も変えなければならないのに文献(3)ではそれを考慮していないために実測値が小さめに出了と思われる。

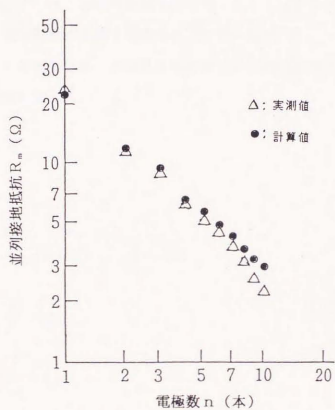


図 6. 10 並列接地抵抗の実測値（文献（3）より引用）と計算値

6-4-2 方形状配置(1)

(1) 評価の準備

既に図6.4に示したような $\rho-a$ 曲線をもとに大地パラメータを推定し、その結果を表6.3に示している。方形状に配置した接地電極は4本であり、4本の電極長同時に変えたときの並列接地抵抗と電極長との関係の実測データは図6.7に示している。接地電極の半径は0.033mである。図6.5に示した配置図から電極配置の座標を読み取ることにする。

以上の準備の結果、大地抵抗を計算するための入力データとしては表6.7に示す諸元になった。

表 6. 7 並列接地抵抗計算に使用した入力データと計算結果

入力データ

地層の厚さ (m)

GH(1)= 1.20

GH(2)= 8.20

各地層の大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)

$\rho(1)= 452.00$

$\rho(2)= 951.00$

$\rho(3)= 140.00$

電極半径 (m)

r= 0.03300

電極深度 (m)

FOR L= 10.00 T0 40.00 STEP 1.00

配置座標 (m)

X(1)= 0.00 Y(1)= 0.00

X(2)= 20.00 Y(2)= 0.00

X(3)= 20.00 Y(3)= 20.00

X(4)= 0.00 Y(4)= 20.00

計算結果

電極長 (m)	一極の接地抵抗	並列接地抵抗	集合係数
L= 10.0	R0= 54.44	RN= 14.47	$\eta = 1.06$
L= 11.0	R0= 38.05	RN= 10.32	$\eta = 1.08$
L= 12.0	R0= 29.45	RN= 8.14	$\eta = 1.10$
L= 13.0	R0= 24.14	RN= 6.79	$\eta = 1.12$
L= 14.0	R0= 20.52	RN= 5.87	$\eta = 1.14$
L= 15.0	R0= 17.89	RN= 5.20	$\eta = 1.16$
L= 16.0	R0= 15.89	RN= 4.69	$\eta = 1.18$
L= 17.0	R0= 14.32	RN= 4.28	$\eta = 1.19$
L= 18.0	R0= 13.04	RN= 3.95	$\eta = 1.21$
L= 19.0	R0= 11.99	RN= 3.68	$\eta = 1.22$
L= 20.0	R0= 11.10	RN= 3.45	$\eta = 1.24$
L= 21.0	R0= 10.35	RN= 3.25	$\eta = 1.25$
L= 22.0	R0= 9.70	RN= 3.08	$\eta = 1.27$
L= 23.0	R0= 9.13	RN= 2.93	$\eta = 1.28$
L= 24.0	R0= 8.62	RN= 2.80	$\eta = 1.29$
L= 25.0	R0= 8.18	RN= 2.68	$\eta = 1.31$
L= 26.0	R0= 7.78	RN= 2.57	$\eta = 1.32$
L= 27.0	R0= 7.42	RN= 2.47	$\eta = 1.33$
L= 28.0	R0= 7.09	RN= 2.39	$\eta = 1.34$
L= 29.0	R0= 6.79	RN= 2.30	$\eta = 1.35$
L= 30.0	R0= 6.52	RN= 2.23	$\eta = 1.36$
L= 31.0	R0= 6.27	RN= 2.16	$\eta = 1.37$
L= 32.0	R0= 6.05	RN= 2.10	$\eta = 1.39$
L= 33.0	R0= 5.83	RN= 2.04	$\eta = 1.39$
L= 34.0	R0= 5.64	RN= 1.98	$\eta = 1.40$
L= 35.0	R0= 5.45	RN= 1.93	$\eta = 1.41$
L= 36.0	R0= 5.28	RN= 1.88	$\eta = 1.42$
L= 37.0	R0= 5.12	RN= 1.84	$\eta = 1.43$
L= 38.0	R0= 4.97	RN= 1.79	$\eta = 1.44$
L= 39.0	R0= 4.83	RN= 1.75	$\eta = 1.45$
L= 40.0	R0= 4.70	RN= 1.71	$\eta = 1.46$

(2) 並列接地抵抗の計算および評価

第5章で検討した多層並列接地抵抗計算のプログラムを用いて並列接地抵抗を計算し、電極長(l)と並列接地抵抗(R)の関係を示す $R-l$ 曲線を作成した。本節で引用している実測データは電極長が10mから30m毎にその値が得られているので $R-l$ 曲線によって評価することができる。計算結果を表6.7に合わせて示しそれをもとに作成した $R-l$ 曲線を図6.11に示す。

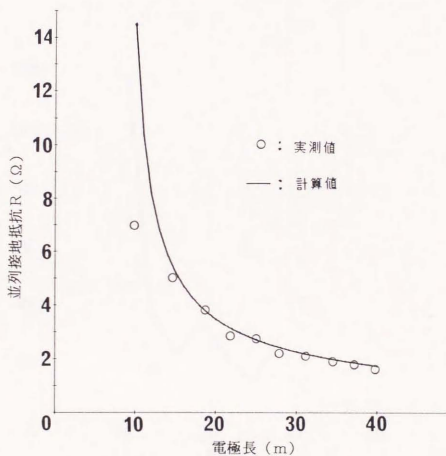


図6.11 並列接地抵抗の実測値と計算値 ($R-l$ 曲線)

図6. 11に示したR- ℓ 曲線において、実測データ (R_0) に対して、多層に対応した接地抵抗計算結果 (R) がどの程度の誤差をもつかを検討するために近似誤差率 ε を次式で算定する。

$$\varepsilon = \frac{|R_0 - R|}{R_0} \times 100 (\%) \quad (6 \cdot 1)$$

図6. 11に示した接地抵抗の計算結果をもとに (6・1) 式により近似誤差率を求め、電極長に対する近似誤差率をみると図6. 12のようになる。

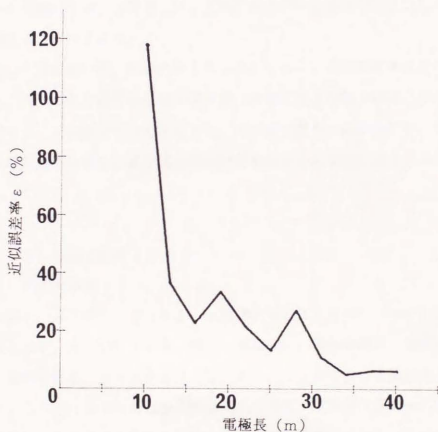


図6. 12 並列接地抵抗の近似誤差率

既に図6. 6に示したように並列された4本の接地電極のそれぞれの接地抵抗の実測値と電極長の関係を示す $R-l$ 曲線が得られている。これらを調べると各電極とも実測値では若干の接地抵抗の差異がみられる。それは当地の大地構造が厳密には水平構造でないことを示唆している。

図6. 12に示したように並列接地抵抗の実測値に対して多層並列接地抵抗の計算値の誤差率をみると電極長が短い場合にその差が大きい。この理由としてはボーリング掘削時の水処理の問題がある。周知のように掘削する場合、外壁の保護およびボーリングヘッドの掘削時の摩擦熱を放散するためにベントナイト溶液を循環させるわけであるが、通常は地表面に水が漏れてしまい、その付近の大地抵抗率を低くしてしまう。そのために、実測値は小さくなる。ちなみに、計算で使用する大地パラメータはボーリング掘削前のデータであり、このために若干の差異が生じるわけである。

図6. 12において、電極長が15 m以上になると近似誤差率は30%の範囲にある。周知のように大地抵抗率は季節（厳密に言えば地中温度、湿度）によって変動する。その観点からとらえると、この値は実用上は許容でき、第5章で示した多層大地に対応した並列接地抵抗計算式は充分に実用に供することを確認した。

6-4-3 方形配置(2)

(1) 評価の準備

既に図6. 8に示したような $\rho-a$ 曲線をもとに大地パラメータを推定し、その結果を表6. 4に示している。図6. 9に示した電極配置から電極座標を読み取り、電極半径0. 043 mを入力し、表6. 8に示すような諸元を入力データとした。ここで、当地における実際は4本の電極が電極長250 mになった時点で並列接地抵抗を測定したもので、したがって実測データは1点しかない。

表6. 8 並列接地抵抗計算に使用した入力データと計算結果

入力データ			
地層の厚さ (m)			
GH(1)=	0.70		
GH(2)=	6.30		
GH(3)=	8.00		
GH(4)=	171.00		
各地層の大地抵抗率 ($\Omega \cdot m$)			
ρ (1)=	190.00		
ρ (2)=	80.00		
ρ (3)=	180.00		
ρ (4)=	100.00		
ρ (5)=	43.00		
電極半径 (m)			
r=	0.043		
配置座標 (m)			
X(1)=	0.00	Y(1)=	0.00
X(2)=	200.00	Y(2)=	-2.00
X(3)=	199.00	Y(3)=	107.00
X(4)=	95.00	Y(4)=	144.00
計算結果			
電極長 (m)	一極の接地抵抗	並列接地抵抗	集合係数
L= 250.0	R0= 0.41	RN= 0.12	η = 1.18

(2) 並列接地抵抗の計算および評価

第5章で検討した多層並列接地抵抗計算のプログラムを用いて電極長250mの場合の並列接地抵抗を計算した。その結果を表6. 8に合わせて示す。電極長250mのときの4本の並列接地抵抗は0.122 Ω となる。ちなみに1本の接地抵抗は0.411 Ω であり、図6. 9のような電極配置における集合係数は1.18である。

当地における実測データは既に表6. 5に示してあるC1~C4のそれぞれの接地電極の接地抵抗にも若干の差異は生じている。ここで、これらの実測値の平均値をみると0.397 Ω である。計算値は0.411 Ω であり、近似誤差率を(6.1)式より求めると-3.5%となる。並列接地抵抗の実測値は0.111 Ω である。それに対して計算値は表6. 8に示したように0.122 Ω である。前述したと同様に近似誤差率を求めると-9.9%となる。

以上に示したように実測値に対して第5章で検討した多層並列接地抵抗計算式による計算値は近似誤差率が -10% 以下であり、充分に実用に供すると思われる。

6-5 まとめ

第3章に述べた多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算式の導出、さらに第4章に述べた実測値との検証は棒状電極（ボーリング深埋電極）が1本の場合であった。それに対して第5章では複数本の並列接地抵抗の計算式の導出を行い、本章でその実測値との検証を行った。本章においては実測データが3例にすぎず、それも定量的な検証は2例についてのみであり、並列接地抵抗計算式による予測の精度を限定するには早計かと思われる。しかし、2例の検証結果をまとめると次のように言える。

B地点は高原地帯であり、大地抵抗率の測定結果をみると厳密な水平構造大地とは言い難い。さらに、測定する際の補助極の位置が平坦な実験エリアからはずれた地点に設けている。このような理由から近似誤差率が 30% 程度になっている。

それに対してC地点はほぼ大地が水平構造を成している場所であり、測定する際の補助極の位置もほぼ同じ水平場所であるため、多層並列接地抵抗計算式による近似誤差率は -10% 以内にある。

これらの検証結果で近似誤差率が $-10\% \sim +30\%$ 以内であることは、前述したように実測データは少ないものの、大地抵抗率の季節的な変動を考慮すれば、本論文で検討している多層大地を考慮した棒状電極の接地抵抗計算式が接地抵抗予測において、精度的には充分に実用に供していると思われる。

第6章の参考文献

- (1) 高橋, 川瀬: 「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電学論, Vol.108, No.8 (昭63-8)
- (2) 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の並列接地抵の解析」
電学論, Vol.108, No.12 (昭63-12)
- (3) 大矢, 他: 「多電極並列接地による接地抵抗の低減化」
電学論, Vol.106, No.10 (昭61-10)
- (4) (社)電気設備学会研究報告書: 「山岳地変電所における接地設計に関する研究(その3)」(昭61-9)

第7章 棒状電極群による接地設計システムの提案

7-1 まえがき

最近の変電所や開閉所等においては、GIS等の電気設備のコンパクト化が進み、接地施工エリアが縮小される傾向にある。また、大容量送電のために所要接地抵抗が $10^{-1}\Omega$ 以下を要求される場合もある。さらに、建設場所の大地抵抗率（以下 ρ と略記）が高く、容易に低い接地抵抗を得ることが困難場合が多い。これらの制約条件があるため、接地設計の段階で接地施工方法も含めた接地抵抗の予測を適切に行う必要性が各方面から望まれている。

上述の三つの制約条件を満足させるには、接地電極を大地に対して鉛直方向に地中深く埋設し、それを多数極並列に接続する、いわゆる棒状電極（ボーリング電極）の並列接地工法を適用することが有効である。この工法は変電所、開閉所等の接地設計で既に試みられており、実用に供している。

しかし、内外において、棒状電極による接地設計は大地を均質地層あるいは二層地層と仮定して実施されているにすぎず、実際の大地は多層構造を成しているため、多層大地を考慮した手法を導入する必要がある。特に、大容量の変電所や開閉所等の有効な接地設計を行うためには、多層大地を考慮した接地設計システムを構築することが必要不可欠であると考ええる。

そこで、接地設計に必要な情報として、建設地の接地施工エリアの面積、その付近の $\rho-a$ 曲線およびボーリング電極半径の3つの情報を得ることで、ある電極配置パターンにおける所要接地抵抗を得るための電極長を決定し、なおかつ、その経済的評価を行い、建設地の大地構造に見合った最も有効的な接地施工方法を選定しようという設計システムを開発した。

これにより、従来は多層大地構造を均質層と仮定した上で平均的な大地抵抗率を採用し、電極配置、電極長の決定等について、ややもすれば試行錯誤的に実施されてきた接地設計に対して、建設地の大地構造に見合った適切な接地工法を選定すること、およびその接地抵抗を適切に予測することが可能になった。

本章においては、多層大地を考慮した接地設計を行うための、実際的な設計フローを提案し、ケーススタディによって、基本的な接地設計システムを検討する。

7-2 システム構築の準備

7-2-1 大地パラメータの推定

(1) ρ の測定および $\rho-a$ 曲線の作成

大地パラメータを推定する方法のひとつに $\rho-a$ 曲線法がある。これには、一般にウェンナーの四電極法が用いられる。 $\rho-a$ 曲線は ρ の実測値と a (電極間隔) の関係を両対数のグラフで表わした曲線をいう。 ρ の測定は建設地の接地施工エリア付近を主体とするが、できるだけ広範囲の大地を測定対象とすることが望ましい。 ρ の高い地域においては、専用の測定器では測定電流が充分に得られず、測定不能になる場合がある。その場合は図 7. 1 に示すように両端の電流補助極に電流 (I) を流し、その間の電位補助極によって電圧 (V) を測定し、電流と電圧の比 (V/I) を求め、四電極法の原理式 ($\rho = 2\pi a V/I$) に代入して ρ を求める。そして $\rho-a$ 曲線を作成する方法を採る。

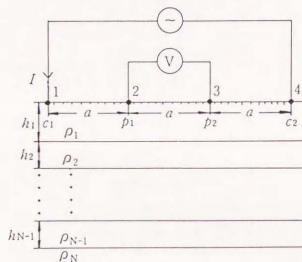


図 7. 1 多層大地におけるウェンナーの四電極法

(2) $\rho - a$ 曲線と大地パラメータの関係

多層問題を解明するために導出された接地抵抗計算式を有意義に使うためには、地層別の大地パラメータを精度良く決定する必要がある。本設計システムにおいては大地パラメータを推定する方法として $\rho - a$ 曲線を用いている。これはウェンナーの四電極法による $\rho - a$ 曲線データから多層に対応した $\rho - a$ 標準曲線を照合することによって理論的に大地パラメータを推定するものである。

従来は二層標準曲線を用いた手作業による照合法で大地パラメータを解析していた。しかし、多層大地における見掛けの大地抵抗率の理論式が導出されたことにより、手作業によらないことから解析者の推定誤差を省くことができ、精度が向上した。 N 層大地における見掛けの大地抵抗率 ρ_s の理論式は既に第2章(2-2)で詳述しているが、ここではそれを再掲する。この式を用いて多層に適用する標準曲線を作成し、実測の $\rho - a$ 曲線と対応することにより、大地パラメータを推定することができる。

$$\rho_a = \rho_1 [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)]$$

ただし、

$$F_N(x) = 2x \int_0^{\infty} \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

ここで、

$$\begin{aligned} K_{N1} &= \frac{k_1 + K_{N2} e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 K_{N2} e^{-2\lambda h_2}}, \\ K_{N2} &= \frac{k_1 + K_{N3} e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_2 K_{N3} e^{-2\lambda h_3}}, \\ \dots K_{Ns} &= \frac{k_s + k_{Ns+1} e^{-2\lambda h_{s+1}}}{1 + k_s K_{Ns+1} e^{-2\lambda h_{s+1}}} \dots \\ K_{NN-2} &= \frac{k_{N-2} + K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}{1 + k_{N-2} K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}, \\ K_{NN-1} &= k_{N-1} \end{aligned}$$

また、

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \dots k_s = \frac{\rho_{s+1} - \rho_s}{\rho_{s+1} + \rho_s} \dots k_{N-1} = \frac{\rho_N - \rho_{N-1}}{\rho_N + \rho_{N-1}}$$

上述の式を用いて計算して得られる $\rho - a$ 曲線と大地パラメータの関係の概念を図 7. 2 に示す。なお、この計算はコンピュータによる数値計算を用いている。

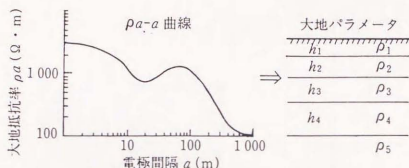


図 7. 2 $\rho - a$ 曲線と大地パラメータの関係

7-2-2 多層大地に適用する接地抵抗の計算

(1) 電極配置マップの作成

設備のコンパクト化に伴い、接地施工エリアが充分にとれないことが多い場合、接地設計の段階で並列接地抵抗の特性を把握して電極の配置を決定する必要がある。電極の配置は、実際には建物の敷地内における接地施工エリアの形状によって一義的に決定される。それは一般に矩形のエリア内に棒状電極を配置する場合、基本的な配置としては方形配置が考えられる。

限られた施工エリア内では、ある電極長において、電極数をむやみに多くすることは並列接地効果の観点では無意味である。例えば、方形配置において、中央

部が空になっている。つまり4辺上のみ電極が配置されている中空配置と、中央部にも電極を詰めている中実配置を比べた場合、後者のほうが電極数が多いのにもかかわらず、接地抵抗の低減にはあまり寄与しないことが知られている。したがって、本システムにおいては、図7.3に示すように限定された接地施工エリア内では並列接地電極の配置を中空方形形状とする。電極配置が決定されれば、電極配置地点のマップを作成し、 $X-Y$ 軸の座標を読む込むことによって自動的に電極間の距離を計算するようにする。

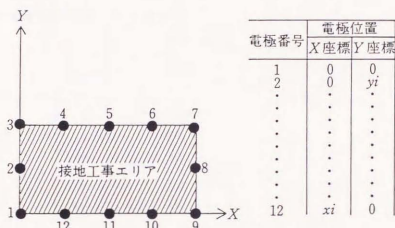


図7.3 限定されたエリア内における電極配置

(2) 接地抵抗計算式

図7.4に示すように大地パラメータ (h_i , ρ_i) をもつ水平多層構造大地にボーリング電極を並列にしたとき、その接地抵抗の計算式は既に第5章で詳述しているが、ここではそれを再掲する。

$$R_0 = \frac{1}{(1, 1, 1, \dots, 1) G^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}}$$

ここで G マトリックスは次式のように抵抗行列で表わされる。

$$G = \begin{pmatrix} R_N, & G(S_{12}), & \dots, & G(S_{1N}) \\ G(S_{21}), & R_N & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ G(S_{N1}), & \dots, & \dots & R_N \end{pmatrix}$$

上式において、 R_N は N 層大地における棒状電極 1 本の場合の接地抵抗計算式である。また $G(S_{mj})$ は電極間距離 S_{mj} を用いた N 層大地における棒状電極の電位分布計算式の電流項を省いた式である。

$$G(S_{mj}) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - H_{N-1}}{\rho_N}} \sum_{s=1}^N \left[\prod_{i=0}^{s-1} (1 - k_i) \right] \\ \times \int_{H_{s-1}}^{H_s} \int_0^\infty \frac{\alpha_{Ns} e^{-\lambda t} + \beta_{Ns} e^{-2\lambda H_s} e^{\lambda t}}{\alpha_{N1} - \beta_{N1} e^{-2\lambda h_1}} \\ \times J_0(\lambda S_{mj}) d\lambda dt$$

ここで、

$$H_s = \sum_{i=1}^s h_i, \quad H_0 = 0, \quad H_N = l$$

$$k_i = (\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i)$$

$$\alpha_{NN} = 1, \quad \beta_{NN} = 0$$

$$\alpha_{N1} = \alpha_{N2} + \beta_{N2} k_1 e^{-2\lambda h_1}$$

$$\alpha_{N2} = \alpha_{N3} + \beta_{N3} k_2 e^{-2\lambda h_2}$$

$$\vdots$$

$$\beta_{N1} = k_1 \alpha_{N2} + \beta_{N2} e^{-2\lambda h_1}$$

$$\beta_{N2} = k_2 \alpha_{N3} + \beta_{N3} e^{-2\lambda h_2}$$

$$\vdots$$

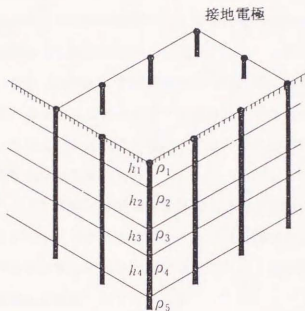


図 7. 4 多層大地における並列接地電極

7-2-3 電極長の経済的評価

ボーリング電極の施工は、大地の土質にもよるが、低い所要接地抵抗を得るためには百メートル以上の長さになる場合がある。ボーリング機械の性能の向上に伴い、大地中に非常に硬い地層が存在していても、工法的には何百メートルの深度まで掘削が可能であるといわれている。しかし、工法的には可能であってもそれを経済的な観点から評価する必要があるだろう。

ボーリング機械による掘削費用は単位長あたりの単価 a 円が基本となり、深度 (ℓ) によってその費用は補正され、深度補正係数を α としたとき、電極 Z 本の ℓ (m) までの掘削費用 M は次式で表わされる。

$$M = (a \cdot \ell \cdot \alpha + b) \cdot Z \quad (7 \cdot 1)$$

ここで、 b はボーリング機械1台（1本の電極用）あたりの設置費用である。
 (7・1)式は基本的な掘削費用構成としており、種々の間接的な費用、ボーリング電極材料費は除いている。

深度補正係数のひとつの例として積算資料から引用してみると、深度30m以内を1としたとき、30～40mまで1.1、50～79mまで1.25、80m以上が1.5となっている。ここでは、これらの係数を用いて、電極長を評価するための考え方を述べることにする。

いま、仮に(7・1)式における a を2万円、 b を5万円としたとき、ボーリング電極1極を100mまで掘削する場合と、 Z 台の機械を用いて Z 極を100mまで掘削する場合を試算してみる。掘削深度(l)と掘削費用(M)の関係をみると図7・5 ($M-l$ 曲線)のようになる。

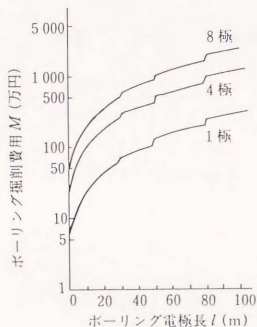


図7・5 ボーリング電極長と掘削費用の関係

これらの関係は掘削深度と機械台数によって決定され、大地構造、電極間隔には全く依存しないものとする。さて、電極長の経済的評価を行うには、電極長によって得られる接地抵抗と掘削費用の関係を調べる必要がある。この方法の概念を図7.6に示す。同図において電極長(l)と接地抵抗(R)の関係は単一電極の場合をA曲線、Z極並列電極の場合をB曲線としたとき、 $R-l$ 曲線から所要接地抵抗を得るための電極長を決定し、次に $M-l$ 曲線よりこの電極長における掘削費用を決定する。このようにして、ある電極で得られる接地抵抗(R)とそれに必要なボーリング掘削費用(M)の関係を $M-R$ 曲線として表わすことができ、経済的な評価をすることができる。

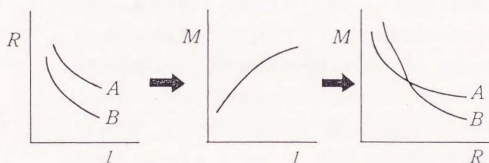


図7.6 $M-R$ 曲線の求め方

7-3 接地設計システムフロー

棒状電極の工法には単一電極を地中深くまで埋設する、いわゆる深埋接地施工と複数極を並列に接続する並列接地施工がある。これらの接地工法の選定には大地構造を十分に把握して、的確な情報のもとで行うことが必要である。つまり、大地パラメータを決定した上で、単一電極の接地抵抗あるいは並列電極の並列接地抵抗を計算し、所要接地抵抗を得るための電極長を求め、この電極長が工法的、経済的に妥当か否かを判断して、深埋接地施工にするか、並列接地施工にするかの選定を行うわけである。本章で提案する接地設計システムのフロー図を図7.7に示し、以下にその内容を説明する。

ステップ1：接地工事が可能なエリアを決定する。前述したように接地設計を目的としてエリアを選定できることはまれであり、通常はエリアが限定される場合が多い。大地抵抗率の測定、 $\rho-a$ 曲線の作成、大地パラメータの決定についてはく7-2-1に既に述べている。

ステップ2：本章で対象にしている大規模な接地施工においては、連結式棒状電極ではなく、ボーリング電極を主体としている。これは大地をボーリングして、その掘削孔に棒状電極（主として銅パイプ）を挿入して用いる電極である。したがって、電極径はボーリング機械の掘削性能と大地の土質（例えば粘土層、砂れき層、岩盤層等）から判断して決定されるものである。土質調査等で用いられるボーリング径は56～116mmまでが一般的である。本設計システムにおいては、ボーリング掘削の見地からボーリング電極の半径を決定することになっている。

ステップ3：所要接地抵抗は設備の種類や規模によって異なるが、一般の電気設備においては電気設備技術基準第28条に定められている値を用いている。それによると、第一種接地工事は 10Ω 、第二種接地工事は一線地絡電流で150Vを除いた値の抵抗値、第三種接地工事は

100Ω, 特別第三種接地工事は10Ωとなっている。変電所, 開閉所等の送電, 変電設備においては, 想定地絡電流値と接地系の許容電位上昇値との比によって決定される。例えば, 許容電位上昇の最大値を2000Vとしたとき, 想定地絡電流が15000Aであれば接地抵抗は0.133Ωとなる。この値が所要接地抵抗である。

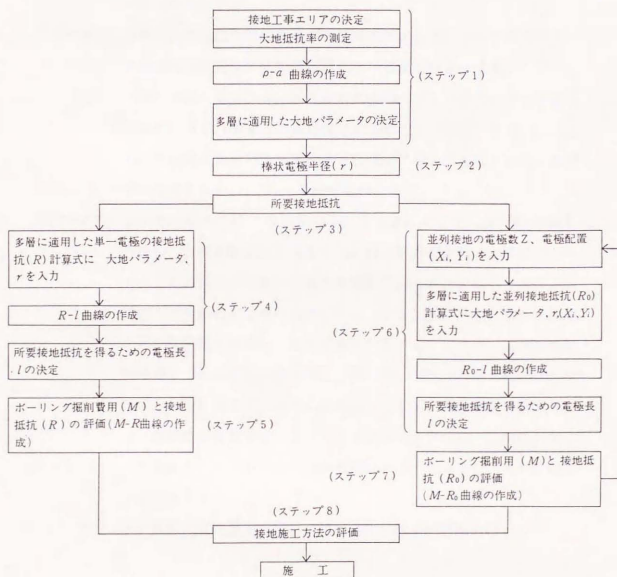


図7.7 接地設計システムのフロー図

ステップ4：ここでは、単一電極に対する接地抵抗の計算、 $R-l$ 曲線の作成、所要接地抵抗を得るための電極長について検討する。〈7-2-2〉で示した計算式に大地パラメータおよび電極半径を代入することで、接地抵抗を計算し、 $R-l$ 曲線を作成する。

ステップ5：単一電極の $R-l$ 曲線と〈7-2-3〉で述べた $M-l$ 曲線によって $M-R$ 曲線を作成する作業を行い、所要接地抵抗を得るための経済的評価を行う。

ステップ6：複数の電極を並列にした場合の接地抵抗の計算、 $R-l$ 曲線作成、所要接地抵抗を得るための電極長について検討する。まず、〈7-2-2〉で述べたように、与えられた接地工事エリア内における電極配置マップを作成する。初期設定の原則は中空配置とする。次に電極配置座標と大地パラメータおよび電極半径を計算式に代入し並列接地抵抗を計算し、 R_0-l 曲線を作成する。

ステップ7：並列接地電極の R_0-l 曲線と $M-l$ 曲線によって、 $M-R_0$ 曲線を作成し、所要接地抵抗を得るための経済的評価を行う。ここで、ステップ6の初期設定値で所要接地抵抗が得られない場合、あるいは費用 M が多額になる場合は再びステップ6に戻り、与えられたエリア内で電極数を増加し、接地抵抗を計算する。ここで、並列接地の特性値としての集合係数が存在するため、電極数が多くなればなるほど、さらに電極長が大きくなればなるほど、集合係数が大きくなり、並列接地効果が薄らぐことを留意すべきである。しかし、エリアが限定されているので、集合係数が大きくなっても、やむを得ない場合もある。

ステップ8：単一電極と並列電極の場合の施工方法の経済的評価を行う。

7-4 設計システムのケーススタディ

本章で提案している設計システムを理解するために、ケーススタディを試みる。既に接地工事エリアの面積が(40m×40m)、大地パラメータが与えられているものとする。

図7.8に示すように大地パラメータA, Bをもつ四層大地モデルにおいて、ボーリング電極半径 $r=0.033$ mとし、電極長を1~100mに変えたとき、単一電極の接地抵抗は図7.8の曲線になる。同図より、大地パラメータAの場合、所要接地抵抗が10Ωのとき電極長は22m、5Ωのときは100m必要となる。それに対して大地パラメータBの場合は10Ωのとき電極長は10m、5Ωのときは38m必要となる。最下層の ρ の値によって、このような差異が生じる。

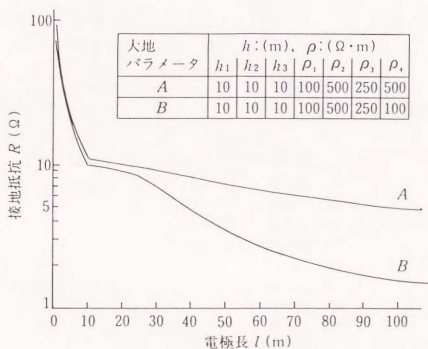
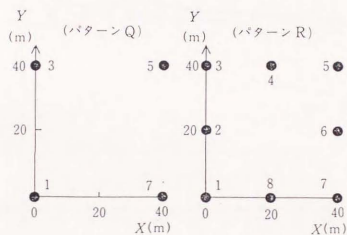


図7.8 電極長と接地抵抗の関係

次に、図 7. 9 に示す並列接地電極の配置パターンを設定する。大地パラメータは既に与えられている値を用いる。図 7. 10 に示す大地パラメータを用い、図 7. 9 で示した 4 極、8 極の電極配置としたとき、各極とも同時に電極長を 1 ~ 100 m まで変えたときの並列接地抵抗は図 7. 10 の曲線になる。同図より、大地パラメータ A 、 B の違いによる並列接地抵抗は単一電極の場合と同様な傾向を示している。



電極配置座標	
パターン Q	パターン R
$B_1(0, 0)$	$B_1(0, 0)$
$B_2(0, 40)$	$B_2(0, 20)$
$B_3(40, 40)$	$B_3(0, 40)$
$B_7(40, 0)$	$B_4(20, 40)$
	$B_5(40, 40)$
	$B_6(40, 20)$
	$B_7(40, 0)$
	$B_8(20, 0)$

図 7. 9 並列接地の電極パターン

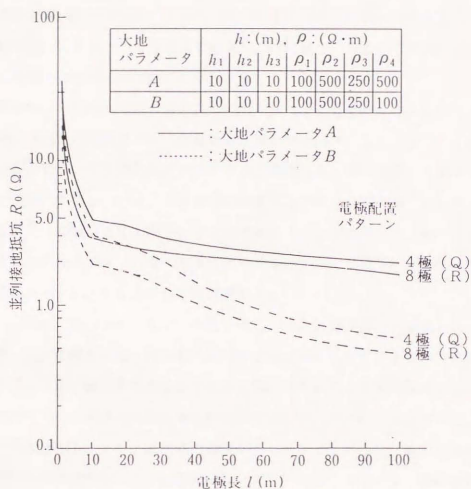


図 7. 10 電極長と並列接地抵抗の関係

電極配置パターンRはパターンQと同じエリア内に電極数を8極施工したものであり、並列接地抵抗は大幅に低減している。ちなみに、所要接地抵抗を 5Ω としたときの必要な電極長をみると、大地パラメータAの場合、パターンQでは6.8 m、パターンRでは4.6 mとなる。一方、大地パラメータBの場合、パターンQでは5.5 m、パターンRでは3.2 mとなる。これらの値は単一電極の場合に対して、並列接地工法であるから所要接地抵抗を得るための電極長を短くすることができるという特徴がある。

以上の作業により、単一電極の場合の R - ℓ 曲線 (図 7. 8), 並列電極の場合の R_0 - ℓ 曲線 (図 7. 10) を得た。そこで、図 7. 7 に示したステップ 5, ステップ 7 の経済的評価を行ってみる。図 7. 8, 図 7. 9 の結果をもとに、ある所要接地抵抗を得るための電極長を決定し、次に図 7. 5 に示した M - ℓ 曲線よりこの電極長における掘削費用を決定する。

この作業により、ある電極で得られる接地抵抗 (R) とそれに必要なボーリング掘削費用 (M) の関係を M - R 曲線として表わすと図 7. 11, 図 7. 12 のようになる。図 7. 11 は大地パラメータ A の場合であるが、1 極とパターン Q の曲線に交点が存在している。これは所要接地抵抗が $10\ \Omega$ 以上のときは単一電極の深埋施工 (電極長 2.2 m 以下) が有利であることを示している。ところが、 $3 \sim 10\ \Omega$ のときはパターン Q (電極長 $3 \sim 2.9\text{ m}$), $3\ \Omega$ 以下のときはパターン R (電極長 9 m 以上) を選ぶのが最適である。

図 7. 12 は大地パラメータ B の場合である。これは最下層の ρ が低くなっているため、短い電極長で低い所要接地抵抗を容易に得ることができる。つまり、それだけボーリング掘削費用が少なくて済むことである。この電極長は $10 \sim 30\text{ m}$ の範囲にあり、電極は地層の境界付近に存在しているために変曲点が生じている。そのため図 7. 11 とは曲線の様相が少し異なっているが、施工方法を選定する判断の傾向は同じである。図に示したように大地パラメータ、電極配置パターンにより M - R 曲線の様相は異なるが、これらの曲線によりボーリング電極の電極長に対する経済的評価を行うことができ、所要接地抵抗に対して最も適した接地施工方法を選定することが可能になる。つまり、四層大地構造モデルにおいて、大地パラメータを把握した上で、単一電極の深埋接地施工にするのか、4 極並列接地施工であれば、配置パターン Q , R のどれを選ぶかを判断することができる。

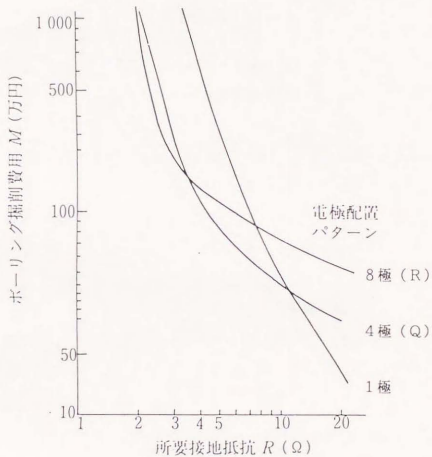


図 7. 1 1 所要接地抵抗とボーリング掘削費用の関係
(大地パラメータ A の場合)

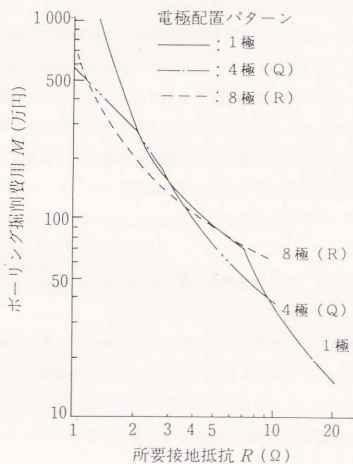


図 7. 12 所要接地抵抗とボーリング掘削費用の関係
(大地パラメータ B の場合)

本章では多層大地構造を考慮した棒状電極（主としてボーリング電極）による接地設計システムを検討した。接地施工エリア、大地パラメータ、電極半径の3種類の情報により、本接地設計システムを実行し、ケーススタディを行った結果、所要接地抵抗（ R ）とボーリング掘削費用（ M ）の関係を表わした $M-R$ 曲線によって接地施工方法を選定する判断基準を得ること、およびその経済的評価を行うことが可能であることがわかった。

従来の接地設計には反映されなかった地層別の大地パラメータ、特に ρ の低い地層の情報等の多層大地を考慮した接地設計システムの手法を用いることによって、大地構造に応じた最適な接地施工方法を選定することの糸口を明確にすることができたと考える。本章は従来の試行錯誤的な設計方法から一歩踏み込んだ、効率の良い接地設計を行うための基本的な考え方を示した。

第7章の参考文献

- (1) 高橋，川瀬：「多層大地を考慮した棒状電極による接地設計システムの提案」電気設備学会論文，Vol.10，No.6（平2-6）
- (2) 高橋：「接地技術の動向」電学誌，Vol.106，No.69（昭61-4）
- (3) 高橋，川瀬：「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」電学論 B，Vol.108，No.5（昭63-5）
- (4) 高橋，川瀬：「多層大地における棒状電極の並列接地抵抗の解析」電学論 B，Vol.108，No.12（昭63-12）
- (5) 高橋，川瀬：「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」電学論 B，Vol.108，No.8（昭63-8）
- (6) 高橋，川瀬：「ウェンナーの四電極法における補助極について」昭61電気学会大会，p1569
- (7) （財）経済調査会：「積算資料」p631，昭63-8

第8章 結言

8-1 研究成果の要約

本論文は多層大地を考慮した場合の棒状接地電極の接地抵抗に関する課題を体系的にまとめたものである。

まず、多層大地における棒状電極が単極の場合および並列極の場合の接地抵抗を計算するための解析解を導出した。これらの導出した式を用いて接地抵抗を計算するには多層大地の大地パラメータを必要とする。そこで、ウェンナーの四電極法で得られる $\rho-a$ 曲線から大地パラメータを推定するための多層に適用する見掛けの大地抵抗率を計算する解析解を導出した。このように本論文は多層大地を考慮した場合の接地抵抗を計算するための解析解の導出を主体に展開した。これらの解析解をもとに、大地パラメータの推定を実現するための大地抵抗率の計算、1極の接地抵抗の計算、複数極の接地抵抗の計算等のための計算式の導出および数値計算プログラムを策定し、多層大地における接地設計システムの構築まで発展させた。それらは内外において全く検討されていなかった新しい知見である。

さらに、本論文で示した理論的な検討結果をふまえて、野外実験により実測データとの検討を行い、工学的な有用性を確認した。

以上のように本論文は高い信頼性が要求されている接地設計に寄与するために多層大地を考慮した場合の棒状電極の接地抵抗計算式を検討したものである。

本論文の成果は電力会社における超高压以上の電圧階級の送電の実用化に伴う変電所、開閉所の接地設計に導入され、現在、計画設計に寄与している。また、高度情報化時代に即した例えばインテリジェントビル等の接地設計にも採用されつつある。さらに IEEE の WG78.1 (Substation Committee, PES) においては、本論文で示した多層接地抵抗についての内容を「IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding」(IEEE std 80)に答申する旨のことである。

本研究によって得られた結果を項目毎にまとめると以下のようになる。

1. 多層大地を考慮した見掛けの大地抵抗率計算式の解析 (第2章)

従来は、二層大地における見掛けの大地抵抗率の理論式しか存在しなかったために、多層問題を解くための地層別の大地パラメータの情報を得ることが困難であった。これを改善するために、多層構造大地における見掛けの大地抵抗率を求める理論式の解析解を導出し、それにより任意の地層構造における $\rho-a$ 標準曲線を作成することを検討してきた。その結果、多層構造大地における $\rho-a$ 曲線の特徴を把握することができた。さらに、応用として大地パラメータを推定する手法を明確にすることができた。

2. 多層大地における棒状電極の接地抵抗計算式の解析 (第3章)

従来は、二層大地における接地抵抗計算式しか存在しなかったが、多層大地に適用する接地抵抗計算のための理論式を解析することができた。さらにコンピュータによる接地抵抗計算のための数値計算プログラムを作成し、任意の地層、任意の電極長における接地抵抗を容易に計算することが可能になった。その結果、多層構造大地における接地抵抗の特徴を把握することができた。

3. ボーリング深埋電極による接地抵抗の実測とその評価 (第4章)

第3章で検討した接地抵抗計算式の検証を主目的としてボーリング深埋電極の接地抵抗に関するフィールド実験を行い、その実測データと計算値の評価を検討した。その結果、第3章で提案している多層大地抵抗計算式によって接地抵抗の予測を行う場合、導出した接地抵抗計算式は充分に実用に供することを確認した。

4. 多層大地における棒状電極の並列接地抵抗計算式の解析 (第5章)

従来は棒状電極の並列接地抵抗を計算する場合、均質地層大地に対する計算手法のみであった。そこで、本論文では多層大地における棒状電極の電位分布計算式を導出し、それを並列接地抵抗の計算に応用し、並列接地抵抗計算式を解析することができた。そして数値計算により多層問題としての並列接地抵抗、および集合係数の特徴を把握することができた。その結果、大地構造によっては従来の並列接地抵抗計算式による予測接地抵抗が低目に出る可能性があること、集合係数が大地パラメータと強い相関があることなど、基本的な事項を明確にすることができた。

5. ボーリング深埋電極の並列接地抵抗の実測とその評価 (第6章)

第5章で検討した並列接地抵抗計算式の検証を目的としてボーリング深埋電極の接地抵抗に関する実測データと計算値の評価を検討した。その結果、第5章で提案している多層大地を考慮した並列接地抵抗計算式によって並列接地抵抗の予測を行う場合、導出した並列接地抵抗計算式は充分に実用に供することを確認した。

6. 多層大地を考慮した棒状電極群による接地設計システム (第7章)

従来の接地設計は均質地層として、ややもすれば試行錯誤的に行われてきたようである。本論文では大地パラメータの推定法、接地抵抗の計算法を組み合わせ多層大地を考慮した棒状電極（主としてボーリング電極）による接地設計システムを検討した。接地施工エリア、大地パラメータ、電極半径の3種類の情報により、本接地設計システムを実行し、ケーススタディを行った結果、所要接地抵

抗 (R) とボーリング掘削費用 (M) の関係を表した M-R 曲線によって接地施工法を選定する判断基準を得ること、およびその経済的評価を行うことが可能であることがわかった。

従来の接地設計には反映されなかった地層別の大地パラメータ、特に大地抵抗率の低い地層の情報等の多層大地を考慮した接地設計システムの手法を用いることによって、大地構造に応じた最適な接地施工法を選定することの糸口を明確にすることができた。

8-2 今後の問題と発展性

接地抵抗計算において多層問題の検討は、二層大地を考慮した接地抵抗計算式に留まり、それ以上の発展はなかった。しかし、本研究によって、多層大地に適用する接地抵抗計算が可能になった。

従前から、変電所、開閉所あるいはビルにおける接地工法はメッシュ接地を主体に行われている。欧米諸国においてもこれが一般的になっているが、Dawalibi 氏が指摘しているように、近年では米国においても、接地施工面積が制限される傾向にあり、ボーリング電極による深埋接地工法の採用が多くなりつつあるという。特に大都市近郊では電力需要の増加に伴うビルの地下における地下式変電所の建設、あるいはインテリジェントビルの建設が多くなってきており、ますます棒状電極による深埋接地工法のニーズが高まってきている。

棒状電極による接地工法は接地工事のための面積が少なく済む利点をもつもので、電気設備のコンパクト化および用地確保が困難になっている状況にあつては、この接地工法がますます一般化するものと思われる。このような場合に、本論文で示した棒状電極による接地設計システムの意義が認識されるであろう。

さて、上述の状況は予想されるとはしても、大規模設備の接地工法はまだメッシュ接地を主体に、棒状電極を併用した形態をとるものが多い。このような場合の多層問題は、例えば、二層大地の場合ですら全く検討されていない。したがっ

て、今後の課題のひとつとなる。

さらに、接地電極がボリウムをもつ形状、例えば、直六面体状電極の接地抵抗は建築構造体を代用電極に採用するときが必要である。このような形状の接地抵抗は形状係数を導入して接地抵抗を計算しているが、この場合にも多層問題を検討する必要がある。

謝辞

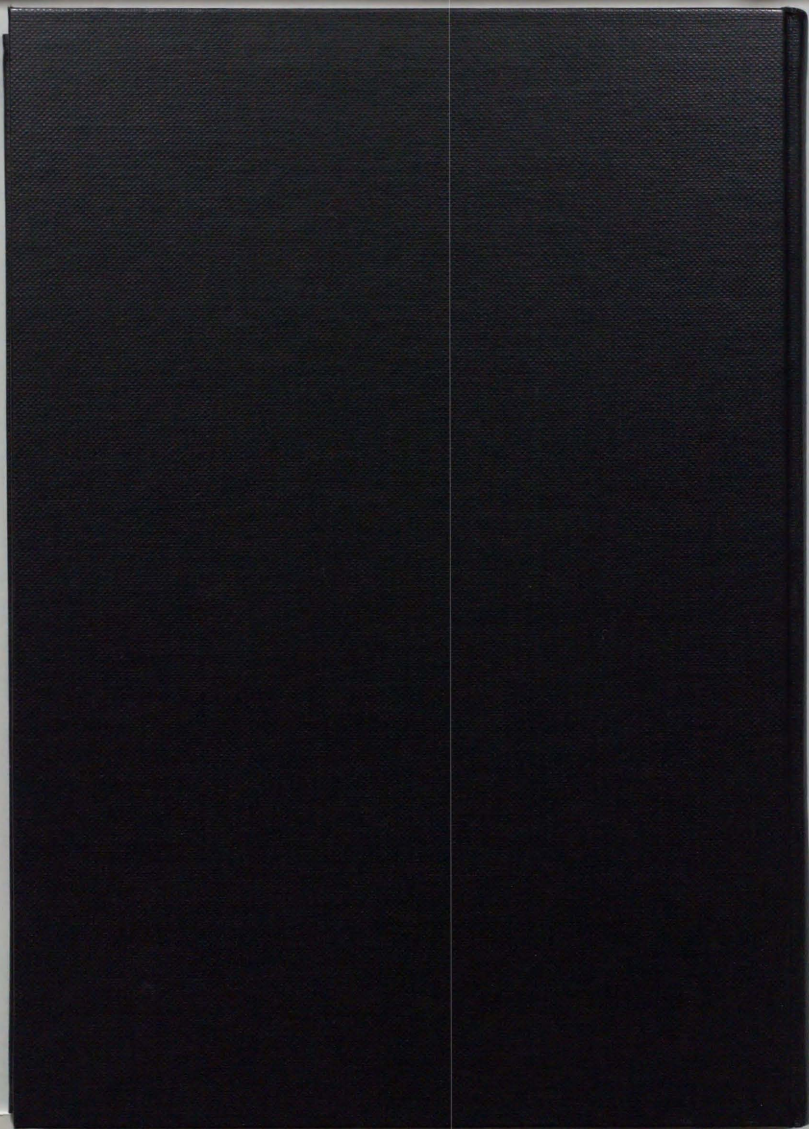
本論文を取りまとめるにあたり、東京大学生産技術研究所教授河村達雄博士、東京大学教授河野照哉博士よりご多忙中にも拘らず終始、懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました。心より感謝いたします。

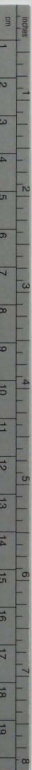
また、貴重な御意見をいただいた東京大学教授正田英介博士、同学教授桂井誠博士、同学助教授小田哲治博士、東京大学生産技術研究所助教授石井勝博士、東京大学助教授日高邦彦博士に心より御礼を申し上げます。

本研究は千葉大学工学部電気工学科教授川瀬太郎博士のもとで行ったもので、筆者を接地に関する研究への道に導き、日頃から親身に御指導、御討論して下さいました川瀬太郎教授に心より御礼を申し上げます。また、東京大学名誉教授・電力中央研究所理事山村昌博士、京都大学教授林宗明博士、東京理科大学教授鶴見策郎博士には筆者の接地に関する研究に対して暖かい御鞭撻を賜りました。さらに、東京電力（株）配電技術課河野純生課長、東京避雷針工業（株）三木常一社長および（社）電気設備学会、東京電力（株）送変電建設本部・工務部、東電設計（株）電気本部の関係者には多大な御協力を賜りました。馬力と探求心だけがとりえの筆者に対して、ここまで育てて下さった各位の御指導、御鞭撻、御協力に心より御礼を申し上げます。

本研究に関する主要発表論文

1. 高橋, 川瀬: 「多層大地における見掛けの大地抵抗率の解析」
電気学会論文誌 B, Vol.108, No.8, p383-p389 (昭63-8)
2. 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の接地抵抗の解析」
電気学会論文誌 B, Vol.108, No.5, p229-p235 (昭63-5)
3. 高橋, 川瀬: 「多層大地における棒状電極の並列接地抵抗の解析」
電気学会論文誌 B, Vol.108, No.12, p585-p592 (昭63-12)
4. 高橋, 川瀬: 「多層大地を考慮した棒状電極による接地設計システムの
提案」電気設備学会論文, Vol.10, No.6, p434-p441 (平2-6)
5. 高橋, 川瀬: 「ビル接地システムに関する考察」
電気設備学会論文, Vol.7, No.10, p638~647 (昭63)
6. 高橋, 川瀬: 「接地技術の最近の動向」
電気学会論文誌 B (解説論文), Vol.110, No.6, p101-p105 (平2-6)
7. 高橋, 川瀬: 「接地電極の形状係数の推定法」
電気学会論文誌 B (研究開発ノート) Vol.103, No.12 (昭58-12)
8. T.Takahashi, T. Kawase: 「Analysis of Apparent Resistivity in a
Multi-Layer Earth Structure」IEEE Transaction on Power Delivery,
Vol.5, No.2, p604-p612, April 1990
9. T.Takahashi, T. Kawase: 「Calculation of Earth Resistance for a Deep
Driven Rod in a Multi-layer Earth Structure」
IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.6, No.2 (予定)
10. T.Takahashi, T. Kawase: 「Analysis of Combined Earth Resistance for
Parallel Driven Rods in Multi-layered Earth」
Electrical Engineering in Japan, Vol.109, No.1, p40-46,
SCRIPTA TECHNICA, Inc.





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

