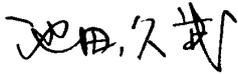


電気探査法おける二、三の問題について

(垂直探査法における結果の解釈を中心として)



矢 作 文 彌*

1. ま え が き

近来、土木構造物基礎・地下水その他各種の調査に、試垂と併せて電気探査が利用されることが頻に多くなってきた。そして、両者を有機的に活用することによって、それらの長所短所を相補い、調査経費の節減と調査時日の短縮が可能となり、電気探査に関する関心と認識は漸く高まらんという段階になっている。

電気探査法の歴史は未だ浅く、我が国へ導入されてより僅かに 20 有余年であるにも拘らず現在のように広く用いられるようになった所以は、従来の啓蒙書と先人の努力の然らしめるものであった。しかし、その反面「過ぎたるは及ばざるの如し」との諺のように、啓蒙の浸透が進むにつれて、往々にして電気探査法に関する正当な認識を欠き、過大評価或いは時には過小評価を行う向きがあるやに見えるようになった。

そこで、電気探査法の内、基礎調査に最も多く使用される比抵抗法による垂直探査について、吾々が探査を実際に行う場合に直面するような問題点の二、三に関し、測定結果の処理—解析とその解釈—を中心として筆者の経験を基に愚見を述べてみたい。

尙、電気探査法、なかんずく比抵抗法の基礎理論、測定法、解析法等の詳細については、既に幾多の教科書や文献があって、それらに詳述されているので、ここでは省略する。

2. ρ - a 曲線を求めるまでの一般的注意

垂直探査の現場測定作業は、或る電極間隔 (a) に対応する見かけの比抵抗 (ρ) を求め、 a を次第に拡大して行って、 a と ρ との関係— ρ - a 曲線—を得ることであり、それを解析し解釈して地下構造を判定するわけである。これを逆にいえば、比抵抗法によって地下構造を探索する場合、根拠とし得るものは、 ρ - a 曲線ただ一つといつても過言ではなく、この一本の曲線中に、関係するすべての要素が織込まれているのである。従って、良い解析結果を得る為には、地下構造をそのまま反映した誤差の無い ρ - a 曲線を得なければならない。しかしながら実際の測定に当っては、いろいろな自然的及び人為

的の誤差が伴いがちであるから、解析段階になって測定値に疑念を懐くようなことなく自信と信頼の念を以て取扱うことができるよう、自然的誤差の原因究明と人為的誤差の排除とを測定の時に努めて行い、解析段階に備えることは、良い探査結果を得る上の大前提である。従って、測定作業中にも常に解析を意識し、測線の状況、電極の状態等、作業全般について細大洩らさぬ注意と管理を行うと共に、 ρ と a との関係の展開に留意し、電極間隔の不正、計算の誤り、接地状態の不良などによる ρ - a 関係の不整が起らぬよう気をつけ、もしいささかの疑念があれば直ちに再測して測定値を確認することによって、測定値を正し、また不整の原因を調べるなど諸般の状態を認識しておかねばならない。

電気探査法を地質調査の一手段として行う限り、 ρ - a 曲線を解析してその結果を表現する場合、最終的には地質学的な表現を採らねば無意味である。電気探査は地層の電氣的性質を利用するもので、地層の電氣的性質（比抵抗法では、電気比抵抗）の差異を構造的に求めることであるが、一般に地層の電氣的境界と地質学的境界とは必ずしも一致せず、近似的に平行することが多いし、また、砂礫層内の地下水面の上と下とのように、地質学的には同一の砂礫層でも電氣的には異種の層を含んで示現されることがある。従って結果の解析と表現に際しては、地質学的な背景から、解析結果を充分咀嚼し解釈することが肝要で、いたずらに地球物理学的解析結果のみとらわれてはならない。その為には、電気探査法と地質学の両者に精通した技術者が探査を行うことが理想的であるが、さうでないことの多い普通のような場合には、予め地質踏査を充分に行い、また解析段階においても相互に連絡をとるなど、充分な協調が必要で、地質学的背景なしに探査を試みることは、単に地球物理学的な異常を地層から認め得たということであって、地質調査の一環としては無謀に近く、また意味の無いこととなり兼ねないといえよう。

3. 露頭における各層の比抵抗測定

探査実施前に行われた地質踏査や地質学的背景から、測点付近における地質構造は定性的には予め大雑把な意味で推定することができようし、またこの推定を認識し

* 電力中央研究所 技術研究所第二部地質研究室



ていることは解析やそれに続く解釈の際に必須なことである。従って下層に検出されるべき地層の露頭が付近にある場合、その比抵抗を測定してをくことは、解析上の重要な資料を得ることとなって推奨されることである。しかし露頭の測定は、対象が乾いた状態にあるとき行うことが多いのに反し、地下構造としてのその露頭は地下水等のため湿潤乃至飽和しているから、同一地層でも露頭における測定で得た比抵抗値が、解析の結果、下層の比抵抗として求められた値と等しくなることは稀であって、その為に、露頭による比抵抗値に拘泥し過ぎても誤った解釈を行うことになるから、充分注意せねばならない。この点、電気検層の活用が望ましい。

4. 見かけの境界ということ

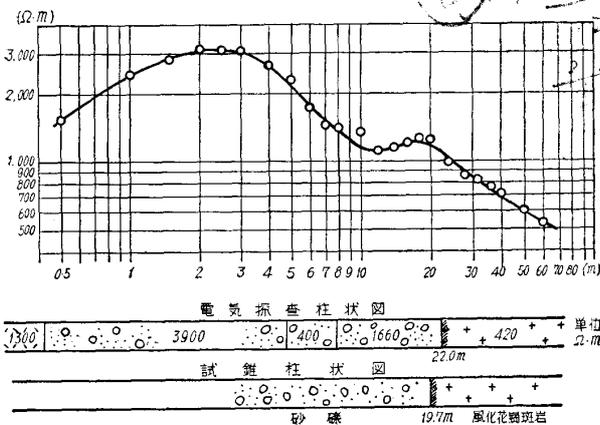


図-1 木曾川における ρ - a 曲線と地質柱状図

図-1 は、木曾川に沿う河成段丘において、水力発電用水路のルート選定の為に、基盤である風化花崗斑岩を探索した際に得られた ρ - a 曲線である。この ρ - a 曲線には測定値の乱れが若干見られるが、そのような所では、前述のように、測定値の誤読、計算の誤り、電極間隔の不正或いは電極接地状態の不良等の人為的誤差を確かめた後、再測して得た値であって、その乱れの原因は、測定地帯が段々畠に覆われている為の段違いによるものであることが明らかとなっている。この ρ - a 曲線を標準曲線で解析すると、同図中の電気探査柱状図に示すようになり、5層構造である。しかし、この測点近傍で行った試錐結果を見ると、基盤上には砂礫層より他に存在していない。すなわち電気探査の第2、第3、第4の各層は、本来地質的には砂礫層として単一に取扱うべきものであるが、粘土分の多少、地下水の状態等の為に、電気的には、その中に境界面が生じた結果、あたかも複雑な地質構造をもっているかのように現われたもので、この種の境界は地質学的観点からすれば、見かけの境界面といわざるを得ず、解釈上注意を要することである。現実の場合、どれが見かけの境界面であるかということは、個々の場合に即して地質学的背景に立って考えねばなら

ない。

5. 探査結果の示す深さについて

前項に挙げた例において、基盤としての風化花崗斑岩の深さについて、電気探査より 22.0 m、試錐より 19.7 m が得られている。基盤面が測点付近においてかなりの範囲にわたって地表面と平行でかつ平坦な場合はとにかく、一般には地表面にも基盤面にも起伏凹凸がある訳であって、そのような場合、電気探査より得られた基盤面の深さ 22.0 m は、単に測点付近における基盤面の平均の深さを示すもので、数値通りに 22.0 m 掘れば基盤が出てくると解すべきではない。何故ならば、図-2 に示すように A 及び B の相異なる 2つの地下構造があるとき、地表面で検知する下層の影響は電流が透入する測定領域の有効体積とでも称すべきものの大小によって現われるから、図のように深さ d_1 、 d_2 が相異なり、地下構造が異なるにも拘らず、有効体積が同じである為、電気的には同じ示徴を与えることになるので、解析によって得た境界面の深さは、測点近傍の平均的の数値と見ねばならないからである。また一方試錐によって得られた基盤の深さにしても、試錐孔が基盤と交わった点の深さが 19.7 m ということであって、その点から若干離れた所における深さは知るべくもない。従って両者の差をとれば、数値的に 2.3 m の差が得られるが、これより直ちに電気探査による基盤の深さには、2.3 m の誤りがあったとすることは当を得ていない。この取扱いは、探査目的によって処理すべきであろう。垂直探査法は、元来水平成層構造を探索理論の出発点としてをり、その他の理論形成上の前提条件をも合わせて、すべての仮定が理想的に満足されているような現場というものは恐らく絶無と考えてよい。であるから、何らかの自然的誤差の介入はそれ自体避けがたいことであろう。従って解析上の誤差も

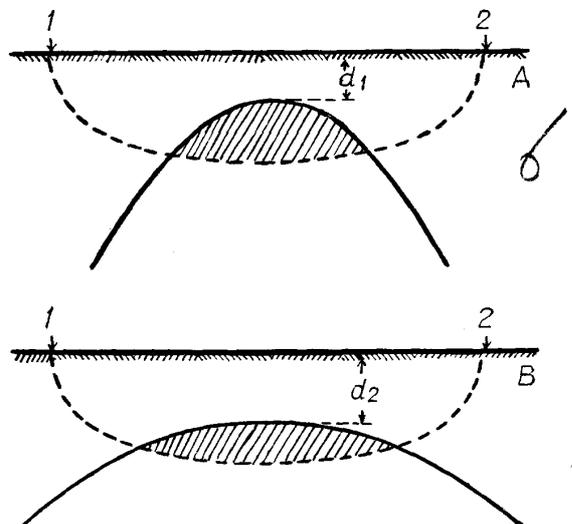


図-2 電気透水深度と検出性能

報 文・論 文

当然ある筈であるし、電氣的境界と地質学的境界とが一致するとは限らないことも合わせて考えねばならない。その為、大きな規模における地下構造の探査で多少の誤差の許せる場合はさて置き、例えば土木工事の為の調査のように深さの絶対値が重要である場合には、探査によって得られた地質境界面の深さそのものを以て工事上の設計などの資料とするようなことは排すべきである。

6. 地表及び地形の異常などについて

垂直探査の基礎理論には、等方均質な半無限媒質とか平行成層構造その他いろいろな仮定が前提条件とされている。しかし、探査を実施する場所がすべてこれらの条件を備えているようなことは恐らくあり得ないであろう。地表の異常とか地形の起伏、境界面の傾斜と曲折等実際の地下構造は千変万化である。

(1) 地表の異常

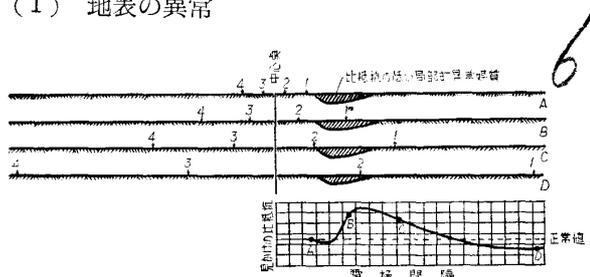


図-3 垂直探査法における地表附近の局部的異常媒質の景

図-3 は地表又はその近くに比抵抗の小さい局部的異常物質があるとき、これを横切ってとった測線上で Wenner 電極配列 (等間隔電極) により垂直探査を行った場合に得られる見かけの比抵抗の定性的変化状況を示すものである。地下構造そのものは均質であるにも拘らず、小さな異常物が局部的にある為に、 ρ - a 曲線には複雑な多層構造をしているかのような見かけの比抵抗の変化が現われる。従って異常物の存在を知らずに解析すると、思わぬ地下構造を創造することとなりかねないから、水路、水溜り、湿地、伏在する大転石、埋設金属管等を測線が通過したときは、解析の場合充分留意せねばならない。この場合、定性的には図のような変化をすることが判っていても、局部的異常物質の影響について定量的に測定値を補正することは殆ど不可能であるから、あらかじめ測定の際に、測線上に上のような異常物が及ぶ限り入らぬように、測線方向を選定しなければならない。また、場合によっては同一測点について測線を直交させて測定を試みることも、異常物質の影響を浮き彫りにする上に効果があろう。

以上は、Wenner 電極配列を用いた場合についてであるが、Schlumberger 電極配列 (註 1) によって測定を行うと、地表の異常による影響は除かれ、上記のような虞れがなくなる利点がある。すなわち、図-4 は、局部

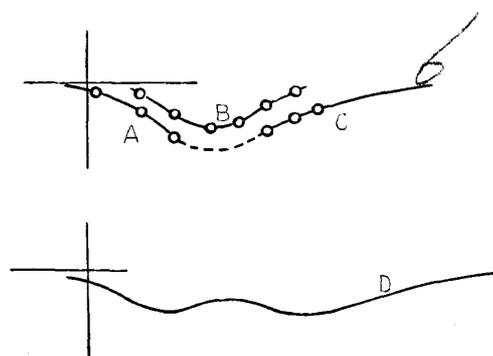


図-4

的異常物質が測線上にある場合に ρ - a 曲線に現われるその異常物質の影響を定性的かつ模式的に例示したもので、同じ測線上で上図は Schlumberger 配列に、下図は Wenner 配列によってそれぞれ得られた曲線である。前者の曲線には 3 つの部分があり、そのおのおの間では、電位電極間隔が相異っている。ただし、各部分内では電極間隔が一定である。2 番目の電位電極間隔をとったとき、電位電極の 1 つまたは両方の近くに局部的異常物質があったので、曲線の B の部分では、両側の 2 つより全体的に上に移っている。従ってこの B の部分を下に平行移動し、A 及び C の部分と接げば局部的異常物質の影響を除き得るわけである。これに反して Wenner 配列による曲線は一見円滑ではあるが、局部的不均質物の影響と地下構造によるものとが重畳してをり、これを分離することが全くできない。

(2) 地形の異常

電気探査理論は半無限媒質を前提としているので、できる限り測線断面は平坦であることが望ましい。しかし、いかに努めても、測線断面の地表に彎曲なり起伏なりが大なり小なり入らざるを得ないのが普通であって、この地形の異常は、基礎理論の前提に合致していないのであるから、測定結果にも当然介入し誤差の原因となる筈である。地形の異常の影響については、若干の典型的モデルについて理論的に解かれているが、実用的な段階にまでは至ってをらず、これらの解によってその影響を理論的定量的に分離し、純粹の平行成層構造に補正して解析することは未だできない。このことは下層が傾斜している場合についても同様である。 ρ - a 曲線において、或る電極間隔に対する見かけの比抵抗は、地下構造、地表異常、地形の影響等の各要素を主とした函数であり、また地形の影響の程度は、その振幅なり波長なりと電極間隔との比を主にした兼ね合ひによるものであるから、測定の際にあらかじめこれらの関係を考えて、order を評価し定性的又は半定量的な認識をしておいて解析に望めば、特別な場合は別としてかなりの効果を挙げ得るのである。これには相当主観が入り、解析の誤差も増大するわけであるが、理論的な地形異常の補正法が確立さ

れていない現状においては、やむを得ないことである。

7. ρ - a 曲線の不整, 不連続

電気探査において、電流電極間隔を拡げるにつれて電流は次第に深部に透入するようになり、測定値にも深層の影響が現われてくる。けれども電極間隔が大きくなる程、地下を流れる電流分布の変化は鈍くなるから、電気的性質が急激に異なるような地質構造の変化が深い所であっても、それより上部の地層の方が大きく寄与するため、平均化されるので、理論的には ρ - a 曲線は連続的かつ比較的緩漫に変化し、急激な曲折とか不連続とかは起り得ない筈である。しかし、実際に野外で探査を実施すると、得られる ρ - a 曲線には標準曲線の上下限を超えるような急な曲折が現われることが往々にして起る。元来、標準曲線というものは、前提条件がすべて満足された理想的構造の場合のものであるから、標準曲線の範囲を越えた急激な変化というものは、その前提条件が満たされていない場合に起ることが当然考えられ、事実に地表又はその近くにおける異常物質の存在とか水平方向の不連続、電極接地状態の不良等がその主な原因であることが多い。いずれにしても現実で得られた ρ - a 曲線がこのようなものである場合、これを標準曲線によって理論的に解析しようとしても、当然不可能である。Moore の方法 (註 2) 又は Heiland の方法 (註 3) によれば、このような場合でも一応解析できることになるが、これらの方法には理論的裏付けが全く無く、単に経験に頼っているに過ぎないので、その結果が実際の構造と仮に一致したとしても、単に偶然の所業かも知れない。従って解析の決定的手段としては採るべきではない。このように理論的処理が不可能の場合は寧ろこの測点又は測定対象は、電気探査には不向きなものと考えべきで、どうしても結果が必要ならば、曲線対比法等の手段に訴えて解析すべきであろう。

8. 或る探査例について

図-5 は、大井川上流の粘板岩を主な基盤とする地点において、表上がかなり薄く所々に粘板岩の露出が見られる地点で得られた ρ - a の曲線とその解析結果及びそれを解析した柱状図である。粘板岩は古生層に属し、露頭はかなり目の多いものとなっている。表土は崖錐を交えた岩片を伴うもので、その厚さは精々数 m 程度である。岩片の為電極の接地状態が良くなかったので、測定値に多少の偏倚が現われたが、これを解析すると基盤の深さとして約 10 m が得られ、その上の第 2 層としては約 3 m から 10 m までの間に比抵抗値が約 11,000 Ω ·m 程度の層があつて、表土と基盤との間に介在することになっている。一方、図-6 は前記測点に近接した位置で、測

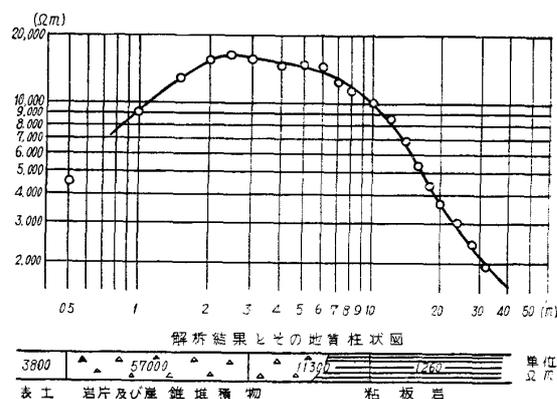


図-5 大井川における ρ - a 曲線と地質柱状図

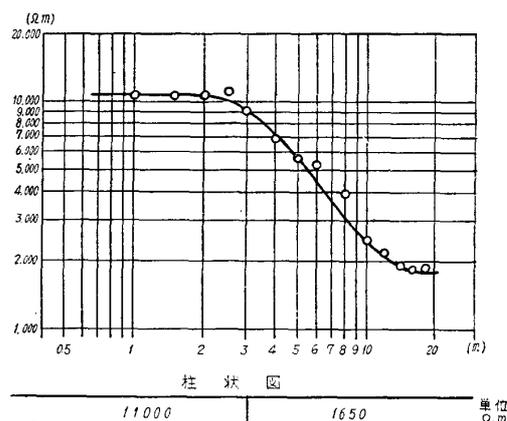


図-6 粘板岩上における ρ - a 曲線

定方向も同一にし、殆ど表土のない状態において、同じ粘板岩の岩盤上で得た ρ - a 曲線である。岩盤上の為電極の接地が悪いので、相当乱れのある ρ - a 曲線となったが、大勢より解析すると、約 3 m の深さに境界が現われている。つまり、地質学的に見た粘板岩の岩盤内部に電気的な境界が生じている。しかしこれは前述した見かけの境界ではない。その理由は、古生層の粘板岩の表面部分が風化作用などで粗鬆となった結果目が非常に多くなり、一見密につまった崖錐堆積物のような様相を呈するので、岩塊自体の部分とは比抵抗が異なり、本来よりも高くなって崖錐堆積物の比抵抗に近づいたものと解釈されるからである。これを参考にして図-5 の ρ - a 曲線の解析結果を解釈すると、第 2 層の厚さ約 7 m の内、下半分程度は粘板岩盤の粗鬆化した表面部分で、上半分が本来の崖錐堆積物と解釈でき、その結果、岩盤とその被覆層との地質学的境界は電気探査では判らないこととなったものであって、解析結果と柱状図における地質境界とが喰違うのもその為である。このような現象は水成岩特に粘板岩、頁岩、砂岩等の基礎岩盤の探査の際には、しばしば遭遇することである。従って、このような場合、同じ岩盤内でも土木工事などのために必要な堅盤迄の深さを知りたい場合などには、有意義な資料ともなり得ようが、地質学的な岩盤面の深さを問題にしているときは、電気探査では不可能ということになる。従っ

報 文・論 文

て、電気探査結果の意味は固定的でないから、目的に副って活用するべきものであって、電気探査は決して万能なものではないことを認識しておく要がある。

如上のことは風化部分のない堅硬な岩盤であっても、表面と内部とでは比抵抗がかなり異なることがあるし、また電氣的非等方性の大きな地層（特に水成作用による堆積層）では、非等方性が結果に大きな影響を与えることがあるから、結果の処理に当ってはこの点も充分注意せねばならない。

9. む す び

電気探査法は電流理論を根幹とし地層の電氣的性質を利用して理論的に組立てた地質調査の演繹的体系である。従って測定結果の解析に当っても理論的に対処すべきが基本的態度であって、従来ややもすれば見られたように、濫りに経験的観念的な態度を挿し挟むべきではないのは当然である。更に解析結果を解釈し意味付けを行う際には前述のように解析結果を基に地質学的背景を以て処理すべきである。けれども、実際の探査作業は、千変万化する地質、地形、気象等の諸条件下において行われるのであるから、いかに努めても人為的あるいは自然的誤差が測定値に介入することは不可避的であり、このような要素を含みがちな探査結果の処理に飽くまで理論に固執する偏狭な態度をとり過ぎると、地質学的意味付けが全く不可能な架空の地下構造を創造する結果となる。このようなことは本末顛倒も甚だしいといわねばならない。従って理論的態様の堅持はもちろん最も重要であるが、その態度には地質学と協調し、地質学的背景による結果の帰納を認める度量が必要であると共に、地質学的独断から探査結果を枉げるような専行も排除せねばならない。

以上、筆者の経験を基に、電気探査を実施する際に直面する問題の若干について愚見を述べた。従来の教科書はややもすれば啓蒙の為といえ机上の論が多く、探査実施上の諸点については触れられていない場合が多いので、これらに関する諸注意と批判的意見を敢て述べた次第である。大方の参考に資し得れば幸甚である。

註 1. Schlumberger 電極配列

垂直探査を実施する上に従来最も多く用いられてきた電極配列は等間隔に4本の電極を設ける Wenner 法であったが、この方法は測定値の処理は簡単ではあるけれども地表の異常の影響を受け易い。Schlumberger 配列は、電極を等間隔とせず測点を中心として左右対称に、電位電極間隔を電流電極間隔の1/5以下、普通1/10より小さくし、間隔を広げる際には、電流電極を4回ないし5回動かす間電位電極は固定しておく。また電位電極を移動するときは、1つの電流電極間隔に対して2種の電位電極間隔で測定し、曲線の一部づつを重複させるようにする（図—4参照）。この配列法は、ヨーロッパを中心として最近頗る使用されるようになり、特に深層（数百mないし数十m）の探査に偉力を発揮している。

註 2. Moore の方法

経験的解析法の1種で積算曲線法ともいわれる。 $\rho-a$ 曲線の見かけの比抵抗を順次積算し曲率の大きい所における積算曲線の交点を地層の境界とする方法で、何ら理論的根拠は無い。

註 3. Heiland の方法

同じく経験的解析法の1つで微分曲線法ともいわれる、 $\rho-a$ 曲線において見かけの比抵抗の代数差を次々に求めプロットしたとき、その曲線の曲折点が地層の境界面であるという。この方法も理論的根拠をもたない。

《 稿 投 歓 迎 》

- 土質調査、基礎工事などに関する現場からの報告を特に歓迎します。
- 報告の内容は次のどれかに相当するものとします
 - a. 基礎、地盤、路床、路盤などについての調査試験とその検討
 - b. 現場に応用した土質調査の新しい方法。
 - c. 地スベリ、凍上その他土に関する防災対策工事
 - d. 土構造物、坑土圧構造物などについての調査設計、施工
 - e. 新しい施工機械、新工法による工事施工例
- 執筆要項は次の通りとします。
 - a. 原稿用紙は連絡あり次第学会より急送します
 - b. 長さは図面を含め原稿用紙で18~30頁を標準とします（でき上り3~5頁）
 - c. 図面は鉛筆書きでよくトレースの必要はありません
 - d. 締切り期日は別に設けませんから脱稿次第学会宛直送して下さい
 - e. 採用は編集委員会で決定するものとし、採用分の原稿に対しては薄謝を呈します