

ミラージ現象の見られる場合の図式計算法

金子 徹一* 川島 威*

Résumé

A Graphical Calculation in Mirage Phenomena

by

Tetsuichi Kaneko & Takeshi Kawashima

Several analytical methods for horizontal layers have been already reported by many geophysicists up to now.

However, in practical engineering works, answers for inclined underground layers are very often requested. In such cases, usually, both initial velocity (v_0) and its increasing rate in depth (a) are horizontally variable.

The writers applied the results of the graphical method performed by C. H. Dix, and expanded it to the inclined underground layer.

They divided the charts for the calculating formula,

$$\delta Z = \delta T \cdot V_1 \left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

where

δT is the changing value of travel time, and δZ the corresponded changing value of depth.

This chart will be effective for many practical purposes, for example, in obtaining the depth of two layers by using intercept periods.

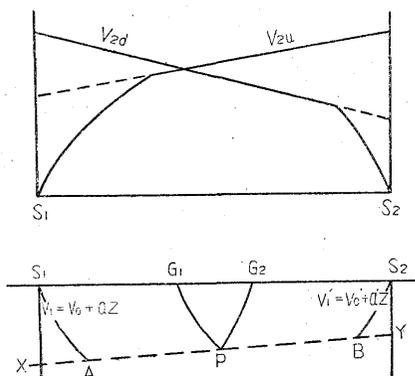
要 旨

ミラージ現象の見られる場合、基盤層が水平である場合の解析法は多くの人々によつて発表されている。しかし、土木調査などで問題になるものは、基盤に傾斜が相当ある場合が多く、また初速度(V_0)、深さに対する変化率(a)も水平方向に相当変化があるのが常である。筆者等は、C. H. Dix が行つた水平層の場合の図式計算法を傾斜している場合にも利用できるように拡大した。そして、深さ δZ と走時 δT の補正量の間関係式 $\delta Z = \delta T \cdot V_1 \left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)^{-1/2}$ の計算チャートを作成した。このチャートは2層の場合の Intercept Time から深さを求めるときなどに利用される式であるので、利用面は広いと思われる。

1. はしがき

風化層や河床の堆積物の地震波速度が、深さとともに増加し、第1図のような走時曲線が得られることがしばしばある。この現象をミラージ現象といつている。この場合に関する解析法については、これまで多くの研究が

発表されている^{1)~5)}。しかし、その大部分のものが基盤の傾斜のない場合の深さを求める方法で、実際の計算を行う場合、この仮定が適用されないときには、その処置に苦しむものである。



第 1 図

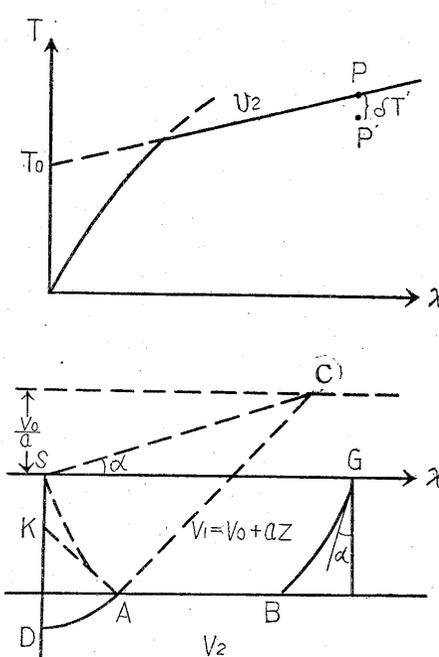
また、公式を用いて深さを計算する方法⁵⁾は、解が1つに決定されて、都合がよいようであるが、精度をあげるために、爆発点を多く設けて、走時曲線を重ね合わせるようにすると、同じ地点で異なる深さが求められるよ

* 物理探査部

うなことがあり、その調整をするのに苦心することがある。これに対し、図式計算法は一般に、走時の精度を適当に考慮して、弾力性のある調整を可能にする利点がある。ミラージュ現象の見られる場合の図式計算法は、C. H. Dix⁶⁾が発表しており、彼も図式計算法は公式を利用するものよりも一見複雑のようであるが、実際には便利で時間も少なくすむといっている。この論文では、Dixの方法を基にして、一部計算に便利な図式を作成するとともに、基盤の傾斜する場合について、近似性を高め、より実際的なものに改良した。

2. 基盤が水平の場合 (Dixの方法)

いま、上層の速度を V_1 、基盤の速度を V_2 とする。上層の速度は $V_1 = V_0 + aZ$ のように、深さとともに1次的に増加するとすると、波路(Ray)は第2図のように、上層では地表から上方に V_0/a の距離で爆発点Sから角 α をなすC点を中心とした弧 SA をなす。ただし、 $a =$



第 2 図

$\sin^{-1}(V_0/V_2)$ である(註1)。いま、A点において、ACに直交する直線を引き、SDとの交点をKとし(Kは波面を作る際の中心である) $AK = DK$ とすると、

$$\overline{SD} = \frac{V_0}{a} (e^{aT(S \rightarrow A)} - 1) \dots \dots (1)$$

が求められる。T(S→A)はS点からA点に至る間の走時である。故に、

註1) 走時曲線から V_0, a を決定する方法については多くの文献がある。たとえば、(5)を見られたい。

$$T(S \rightarrow A) = \frac{1}{a} \log_e \left(\frac{V_0 + a\overline{SD}}{V_0} \right) = \frac{2.3}{a} \log_{10} \left(\frac{V_0 + a\overline{SD}}{V_0} \right) \dots \dots (2)$$

P点における走時T(S→A→B→G)は

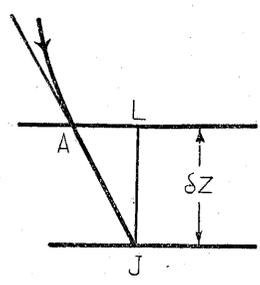
$$T = \frac{4.6}{a} \log_{10} \left(\frac{V_0 + a\overline{SD}}{V_0} \right) + \frac{AB}{V_2} \dots \dots (3)$$

で求めることができる。しかし、(3)式の計算は基盤までの深さが判つているときにできるのであつて、実際には基盤の深さを求めるのが目的である。このために、まず、第1次の近似として第2図の上図に示されている彎曲した走時曲線の平均の速度を $\overline{V_1}$ とし、深さ Z' を求めてみよう。

$$Z' = \frac{T_0 \overline{V_1}}{2} \left(1 - \frac{\overline{V_1}^2}{V_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \dots \dots (4)$$

ここで、 T_0 は Intercept Time である。この Z' の深さを図上に書き入れ、上記操作をしてS→Gまでの走時を求めて、第2図の走時図の上におくと、当然多くの場合、それはP点とは一致しないで、P点の上または下になる。この点を P' とする。次に基盤の深さを適当に上下させて P' 点がP点に一致する補正の方法を考えよう。

いま、AB面を δZ だけ深くする場合について述べよう。第2図のSAはA点附近で短い距離を考える場合には、直線とみなすことができるので、SAを直線的に延長して δZ だけ深くした面との交点をJとする(第3図参照)。すると、このために走時に影響する量 δT は



第 3 図

$$\delta T = T(A \rightarrow J) - T(A \rightarrow L) = AJ \frac{1}{V_a} \left(1 - \frac{V_a^2}{V_2^2} \right) \dots \dots (5)$$

で与えられる。ここで V_a は深さA点における速度で、 δZ の間では一様な速度と考える。故に

$$\delta Z = \delta T \cdot V_a \left(1 - \frac{V_a^2}{V_2^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \dots \dots (6)$$

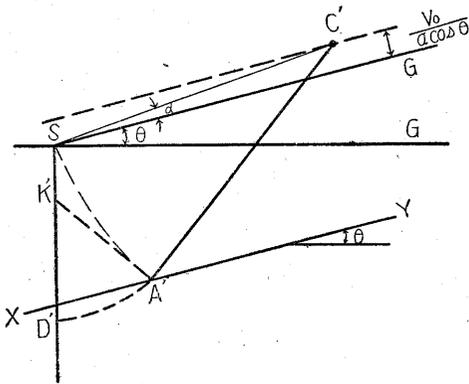
もし、第2図に見るように、補正する走時の量が $\delta T'$ とすると、これはA点とB点とでそれぞれ(6)式の δT だけの量の和であるから、 $\delta T = 1/2 \delta T'$ に相当するだけ

の δZ を求めればよい。

3. 基盤が傾斜している場合

次に、基盤 (V_2) が傾斜している場合について考えよう。土木方面で行われる基盤調査の場合には、前項でのべたような基盤の水平の場合には、むしろ特別な例である。しかし、基盤が傾斜している場合の深さを求める方法は、理論的にやつかいであるばかりでなく、第1図でみられるように、各爆発点ごとに上層の速度 (V_0) とその変化率 (a) が一定でなく、まちまちである場合が多い。このような場合には、理論的に深さを求めることは不可能に近い。そこで、まず近似計算を進めることにより、一歩一歩真の値を求めて行く方法を考えることにする。

第1歩として、前項の場合と同様に、それぞれ爆発点において基盤が水平として上層の平均速度 (\bar{V}_1) を用いて深さ Z' を求める ((4)式参照)。この際、基盤の速度として $(V_{2a} + V_{2b})/2$ を用いても誤差はごく僅かである。この結果、求められた深度を第1図の XY 面とする。この深さは通常かなり大きな誤差を含んでいるが、傾斜の傾向については間違いはない。次に、基盤が XY 面とし図式計算をすることにしよう。XY 面の傾斜を θ とすると、爆発点 S を中心にして、SG から θ だけ回転した SG' 面をとることにする (第4図)。この場合 SG'



第 4 図

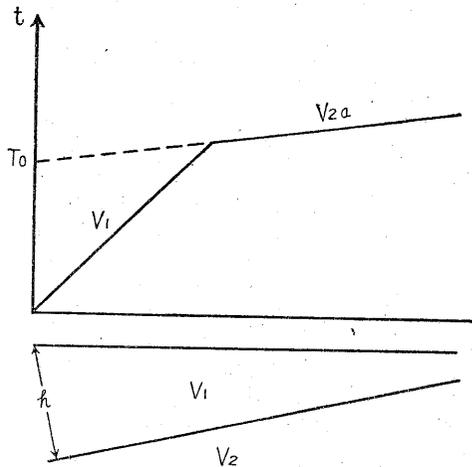
と XY との関係は傾斜のない第2図の SG 対 AB との関係に相当する。しかし、このときの深度に対する速度変化率は当然小さくなり、 $V_1 = V_0 + aZ$ の代りに $V_1 = V_0 + a \cdot \cos \theta \cdot Z$ としなければならない。したがって、第4図のように、 C' の SG' からの距離は V_0/a の代りに $V_0/(a \cos \theta)$ とする必要がある。以上のことを考慮すると、 C' を中心とし、 SC' を半径とする円を描き XY 面との交点 A' を求めると弧 SA' は XY 面に臨界角で屈折する波路を示すことになる。 SA' の走時 $T(S \rightarrow A')$ を

求める方法は、前項でのべた水平層の場合とまったく同一である。すなわち、 A' 点において、 A'/S に接線を引き、これと S からの垂線とが交わる点を K' とする。 K' から $A'K' = D'K'$ になるように点 D' を求め、 SD' の長さをはかると、走時 $T(S \rightarrow A')$ は (2) 式の SD の代りに SD' を置いたとして計算される。

第1図のような走時が得られた場合について考えると上記のような操作により、上層の速度が同一でない場合についても $T(S_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow S_2)$ を図式的に計算することができるので、この値と観測値とをくらべて深さの補正量 δZ を (6) 式から求めることは簡単であろう。また、受振点 G_1, G_2 などで走時を求める場合には、それぞれの場所の V_0, a' が判つていなければならないのであるが (この値を知るためには、おのおのの点を爆発点としなければならない)、もし決定されない場合には V_0 と V_0', a と a' の値を距離で比例配分した値を用いるのも1つの方法であろう。これは、服部¹⁾が発表した水平方向にも1次的に速度が変化する場合に相当する。しかし、地層の堆積状態の複雑な所では、 V_0, a の値が、 S_1, S_2 の中間の位置でかならずしも中間の値をとらないことがあることは注意すべきである。

4. チャート

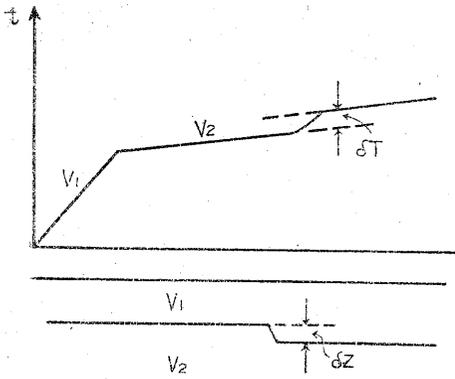
2. の (6) 式は、補正する走時と深さとの間の関係式であるが、この式は水平2層の場合の Intercept Time T_0 から深度を求める式と同じ形式のものである。また



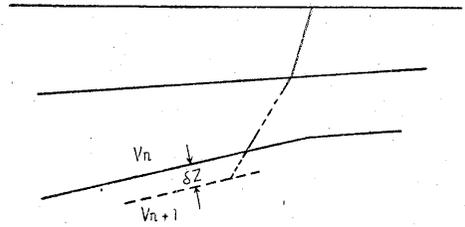
第 5 図

第5図のごとく、下層が傾斜している場合、爆発点から下層に垂線を下して、その長さを h とすると、 h は

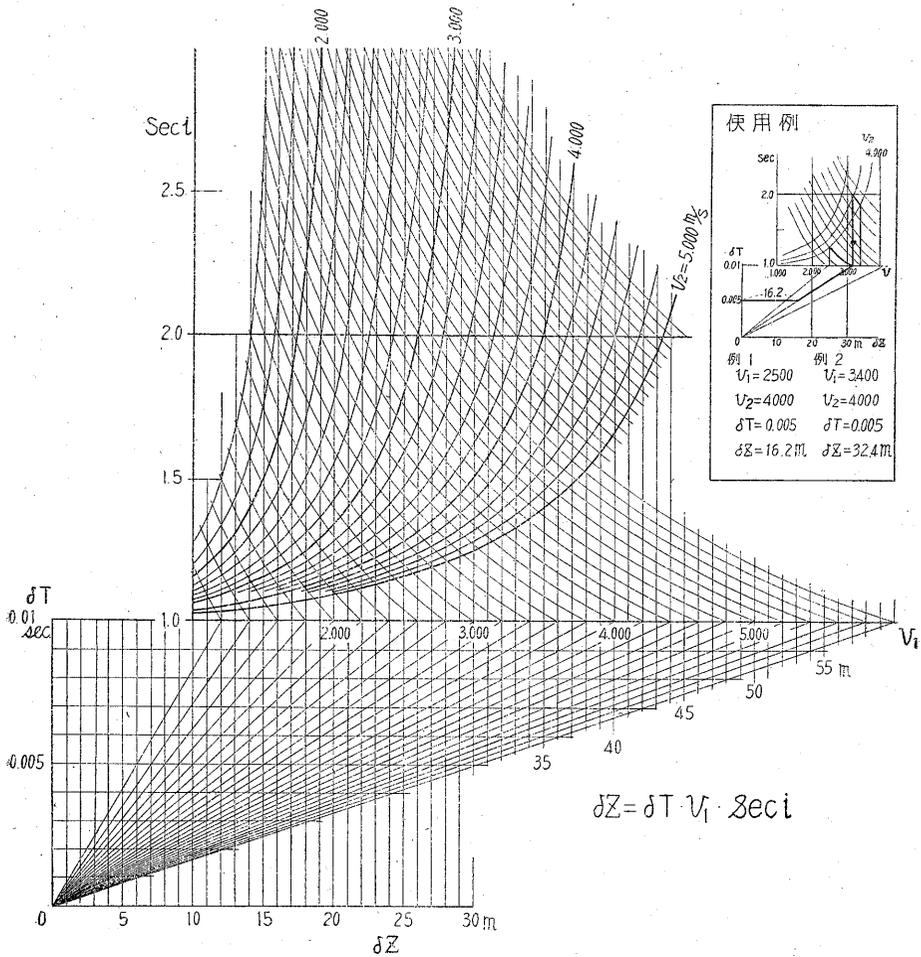
$$h = \frac{T_0 V_1}{2} \left(1 - \frac{V_1^2}{V_{2a}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (7)$$



第 6 図



第 7 図



第 8 図

- 使用法
1. 横軸上に V_1 をとる
 2. V_1 における垂線と V_2 曲線の交点を求める
 3. その点から双曲線に沿って1.0の横軸との交点を求める(または2.0の横軸との交点を求める)。これから垂線を下して横軸との交点を求める
 4. その点と0点を結ぶ直線上の点は縦軸が δT であり横軸が δZ である(2.0の横軸を用いた場合には $\delta Z/2$ である)

で与えられる。ここで、 T_0 は Intercept Time であり V_{2a} は下層の見掛けの速度である。したがって、 V_{2a} は真の速度 V_2 にくらべて昇斜の場合には大きく、降斜の場合には小さい。

また、基盤が断層^{註2)}のように急に深くなっている場合に(第6図)、その落差を δZ とすると、 δZ は

$$\delta Z = \delta T \cdot V_1 \left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

で求めることができる。

図式計算を実施する場合、速度層の境界面を上下させて観測走時と計算走時とが一致するように操作するのであるが、この際境界の移動量 δZ と走時の差との関係は前項の第3図とまったく同様である。したがって、上層の速度を V_n 、下層の速度を V_{n+1} とし、その境界を平行移動したとすると(第7図)、 δZ と δT との関係は

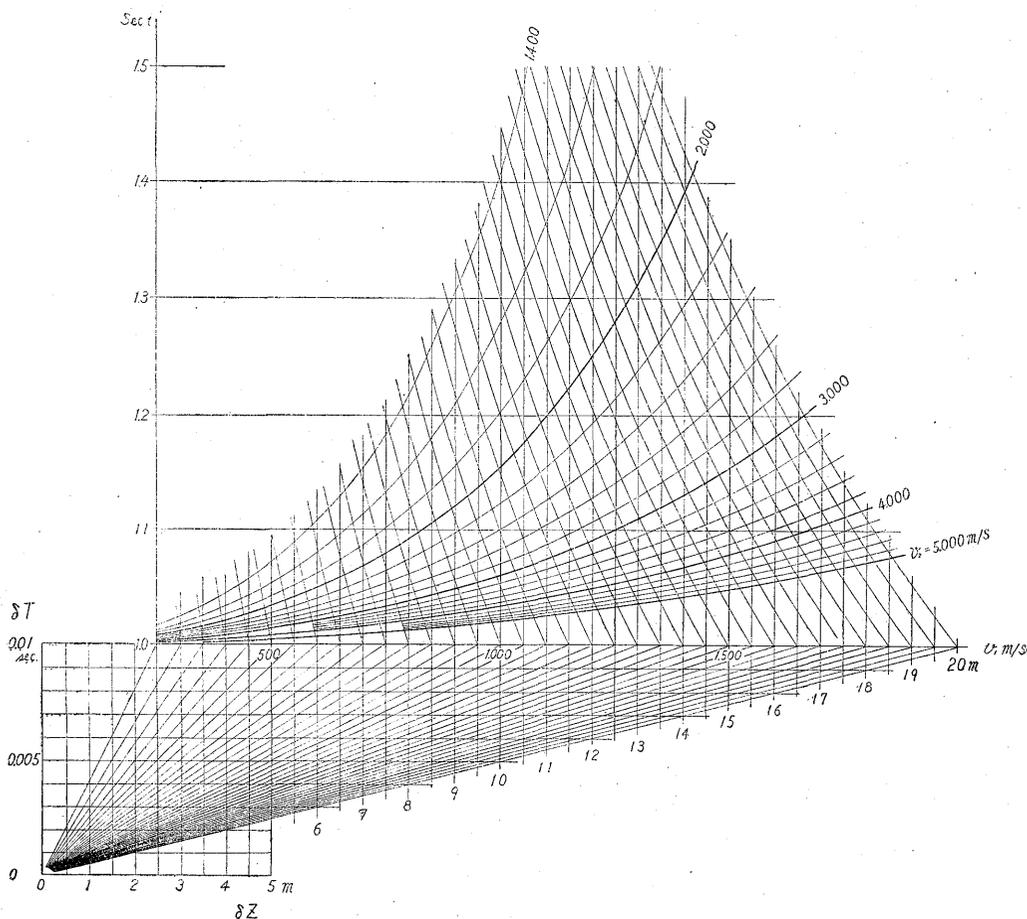
$$\delta Z = \delta T \cdot V_n \left(1 - \frac{V_n^2}{V_{n+1}^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

以上、(4)、(6)、(7)、(8)、(9)の各式をくらべてみると、(6)、(8)、(9)式は同じ形式のものであり(4)、(7)はそれを $1/2$ にしたものである。このように(6)式は屈折法の解析の上で非常に広く利用される式であるので、Dix はこのための特別な計算尺を発表している。しかしながら、わが国では特別な計算尺を作成することは、種々の困難もあるので、筆者等は計算のためチャートを作成した。第8図および第9図がそれである。第8図と第9図とは同じものである。第8図で上層の速度 V_1 の値が 1 km/s 以下の小さい値の場合には精度が著しく悪くなるので、その部分だけを拡大したものが第9図である。

5. チャートの使用法

第8図の右上に使用例を示してあるように、(1) ま



第 9 図

ず上の横軸で走時から決定された V_1 の値をとる。(2) 右上から左に下つている曲線は、それが1つ1つ下層の速度 V_2 にとつてある。そこで、計算される V_2 の値の曲線をと、これと V_1 における垂線との交点Pを求めると、その点の縦軸の長さは $(1-V_1^2/V_2^2)^{-\frac{1}{2}} = \sec i$ を示す。しかし、この値を求める必要はない。(3) 左上から右下に下つている曲線は双曲線である。P点を通る双曲線にそつて左下にさがり、 $\sec i$ が1の横軸との交点Qを求めれば、その点の横軸の値は $V_1 \cdot \sec i$ の値である。(4) 次に、下図の縦軸の δT の値をとつて、これと OQ との交点Rを求めれば、その横軸の値が求める δZ の値である。

図の大きさを節約するために、 V_1 と V_2 との大きな値の場合はP点から双曲線にそつてQ点に下がる代りに $\sec i=2$ の交点 Q' をとり、その点から垂線を下して $\sec i=1$ との交点を Q にして以下同様の操作を行つて δZ を求める。このようにして、求められた δZ の値は真の値の $\frac{1}{2}$ であるから、最後に2倍する必要がある。

右上図の使用例では $V_1=2,500, 3,400, V_2=4,000, 4,000, \delta T=0.005$ の場合について、上記の2つの方法を図解している。

下図の δT の値が 0.001 sec の目盛でしてあるが、 $T_0((7), (4)式)$ を用いる場合には、1目盛を10倍に 0.01 sec にとつて、当然のことであるが横軸 δZ の目盛りを 1m の代りに 10m にとつてもよい。

第9図の使用法は第8図とまったく同様である。

(昭和 29 年 4 月稿)

文 献

- 1) 服部保正：速度が水平垂直両方向と連続的に変化する場合の走時曲線，物理探鉱，Vol. 4, No. 2, 1951
- 2) 吉田寿々，渡辺健一：ミラージュ層を含んだ走時曲線の解析法（その1），物理探鉱，Vol. 4, No. 2, 1951
- 3) Gognal, J. M.: Seismic Refraction with Variable Velocity, Geophys, XVI, 1, 1951
- 4) Heiland: Geophysical Exploration, p. 540.
- 5) 金子徹一：栃木県五十里ダム物理探鉱調査および研究報告，附録 IV，いわゆるミラージュ現象のある場合の深度計算について，地質調査所月報，Vol. 3, No. 9, 1952
- 6) Dix, C. H.: Seismic Prospecting fer Oil.