

2つの「大森公式」を巡って(その1)

— 1995年兵庫県南部地震余震について「距離公式」を検証する —

岡本義雄*

1. はじめに

近代地震学の父と称される東京帝国大学教授大森房吉は明治から大正にかけて地震学の礎を築くのに活躍した。以後、彼の名が付された公式が地震学に2つ残された。1つは有名な震源距離と初期微動継続時間(P-S時間)との関係式であり、もう1つは一般には余り知られていない大地震の余震発生の時間減衰に関するものである。ここでは、筆者の自作地震計でとらえた兵庫県南部地震の余震記録を基に、有名な前者の「大森公式」(以下「距離公式」と記す)について論じ、次稿で後者の公式を論じたい。

2. 観測器材

余震観測に用いた観測システムは、1990年頃より自然地震観測に使用している地震計から記録システムまで、すべて手作りのシステム¹⁾である。小刻みな改良を加えながら、現在でも上下動+水平動2成分の3成分観測を継続している。観測システムの全景を図1に示す(システムの詳細は文献¹⁾に譲る)。1995年1月17日5時46分に発生した兵庫県南部地震は震源から約60kmの自宅観測点(和歌山県橋本市北部)で、この観測システムにより発生前後から終息にいたる過程を余す所なく記録された。以下、余震記録を中心に詳しい解析を行う。

3. 余震波形記録の解析実習(その1. 波形記録の読み取り)

(1) 余震波形記録

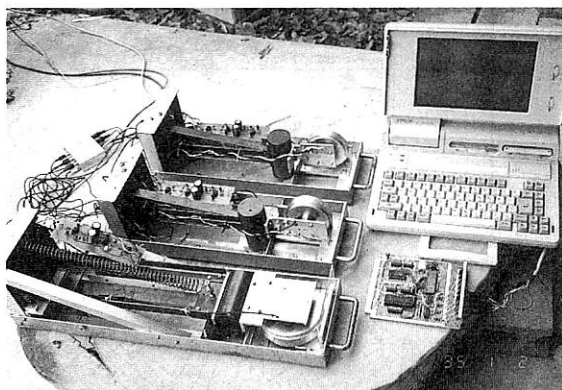


図1 自作地震観測システム

膨大な余震記録の中から、1月下旬~2月中旬頃を中心に、次の点を考慮して波形記録を選択した。

- A. 振幅が振り切れていないこと。
- B. 初動が明瞭に読み取れること。
- C. 震源位置が余震域で適当に分散すること。
- D. 深い地震(20km以上)は除く。

選択された余震の記録波形例と気象庁による諸元²⁾³⁾を付図及び付表に示す。なお、比較解析のため余震以外に近隣の地震を幾つか付け足している。

(2) P波, S波の到着時間の読み取り

- ① 付表の地震波形 a. ~ t. の諸元データに従い震央をまず白地図上にプロットする(図2参照)。
- ② 次に、地図上のスケールを参考に物差しで観測点から震央までの距離 L [km] を測定する。
- ③ P波初動到着時刻(波形記録に記入済み)と発震時刻(付表)との差より、P波の震源から観測点までの所要時間 T_p [sec] を求める。
- ④ 波形記録よりP-S時間(初期微動継続時間、あるいはS-P時間とも呼ばれる) T_{ps} [sec] を読み取り、S波の到達所要時間 T_s [sec] を $T_s = T_p + T_{ps}$ で求める。なお、S波の到着時刻の読み取りは専門家でも難しい場合がある³⁾が、水平動で大きく振幅や周期が変化し始める場所を読むとよい。

4. 大森の「距離公式」の意味

(1) 「距離公式」の係数 k と V_p , V_s

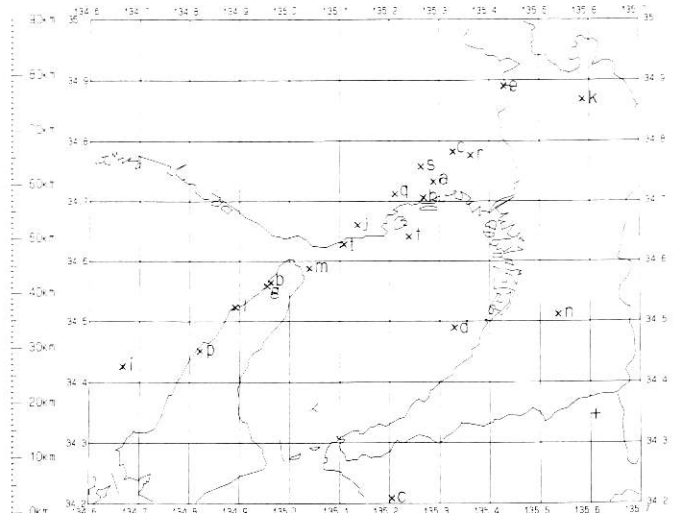


図2 作業用地図(震央をプロット, +は観測点)

* 科学教育部 理科第二室

大森の「距離公式」は震源距離を D [km]、P-S時間を Tps [sec]として下式で示される。

$$D = k \times Tps \quad (1)$$

これは速度の異なる2種類の波(P波, S波)の到着時間差で波源までの距離を知ろうとするもので、雷の距離を光と音の到達で推定するのと似ている。今、地下構造が一様であると仮定すると、比例定数 k は地下のP波速度 Vp [km/s], S波速度 Vs [km/s]を用いて下式のようになる。

$$k = VpVs / (Vp - Vs) \quad (2)$$

大森は $k=7.42$ を得たといわれるが、実際には k は4~9位の範囲で地域により変わるとされる¹。大森の活躍した頃の時計の精度では、地震波到着の絶対時刻よりP-S時間(相対時間)の方が正確に計れたため(1)式は震源(震央)決定にかかせなかった。

(2) 震源決定法の変遷

絶対時刻が正確に計れるようになった現在では、この震源決定法に代わり、P波の初動時刻を用いる方法や実際の地下構造を反映した走時表を用いる方法など、新たな方法が考案されている。特に、大学などの専門機関では、精密な震源決定の際、地下に速度構造モデル(水平成層構造)を仮定し、震源からすべての観測点までの走時(波が伝わるのにかかる時間)を層間での屈折等を考慮した波線により計算する。そして計算値(C)と観測値(O)の差のRMS(二乗平均の平方根)が最小になるように震源を動かし決定するという計算機頼みの方法を用いている。ここまで来ると震源決定に際し、上記「距離公式」の意味はやや色あせてしまうことになる。

5. 余震記録の解析実習(その2. 試行錯誤法を用いた「距離公式」の諸定数の算出)

震源の深さを無視し、震源距離 D ≡震央距離 Δ (これは震源から遠いところで近似的に成り立つ)を仮定すると、3.の読み取りデータより、 $Vp = \Delta / Tp$, $Vs = \Delta / Ts$, $k = \Delta / Tps$ を用いて諸定数は簡単に求まり、その測定結果を平均すると、

$Vp = 5.9\text{km/s}$ $Vs = 3.3\text{km/s}$ $k = 7.8\text{km/s}$ が得られる(概算値)。

しかし、以下では上記専門家の方法をまねて震源の深さと波線を考慮した上での諸定数の算出を行う。
<試行錯誤法>

今、最も簡単に地下が一様な地震波速度構造を持つと仮定する。このとき、地震波の波線は直線となり、震源距離(=波線距離) D [km]は震源の深さを h [km]として、

$$D = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \quad (3)$$

と書ける。この波線にそって、地震波が Vp , Vs で伝わり、付表の余震について、観測値(O)の走時曲線**に最も近い計算走時(C)を与える Vp , Vs の最適値を表計算ソフトのグラフ表示を利用した試行錯誤により求めることにする。

- ① 余震毎に計算シートに行を作成し、 Δ , Tp , Ts の観測値を列毎に順に記入する。次にグラフ機能を用いて、 Δ に対する、 Tp , Ts をプロットした走時曲線を書く(図4の×, +がこの観測値を表す)。
- ② 次に h , D の列を追加し、 h の列には震源の深さ、 D の列には(3)式の各変数に該当するセル番号を用いて計算式を記入し、これをすべての行にコピーする(図3の計算式を参照)。
- ③ 波の到着時間の計算値 $Tp' = D / Vp$, $Ts' = D / Vs$ の列も同様に計算式を記入し、すべての行にコピーする。このとき Vp , Vs は先ほどの概算値を出発値として用いる。
- ④ 次に、 Δ に対する Tp' , Ts' (計算値)を先ほ

=SQRT(C2^2+B2^2)										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	記号	深さ	Δ [km]	D	Tp 観測値	Ts 観測値	Tp 計算値	Ts 計算値	$Vp=6.1$	$Vs=3.5$
2	a	11	52.4	53.5	8.8	15.4	8.8	15.3		
3	b	15	64.6	66.4	10.9	19.0	10.9	19.0		
4	c	10	40.5	41.7	7.1	12.4	6.8	11.9		
5	d	13	29.4	32.1	5.5	9.6	5.3	9.2		
6	e	15	61.9	63.7	10.4	18.0	10.4	18.2		
7	f	10	47.3	48.4	7.8	14.1	7.9	13.8		
8	g	16	64.6	66.6	10.9	19.0	10.9	19.0		
9	h	14	50.3	52.2	8.5	15.0	8.6	14.9		
10	i	9	87.4	87.9	14.5	25.1	14.4	25.1		

図3 表計算ソフトの計算シート(計算式の入力)

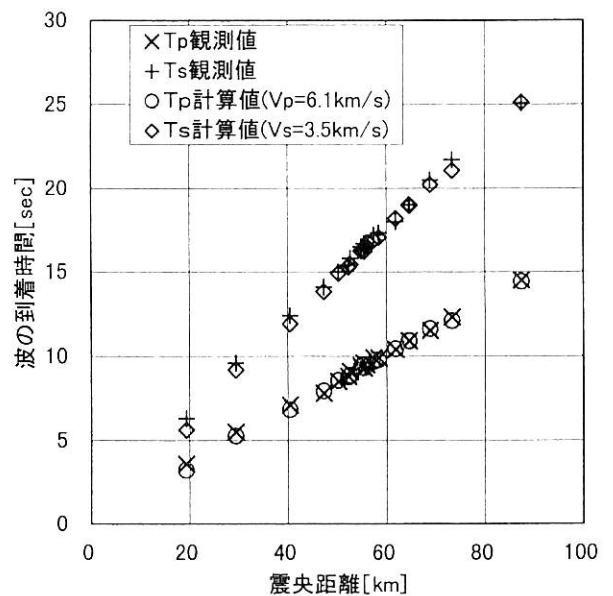


図4 走時曲線(×, +が観測値, ○, ◇が計算値)

** 普通、走時曲線は1つの地震について多くの観測点でのデータを用いるが、ここでは、逆に1つの観測点に対する多数の地震データを用いる点に注意。

どの走時曲線に重ねてプロットする。

⑤ V_p , V_s を0.1[km/s]刻みで変化させ、 T_p' T_s' が T_p , T_s とグラフ上で最もフィットする値を探す(図4の○, ◇が最適値による走時を示す)。

〈計算結果〉

$$V_p=6.1\text{km/s} \quad V_s=3.5\text{km/s}$$

が最適値として得られる。また、(2)式より

$$k=8.0\text{km/s}, \text{ また } V_p/V_s=1.7 \text{ (後述)}$$

が求まる。この方法の利点は、複雑な地下構造であっても、波線の計算式さえ用意できれば、グラフの日視により、最適値を求めることができる点にある。

6. 解析値の吟味と補足

5. の走時曲線から次のことが言える。

I. 走時曲線の集中度からみて、余震記録の時刻の精度は±0.1秒を大きく割ってはいない***。

II. 走時曲線の直線性からみて、地下に大きな速度構造の不連続等は考えにくい。

また、観測点に関しては、

III. 観測点は数mと薄い堆積層を載せた和泉層群の岩盤上に位置し、堆積層の影響は小さい。

以上の3点から考えて、最終的に算出した V_p , V_s は伝播経路(上部地殻)の真の地震波速度にかなり近いと考えられる。しかし、地下の一樣構造を仮定している点が上記解析の限界点である。一般には深さ方向や水平方向にも地震波速度が異なるはずであり、「距離公式」の比例定数 k はこのような構造ではもはや意味を失う量であることに注意したい。

現在、地殻上部の地震波速度に関して、本稿の波線域のすべてを網羅する測定データはまだ無い。参考のため、近畿地方の微小地震の震源決定に用いている速度構造モデルの1例(「阿武山モデル」⁵⁾)を下に示す。これは、堆積層を除いて地殻を3層に分割している(V_s は $V_p/V_s=\sqrt{3}$ になるように設定)。

	深さ	V_p
第1層	5 kmまで	5.5km/s
第2層	5 - 18km	6.0km/s
第5層	18 - 30km	6.7km/s
マントル最上部	30km以深	8.0km/s

これによれば本稿の V_p , V_s は第2層の値に近いと言える。なお、 k や V_p/V_s (本稿の値1.7)は地下構造と共に、地下を構成する岩石の種類にも影響する量で、これらを基に地下の構造や岩石を推定す

る試みも広く行われてきている。本稿での V_p や V_p/V_s は地殻上部を構成すると考えられている花崗岩の値に近いと言える。しかし、1点のみの観測データであり、これ以上の解析には踏み込まない。

〈震源決定の精度〉

震源決定の精度は計算に用いる速度構造モデル(大学等)や走時表(気象庁)の他に、波形のP波、S波の到着時刻の読み取り精度(あるいは時計の精度)も大きく影響する。例えば $V_p=6.0\text{km/s}$ とすると、0.1秒読み取り値が狂うと震源の位置は600mずれる(実際には、多くの観測点のデータを用いるのでそう単純ではないが)。精密な余震震源の決定は、活動した地下の断層の位置や、震源メカニズムの解析等重要な研究の出発点である。時計の刻時精度が上がリ、計算機の能力が向上した今日では、波形の読み取りも計算機により自動化されていることが多い。それでも今回の兵庫県南部地震の余震震源決定など、重要なデータ処理では人間の目視による読み取りが欠かせないと聞く。インターネット等により、簡単に精度の高い観測データが入手できるようになってきたが、多少精度は悪くても、本稿のような手作りの波形データを実習で扱うことは、自然科学の中での人間と測定データのかかわりを生徒に改めて考えさせ、自然の息吹の不思議さを実感させることにも役立つと思われる。

7. おわりに

自作地震計の余震波形記録から、大森の「距離公式」にまつわる諸定数を算出した。すでに記したように今日では教材としての実習を除くと震源決定に関して「大森公式」の役割はやや薄れたと言える。しかし、兵庫県南部地震当日未明、筆者は震度4ないし5の激しい揺れに驚きながらも、心のどこかでP-S時間を冷静に計っていた。過去、有感地震を経験する度に「大森公式」を身体が覚え直していたからだと思われる。この地震以後、防災教育という言葉をよく聞くようになったが、災害をもたらす自然を理解する原点という意味で、「大森公式」は今もなお光を失ってはいないと考える。なお、余震波形の特徴等については、紙面の都合で他の機会に譲る。

謝辞他：兵庫県南部地震の余震の震源決定にたずさわられた大阪市立大学大学院理学研究科助手根本泰雄氏からは貴重なご教示と草稿へのコメントをいただきました。感謝いたします。本研究には平成9~10年度文部省科学研究費補助金基盤研究C(No.09680207)及び第36回下中研究助成金の一部を使用しました。

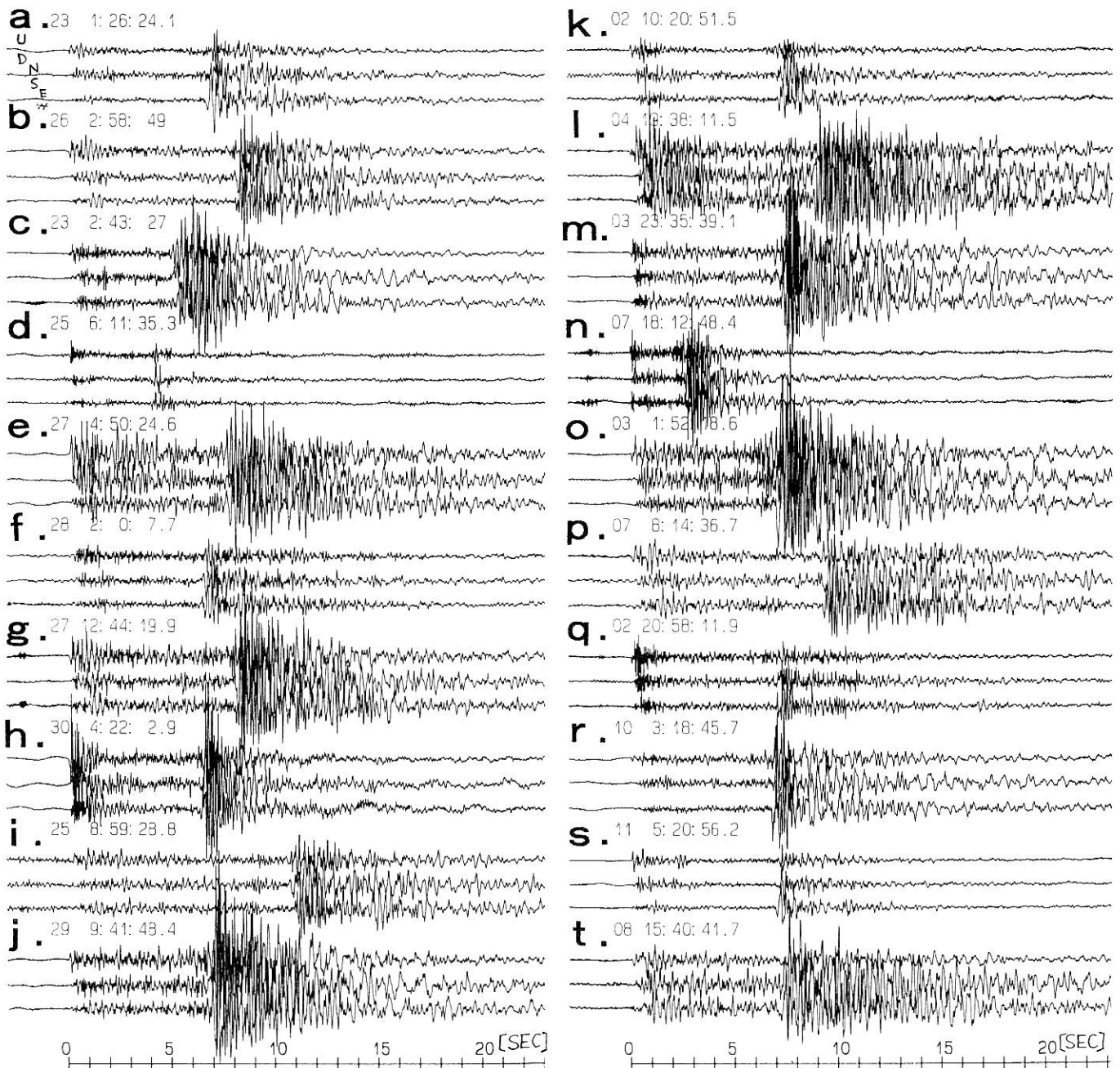
*** これは記録システム用にいるPCの内部時計の精度に依存するが、筆者はNTT時報により数日おきに較正を行うなど精度維持に努めている。

引用・参考文献

- 1) 岡本義雄：大阪と科学教育 5, 9 (1991)
- 2) 気象庁：地震月報 平成7年2月(1997), 60pp.
- 3) 気象庁：地震観測指針(観測編)(1978), p.81
- 4) 宇津徳治：地震学, 共立全書(1977), p.137-138
- 5) 根本泰雄他：地震2, 50, 125(1997)

付表 気象庁「地震月報」による余震他の諸元(北緯, 東経は10進数に直す. また, 波形の重なりを避けるため必ずしも時間順には並んでいない)

発震時刻	年	月	日	時	分	秒	北緯	東経	深さ	M
a	95	1	23	1	26	15.3	34.737	135.288	11	2.9
b	95	1	23	2	58	38.1	34.567	134.958	15	3.1
c	95	1	23	2	43	19.9	34.207	135.203	10	2.9
d	95	1	25	6	11	35.3	34.482	135.335	13	2.4
e	95	1	27	4	50	14.2	34.885	135.428	15	3.4
f	95	1	28	1	59	59.6	34.640	135.235	10	2.9
g	95	1	27	12	44	9.0	34.560	134.955	16	3.3
h	95	1	30	4	21	54.4	34.703	135.270	14	3.0
i	95	1	25	8	59	14.3	34.425	134.662	9	3.2
j	95	1	29	9	41	39.1	34.660	135.138	13	3.3
k	95	2	2	10	20	41.6	34.865	135.582	14	3.0
l	95	2	4	19	38	0.0	34.524	134.890	16	3.6
m	95	2	3	23	35	29.2	34.585	135.042	12	3.3
n	95	2	7	18	12	44.8	34.512	135.542	12	2.4
o	95	2	3	1	52	9.0	34.788	135.325	13	3.3
p	95	2	7	8	14	24.4	34.450	134.820	7	3.4
q	95	2	2	20	58	2.5	34.715	135.210	15	2.8
r	95	2	10	3	18	36.6	34.775	135.360	12	3.0
s	95	2	11	5	20	56.2	34.757	135.263	12	2.7
t	95	2	8	15	40	32.2	34.632	135.107	15	3.4



付図 余震波形データ(観測点は34.3465N, 135.6108E, 表示時刻はP波到着時刻, 3本の波形は上からU-D(上下動), N-S, E-W(水平動)を示す. センサーの特性から速度波形であることに注意)