

地震モーメントと余震域・波源域*

市川政治**

550.342

Seismic Moment, Aftershock Region and Tsunami Origin

M. Ichikawa

The Seismological Section, J.M.A.

Abstract : Based on the equivalency of radiation patterns of P and S waves resulted from a force system of double couple and a slip dislocation along a fault (Maruyama, 1963), Aki (1966) introduced a relationship among the seismic moment and fault parameters such as an area of a slip surface and an amount of dislocation etc., and estimated the stress change before and after the Niigata earthquake of 1964.

In order to study a relation between an area of tsunami origin or of aftershock region and an area of slip surface estimated on the basis of the seismic moment, the following relation between an area of fault surface and an earthquake magnitude was derived using data of big events occurring in the world.

$$\log A\bar{U}=1.5M+4.2, \quad (1)$$

(A ; cm^2 , \bar{U} ; cm), or

$$\log A\bar{U}=1.5M-7.8 \quad (2)$$

(A ; km^2 , \bar{U} ; m),

where A is the area of slip surface, and \bar{U} the fault displacement.

Under the assumption that the area of aftershock region or of tsunami origin of a certain large event represents the area of slip surface which is produced by the event, amount of slip for some Japanese earthquakes whose area of aftershock region and/or tsunami origin was estimated, were calculated using equation (1) or (2).

Comparing amounts of slip thus obtained with those calculated from the Iida's formula giving the relation between fault displacement and earthquake magnitude, we find that the values calculated with the Iida's formula are several times as large as those obtained from eq. (1) or (2), except events occurring in Japanese islands. Results for the inland earthquakes are satisfactory each other.

The discrepancies of slip calculated from the present equation and Iida's formula may be partly due to differences of uncertainties of epicenter determinations for events occurring under ocean and islands, and may be partly due to variations in focal mechanisms of the earthquakes.

To confirm a reliability of equation (1) or (2), similar equations exhibiting relation between earthquake magnitude and fault parameters were derived using Utsu-Seki's formula giving relation between area of aftershock region and magnitude of main shock, Hatori's formula giving relation between area of tsunami origin and earthquake magnitude, and the above-mentioned Iida's formula.

The equations obtained from combinations of the above-mentioned formulae agree well with equation (1) or (2), provided that the systematic discrepancies in values obtained from the Iida's formula and equation (1) or (2) are taken into consideration.

* Received July 25, 1970

** 気象庁地震課

§ 1. まえがき

いわゆる double couple (又はⅡ型の起震歪力) の震源モデルに基づく $P \cdot S$ 波初動分布型と, slip dislocation (不連続面 (断層面) に沿って発生した食違い) によるそれとは, 同じ型となること弾性転位論に基づく理論計算から明らかにされている (Maruyama, 1963).

このⅡ型のモデルを形成するところの, 同一平面に存在し, 互に直交する2組の偶力のいずれか一つの偶力のモーメントが, 震源付近の剛性率・断層面面積・断層の平均の食違いの量の関数であることを, Aki (1966) は導き出している.

また, 安芸は新潟地震の長周期表面波の解析からその地震のモーメントを求め, 余震域の広さ・地殻変動の状態とが調和していることを示し, 同時に, 地震前後の歪力変化も計算している. このほかにも, この種の研究が世界各地に発生した若干の大地震について行われている.

一方, 主として日本付近の断層を伴った地震について断層の変位量や長さ, 地震規模などの関係が Iida (1965) によって研究されている. Hatori (1969) は津波を伴った地震について, 津波の伝搬時間から波源域の面積を求め, 地震規模との関係を調べ, また, 波源域面積が余震域面積とほとんど同程度であることなどを示した. さらに, 波源域における垂直変動量を計算し, これが陸上の地震に伴う断層のそれと調和することも調べている (Hatori, 1966).

ところで, これらの結果は上記の地震モーメントや断層パラメータと調和するであろうか? このことを, 過去の大地震のいろいろの資料から調べてみよう.

§ 2. 地震規模と断層面面積・食違い量

Aki (1966) によれば, 地震のモーメント M_0 , その地震の断層面面積 A , および平均の食違いの量 \bar{U} との間には, 次の関係がある.

$$M_0 = \mu A \bar{U} \tag{1}$$

ここに, μ は剛性率.

地震および地震波のエネルギーをそれぞれ E, E_s , 地震前後の震源付近での歪力の変化量を $\bar{\sigma}$, また, $c = E_s/E$ とすると,

$$E = \bar{\sigma} M_0 / \mu, \tag{2}$$

$$E_s = cE = c\bar{\sigma} M_0 / \mu \tag{3}$$

なる関係がある.

さらに, 地震の規模 M と E_s との間には良く知られて

いる

$$\log E_s = a + bM \tag{4}$$

が成り立つものとする.

このとき, (3)と(4)から下式が得られる.

$$\log M_0 = (a - \log c\bar{\sigma} + \log \mu) + bM. \tag{5}$$

一般に a, b の値として, 11.8, 1.5 がそれぞれ使われている. また, $c\bar{\sigma}$ が M と殆んど無関係であるとする (Wyss et al, 1968), $\log M_0$ と M とは直線関係にあることがわかる.

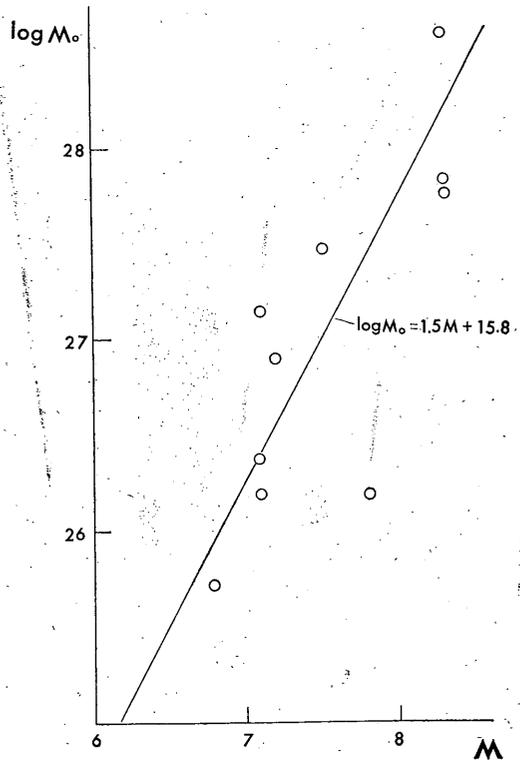


Fig. 1. Seismic moment M_0 vs earthquake magnitude M for some large earthquakes occurring in the world. Data used in the plot were taken from the paper of Brune et al (1967).

Fig. 1 に示した Brune et al (1967) のデータから, $a = 11.8, b = 1.5$ として (5) 式の右辺第1項を求めると $a - \log c\bar{\sigma} + \log \mu = 15.8$

が得られる.

$\log \mu = 11.57$ とすると, $\log c\bar{\sigma} = 7.57$ すなわち $c\bar{\sigma} = 37$ (bar) となる. この値はこれまでの結果と比較して不適当なものではない (Brune et al, 1967). そこで, M_0 と M との間には次の関係が成り立つものとして, 以

後の議論を進めよう。

$$\log M_0 = 1.5M + 15.8. \quad (6)$$

(1)と(6)から

$$\log A\bar{U} = 1.5M + 4.2 \quad (7)$$

$$(A: \text{cm}^2, \bar{U}: \text{cm}),$$

または,

$$\log A\bar{U} = 1.5M - 7.8 \quad (8)$$

$$(A: \text{km}^2, \bar{U}: \text{m}),$$

が得られる。

これが地震規模と断層パラメータを結ぶ式である。

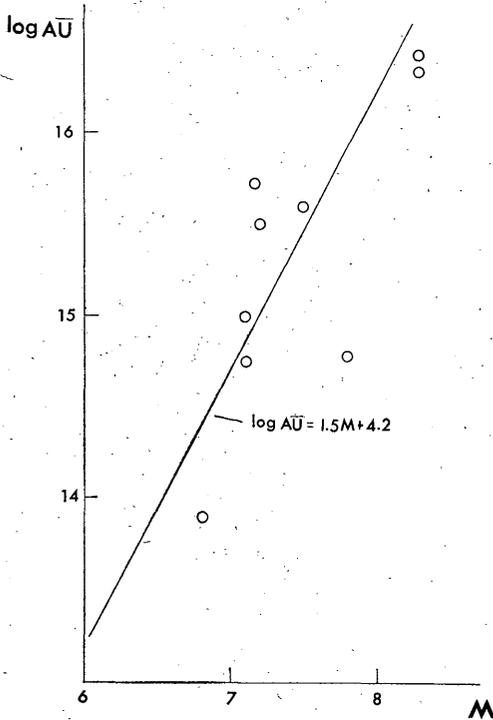


Fig. 2. $A\bar{U}$ vs M .

A ; area of fault surface in cm^2 ,
 \bar{U} ; fault displacement in cm, and
 M ; earthquake magnitude.

上記の Brune et al (1967) の論文に使われているデータおよび(7)式を Fig. 2 に示す。データの数だけでなく、かつ、図中の点のばらつきはひどいが、(7)式との間には系統的なずれは認められない。すなわち、(7)式は一応妥当なものと考えられる。

§ 3. 余震域・波源域の面積と断層の平均変位

大地震に伴う余震は、本震のエネルギーが貯えら

れていた、いわゆる地震体積内に発生すると言われている (Tsuboi, 1956)。余震の震央の分布から推定される余震域の面積は、本震の断層面の面積とどのような関係があるだろうか？ また、波源域の面積と、断層面面積と、どのような関係があるだろうか？

もし、余震域や波源域の面積が断層面のそれとほぼ同程度ならば、(7)・(8)から推定される断層の変位量が、これまで得られている地震の規模と断層変位量との関係と矛盾しないはずである。

この観点から、宇津等 (1955) の求めた余震域面積や Hatori (1969) による波源域面積が、断層面面積に等しいと仮定して(8)から \bar{U} を計算した。

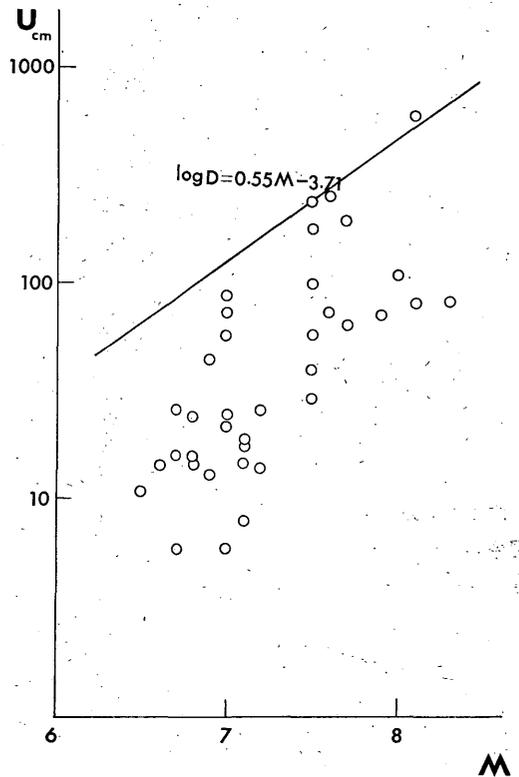


Fig. 3. \bar{U} (cm) calculated from an area of tsunami origin given by Hatori (1969) using eq. (1), vs M . The straight line in the plot indicates Iida's formula giving relation between fault displacement D (cm) magnitude M .

Figs. 3, 4 に上の計算結果を示す。図中の直線は断層変位量 D (m) と M との関係を示す Iida (1965) の式

$$\log D = 0.55M - 3.71 \quad (9)$$

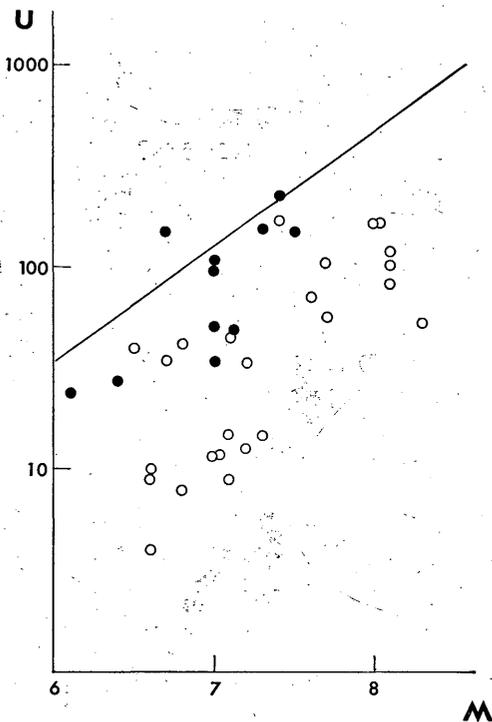


Fig. 4. \bar{U} (cm) calculated from area of aftershock region given by Utsu-Seki (1955) using eq. (1), vs M .

●; earthquake occurring under island
○; earthquake occurring under ocean.

に対応するものである。

図中の各点は、明らかに、Iida の直線より系統的に下方に存在する。すなわち、波源域・余震域を断層面として(8)から推定した \bar{U} は、これまでの観測結果に比べ、その地震の規模の割りには小さ過ぎると言える。(8)から求めた \bar{U} は、平均して、(9)から推定される値の1/6である。逆に、(9)から求めた平均的な断層変位が妥当であると考え、これを基準にとった場合、余震域や波源域の面積は、断層面のそれよりも数倍広く求められていると言える。

この際、問題は推定された余震域や波源域の面積の精度である。余震域について言えば、陸上の地震のそれは海底のそれよりも系統的に狭まいことが宇津ら(1955)によっても指摘され、また Fig. 4 から明らかである。気象庁決定の震央決定の精度は、観測網内の地震と外側のそれとは相当に違い、観測網からはなれるにし

* 最近宇津は下記の (10) を $\log S=1.07M-4.12$ と改めている。

たがって、急激に決定された震央の精度は悪くなる(市川, 1969)。このことは、内陸の地震に対しては、比較的是っきり余震域を決め得るのに対して、海底の地震の余震域は広めに推定される恐れのあることを示唆する。上記の海底地震と内陸地震の余震域面積の違いは、このことにも多少関係があるだろう。また、余震が断層面の周辺に集中発生するものならば、余震震源の地表への投影である余震域の形は、断層発生の状態、すなわち、strike-slip か dip-slip かによっても違はずであり、このこととも関係があるだろう。

ともあれ、海の地震の余震域や波源域の面積は、平均して、断層面のその数倍の広がりを持っているとするのが妥当のようである。

§ 4. 余震域面積・波源域面積と断層変位

同じ地震の余震域の面積と波源域のそれとはほぼ同じであり、この対数は地震の規模と直線関係にあることがわかっている。また、断層の変位量と地震規模との間にも(9)のような関係が成り立つ。これらを組み合わせることにより、(7) (又は(8)) の型の式が得られ、地震モーメントから出発して得た(7)又は(8)式と、比較することができる。

宇津*ら(1955)による余震域面積 $S(\text{km}^2)$ と地震規模 M との間には、下の関係が成立つ。

$$\log S = M - 4, \quad (\text{全地震の平均}) \quad (10)$$

$$\log S = 0.85M - 3.05, \quad (\text{陸の地震}) \quad (11)$$

$$\log S = 0.93M - 3.18, \quad (\text{海の地震}) \quad (12)$$

また、Hatōri(1969)によると、波源域面積 $S(\text{km}^2)$ と M との間には、

$$\log S = 1.07M - 4.12 \quad (13)$$

の関係がある。

断層変位量 D (m) と M との関係式(9)と(10)~(13)から下の関係が得られる。

$$\log SD = 1.55M - 7.71, \quad (14)$$

$$\log SD = 1.40M - 6.76, \quad (15)$$

$$\log SD = 1.48M - 6.89, \quad \text{および} \quad (16)$$

$$\log SD = 1.62M - 7.83. \quad (17)$$

これらの関係を図示したものが Fig. 5 であり、余震域・波源域の面積が断層面積の数倍であることを考慮すると、これらは(8)式と良く調和しているといえよう。

地震の規模をはじめとして、地震のエネルギー・余震域や波源域の面積・断層変位量などの値は、いずれにしても相当に大きざっぱなものである。それにもかかわら

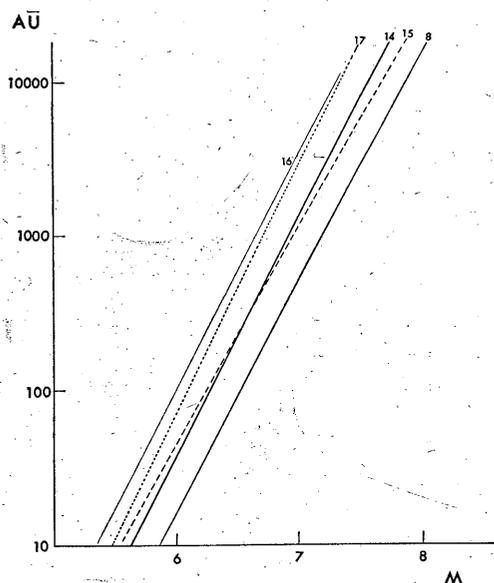


Fig. 5. Various relations between $\bar{A}U$ and M derived from formulae (cf. eqs. 9, 10, 11, 12, and 13). Numerals in the plot correspond to the equation number in the text.

ず、それぞれ独立に決められたこれらの量のあいだの関係式を地震のモーメントと言う新しい量を通じて比較してみると、互に良く調和することは興味あることである。

§ 5. むすび

地震のモーメント・地震および地震波エネルギーの関係から地震断層面の面積、その平均くいちがい量と地震規模との間に簡単な関係がある。これによると、同じ場所に同じような状態下で発生した同じ規模の地震の断層面の面積と、その平均の変位量との積は等しくならなければならない。

一方、大地震に伴ない発生する断層の周辺に余震が集中発生すると考えるならば、その震源の地表への投影である余震域の形や、津波発生と関係があるであろう海底地形変動などは、それぞれ、その地震のメカニズム、すなわち、発生した断層の状態と密接に関係するだろう。余震域や波源域面積、地震規模の関係に見られる幅広いちらばりは、面積や規模推定の精度ばかりでなく、はじめに述べたことと密接に関係があるものと思われる。

地震モーメント・断層パラメータなどから地震前後の

歪力変化が求められ、米国ではこの歪力変化に地域差のあることが確められている。一方、わが国では、地震断層の観測される機会は少ないので、この種の研究を手取り早く行うためには、いきおい、余震域の面積などを断層面の面積と関係させて推定するようになるだろう。上記の結果は、このとき考慮されるべきである。

地震波エネルギーと地震規模・モーメントから求めた断層面面積・断層変位量と地震規模との関係と、余震域面積・波源域面積・断層変位量などの量と地震規模(M)との諸関係式の組合せから求めた式とを比較してみると、互に良く調和している。とくに、これらの式で、変数 M の係数は Gutenberg らの M と地震波エネルギーの関係式における変数 M の係数に等しくなければならないが、諸実験式から求めたこの値は 1.4~1.6 であり、Gutenberg らの結果と極端に矛盾していない。

参考文献

- Aki, K. (1966); Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964, part 2. Estimation of Earthquake Moment, Released Energy, and Stress-strain Drop from the G Wave Spectrum, Bull. Earthq. Res. Inst., **44**, 73~88.
- Brune, J. N. and C. R. Allen (1967); A Low-stress-drop, Low-magnitude Earthquake with Surface Faulting: the Imperial, California Earthquake of March 4, 1966, Bull. Seism. Soc. Am., **57**, 501~514.
- Hatori, T. (1966); Vertical Displacement in a Tsunami Source Area and the Topography of the Sea Bottom, Bull. Earthq. Res. Inst., **44**, 1449~1464.
- Hattori, T. (1969); Dimensions and Geographic Distribution of Tsunami Sources near Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 185~214.
- 市川政治 (1969); 気象庁地震観測網の震源決定の精度・能力, 研究時報, **21**, 297~308.
- Iida, K. (1965); Earthquake Magnitude, Earthquake Fault and Source Dimensions, J. Earth Sci. Nagoya Univ. **13**, 115~132.
- Maruyama, T. (1963); On the Force Equivalent of Dynamic Elastic Dislocations with Reference to the Earthquake Mechanism, Bull. Earthq. Res. Inst., **41**, 467~486.
- Tsuboi, C. (1956); Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth's Crust, J. Phys. Earth, **4**, 63~66.
- 宇津徳治・関彰 (1955); 余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係, 地震 第2輯, **7**, 233~239
- Utsu, T. (1969); Aftershocks and Earthquake Statistics (I), Some Parameters which characterize an Aftershock Sequence and their Interrelation, J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., VII, **3**, 129~195.
- Wyss, M. and J. N. Brune (1968); Seismic Moment, Stress, and Source Dimensions for Earthquakes in the California-Nevada Region, J. Geophys. Res., **73**, 4681~4694.