海洋プレート厚の減少——ハワイ・ エンペラー海山列の進化

金沢大学理学部地学教室 大河原 浩*・河野芳輝

(昭和 56 年 5 月 7 日受理)

Thinning of the Oceanic Lithosphere—Evolution of the Hawaiian-Emperor Chain

Hiroshi OGAWARA and Yoshiteru KONO

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kanazawa University

(Received May 7, 1981)

Thinning process of the oceanic lithosphere was discussed with a consideration of an evolution of the Hawaiian-Emperor chain. The oceanic lithosphere increases or decreases its thickness under the heat balance between input heat flow from the asthenosphere, output thermal conduction within the lithosphere and release or sink of latent heat at the lithosphere-asthenosphere boundary. The heat flow from the asthenosphere controls this process. In ordinary condition, the lithosphere thickens with time, on the other hand, excess heat flow from deeper part of the mantle thins the lithosphere. A condition of the excess heat flow may realize under the Hawaii Island as a "Hot-spot". Thinning and thickening processes of the Pacific plate along the Hawaiian-Emperor chain are examined mathematically. Observed data for ocean bottom topography, surface heat flow and gravity anomaly are successfully explained by this model.

§1. はじめに

海洋プレートの厚さが時間と共に増加するということは、観測及び理論によつてほぼ確立したように見える。YOSHII (1973) は、太平洋における地殻構造データから、地殻より下の構造に依存する重力異常、すなわち Residual Gravity Anomaly (R. G. A.) を求めた。この R. G. A. と海洋底の年代 t との間に $R. G. A. \propto \sqrt{t}$ の関係が見られることから、彼はプレートの厚さが年代と共に増加するという「プレート生長説 (Thickening Plate Model)」を提唱した。この線にそつた理論的研究には PARKER and OLDENBURG (1973), KONO and YOSHII (1975), OLDENBURG (1975), YOSHII *et al.*, (1976), Ito (1976), 河野・天野 (1978), KONO and AMANO (1978) などがある。これらの研究において、プレートの生長は、部分熔融状態のアセノスフェアが固化しプレートの一部になることによつて進行していくという考えに立つて

昭和 54 年 9 月 28 日発表

* 現在の所属：北陸地下開発株式会社

いる。

さらに、表面波の分散曲線の解析 [LEEDS *et al.* (1974); YOSHII (1975)] からプレート生長説を支持する結果がえられてきた。また大陸地域においても、大陸プレートの厚さが時間と共に増加してきたことが示された [KONO and AMANO (1978)]。

一方、YOSHII (1973) のモデルを改良した KONO and YOSHII (1975) のモデルは、プレートの厚さが単に時間と共に増加するだけでなく、アセノスフェアからの熱流量の大きさによっては、その厚さを減ずる可能性をも含んでいる。アセノスフェアからの高熱流量流入によるリソスフェアの厚さの減少は、ホット・スポットの下や大陸分裂開始前の大陸下などで期待される現象である。本論文では、このようなプレートの thinning 過程を考慮して、ハワイ・エンペラー海山列の進化を論じる。

§ 2. 熱的モデル

KONO and YOSHII (1975) によるプレート生長モデルは次のようである (Fig. 1 参照)。海嶺下から湧き出した高温物質は冷却・固化してリソスフェアすなわちプレートになる。このとき、プレート・アセノスフェア境界における熱的境界条件は

$$Z=l: T=T_s \text{ (Solidus temperature)} \quad (1)$$

$$\rho L \frac{dl}{dt} = K \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_l - Q_0. \quad (2)$$

である。ここで L はアセノスフェア最上部の潜熱、 l はプレートの厚さ、 Q_0 はアセノスフェアからの熱流量である。プレート上面における境界条件は

$$Z=0: T=0 \quad (3)$$

Fig. 1. Schematic illustration of the Thickening Plate Model [YOSHII (1973)] with a slight modification [KONO and YOSHII (1975)]. Now this model extends into the Thinning Plate Model in this study.

初期条件は

$$t=0: l=l_0, T=T_0(Z) \quad (4)$$

である。

この現象を支配する基本方程式は、一次元の熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + H \quad (5)$$

である。ここで注意すべきことは、 L は岩石が全熔融するに要する潜熱 (約

Table 1. Parameters used in the present calculation. Those are the same which were used in the calculation of the Thickening Plate Model for the oceanic lithosphere [KONO and YOSHII (1975)] and the continental lithosphere [KONO and AMANO (1978)].

Physical Parameters		Convensional Unit	S. I. Unit
ρ_P	Density of Plate	3.4 gr·cm ⁻³	←
ρ_A	Density of Asthenosphere	3.3 gr·cm ⁻³	←
ρ_W	Density of Sea Water	1.0 gr·cm ⁻³	←
c	Specific Heat	0.25 cal·gr ⁻¹ ·deg ⁻¹	1.05 kJ Kg ⁻¹ K ⁻¹
K	Thermal Conductivity	0.007 cal·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹ ·deg ⁻¹	2.93 W m ⁻¹ K ⁻¹
H	Radiogenic Heat	0.1×10 ⁻¹³ cal·cm ⁻³ ·sec ⁻¹	0.042 μ Wm ⁻³
L	Latent Heat	80 cal·gr ⁻¹	335 kJkg ⁻¹ K ⁻¹
T_s	Solidus Temperature	1100°C	1373°K
Q_0	Heat Flow from normal Asthenosphere	0.6×10 ⁻⁶ cal·cm ⁻² ·sec ⁻¹	26.12 mWm ⁻²
ΔZ	Space Interval	2 km	2×10 ³ m
Δt	Time Interval	7.7 years	2.426×10 ⁸ sec
P	$(K/\rho c) \Delta t/\Delta Z^2$	0.05	0.05

100 cal·gr⁻¹) ではなくて、アセノスフェア最上部の部分溶融の程度に応じた、いわば実効的な潜熱と考えるべきことである。

計算に用いた定数を Table 1 に示す。ここで T_s は圧力によらないで一定だと仮定した。 T_s がペリドタイトに対する KUSHIRO *et al.* (1968) の実験結果のように圧力に依存したとしても、 T_s が一定の場合とほとんど違いはなかつた (Appendix I 参照)。

(1) から (5) の式は、陽解法によつて解いた。詳細は KONO and YOSHII (1975) を参照されたい。ただし $P=(K/\rho c) \Delta t/\Delta Z^2$ は 0.05 を選んだ。

§3. 基礎的数値実験

ここではプレートの厚さが減少する条件と、それに関連した基礎的な数値実験例について述べる。

熱的境界条件 (2) から明らかなように $K(dT/dZ)_i < Q_0$ ならば $dl/dt < 0$ となるから、このとき潜熱は吸収され、岩石は溶融し、プレート厚は減少する。逆に $K(dT/dZ)_i > Q_0$ ならば、プレート厚は増加する。これまでのプレート生長モデルの計算は全て後の条件下でおこなわれてきた。 $K(dT/dZ)_i = Q_0$ ならば、プレート厚に変化が起らない。これらをまとめると：

$$K \left(\frac{dT}{dZ} \right)_i \begin{cases} > Q_0 \\ = 0 \\ < Q_0 \end{cases} \Rightarrow \frac{dl}{dt} \begin{cases} > 0 \text{ (plate thickening)} \\ = 0 \text{ (constant thickness)} \\ < 0 \text{ (plate thinning)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Rightarrow \frac{dl}{dt} \begin{cases} > 0 \text{ (plate thickening)} \\ = 0 \text{ (constant thickness)} \\ < 0 \text{ (plate thinning)} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \frac{dl}{dt} \begin{cases} > 0 \text{ (plate thickening)} \\ = 0 \text{ (constant thickness)} \\ < 0 \text{ (plate thinning)} \end{cases} \quad (8)$$

以上のように、 Q_0 が空間的あるいは時間的に変化すれば、(6)～(8) の条件にしたがつてプレートは厚さを増したり減少したりすることになる。

式 (4) は $|dl/dt| \propto |K(\partial T/\partial Z)_l - Q_0|$ を意味するから、 Q_0 を一定とするとプレートの初期条件が何であつても、プレート厚 l はしだいに一定の厚さに収束する。本論文ではこの厚さを定常プレート厚 (Steady Plate Thickness) l_s と呼ぶことにする。

定常プレート厚は

$$l_s = \{-Q_0 + (Q_0^2 + 2HKT_s)^{1/2}\}/H \quad (H \neq 0 \text{ のとき}) \quad (9)$$

$$l_s = KT_s/Q_0 \quad (H = 0 \text{ のとき}) \quad (10)$$

となる。Table 1 のパラメーターを使つて、 l_s と Q_0 との関係を Fig. 2 に示した。KONO and YOSHII (1975) で推定された $Q_0 = 0.6 \times 10^{-6} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ に対し $l_s = 117 \text{ km}$ となる。彼らの結果によれば、海洋プレートは $t = 200 \text{ My}$ でも $l \simeq 90 \text{ km}$ であるから、定常プレート厚になる前に海溝から地球内部に沈み込んでいることになる。

今、定常プレート厚が 100 km とすると

$$Q_0 = K(dT/dZ)l_s = 0.72 \text{ HFU}$$

より大きな Q_0 がアセノスフェアから流入すれば、プレート厚は減少することになる。 Q_0 が 10 HFU の場合、定常プレート厚は約 7 km となるが、その状態へいたる時間経過はアセノス

フェアの潜熱 L の大きさにはほぼ比例する。 $L = 80 \text{ cal} \cdot \text{gr}^{-1}$ のとき、上記の時間は約 20 My となる。一方、 L が一定で Q_0 が変化すると、定常プレート厚になるまでの時間は Q_0 にほぼ反比例する。 $L = 80 \text{ cal} \cdot \text{gr}^{-1}$ のとき、 $Q_0 = 10 \text{ HFU}$ ならばこの時間は約 20 My だが、 $Q_0 = 5 \text{ HFU}$ ならば約 50 My となる。

さて、プレート厚の変化に対して刻々にアイソスタシーが成立つていくものと仮定すると、プレート厚の減少 ($l_0 - l$) に対して隆起量 Δh は

$$\Delta h = (\rho_F - \rho_A)(l_0 - l)/(\rho_A - \rho_W) \quad (11)$$

Fig. 2. Change of plate thickness in steady state (Steady Plate Thickness) as a function of the heat flow from the asthenosphere.

で与えられる。また、プレート厚の減少とアイソスターによる隆起にともなう重力変化（フリーエア異常の変化）はゼロである。

§ 4. ハワイ・エンペラー海山列の進化

本節では、プレート厚減少の熱的プロセスを、ホット・スポットによつてプレート厚が減少していると考えられるハワイ・エンペラー海山列に適用し、その進化を考察してみる。この地域のプレートが周辺よりも薄くなつていているとする根拠は、YOSHII (1973) による R. G. A. と海山列にそつた地形（水深）変化とに主に基づいている。

(a) R. G. A. と水深変化

R. G. A. はモホ面以深の質量異常を知るために導入された一種の 1 次元ブーゲー異常である。R. G. A. すなわち、モホ面以浅の各層の密度 ρ_i を上部マンツルの密度でおきかえる：

$$\text{R. G. A.} = \text{F. A.} - 2\pi G \sum_i (\rho_i - \rho_M) H_i \quad (12)$$

ここで F. A., ρ_M , H_i はそれぞれフリーエア異常、上部マンツルの密度、 i 層の厚さである。モホ面以深の質量異常を ΔM とすると

Fig. 3. Distribution of the Residual Gravity Anomaly defined by YOSHII (1973) over the Pacific Plate as a function of ocean bottom age.

$$R. G. A. = 2 \pi G \Delta M \quad (13)$$

と解釈することができる。海上における重力測定値と人工地震による地殻構造から R.G.A. を求めると、Fig. 3 のように

$$R. G. A. \propto \sqrt{t} \quad (14)$$

という結果が得られた [YOSHII (1973)]。ここで t は地磁気異常などから決まる海洋底の年代である。YOSHII (1973) の解釈、すなわち、式 (14) の関係は、アセノスフェアより密度の大きなプレートが海嶺から難れるにつれて生長するからだとする

$$\Delta M = (\rho_P - \rho_A) l + \text{const.} \quad (15)$$

となる。 $\rho_P - \rho_A = 0.1$ とすると

$$R. G. A. = 4.19 l + \text{const.} \quad (16)$$

を得る。また、プレート内の熱膨張を仮定し、熱膨張率を $6.0 \times 10^{-5} \text{ deg}^{-1}$ とすると

$$R. G. A. = 4.70 l + \text{const.} \quad (17)$$

を得る。式 (16) と (17) から計算されるプレート厚のちがいは 5% 以下である。本論文では両式の平均値を用いて

$$R. G. A. = 4.45 l + \text{const.} \quad (18)$$

として議論を進める。

Fig. 3 には、YOSHII (1973) の結果の他に FURUMOTO *et al.* (1971) の地殻構造データと (12) 式から計算したハワイ・エンペラー海山列における R.G.A. 値も示してある。計算の詳細は Appendix III に記した。海洋底年代は、この地域が Magnetic quiet zone にあるため正確には推定できない。ハワイ島周辺の海洋底年代を YOSHII (1973) と同じく 85 My と仮定し、各島の年代は DALRYMPLE *et al.* (1977) によつた。

ハワイ・エンペラー海山列は、ホット・スポットによつて形成されたと考えられている [WILSON (1963); MORGAN (1972)]。この地域では太平洋全体の R.G.A. の傾向に比べて明らかに小さい値をとっている。特に、ホット・スポットが位置すると考えられるハワイ島付近で約 100 mgal の低下が見られる。R.G.A. 値 100 mgal の減少は、式 (18) により、プレート厚約 20 km の減少で説明できる。

Fig. 4 にハワイ海山列周辺の海底地形を、Fig. 5 におよびフリーエア異常の断面図を示す [WATTS (1976)]。Fig. 5 で注目すべきことは、1/4 波長が 800 km にもおよぶ大規模な地形

Fig. 4. Map around the Hawaiian chain to show the ocean bottom topography and locations of topography and free-air gravity anomaly profiles, which are presented in Fig. 5. Contor interval is 1000 fm (1 fm=1.8288 m) [from WATTS (1976)].

変化が見られることである。しかも、起伏・波長ともハワイ島から北西へ離れるにつれて減少して行っている。このような地形変化は、ホット・スポットの加熱によるプレート厚の減少が海山列に直交する方向にもおよんでおり、その結果アイソスタシーによる隆起とその回復によって生じたと考えることができる。

Fig. 5 のフリーエア異常を見ると海山列の麓に顕著な負の異常が存在する。FUJIMOTO (1976), 藤本・友田 (1977) は、北西太平洋の他の海山についても同様な重力異常分布が存在することを認め、このような海山のまわりの負のフリーエア異常の原因は、海山直下のプレートが薄いことにありと指摘している。

以上述べてきたことをまとめると、ハワイ・エンペラー海山列は次のような過程をたどって進化してきたと考えることができる：まず、東太平洋海膨で生成され、海膨から離れるにつれて厚さを増してきた海洋プレートは、現在のハワイ島直下近くでホット・スポットにより加熱され、局部的にその厚さを減少した。このとき生成したマグマの一部は、地表に噴出してハワ

Fig. 5. Topography and free-air anomaly profiles along the lines indicated in Fig. 4 [from WATTS (1976)].

イ島など火山島列を形成した。ホット・スポット通過後は再びその厚さを増加した。これらの過程に伴って、海山列にそつて地形（水深）、重力、熱流量等に変化が生じた。ホット・スポット通過後、水深は浅くなり、熱流量はわずかに増加することが予測される。

(b) シミュレーション

さて、これまで述べたプレート生長と **Thinning** 説に基づいてハワイ・エンペラー海山列の進化をシミュレーションする。そのために、ホット・スポットについて次の仮定をおく。

Fig. 6. Model pattern of a hypothetical high heat flow from the asthenosphere by "Mantle Plume" under the "Hot Spot": (A) "Realistic": (B) "Mathematical" (this study), respectively.

ホット・スポットは一般の海洋底下よりもアセノスフェアからの熱流量 Q_0 が大きい地域として定義する。現在、ホット・スポットの広がりについては明確でない。したがつて、ここでは直径 500 km の範囲にわたつて一様に Q_0 が大きいと仮定した。これはプレート移動速度が太平洋プレートのように約 10 cm/年だとすると、プレー

トがホット・スポット上を通過するのに要する時間 T_{HS} が 5 My であることを意味する。ホット・スポットでの Q_0 (以後これを Q_{HS} とする) は Fig. 6 (A) のように時間あるいは空間的に対して中心にピークをもつような分布をしていると考えるのが自然だが、このような分布を与えても現状の観測データではこれを決定することは不可能である。したがって、本研究では Fig. 6 (B) のようにステップ的な変化を与えた。 Q_{HS} の大きさそのものについても何ら推定の手段がない。ここでは、5 HFU と 7.5 HFU の場合について計算を行つた。プレート厚の減少にはプレートへ流入する総熱量 $Q_{HS} \times T_{HS}$ が関係するので、この値が大きく変らなければ結果も基本的に変わらない。

以後の議論において (海底) 火山島のような「局所的」地形は無視し、長波長の起伏のみに着目する。またアイソスタシーが瞬間にかつ完全に成り立つとして式 (11) から導かれる水深変化の式を用いる:

$$w = (l - l_0)(\rho_P - \rho_A)/(\rho_A - \rho_W) + w_0 \quad (19)$$

ここで l_0 , w_0 は、その値がわかっている地点でのプレートの厚さおよび水深である。ここでは海嶺での代表的な値

$$l_0 = 10 \text{ km}, \quad w_0 = 2500 \text{ m}$$

を用いる。また、前節の数値実験においてはパラメーターとして用いたアセノスフェアの潜熱 L および平均的なアセノスフェアからの熱流量 Q_0 を、ここではそれぞれ

$$L = 80 \text{ cal} \cdot \text{gr}^{-1}, \quad Q_0 = 0.6 \text{ HFU}$$

とする。これらは KONO and YOSHII (1975), KONO and AMANO (1978) において、標準的海洋プレートや大陸プレートの生長説に対して採用され成功をおさめた値である。

数学モデルは第 2 節で示したとおりである。Table 1 と本節に記した数値を用いて計算した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 は上から、水深、地殻熱流量およびプレート厚の時間的变化を示している。 Q_0 の時間的变化は図の一番下に描いたとおりである。式 (18) と Fig. 3 の R. G. A. 値とから求められた太平洋プレート厚の「観測値」は、ハワイ海山列下でプレート厚が確実に薄くなっていることを示している。この図に示した水深の観測値は CROUGH (1978) がまとめた値 ($1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの平均値) であり、地殻熱流量の観測値は SCLATER *et al.* (1976) による値である。

図が示すように、我々が採用したモデルは様々な観測値を基本的に説明している。先に述べたアイソスタシーについての仮定から、プレート厚変化につれて水深変化は時間の遅れなく現

Fig. 7. Results of the simulation. Theoretical and observed changes of the topography, surface heat flow and the plate thickness are illustrated.

われる。一方、地殻熱流量は、ホット・スポット通過後約 20 My たつて最大値が現われている。これはプレート表面までの熱伝導に時間がかかることで説明できる。しかし、一般にプレート厚の減少後、再び増加する（冷却する）過程が遅すぎると見えるが、このことについては後にふれる。

Fig. 8. はプレートがホット・スポットによつて加熱されている間のプレート内の温度分布を示している。この図から明らかなように、加熱中、すなわちプレート厚の減少中地表付近の温度分布は変化していない。ホット・スポット通過後は $K(dT/dZ)_i - Q_0$ が大きいので、同じ厚さを持つ一般の海洋プレートよりも速く生長する。例えば、 $Q_{HS}=5.0$ HFU の場合、約 30 My でホット・スポット通過前の厚さに回復するが、普通の海洋プレートの場合同じ厚さに生長するのに 40 My 以上の時間を必要とする。しかしながら、先にふれたように、それでも観測値と比べると冷却が遅すぎると見える。これらの不一致は、問題を現実的な三次元で計算していないことが主な原因であろう。三次元であれば冷却はより早く進行するからである。

本論と平行して DETRICK and CROUGH (1978), CROUGH (1978) は長波長の地形的起伏と

Fig. 8. Variation of temperature profile within the plate during the thinning process.

フリーエア異常より、ハワイ海山列におけるアイソスタシー補償深度を 50~100 km と見つめている。しかしながら、彼らの熱モデルではプレート内の温度分布は上記の計算のための見つものにすぎず、本研究のように海嶺からの生長をふくむ統一的なものになつていない。

以上のことから、ホット・スポットの加熱によつて太平洋プレートが薄くなり、アイソスタシーのため隆起して海山列を形成したというハワイ・エンペラー海山列の進化モデルは、水深、熱流量、R. G. A. などの観測量を統一的に説明することができた。なお、このモデルは太平洋プレートの一般的な生長とも調和的であることを強調しておきたい。

§5. ま と め

YOSHII (1973) に始まるプレート生長説は、KONO and YOSHII (1975) のわずかな改良を経て、プレート厚の減少プロセスを含む一般的なプレート厚変化過程の理論として確立した。本論文は、このプレート厚減少過程がハワイ・エンペラー海山列の進化を十分説明できる可能性を示したものである。同じ現象は、大陸分裂の初期過程としても重要な役割を果たしたと考えられる。すなわち、厚さ約 150 km の大陸プレートがその厚さを減じることなしには大陸の分裂は起らなかったにちがいない。たとえば、重力及び走時異常から、アフリカのリフトバレー下では、大陸プレートが薄くなつていくことが示唆されている [GIRDLER *et al.* (1969); SEARLE (1970)]. かくして、海洋プレートの生成と生長 [YOSHII (1973); KONO and YOSHII (1975)] 及び局所的な thinning (本研究)、そして海溝からの消滅、これと平行して、大陸プレートのゆつくりとした生長 [KONO and AMANO (1975)] と局所的な thinning, そして大陸プレートの分裂と移動という諸現象が地質時代を通じてくりかえされてきたという概念に到達する。

Appendix I: Solidus が圧力の関数であるときの影響

上部マントルがペリドタイトより成り、 H_2O に飽和しているとする、その Solidus は KUSHIRO *et al.* (1968) のデータを参考にすることができる。本研究の数学モデルにおいて、 T_s を一定ではなく、KUSHIRO *et al.* (1968) の結果にしたがって圧力（深さ）の関数であるとして計算した場合を Fig. 9 に示した。この場合、プレート・アセノスフェア境界は等温線にならないので、各位置での温度も共に記した。図から明らかなように、 $T_s=1100^\circ\text{C}$ とした場合と観測誤差の範囲内でしかくいちがいが生じなかつた。

Fig. 9. Effect of pressure-functioned Solidus on the plate thickness compared with the constant Solidus temperature.

Appendix II: 定常プレート厚を求める式

プレート生長説においてアセノスフェアからの熱流量 Q_0 が一定ならば、プレート厚は一定値 l_s に収束する。

式(5)において $\partial T/\partial t=0$ とすると

$$\partial^2 T/\partial Z^2 = -H/K$$

これより

$$\partial T/\partial Z = -(H/K)Z + C_1 \quad (\text{Ap. -1})$$

$$T = -(H/2K)Z^2 + C_1Z + C_2 \quad (\text{Ap. -2})$$

境界条件 (3) より $C_2=0$

境界条件 (1) より $T_s = -(H/2K)l_s^2 + C_1l_s$

$$\therefore C_1 = T_s / l_s - (H/2 K) l_s \quad (\text{Ap.}-3)$$

条件 (7) より

$$Q_o = K(\partial T / \partial Z) l_s = K T_s / l_s - (H/2 K) l_s$$

$$H l_s^2 + 2 Q_o l_s - 2 K T_s = 0$$

$l_s > 0$ だから, $H \neq 0$ のとき

$$l_s = \{-Q_o + \sqrt{Q_o^2 + 2 H K T_s}\} / H \quad (\text{Ap.}-4)$$

$H = 0$ のとき

$$l_s = K T_s / Q_o \quad (\text{Ap.}-5)$$

このときの地殻熱流量 Q_s およびプレート内の温度分布は

$$Q_s = K T_s / l_s + (H/2) l_s = Q_o + H l_s \quad (\text{Ap.}-6)$$

Fig. 10. Locations of Explosion Seismic Profiles and sections of crustal structure [FURUMOTO *et al.* (1971)]. They are grouped from A to D based on the K-Ar age [DALRYMPLE *et al.* (1977)] of volcanic rocks nearby each profile.

$$T(Z) = -(H/2K)Z^2 + \{T_s/l_s + (H/2K)l_s\}Z \quad (\text{Ap. } -7)$$

Appendix III: ハワイ・エンペラー海山列周辺の Residual Gravity Anomaly

ハワイ・エンペラー海山列周辺の R. G. A. を計算した. 式 (12) において, H_i は FURUMOTO *et al.* (1971) の爆破地震によるデータ (Fig. 10) を, ρ_i は同データの P 波速度と NAFE and DRAKE の経験則 [NAFE and DRAKE (1963)] から求まる値を, また F. A. (フ

Table 2. Residual Gravity Anomalies along the Hawaiian-Emperor chain, which are calculated using seismological crustal structures [FURUMOTO *et al.* (1971)] and free-air anomalies [WATTS (1976)] around the Hawaiian-Emperor chain. The geologic basement ages of each location are grouped into four based on K-Ar age [DALRYMPLE *et al.* (1977)]. Results are plotted on Fig. 3 with YOSHII's (1973) data.

Location No.	R. G. A. -F. A.* ¹ (mgal)	F. A. Free-air Anomaly (mgal)	Residual	G. R. A. Gravity Anomaly (mgal)	Basement Age* ² (M. y.)
1	635	-1		634	A
2	556	35		591	A
3	601	-7		594	B
4	649	0		649	B
5	645	0		645	B
6	693	0		693	B
7	643	11		654	B
8	665	10		675	B
9	508	11		519	A
10	561	41		602	A
11	727	-48		679	C
12	805	-48		757	C
13	722	-30		692	C
14	665	0		665	C
15	668	-7		661	C
16	695	-18		677	C
17	712	-18		694	C
18	720	-18		702	C
19	708	0		708	D
20	699	0		699	D
21	711	0		711	D
22	666	0		666	D
23	725	0		725	C
24	639	0		639	C
25	647	0		647	C
26	652	0		652	C
27	615	33		648	C

*¹ R. G. A. -F. A. = $-2 \pi G \sum_i (\rho_i - \rho_M) \cdot H_i$

*² A: 5-8; B: 10-13; C: 15-20; D: 23-27 (M. y.)

リーエ異常)は WATTS (1976) の $1^\circ \times 1^\circ$ の平均値をそれぞれ使つて計算した。これらのデータは, DALRYMPLE *et al.* (1977) による岩石の K-Ar 年代値を参考にして (A)~(D) の 4 グループに分類した。計算に用いた数値と得られた結果を Table 2 に掲げた。また, それぞれのグループについて平均値, 標準偏差を計算したものを Fig. 3 に YOSHII (1973) の値と共にプロットした。

文 献

- CROUGH, S. T., 1978, Thermal Origin of Mid-Plate Hot-Spot Swells, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **55**, 451-469.
- DETRICK, R. S. and S. T. CROUGH, 1978, Island Subsidence, Hot Spots, and Lithospheric Thinning, *J. Geophys. Res.*, **83**, 1236-1244.
- FUJIMOTO, H., 1976, Processing of Gravity Data at Sea and Their Geophysical Interpretation in the Region of the Western Pacific, *Bull. Oean Res. Inst., Univ. Tokyo*, **8**, 1-81.
- 藤本博己・友田好文, 1977, 地下の構造から予想される地表の重力と実測の重力との差から求められる海山, 海溝下のリソスフェアの異常と, 海溝, 海山の相互作用, *地震* **2**, **30**, 359-368.
- FURUMOTO, A. S., J. F. CAMPBELL and D. M. HUSSONG, 1971, Seismic Refraction Surveys along the Hawaiian Ridge, Kauai to Midway Island, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 147-166.
- GIRDLER, R. W., J. D. FAIRHEAD, E. C. SEARLE and W. T. C. SOWERBUTTS, 1969, The Evolution of Rifting in Africa, *Nature*, **224**, 1178-1182.
- ITO, K., 1976, Heat Flow and Thickness of the Ocean Lithosphere, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **30**, 65-70.
- KONO, Y. and T. YOSHII, 1975, Numerical Experiments on the Thickening Plate Model, *J. Phys. Earth*, **23**, 63-75.
- KONO, Y. and M. AMANO, 1978, Thickening Model of the Continental Lithosphere, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **53**.
- 河野芳輝・天野雅史, 1978, 堆積作用がある場合のプレート生長—日本海への適用, *地震* **2**, **30**, 163-178.
- LEEDS, A. R., L. KNOPOFF and E. G. KAUSEL, 1974, Variations of Upper Mantle Structure under the Pacific Ocean, *Science*, **186**, 141-143.
- MORGAN, W. J., 1972, Deep Mantle Convection Plumes and Plate Motions, *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **56**, 203-213.
- NAFE, J. E. and C. L. DRAKE, 1963, Physical Properties of Marine Sediments; in *The Sea*, Vol. 3, edited by M. N. Hill, Interscience Publishers, New York, 794-815.
- OLDENBURG, D. W., 1975, A Physical Model of the Creation of the Lithosphere, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **43**, 425-451.
- PARKER, R. L. and D. W. OLDENBURG, 1973, Thermal Model of Ocean Ridges, *Nature*, **242**, 137-139.
- SCLATER, J. G., J. CROWE and R. N. ANDERSON, 1976, On the Reliability of Oceanic Heat Flow Averages, *J. Geophys. Res.*, **81**, 2997-3006.
- SEARLE, R. C., 1970, Evidence from Gravity Anomalies for Thinning of the Lithosphere beneath the Rift Valley in Kenya, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **21**, 13-31.
- WATTS, A. B., 1976, Gravity and Bathymetry in the Central Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, **81**, 1533-1553.
- WILSON, J. T., 1963, A Possible Origin of the Hawaiian Islands, *Can. J. Phys.*, **41**, 863-870.
- YOSHII, T., 1973, Upper Mantle Structure beneath the North Pacific and the Marginal Seas, *J. Phys. Earth*, **21**, 313-328.
- YOSHII, T., 1975, Regionality of Group Velocities of Rayleigh Waves in the Pacific and

Thickening of the Plate, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **25**, 305-312.

YOSHII, T., Y. KONO and K. ITO, 1976, Thickening of the Oceanic Lithosphere; in the Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin, The Woollard Volume, *Geophys. Monog.*, Vol. 19, Am. Geophys. Union, 424-430.