

坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル

田中明子* 矢野雄策** 笹田政克*** 大久保泰邦†
梅田浩司†† 中司昇†† 秋田藤夫†††

Akiko TANAKA, Yusaku YANO, Masakatsu SASADA, Yasukuni OKUBO, Koji UMEDA, Noboru NAKATSUKA and Fujio AKITA (1999) Compilation of thermal gradient data in Japan on the basis of the temperatures in boreholes. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 50 (7), p. 457-487, 10 figs., 2 tables.

Abstract: Thermal gradient data of Japan have been compiled on the basis of 1829 borehole temperature data. We have used the borehole data of 300 m or more in depth, below the transient effects of surface temperature variations and below the groundwater infiltration zone. Thermal gradient was calculated from the difference between the temperature at the bottom of each borehole or the maximum temperature in the borehole and the average surface temperature. We also used the 108 thermal gradient data from the heat flow data sets compiled by Yamano *et al.* (1997). Although most of the thermal gradient data are within the typical range of 10 to 80 K/km, the average value of 70 K/km is higher than the typical geothermal gradient value of about 20 K/km. It may reflect that much more data were obtained from the regions of higher thermal gradients such as volcanic and geothermal areas. There are large variations of the thermal gradients over small horizontal distances. This is due to a combination of different complex thermal processes. Although the method to estimate the thermal gradients used in this study contains many simplified assumptions and there are many gaps in the data to define fine structure of the thermal gradients, the distribution of thermal gradients is consistent with the tectonic settings. In the northeastern part of Japan, the thermal gradient is low on the Pacific side of the arc and high on the back-arc side. The boundary between the outer low-thermal gradient and the inner high-thermal gradient regions roughly coincides with the volcanic front. In southwestern Japan, lower values have been obtained around the Seto Inland Sea. The spatial variations in thermal gradient are in good agreement with the heat flow data. It suggests that the pattern of thermal gradient data is useful as an indicator of the shallow thermal structure.

要 旨

日本列島の地殻表層の広域的な温度構造を示すデータの一つとして、1,829 点の坑井の温度データのコンパイルがなされた。坑底温度と地表での基準温度をもとに地温勾配を推定した。また、従来からコンパイルされてきた地殻熱流量のデータセット (山野・他, 1997) の地温勾配の値 108 点もあわせて用いた。この結果、火山フロント付近を境界とし、海溝側の平均値の方が背弧側の平

均値よりも小さい傾向を示すこと、瀬戸内海周辺は低い値を持つことが明らかになった。この広域的なパターンは、これまでにコンパイルされている日本列島下の温度構造を表わす地殻熱流量のデータなどとよく一致する。しかし地温勾配は隣接した坑井間でも値が大きく違うことも多い。特に浅い坑井における測定値や火山・地熱地帯などにおいては、ばらつきは大きくなり、地温勾配の平均値 20 K/km に比べ、100 K/km 以上の高い値をとることも多い。地温勾配は、多くは 1,000 m 程度の坑井より見積もられており、これをもとにより深い深度における温度を推定することや、ここで得られた値のみからデータの存在しない場所の地温勾配を推定することは困難である。しかし、地殻熱流量のデータに比べて数多く存在するので、地殻熱流量の分布のみでは明らかではな

Keyword: thermal gradient, borehole, heat flow, Japanese islands

* 地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

** 地殻熱部 (Geothermal Research Department, GSJ)

*** 国際協力室 (International Geology Office, GSJ)

† 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization)

†† 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

††† 北海道立地下資源調査所 (Geological Survey of Hokkaido)

い熱構造を知ることができる可能性がある。

1. はじめに

地球は、内部に蓄えられたもしくは内部で発生する熱エネルギーを変換して、地震・火山活動やテクトニクスなどのエネルギーとしている。またこの際エネルギーの一部は熱エネルギーとして放出している。このように地球物質の移動と変化は、熱エネルギーの授受を伴っている。地球上で人目をひく熱現象は、火山の噴火、温泉の湧出、地震などであろう。しかし、これらによるエネルギー放出はそれぞれ 10^{12} , 7×10^{10} , 10^{10} W にすぎない(水谷・渡部, 1978)。地球内部のエネルギーを最も大量に地表に運搬しているのは、固体熱伝導による地殻熱流量であり、エネルギー放出は 3×10^{13} W である。太陽からの輻射エネルギーは 1.7×10^{17} W であり、地球内部からの熱エネルギーに比べて4桁ぐらい大きい。しかし太陽からの輻射と、反射や赤外放射で逃げる熱がつりあっているため、地表数 m より深いところにはほとんど影響を与えない。

このような地球の熱現象を理解するうえで、最も基本的で直接観測される量は、地殻熱流量である。地殻熱流量は、温度勾配とその場の物質の熱伝導率の積として得られる。地殻熱流量は、地球内部から地表に向かって熱伝導により運ばれる熱のことで、火山や地熱地帯などで顕著に見られる物質の流動に伴って放出される熱量は含まない。地殻熱流量を陸上で測定するためには、地表付近の各種の擾乱を避けるために数百 m 程度の坑井が必要とされる。一方温度環境が安定している深海底では、海底面から数 m 以内の測定により地殻熱流量を求めることができる。全世界の地殻熱流量のコンパイルは IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) の国際熱流量委員会 (International Heat Flow Committee) のプロジェクトとして行われ、現在約 250,000 点の熱流量のデータが公開されている (Pollack *et al.*, 1993)。日本においては、陸上では 1957 年に、海域では 1961 年に地殻熱流量が最初に測定されて以来精力的に調査が行われ、1970 年頃には広域的な地殻熱流量分布の特徴が明らかにされている (例えば, Uyeda, 1972)。しかしながら、測定点の分布には偏りがあり、他のデータを併用した総合的な解釈もまた必要である。

本論文では、日本列島下の温度構造を推定し得る情報の一つとして、熱伝導のみではなく熱対流をも含めた地

中の深さに対する温度変化を地温勾配として計算し、コンパイルを行った。そのために従来から利用されている地熱、石油、金属資源探査や防災を目的とした坑井データの他に、温泉開発を目的とした坑井(温泉井)のデータを収集し、坑井の深度や温度データの編集および、地温勾配図の作成を試みた。もちろんこれらの温泉井は、一般的に深度は浅く、データの質が高いとは限らないが、その他の坑井データに比べて圧倒的に数多く存在するという特徴を持つ。これらのデータを利用することによって、火山や地熱地帯および低温度地帯の分布特性を表わす、日本列島の地温勾配の分布を明らかにすることができた。

本論文では、最初に存在する坑井データについて述べる。次に、地温勾配の計算方法について説明する。最後に、広域的な地温勾配値の分布について記述する。なお 300 万分の 1 の日本列島地温勾配図は、別途地質調査所出版物として出版されている(矢野・他, 1999)。

2. データ

用いる坑井データの出所については別途地質調査所出版物(矢野・他, 1999)に詳しい。これは入手し得た坑井データから、坑井点の所在地(県名, 地区名, 温泉地である場合は温泉名), 坑井番号・名, 掘削年月日, 最終坑径, データの種類(地熱, 温泉, 鉱山, 石油, 防災の別), 坑口の緯度・経度, 標高, ボーリングの傾斜・方位, 偏距, 掘削深度, 地温勾配を求めた計算区間, 水位, 検層時の外気温度, スタンディング・タイム(泥水循環停止後, 検層開始までの時間), 基準温度, 坑底温度, 最高温度とその深度, 地温勾配, 温度パターン(上昇流型, 下降流型, 伝導型の別)などについてまとめ、「坑井データ一覧」を作成したものである。しかしこれらの項目全てが明らかにされているものは数少ないので、ここでは得られた坑井データ一覧より、緯度, 経度, 標高, スタンディングタイム, 坑底温度もしくは最高温度, および掘削深度もしくは最高温度を記録した深度のみを抜き出して使うことにした(第1表(a))。なお北海道地域については、北海道立地下資源調査所(1995)60万分の1北海道地温勾配図と全く同じデータセットをもとにしている。緯度・経度については度, 分, 秒について記述されているが、秒については10秒程度の精度と思われる記述が多いことから、位置の精度は200m程度であると考えられる。

第1表(b) data set (B): 坑井のデータセットの中で温度の情報を持たないもの。坑井の緯度, 経度, 標高, 掘削深度, 地温勾配値を示す。

Table 1 (b) Longitudes, latitudes, elevations, depths, and thermal gradients from borehole data set (B), in which only thermal gradients and depths of boreholes are known and no temperature data are available.

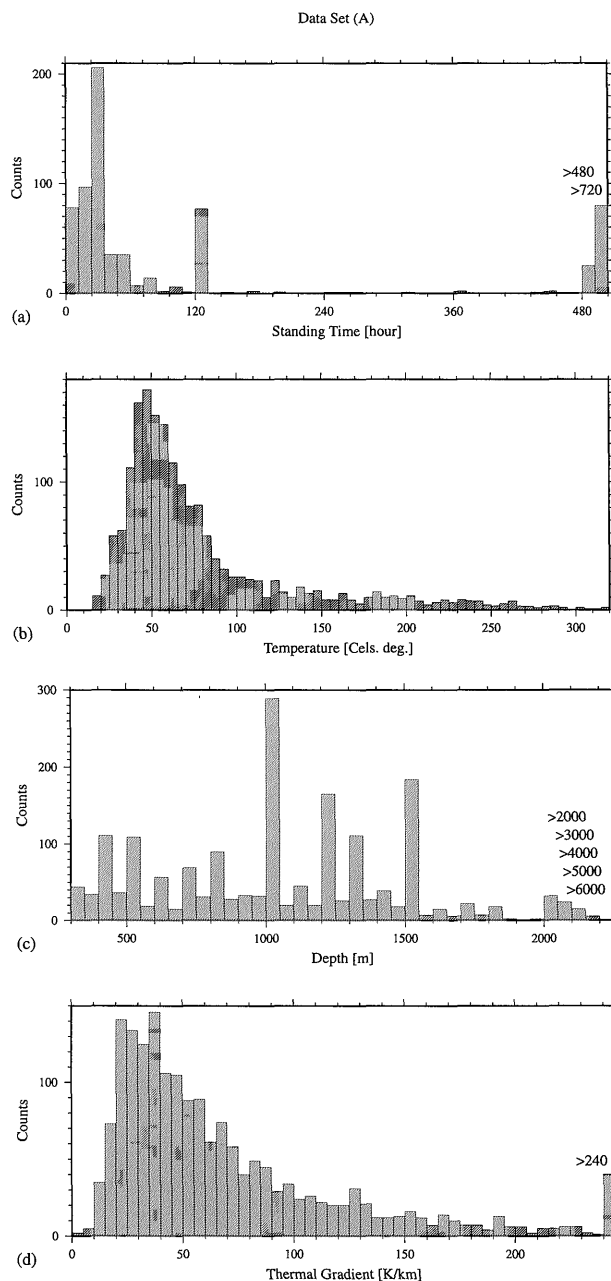
経度 (deg.)	緯度 (deg.)	標高 (m)	掘削深度 (m)	地温勾配 (K/km)
140.3300	35.9500		1234	14
140.5700	36.1200		1234	16
140.2100	36.2500		300	31
139.4500	36.6500		2002	40
139.1900	36.3100		2040	34
139.5500	36.2400		1234	15
139.5400	35.8000		2001	17
138.8000	36.2000		401	19
139.3900	35.9000		1830	23
139.3000	35.8400		802	17
140.3000	35.8300		1336	7
140.2400	35.5400		2041	15
139.8600	35.3400		2040	25
140.1600	35.2800		2039	25
139.4700	35.6500		2783	17
139.5200	35.5000		1998	29
139.3500	35.4200		1837	19
138.8100	35.7400		1245	21
137.8900	35.0800		560	20
130.8736	31.3756	55	1500	23

ここでは地温勾配を計算する際に, 深度 300 m 以深のデータのみを用い,

- 1) 掘削深度および坑底温度 (1,435 個所),
- 2) 最高温度とそれが記録された深度 (32 個所),
- 3) 掘削深度および最高温度 (342 個所)

を使用することにした (これらいずれの組み合わせの深度と温度を使用したかについても第1表(a)に明記してある。これら坑井のデータセットの中で深度と温度の情報を持つものをまとめて data set (A) とする。). スタンディング・タイムについての記載は 676 個所についてのみであり, これはここであげたデータの約 37% にすぎない。しかも, 24 および 48 時間以内のスタンディング・タイムがそれぞれ, 42 および 71% を占める。これらの値についてのヒストグラムを第1図に, 空間分布を第2図に示す。第1図に示されるように坑井データの深度別では 300 m-500 m 未満が 12%, 500 m-1,000 m 未満が 27%, 1,000 m 以深が 61% である。坑井データは, 北海道南西部, 東北から関東地方の火山フロント付近, 九州地方の火山地帯に多いが, 温度測定点の深さにかかわらず温度のばらつきは大きい。一方, 近畿, 中国, 四国地方では坑井データが少ない。また第3図に示すように, 温度は水の沸騰曲線よりは低い, 異常に高いデータも見られる。これらの異常な高温は特に浅い坑井において顕著に見られる。

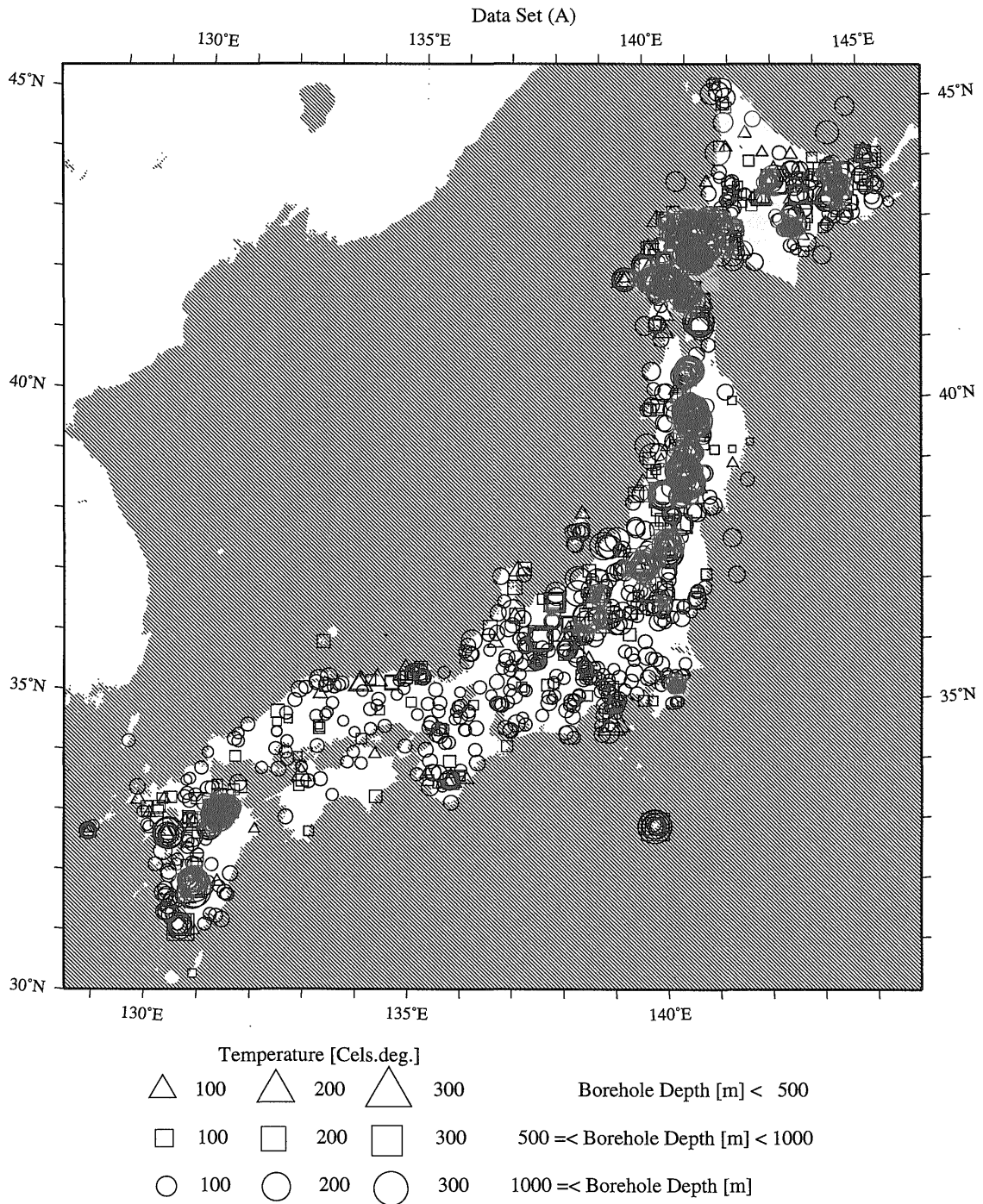
一方, 20 個所については, 温度とスタンディング・タイムについての記載がなく, 地温勾配と掘削深度のみが明記されている。この場合は別表にした (第1表(b)).



第1図 data set (A) の (a) スタンディングタイム, (b) 温度, (c) 深度, (d) 地温勾配のヒストグラム。
Fig. 1 Histograms of (a) standing times, (b) temperatures, (c) depths, and (d) thermal gradients using data set (A).

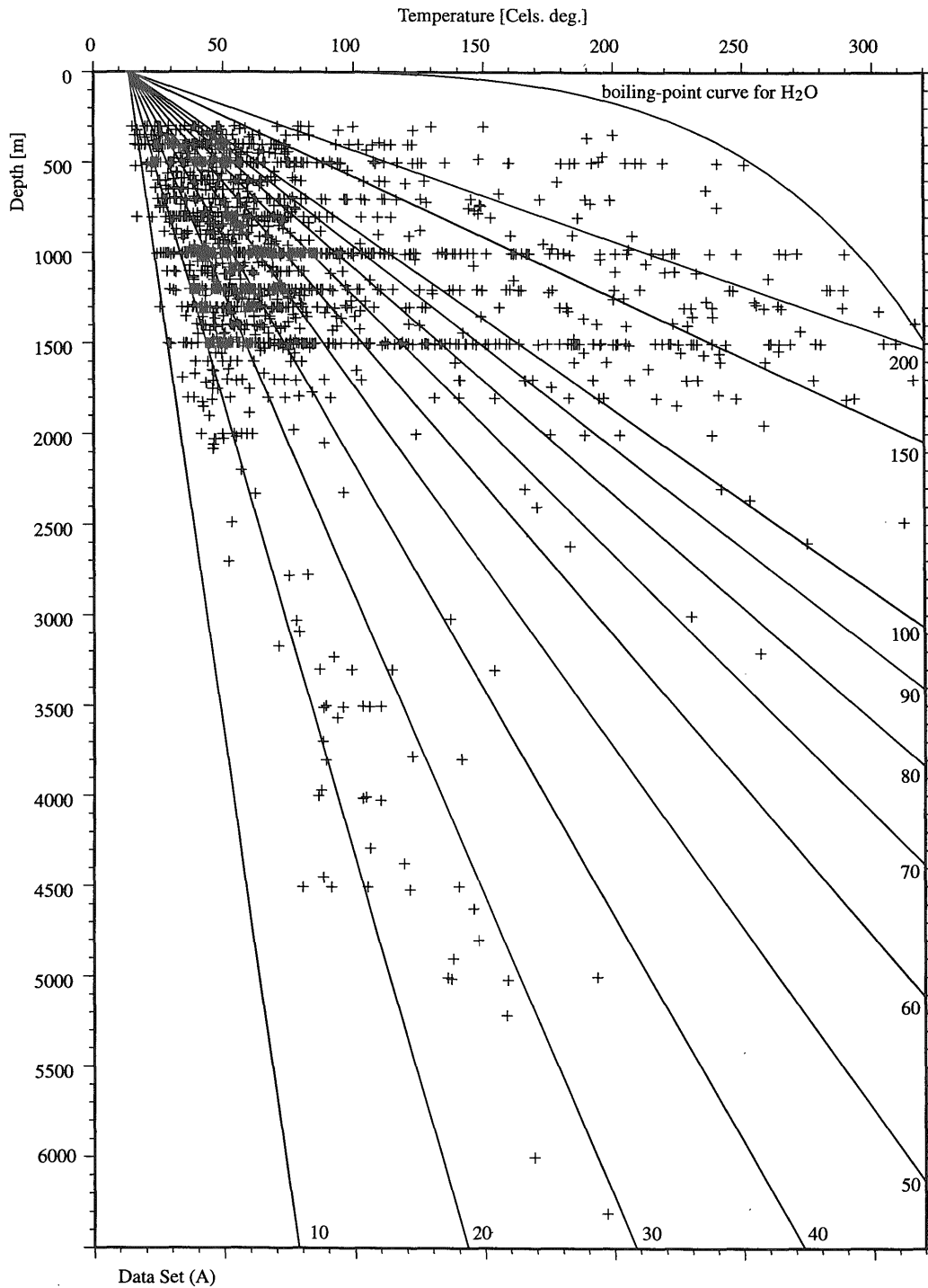
これを data set (B) とする。). これらの値についてのヒストグラムを第4図に, 空間分布を第5図に示す。これらは関東平野付近に集中しており, 低い地温勾配をとる。地温勾配の算出方法が不明ではあるが, 上記のデータセットのデータが疎である部分にデータが集中していることから, 日本列島全域の地温勾配の分布を知るうえで貴重なデータになり得るとして, ここではあえて使用することにした。

上述のデータとは別に従来からコンパイルされてきた地殻熱流量のデータセットも用いた (山野・他, 1997)。



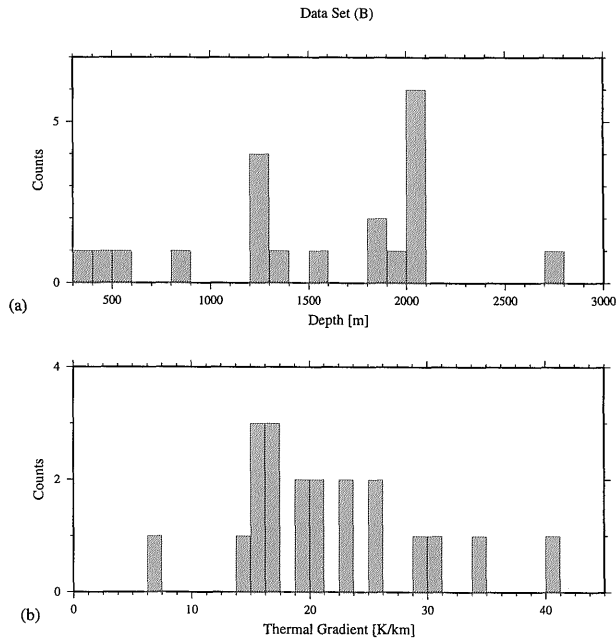
第2図 data set (A) による日本列島の坑底温度もしくは最高温度の分布図。△, □, ○の面積は温度の大きさに比例し、各シンボルは坑井の深さがそれぞれ 300 m-500 m 未満, 500 m-1000 m 未満, 1000 m 以深であることを示す。ここでは地図の投影法は全て緯度 37.75°, 経度 137.5° を中心とし、緯度 32.75° と 42.75° を標準緯線とする Albers 正積円錐図法を用いた。

Fig. 2 Temperature distribution of the Japanese islands using data set (A). The area of each symbol is proportional to the temperature. Triangles, squares and circles indicate the depth of boreholes of 300-500 m, 500-1000 m, and of deeper than 1000 m, respectively. Albers conic equal-area projection is used. Projection center is 37.75° N and 137.5° E, and 32.75° N and 42.75° N are standard parallels.



第3図 data set (A) の深度に対する温度のプロット (各データは+で表されている.)。実線は地温勾配 (各々の数字の単位は K/km.), 曲線は水の沸騰曲線を表す。

Fig. 3 Temperatures plotted against depths using data set (A). Solid lines show temperatures as a function of depth, in cases of constant thermal gradient 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150 and 200 K/km. The curved line shows the boiling temperature of H₂O.



第4図 data set (B) の (a) 深度, (b) 地温勾配のヒストグラム.

Fig. 4 Histograms of (a) depths and (b) thermal gradients using data set (B).

このデータセットには、測点名、緯度、経度、測定点の標高または水深、最も深い温度測定点までの地表面または海底面からの深さ、温度測定点数、温度勾配、熱伝導率測定点数、熱伝導率、熱流量が含まれている。ここでは、このデータセットの中で、坑井データと同様に、最も深い温度測定点までの地表面または海底面からの深さが300 m以上のもので温度勾配のデータの明記してあるもの108点を使用した(これをdata set (C)とする。第2表、第6図、第7図)。このデータセットでは、緯度・経度については度と分(まれに1/10分)のみの記述のデータがほとんどであるので、位置の精度は2 km程度であると考えられる。データは北海道道東や関東地方平野部、丹後半島など局所的に集中しているが、これらのデータ集中域においては、温度測定点の深さにかかわらず地温勾配の値のばらつきは小さい。これはスタンディング・タイムが十分に長く温度が定常状態にあることを前提として収集されたデータセットであるからであろう。

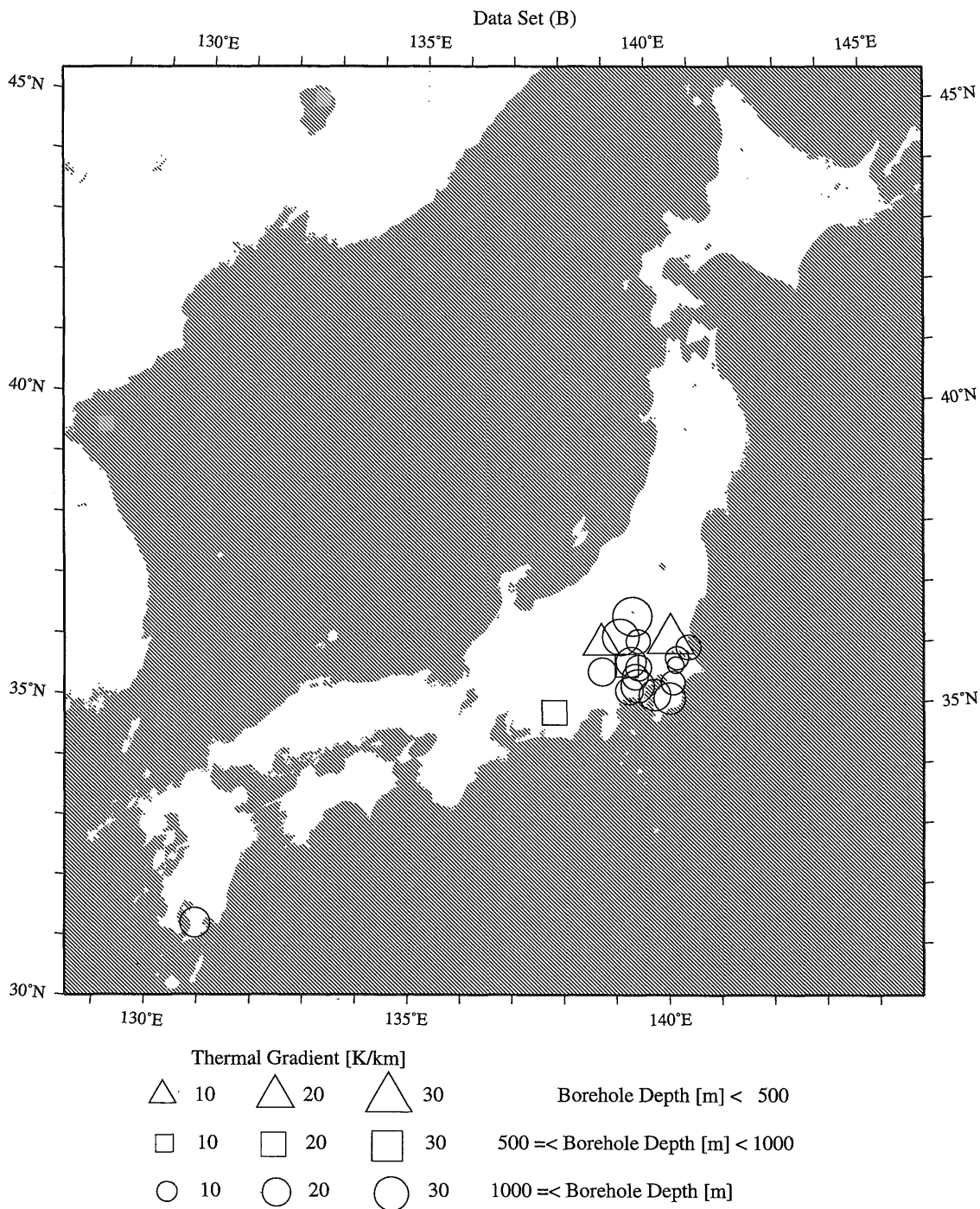
これらdata set (A)-(C)の3種類のデータの総数は、1,937点であり、そのうち温度測定点の深さが300-500 m, 500-1,000 m, 1,000-1,500 m, 1,500-2,000 m, 2,000 m以深のデータはそれぞれ239, 524, 802, 275, 97点を占める。

3. 地温勾配値

坑井で行われる温度測定は、その場所と時間において

のみ意味があるのであり、多くの要因が測定に影響を与える(例えば、Buntebarth, 1984)。まず、日変化、年変化、さらにはより長周期の気候変動などの地表の温度、また、地表の形態や地質などに、地下の温度は影響を受ける。また、地下水の流れやテクトニックな動きにより、伝導より対流による熱輸送のほうが効果的となることもある。深さ50 cmで日変化は1%以下になるが、年変化に依存しない地中の温度を知るためには、深さ10-15 mの坑井を用いて何箇所かで温度測定を行う必要がある。それより深い坑井では、掘削の過程そのものが、地下の温度に大きな擾乱を与える。掘削リグからの水の循環は、一般的に坑井の周りの岩石を温め、ある深さで深では逆に冷やす。またドリルビットで生じる熱は、坑井の周りの岩石を温める。これらの影響をとり除くためには方法が2つ考えられる(例えば、Turcotte and Schubert, 1982)。一つ目の方法は、坑底温度がこれらの影響を受けないように、掘削中に坑底の温度測定を行う方法である。もう一方の方法は、坑内温度が完全に地中温度と平衡状態になった後(一般的に1年から2年程度後)に温度測定を行う方法である。もちろん後者の方法が望ましいが、主に現場における作業上の都合などにより、掘削直後に温度測定がなされていることが多い。

前述のようにここで用いたのは坑井の深度が300 m以深のデータのみとした。これは、地表温度の日変化や年変化だけではなく、特に氷河期の影響などより長期(10³年程度)におよぶ気候変動による地表の温度変化などが、地下の岩石の温度に影響を与える影響を避ける



第5図 data set (B) による日本列島の地温勾配図. △, □, ○の面積は地温勾配の大きさに比例し, 各シンボルは坑井の深さがそれぞれ 300 m-500 m 未満, 500 m-1000 m 未満, 1000 m 以深であることを示す.

Fig. 5 Distribution of thermal gradients for the Japanese islands using data set (B). The area of each symbol is proportional to the thermal gradient value. Triangles, squares, and circles show the depth of boreholes of 300-500 m, 500-1000 m, and of deeper than 1000 m, respectively.

坑井の温度データによる日本の地温勾配値 (田中 ほか)

第2表 data set (C): 地殻熱流量のデータセットによる緯度, 経度, 深度, 温度勾配値 (山野・他 (1997)).

Table 2 Longitudes, latitudes, depths, and thermal gradients from the published heat flow data sets (after Yamano *et al.* (1997)).

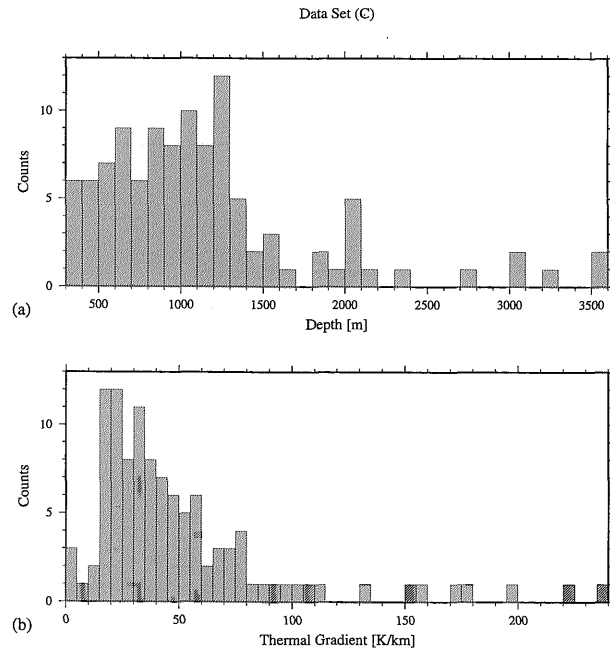
経度 (deg.)	緯度 (deg.)	掘削深度 (m)*	温度勾配 (K/km)	経度 (deg.)	緯度 (deg.)	掘削深度 (m)*	温度勾配 (K/km)
141.733	42.650	3570	17	143.333	44.008	1300	54
142.183	43.400	630	29	140.150	41.975	1245	51
140.633	43.000	600	56	143.283	42.633	1107	39
142.067	42.967	550	23	143.300	42.633	1119	37
140.533	43.117	347	46	144.175	43.908	1500	50
141.183	42.700	600	82	140.817	43.075	1352	62
140.567	43.033	1180	66	142.575	43.450	985	48
140.817	42.983	950	76	140.000	42.150	1035	109
141.200	42.717	450	73	144.467	43.608	1300	66
141.183	43.100	308	43	140.875	42.550	1274	77
141.933	42.717	700	21	144.300	43.800	1113	41
140.367	42.500	480	72	143.167	42.917	1110	25
140.867	42.533	340	100	144.250	44.033	1174	43
140.667	41.983	700	45	141.350	43.100	500	46
140.908	41.167	390	72.2	140.740	35.827	780	17.3
140.200	38.025	570	39.5	137.545	36.217	1000	155
139.367	34.783	700	221	137.545	36.217	1000	195
132.817	33.650	435	23.1	138.542	36.600	1265	177
130.767	32.050	440	75.7	138.542	36.600	1270	174
143.237	40.630	862	32	137.392	36.217	800	150
143.310	40.627	934	36	137.392	36.217	803	50
143.928	39.735	488	24	137.392	36.217	604	235
131.418	31.610	1000	38	131.623	34.125	300	14.5
137.798	36.520	1300	56	131.743	33.542	560	30.3
135.335	34.810	1001	29	134.937	35.555	650	24
134.965	35.653	900	31	135.068	34.937	1000	20
134.972	35.650	860	31	134.527	35.448	680	60
135.015	35.687	780	29	134.682	35.505	1000	30
135.110	35.728	840	34	135.115	35.535	850	28
135.180	35.582	800	32	134.830	35.552	800	29
134.943	35.630	900	40	135.065	35.702	1250	39
141.650	42.533	2183	34	135.942	34.908	1500	22
141.767	42.450	3200	30	139.450	36.650	1450	39.5
141.912	42.510	3005	17	136.590	36.657	1150	19.8
143.400	42.950	380	55.9	136.623	35.613	300	24.4
144.450	43.500	660	94	140.167	35.283	2039	24.6
143.950	42.900	640	40.3	140.233	35.533	2041	15
145.467	43.267	1200	23	140.333	35.950	1234	14
144.917	43.750	1260	67	138.817	35.733	1245	20.9
142.900	43.783	500	95.7	139.467	35.650	2783	16.5
141.150	41.800	500	131	139.300	35.833	802	17.4
144.017	43.717	1200	47.6	139.383	35.900	1830	23
143.233	44.133	950	44	139.183	36.317	2040	34.1
144.333	43.392	1650	33	139.733	35.933	3511	20.9
141.643	45.442	930	51	139.817	35.617	3030	15.3
144.472	43.855	1140	40	140.300	35.833	1336	8
143.295	43.228	1500	49	140.017	35.783	2330	15.6
140.425	43.150	600	58	140.567	36.117	1234	16
143.483	42.542	700	38	139.550	36.233	1234	14.9
144.680	43.900	1450	58	139.533	35.800	2001	16.7
140.825	42.025	1000	79	140.217	36.250	300	31.3
140.718	42.020	1000	58	139.517	35.500	1998	29.1
140.517	42.950	1003	88	139.350	35.417	1837	18.7
140.633	42.833	500	110	139.867	35.333	2040	25.1

*最も深い温度測定点までの地表面または海底面からの深さ

ためである。これらの影響を避け定常的な温度構造を得るためには、坑井の深さは約 300 m 程度必要であるとされている (Turcotte and Schubert, 1982)。

一般的には、地熱井や石油・天然ガス井では長時間の温度回復試験を行なうことが多い。一方、温泉井などでは掘削直後に温度を測定し温度の回復試験を行なわない場合も多く、また各深度での温度を測定せず坑底の温度だけ測定する場合もある。このようにここで用いた坑井

の温度検層データにはさまざまな精度のものが含まれる。ここでは前節で述べたように、日本列島全体におよぶなるべく多数のデータを活用することを目的としているので、十分な情報を持つデータのみではない。そこで、data set (A) を用い、各坑井データの坑底温度もしくは最高温度と“地表の基準温度”の差を掘削深度もしくは最高温度を記録した深度で割ることにより、地温勾配値とした。つまり、



第6図 data set (C) の (a) 深度, (b) 地温勾配のヒストグラム.

Fig. 6 Histograms of (a) depths and (b) thermal gradients using data set (C).

地温勾配値

= (坑底温度 - 地表の基準温度) / 掘削深度
(data set (A) の 1) の場合

もしくは

= (最高温度 - 地表の基準温度) /
最高温度を記録した深度
(data set (A) の 2) の場合

もしくは

= (最高温度 - 地表の基準温度) / 掘削深度
(data set (A) の 3) の場合

として計算した。ここで基準温度は日本の主な気象官署の 80 地点における年平均気温 (西暦年次の 1 の位が 1 の年から始まる最近の連続する 30 か年の累年平均値。ここでは 1961 年から 1990 年までのものを使用した。) (国立天文台, 1997) を用いることにした。実際には各坑井データの最寄りの気象官署における年平均気温をそのデータの基準温度とした。各坑井データと最寄りの気象官署の両者がもっとも離れている場合の距離は約 150 km であり、平均距離は約 20 km であった。両者の間の距離は 100 km および 50 km を越えるデータは全体のそれぞれ 1% 以下および 10% 以下である。なおこのようにして計算した地温勾配のうち 1 点は負の値をとったので、これについては、地温勾配値を 0 とした。

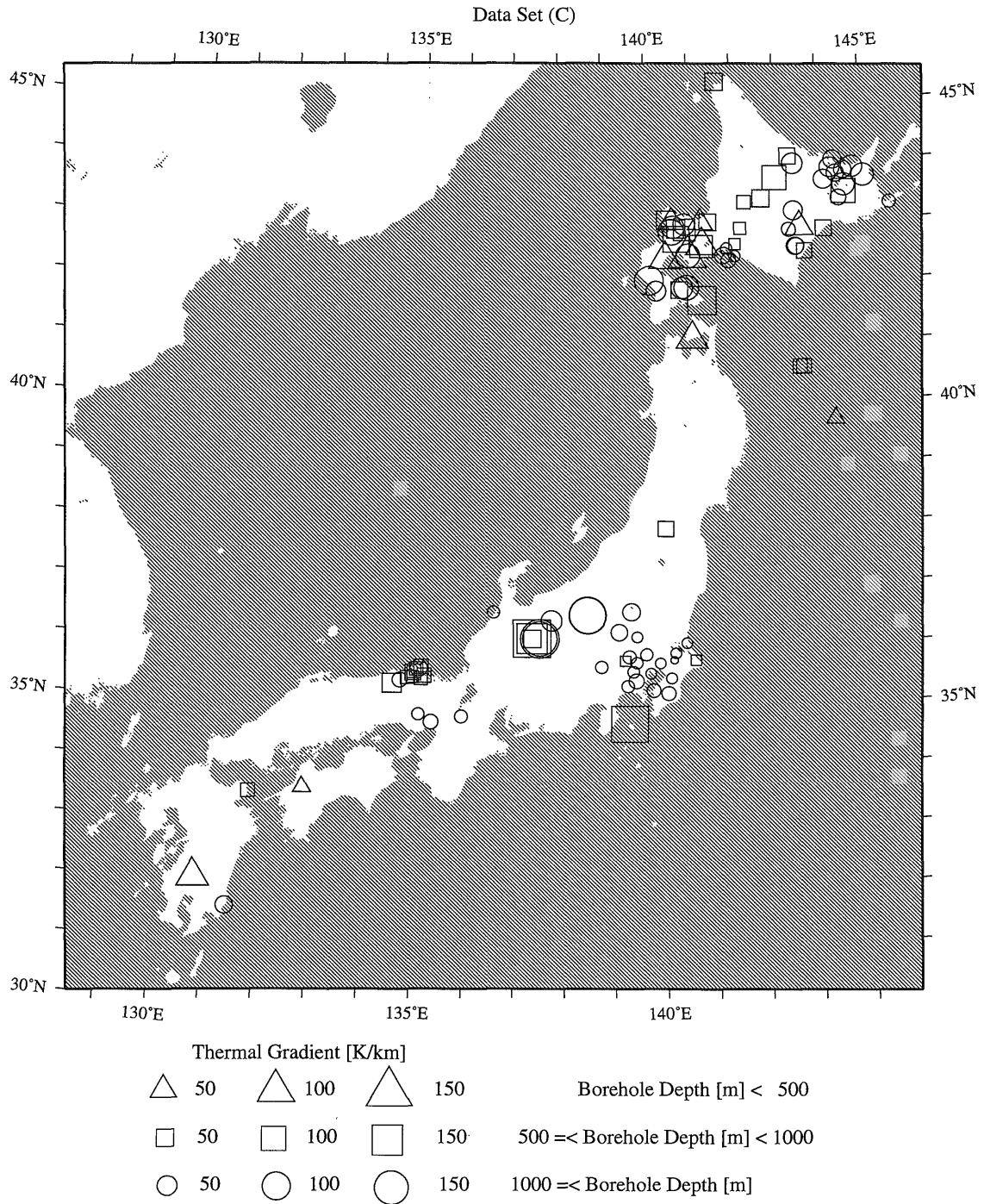
なお、広域的な地温勾配値を表す図としては、北海道地域については、北海道立地下資源調査所 (1995) の出版した「60 万分の 1 北海道地温勾配図」がある。本論文では全く同じデータセットをもとにしているが、北海道

立地下資源調査所 (1995) では基準温度を 10°C と一定にして地温勾配を計算している。一方、本論文では上記のような場所によって異なる基準温度を用い地温勾配を計算しているので、両者の間では地温勾配の値は異なる。

上記のような方法で決めた地温勾配値のヒストグラムを第 1 図 (d) に示す。典型的な地温勾配の範囲は 10-80 K/km 程度 (例えば, Stein, 1995) であり、これとほぼ同じ範囲にデータが集中している。ここで得られた地温勾配の平均値は 70 K/km であり、典型的な値 20-30 K/km (例えば, Turcotte and Schubert, 1982) に比べて大きい。これは、一般的に地温勾配とは、熱伝導によって地中の温度が深さとともに増加する程度のことと解釈されていることが多いのに対し、ここでは、上述のようにある深さにおける温度と地表温度の差を坑井の深さで割った値を用いていることに原因があると考えられる。つまり、ここで求めている地温勾配は、熱伝導のみではなく熱対流をも含んだ地中の温度の増加率であるからである。また坑井データが地熱地帯に集中していること、また日本列島という活動的な島弧のデータであるということにも起因すると考えられる。

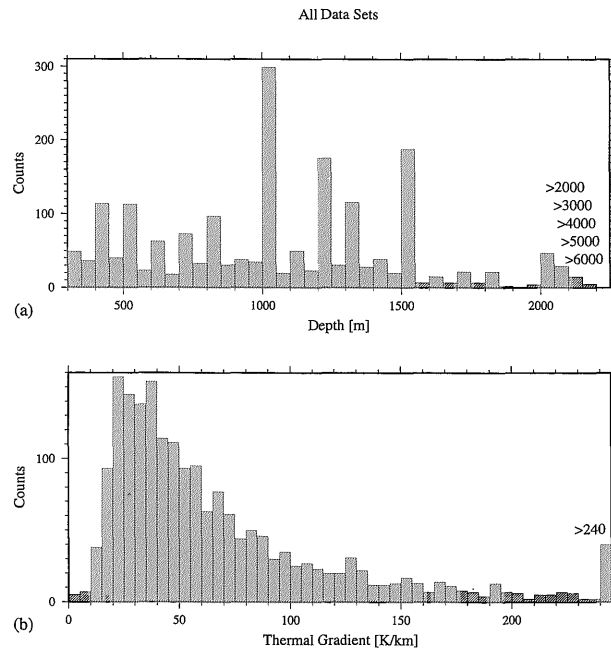
第 8 図にここで求めた全データの地温勾配と深度のヒストグラムを、第 9 図に、data set (A)-(C) の 3 種類のデータの全てについての深度に対する地温勾配の値のプロット、および、深度 300-2,000 m までは各 100 m 毎、深度 2,000 m 以深では各 500 m 毎の、地温勾配と深度の平均値を示す。深度 2,000 m 以深では地温勾配の平均値はいずれも 20-35 K/km 程度の値をとるのに対し、2,000

坑井の温度データによる日本の地温勾配値 (田中 ほか)



第7図 data set (C) による日本列島の地温勾配図. △, □, ○の面積は地温勾配の大きさに比例し, 各シンボルは坑井の深さがそれぞれ 300 m-500 m 未満, 500 m-1000 m 未満, 1000 m 以深であることを示す.

Fig. 7 Distribution of thermal gradients for the Japanese islands using data set (C). The area of each symbol is proportional to the thermal gradient value. Triangles, squares, and circles show the depth of boreholes of 300-500 m, 500-1000 m, and of deeper than 1000 m, respectively.



第8図 全てのデータに対する (a) 地温勾配, (b) 深度のヒストグラム。
 Fig. 8 Histograms of (a) depths and (b) thermal gradients using all the data sets.

m以浅の平均値は100 K/kmを超えるような非常に大きな値から深さに伴い減少する。また、浅い坑井データほど、地温勾配のばらつきが大きい。これは地温勾配の値が坑井深度の逆数に比例するので、坑井の深度が浅いほど地温勾配の値に測定値や測定誤差が大きく影響することが主な原因である。つまり、温度の測定誤差や異常な高温が観測された場合に、坑井の深度が浅いほど、異常な地温勾配値と検出されるてしまうことが多い。また data set (A) と (B) については、データ取得時期の影響を考慮せず、基準温度として平年気温を用いていることも一因となっていると考えられる。

4. 地温勾配図

第10図に坑井データの深度別 ((a) 坑井の深さが300 m-500 m未満, (b) 500 m-1,000 m未満, (c) 1,000 m-1,500 m未満, (d) 1,500 m-2,000 m未満, (e) 2,000 m以深)の地温勾配図を示す。広域的な地殻熱流量分布の特徴は、東北日本では太平洋側で熱流量が低く(40-80 mW/m²以下)日本海側で高い(80 mW/m²以上)が、西南日本では南海トラフ側で高く瀬戸内海周辺で相対的に低い値をとるといったことなどがあげられる。第10図のいずれの深度を用いた図においても、これらの傾向と調和的である。たとえば、1,000 m以深の坑井では、瀬戸内海周辺ではほとんど30 K/kmの小さな値をとる。ただし、広域的には地殻熱流量の分布とよく一致するが、地温勾配図は隣接した坑井間でも値に大きな差があること

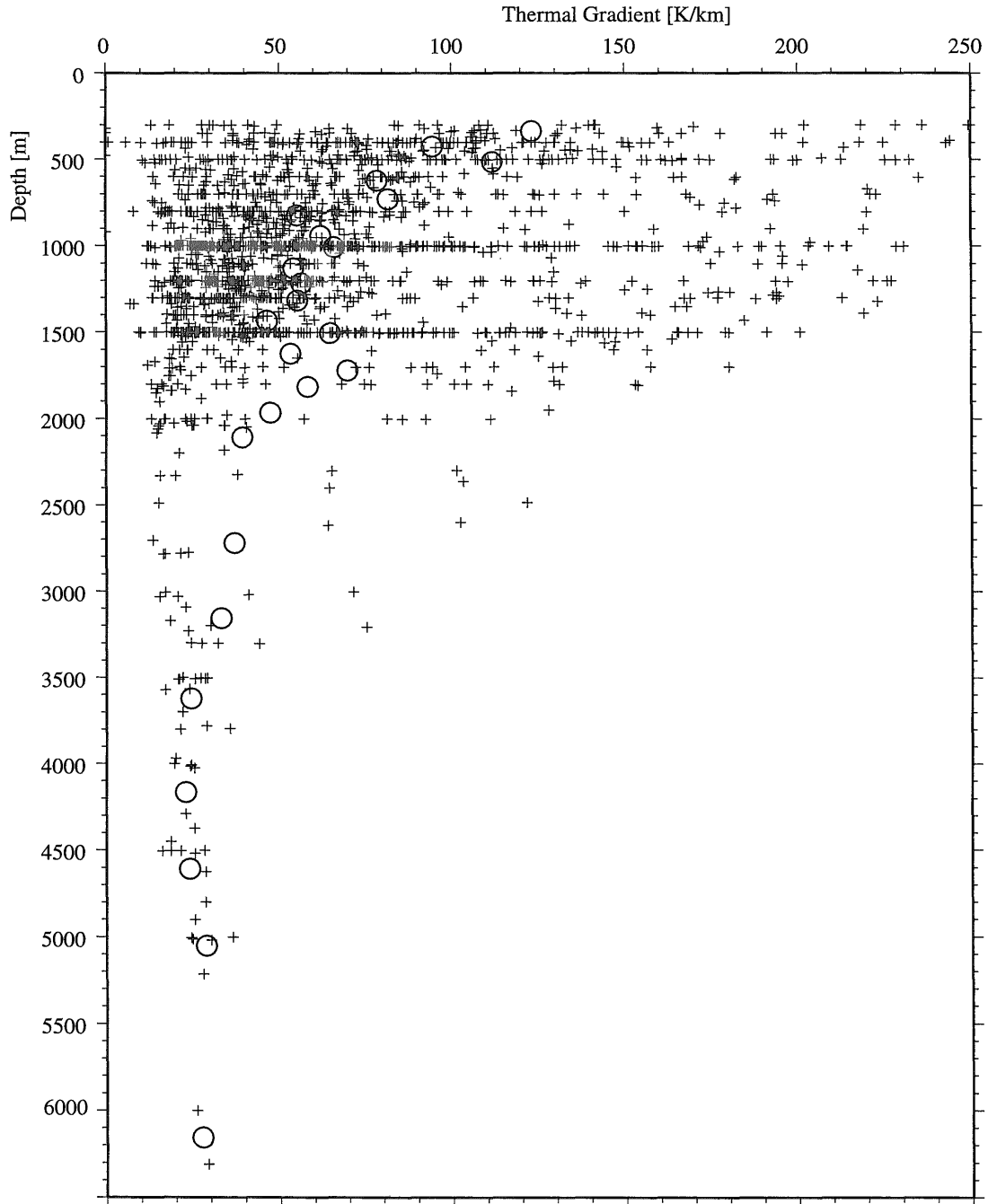
もあり、ばらつきの大きな図になる。特に火山・地熱地帯などでは、熱水対流などの影響を受け熱輸送のプロセスが複雑であると考えられるため、ばらつきは大きくなる。また、浅い坑井では、ばらつきの大きな図となる。これは、地下浅部では熱水対流などにより場所によって温度が大きく変化する傾向があり、かつ地温勾配の計算が深度の逆数に比例するために温度の誤差が測定点の深さが浅いほど大きな影響を与えるためと考えられる。たとえば100 K/km以上の大きな値をとるのは、火山や地熱地帯か、1,000 m以浅の浅い坑井に限られる。

一方、日本列島のより詳細な熱構造を推定するためにはデータ数が不足している。たとえば、東北日本の低い地温勾配から高い地温勾配へ変化する場所を特定するためには、データは十分ではなく、また存在するデータはばらつきが大きい。これは地殻熱流量のデータと同じ状況である。

また全体のデータの中で data set (B) や data set (C) による第5図・第7図はデータ数が少なく(それぞれ1%と6%)、データが関東平野や北海道など一部の地域に集中しており、日本列島全体の傾向が明らかになるほどではないが、第10図とは調和的である。

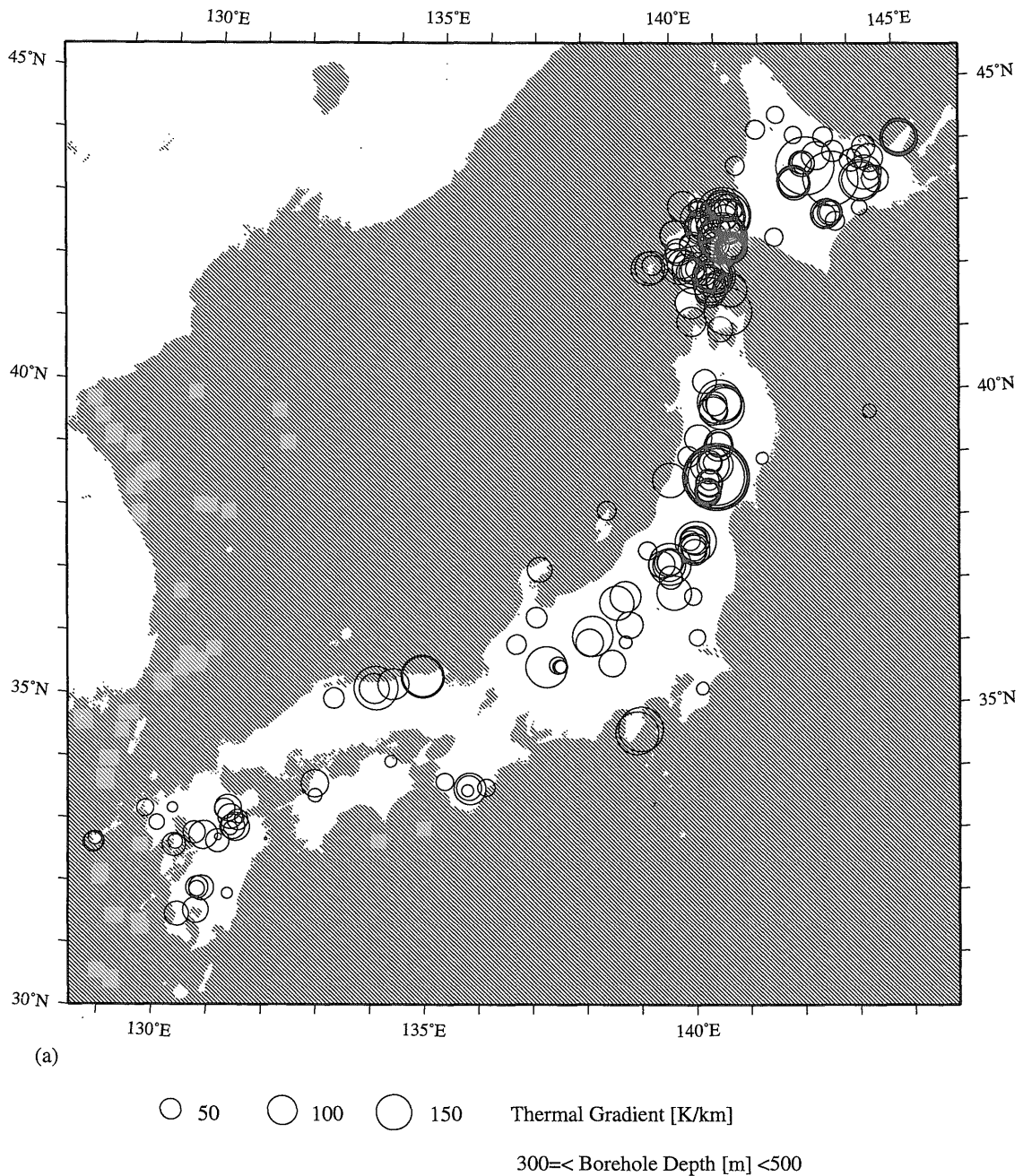
5. おわりに

日本列島の坑井データの深度までの温度構造を示すデータの一つとして、1,829点の坑井の温度データのコンパイルがなされた。また、従来からコンパイルされて



第9図 深度に対する地温勾配のプロット (各データは+で表されている.)。○は、深度300-2000 mまでは各100 m毎、深度2000 m以深では各500 m毎の地温勾配と深度の平均値を示す。

Fig. 9 Thermal gradients plotted against depths. Average values of thermal gradients (shown by open circles) are plotted for every 100 m interval at depths shallower than 2000 m and for every 500 m interval at deeper than 2000 m.

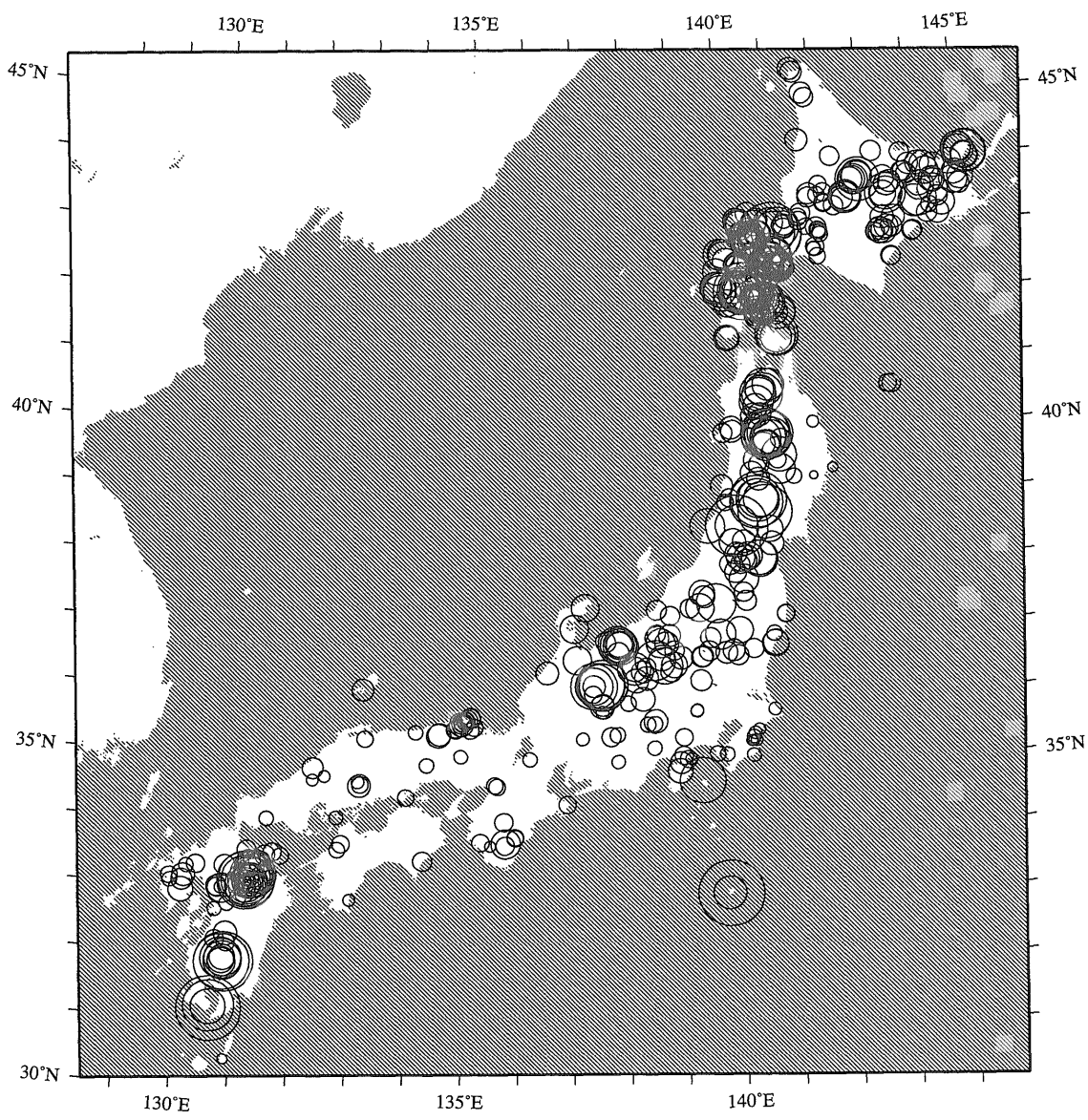


第10図 (a)

Fig. 10 (a)

第10図 坑井の深さが (a) 300 m-500 m 未満, (b) 500 m-1000 m 未満, (c) 1000 m-1500 m 未満, (d) 1500 m-2000 m 未満, (e) 2000 m 以深の日本列島の地温勾配図。○の面積が地温勾配の大きさに比例する。

Fig. 10 Distribution of thermal gradients using the Japanese islands using all the data sets. Depths of boreholes are (a) 300-500 m, (b) 500-1000 m, (c) 1000-1500 m, (d) 1500-2000 m, and (e) deeper than 2000 m. The radius of each circle is proportional to the thermal gradient value.

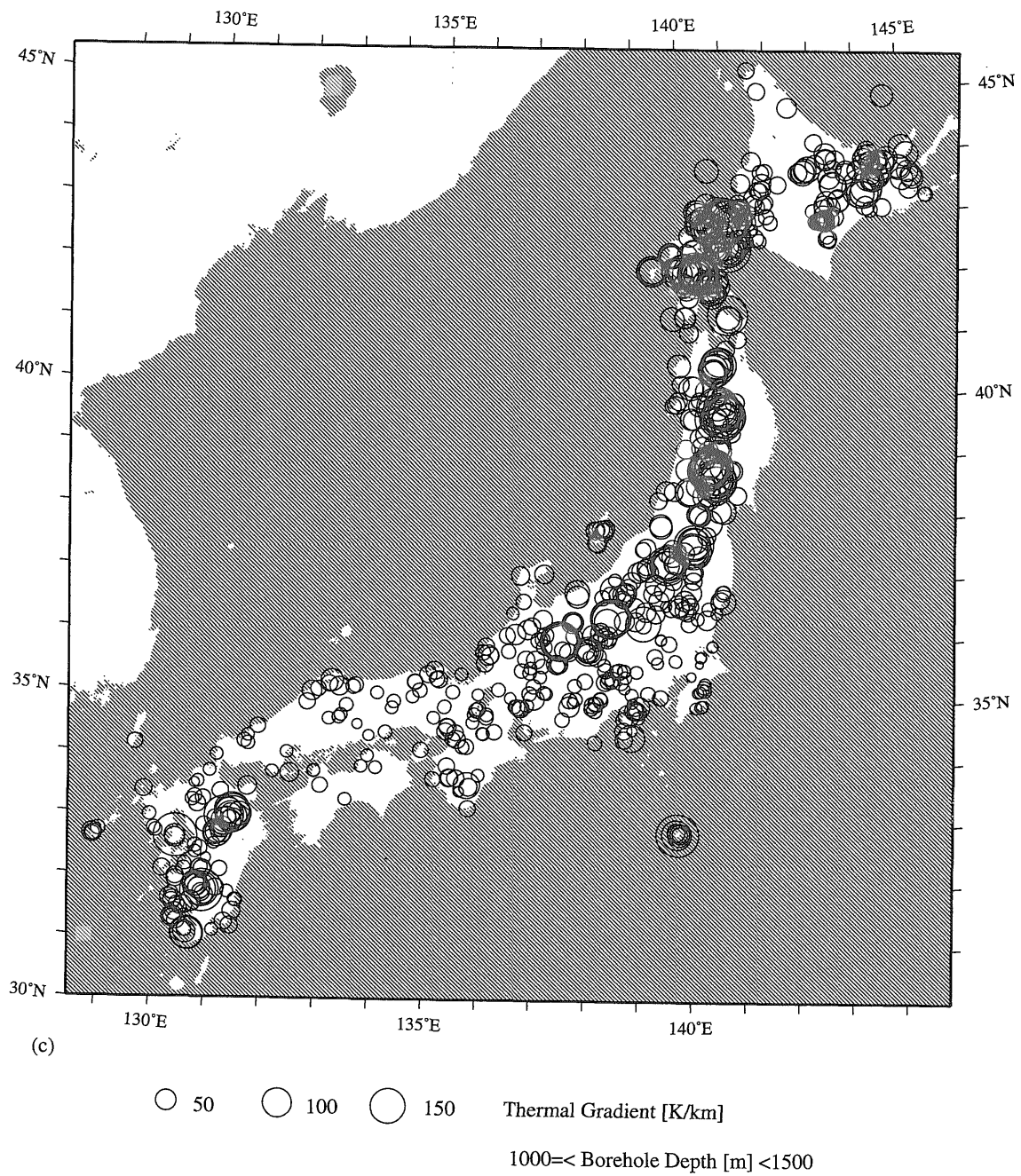


(b)

○ 50 ○ 100 ○ 150 Thermal Gradient [K/km]
500= \leq Borehole Depth [m] <1000

第10図 (b)

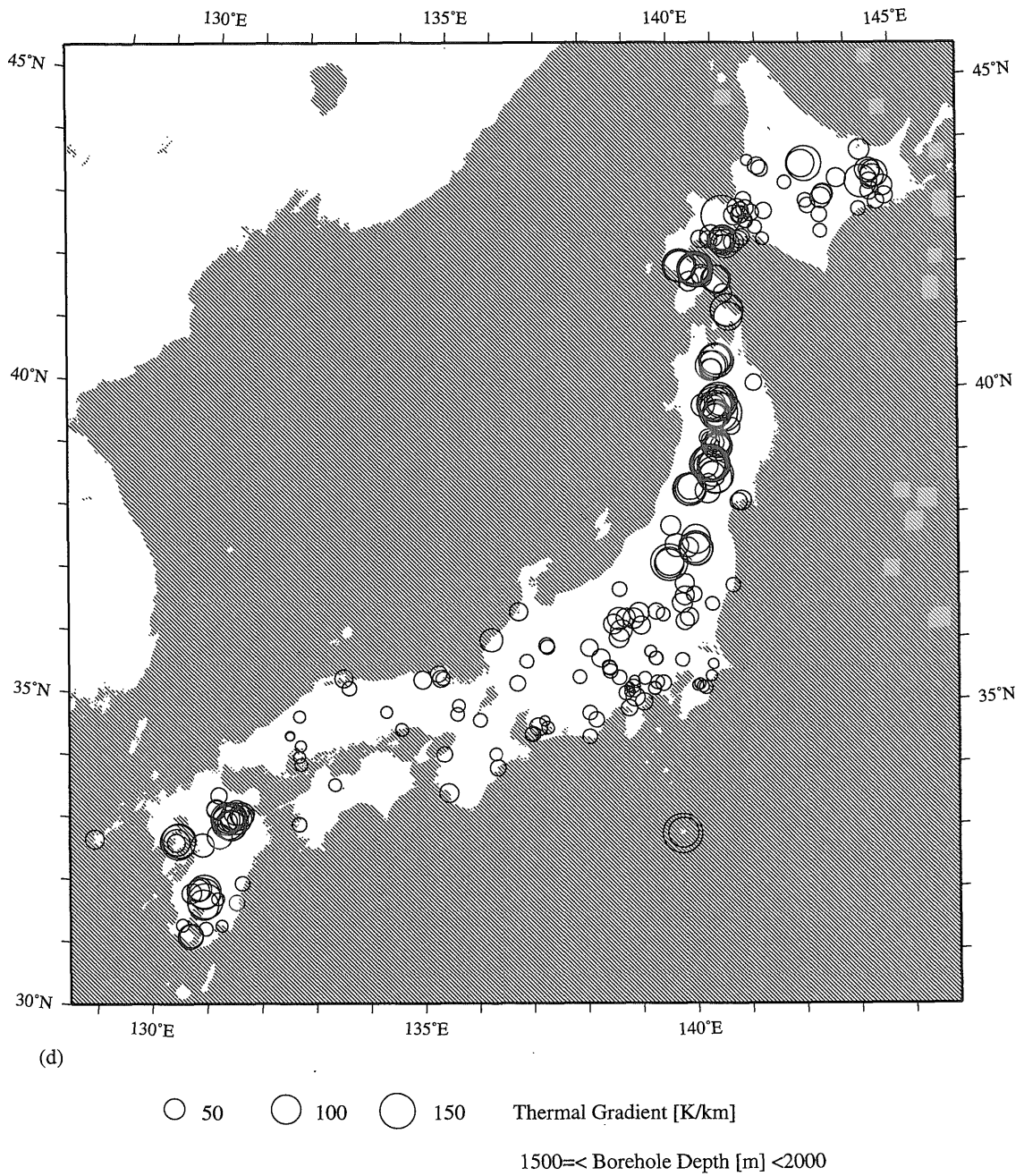
Fig. 10 (b)



第10図 (c)

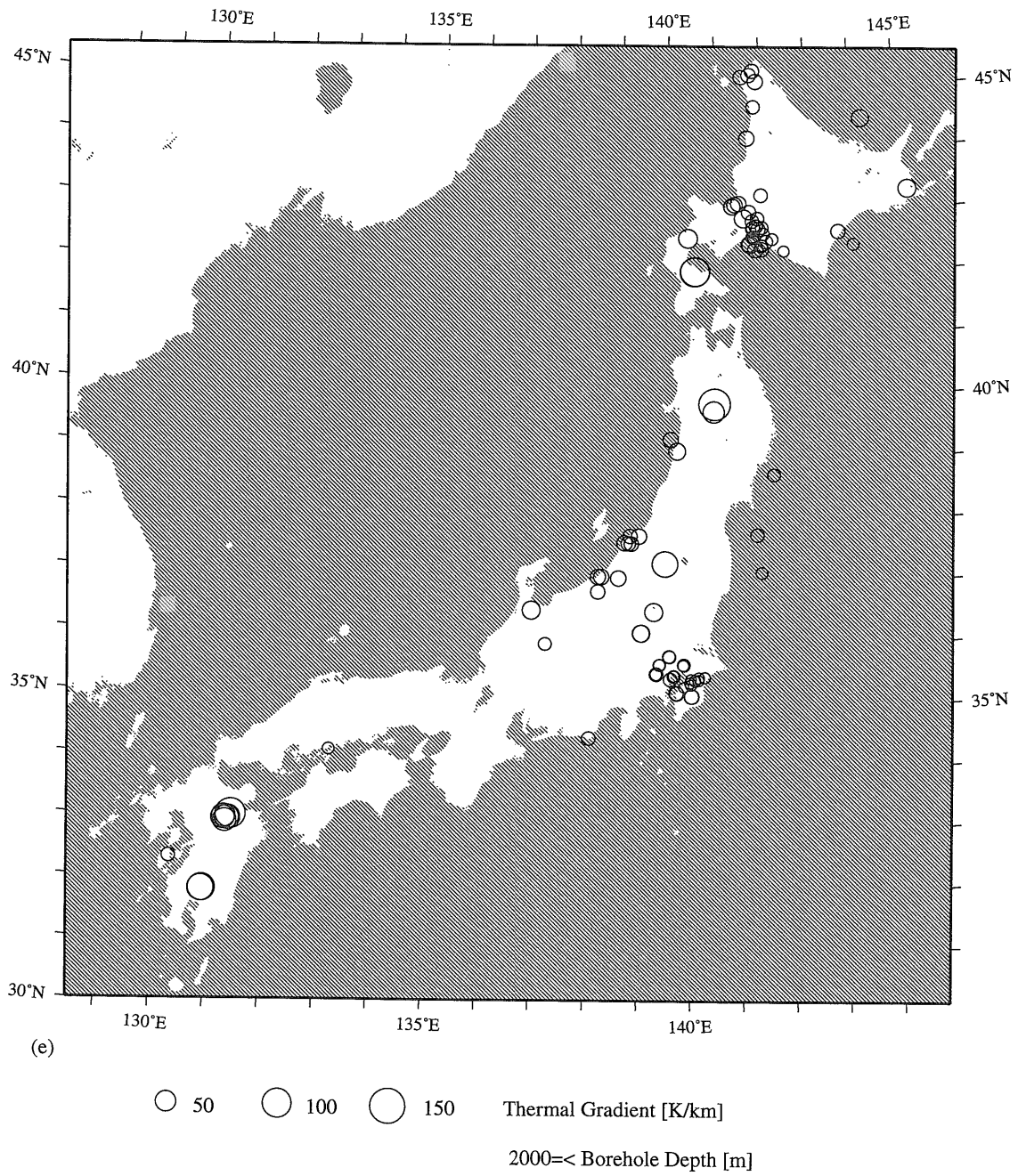
Fig. 10 (c)

坑井の温度データによる日本の地温勾配値 (田中 ほか)



第10図 (d)

Fig. 10 (d)



第10図 (e)

Fig. 10 (e)

きた地殻熱流量のデータセット (山野・他, 1997) の地温勾配の値 108 点もあわせて用いた。坑井データの坑底温度と地表での基準温度をもとに地温勾配を算出した結果, 火山フロント付近を境界とし, 海溝側の平均値の方が背弧側の平均値よりも小さい傾向を示すことや, 瀬戸内海周辺は低い値を持つことが明らかになった。また, 火山・地熱地帯では 100 K/km 以上の高い値を示す。これらのパターンは, これまでにコンパイルされている日本列島下の温度構造を表わす, 地殻熱流量のデータなどとよく一致する。しかし, 地温勾配は, 多くは 1,000 m 程度 (ここで用いたデータの坑井の深さの中央値および平均値は両者とも 1,100 m である。) の坑井によって見積もられており, この深度ではまだ一般的には対流熱輸送の効果も含まれると考えられるので, これをもとにより深い深度における温度を推定することは困難である。また同様な理由で隣接する坑井でも地温勾配の値がばらつくこともあり, ここで得られた値のみからデータの存在しない場所の地温勾配を推定することも困難である。しかし, 地殻熱流量のデータに比べて数多く存在するので, 地殻熱流量の分布のみでは明らかではない熱構造を知ることができる可能性がある。

謝辞 本研究を行うにあたって, 高橋正明・玉生志郎・阪口圭一・丸井敦尚・内田洋平の各氏からは貴重な助言を頂きました。また松林修氏には原稿を査読して頂き, 有益な助言を頂きました。これらの方々には心から感謝いたします。なお図の作成には, GMT systems ver. 3 (Wessel and Smith, 1995) を用いた。

文 献

Buntebarh, G. (1984) Geothermics: An introduction. Springer-Verlag, 144 pp.
北海道立地下資源調査所 (1995) 60 万分の 1 北海

道地温勾配図。

国立天文台編 (1997) 理科年表。

Pollack, H.N., Hunter, S.J. and Johnson, J.R. (1993) Heat flow from the earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophysics*, **31**, 267-280.

水谷 仁・渡部暉彦 (1978) 地球熱学, 岩波講座地球科学 1 地球, 上田誠也・水谷 仁編, pp. 167-224, 岩波書店。

Stein, C.A. (1995) in "Heat flow of the Earth, in Global Earth Physics, A Handbook of Physical Constants" ed. by T.J. Ahrens, American Geophysical Union, 144-158.

Turcotte, D.L. and Schubert, G. (1982) Geodynamics applications of continuum physics to geologic problems. John Wiley & Sons., 450 pp.

Uyeda, S. (1972) Heat flow, in The Crust and Upper Mantle of the Japanese Area Part I Geophysics, ed. by Japanese National Committee for Upper Mantle Project, 97-105, Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo.

山野 誠・木下正高・山形尚司 (1997) 日本列島周辺海域の地殻熱流量分布, 地質ニュース, **517**, 12-19.

矢野雄作・田中明子・高橋正明・大久保泰邦・笹田政克・梅田浩司・中司 昇 (1999) 300 万分の 1 日本列島地温勾配図, 地質調査所。

Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1995) New version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Trans., AGU*, **76** (33), 329.

(受付: 1999 年 1 月 5 日: 受理 1999 年 4 月 19 日)