

関東地域の震源分布のフラクタル性

野口伸一*

Fractal Properties of the Distribution of Earthquake Hypocenters in the Kanto District, Japan

By

Shin-ichi NOGUCHI

Earthquake Research Center

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

Abstract

To clarify the fractal properties of the densely distributing earthquakes beneath the Kanto district in Japan, we systematically derive earthquake clusters most of which are composed of microearthquakes. Hypocenters are relocated using an elaborate method that is based on routinely observed data. A total of 13,812 hypocenters with a high degree of accuracy were used for fractal analysis. To identify clusters from densely distributed hypocenters we used a link method by applying a declustering algorithm. As a result, it was possible to identify 29 sets of clusters in which all the hypocenters were linked within a mutual distance of $\leq 1.5\text{km}$. The spatial distribution of the hypocenters and fractal properties were examined for relatively large clusters each of which contains more than 100 hypocenters. Fractal dimensions, D , were obtained using a box counting method. A clear tendency showing that D increases with the number of hypocenters was observed. On the other hand, D is negatively correlated both with hypocenter density, which is defined as the number of hypocenters divided by the total volume occupied by the hypocenters, and with the focal depth of the cluster. D was observed to range from 1.5 to 1.9, suggesting that each cluster is constituted of hypocenters that are distributed with some plane-like or linear geometry. The remaining declustered hypocenters are on the whole distributed three-dimensionally and D was obtained to be approximately 2.3.

Key words: Earthquake clusters, Fractal analysis, Link method, Hypocenter distribution in the Kanto area

1. はじめに

関東地域では大小様々の地震の密集域、いわゆる地震の巣で、地震活動が活発である。このような震源密集域の要因として、関東下へ沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートの上部構造の不均質性、特にフィリピン海プレート前弧域の横方向に複雑な構造と、関東下に収斂する3つのプレートの相互作用が挙げられる。そこでは、破壊強度が弱い所に応力集中して、力学的に不安定状態にあるため、絶えず微小破壊が繰り返されている

のではないだろうか。そのような震源の分布形態や密集度の詳細を知ることは、プレートの相対運動や物質分布と関連して重要と考えられる。ここでは、最近十数年間の観測データに基づき、震源クラスターを客観的に抽出し、そのフラクタルな特徴を評価することを試みる。解析には精度が良く分解能の高い震源データが望ましく、次節では対象域を選定して震源決定し、まずその誤差を評価することにする。

*防災科学技術研究所 地震調査研究センター

2. 震源データと震源決定の誤差について

震源の精度を上げるため、ルーチンの震源と各観測点の読み取りデータを用いて、関東地域と周辺の震源を再決定した。期間は現在の処理システム(松村ほか, 1988)により検出率が増大した1986年4月~2000年5月末である。震源の精度は、主に初動の検測値の精度と計算に用いる標準速度構造に依存する。ここでは、対象域をブロックに分け、ブロック毎に観測点を選び、観測点補正を施して震源決定した(野口, 1998)。その手順は、(1)ルーチンの深さ毎の震央分布図から、地震の発生域と観測点分布を考慮してブロック分けする。(2)各ブロックの位置、大きさと深さから、ブロックを十分に覆う観測点をブロック毎に選ぶ。そのため、観測網の周辺や深いブロックほど広い範囲の観測点を用いている。(3)各ブロックで比較的精度の良いルーチンの震源データを選び、各観測点のP波、S波の走時偏差の平均値を求め観測点補正值とする。(4)標準の速度構造はルーチンと同じものを用い、ルーチンの計算法(鶴川ほか, 1984; 岡田, 1988)

によりブロック毎に震源決定した。

解析の対象地域は、図1の矩形域の100 km以浅である。この領域は、観測網で十分覆われ、多数の震源密集域を含んでいる。再決定した震源の誤差の分布について、ルーチンと比較しながら簡単に触れておく。

2.1 震源決定の誤差

図2(a)は、対象地域のマグニチュード $M \geq 1.0$ の地震について、発震時と震源座標の誤差のヒストグラムを、図2(b)は、深さ別の地震のヒストグラム示している。図2(a)のうち、再決定震源(Relocated)の分布をみると、 dt (発震時の誤差)、 dx , dy および dz (東西、南北および深さ方向の誤差)の最大頻度は、各々0.06秒, 0.3 km, 0.3 kmおよび0.6 kmにある。また、各々の範囲($dt \leq 0.3$ 秒, $dx, dy \leq 1.5$ km, $dz \leq 2$ km)に入る震源の割合は、全震源決定数に対して86~93%である。3方向のうち、深さ方向の誤差 dz は水平方向の誤差より約2倍大きい。なお、 $dz=0$ kmの度数には深さ固定で震源決定されたものが含まれている。一方、図2(a)のルーチン(Rou-

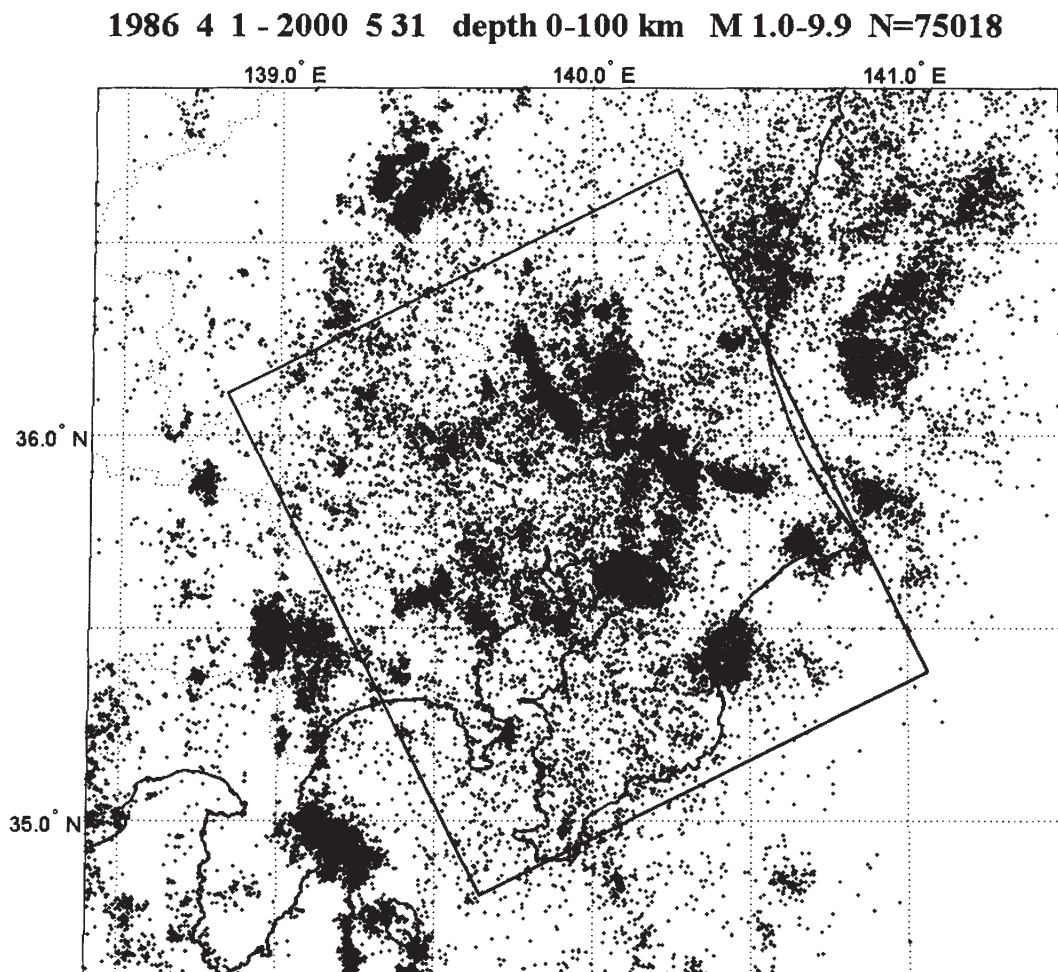


図1 関東地域の震央分布(1986年4月1日~2000年5月31日, $M \geq 1.0$, 深さ100 km以下)。解析は、震源を再決定して、図中矩形域の震源のうち、誤差が小さい $M \geq 2$ の地震に限定して行う。

Fig. 1 Epicentral distribution of earthquakes in the Kanto area (April 1, 1986-May 31, 2000, $M \geq 1.0$, depth ≤ 100 km). On the basis of relocated hypocenters, the analysis is restricted to earthquakes within the rectangular area with small hypocenter errors and $M \geq 2.0$.

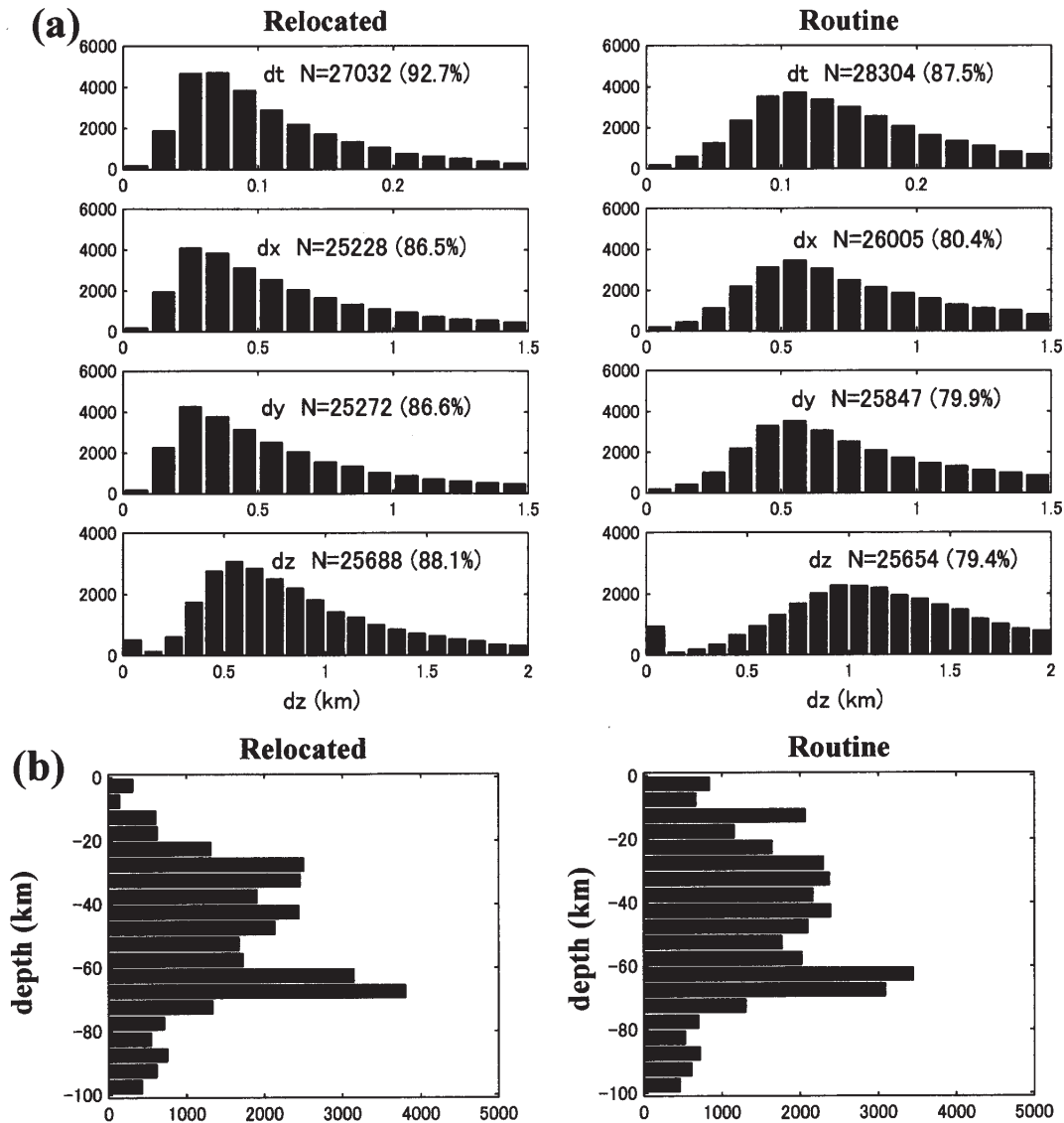


図2 図1の矩形域内の地震について、再決定震源とルーチン震源の比較。(a)誤差の分布(dt :発震時誤差(秒), dx , dy , dz :東西, 南北および深さ方向の誤差(km)), (b)深さ5 km 毎の地震の頻度数

Fig. 2 Comparison between the relocated and routine hypocenters of earthquakes within the rectangular area shown in Fig. 1. (a)Distributions of hypocenter errors (dt : origin time error in second; dx , dy , dz : errors in EW, NS and vertical directions in km, respectively). (b)Histogram of hypocenter depth at 5 km intervals.

tine)の震源の誤差分布をみると、最大頻度の誤差は再決定震源に比べていずれもほぼ2倍大きく、かつ広くばらついている。

図2(b)の深さ毎の地震数のうち、再決定震源の分布は、関東地域の平野部下で20数km以下の浅い地震が極めて少なく、深さ60~70 kmでもっとも活動が高いことを示している。ルーチンの震源の深さ分布には、深さ固定で震源決定された浅い地震が多く含まれている。

2.2 マグニチュードの度数分布と下限の M

図3は、上記の震源データについて M 毎の度数分布を示している。ほぼ漏れなく検出されている $M \geq 2.0$ について、 b 値を求めると $b=0.79$ となる。断層の長さ

M の標準的な経験式から、 $M=2$ の断層の長さは約120 m、 $M=3$ は400 m程度に相当する(たとえば、宇津, 1984)。図3の地震のうち、 $M \leq 3$ の微小地震は全体の92%を占め、対象域の大多数の地震は点震源として扱うことができる。

以上、観測点を限定し観測点補正を施して震源決定した結果、震源の誤差はルーチンに比べてほぼ半分となり震源の解像度が向上した。また、深さ100 km以浅では $M \geq 2$ がほぼ漏れなく観測されている。これらのことから、 $162 \times 144 \times 100 \text{ km}^3$ の対象領域において、深さ固定の震源を除き、 $M \geq 2$ 、発震時誤差 ≤ 0.3 秒、東西と南北方向の誤差 ≤ 1.5 km、深さ方向の誤差 ≤ 2 km の13,812個

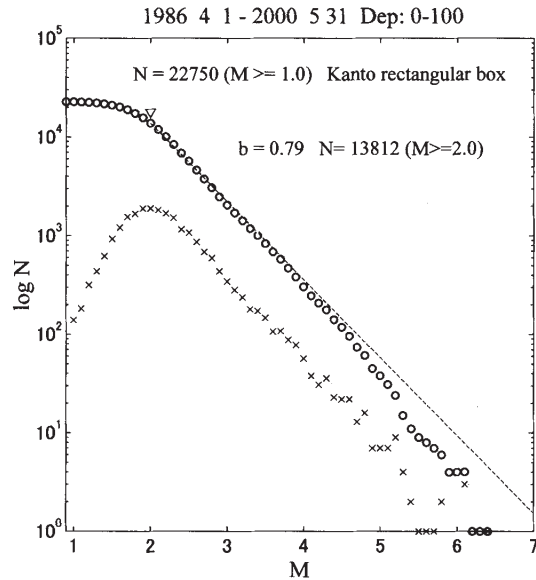


図 3 図 1 の矩形域の地震の規模別分布と $M \geq 1.95$ から求めた b 値。×印と○印は各々 $M0.1$ 毎の度数と累積度数を示す。

Fig. 3 The magnitude-frequency distribution of earthquakes in the rectangular area shown in Fig. 1 and the b value obtained for $M \geq 1.95$. Crosses and open circles are the frequency and cumulative frequency of M at 0.1 intervals, respectively.

の震源について解析することにする。

3. リンク法によるクラスターの抽出

震源の空間分布から、ある震源のかたまり＝クラスターを取り出すため、いくつかの方法が考えられる（例えば、宇津，1999，の第 9 章）。ここでは、ある距離以下の震源同士を連結して取り出すリンク法を用いる。震源が密に分布する対象域から、まず密集度が高い領域を核として取り出し、次に周辺の震源との連結を判別するアルゴリズムを採ることにする。すなわち、震源カタログから、1) ある震源を中心に距離 R (km) 以内に入る他の地震を選び出し、その数がある $N1$ 個以上となる場合に、それを最初のクラスターとする（図 4 の I）。次に、クラスターの $N1$ 個以上の震源各々について、2) 距離 R 以内に入る他の震源を選び出し、その数がある $N2$ 個以上の場合、先のクラスターのメンバーに加える（図 4 の II）。3) 選択された $N2$ 個以上の震源各々について同様に 2) の操作を行い（図 4 の III）、2) の条件からはずれるまで順次 2) を繰り返す。

この操作でクラスターの数や大きさは、パラメータ R , $N1$ および $N2$ に依存し、距離 R が短いほどクラスターの空間的広がりは小さく、また $N1$ が少ないほどクラスターの数が増える。また、 $N2$ が少ないほど周囲の地震と連結して空間的に拡がり比較的確なクラスターが生じる。いくつかの組合せを試みた中から、ここでは

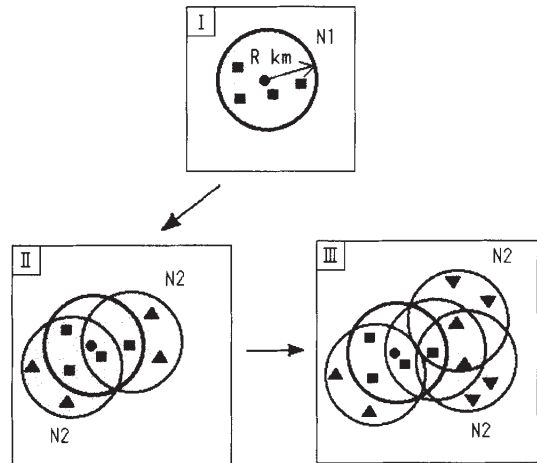


図 4 リンク法によるクラスター抽出を示す模式図。まず、距離 R 以内にある $N1$ 個以上の地震を選択して最初のクラスターとする。次に $N1$ 個以上の地震各々について R 以内にある $N2$ 個以上の地震を選びクラスターに加えこれを繰り返す。詳細は本文を参照

Fig. 4 A schematic diagram illustrating the link method used to derive the clusters. Earthquakes containing more than $N1$ events within a distance, R , are selected as the first cluster. Then other earthquakes within the distance R and containing more than $N2$ events for all events exceeding $N1$ are added to the previous cluster. The same procedure is repeated for all events exceeding $N2$, and so on. Details are described in the text.

$R=1.5$ km, $N1=20$ 個, $N2=5$ 個とした場合を扱うことにする。

図 5 は、上記パラメータで取り出されたクラスターと、その他の地震（非クラスターとする）の空間分布を色分けして立体的に示した。この中で大小 29 組のクラスターが抽出された。図 6 は、クラスターと非クラスターの震央分布と、A, B および C 領域の鉛直断面における震源分布を色分けして示している。

図 7 は、抽出された 29 組のクラスターのうち、100 個以上の地震から成る 17 組のクラスターについて、震源の空間分布を地震数の順に並べて示している。このうち、約半数のクラスターは深さ 60~70 数 km にある。最大のクラスター C1 は千葉県中部にあり、地震数は 1,071 個、概ね $16 \times 16 \times 10$ km の直方体容積に含まれる（図 6 の断面図 B と C では番号 1 のクラスターに対応）。千葉県中部には、この他 C13, C15 の小クラスターが抽出された。茨城県南西部鬼怒川付近下の北西に傾く顕著な震源密集域は、3 つのクラスター C2, C6 および C10 に分けられた（図 6 断面図 B の 2, 6, 10 のクラスター）。また、29 組のうち最小のクラスターは地震数が 28 個で $3 \times 2 \times 3$ km 程度の容積に収まる。

ちなみに、上記のパラメータで $R=2$ km とした場合、

1986 4 1 - 2000 5 31 N=13812 M>=2.0

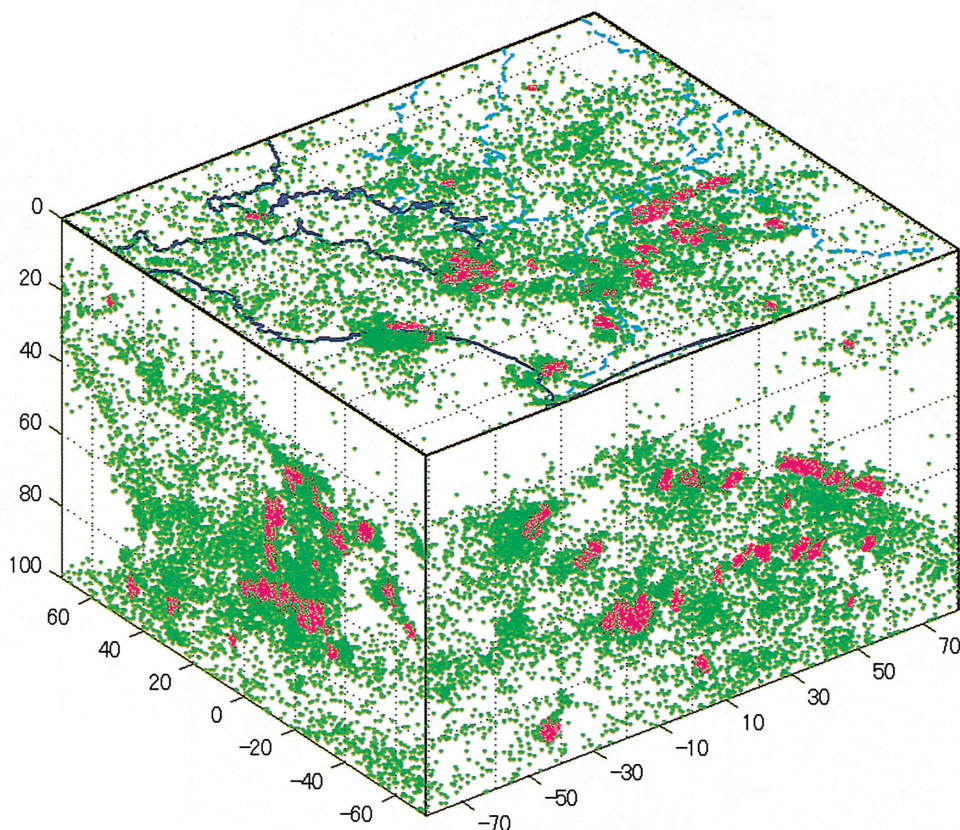


図5 リンク法により選出されたクラスター（赤紫）とその他の非クラスター（緑）の空間分布図。
図4のアルゴリズムで $R=1.5\text{km}$, $N1=20$ 個, $N2=5$ 個として29組のクラスターが抽出された。

Fig. 5 Spatial distribution of earthquake clusters derived using the link method (magenta) and other non-clusters (green). In total 29 sets of clusters were derived by setting $R=1.5\text{ km}$, $N1=20$ and $N2=5$ using the algorithm showing in Fig. 4.

クラスターは30組が抽出され、 $R=1.5\text{ km}$ のときの29組と変わらないが、クラスターの中身はやや異なり、小クラスターが連結して大きなクラスターになる場合や、新たなクラスターが生じたりする。また、 M の下限を下げた場合、より多数のクラスターが生じ、特に関東西部の浅い震源分布域にいくつかのクラスターが抽出された。

4. ボックス計数法によるフラクタル解析

ここでは前節で抽出された図7の各クラスターについて、震源分布のフラクタル次元やその他の量を定義して、比較・検討を行う。フラクタル次元を求めるいくつかの方法（高安，1986）のうち、対象領域の粗視化の度合いを変える方法を用いることにする。すなわち、クラスター領域をある稜長 L_i (km) の立方体のボックスに分割したとき、少なくとも1個の地震を含むボックスの数 N_i を計数し、 L_i を変えながら N_i と L_i の関係を求めるボックス計数法である。 N_i と L_i が、 C を定数として、

$$N_i = \frac{C}{L_i^D} \quad (1)$$

にあるとき、 D がフラクタル次元として定義される（例えば Turcotte, 1997）。 D は $\log N_i$ と $\log L_i$ の関係をプロットして、その直線部分の傾きから求められる。

また、クラスターを構成する地震が占める体積、および単位体積内の地震数、すなわち地震数密度を定義する。ここでは、 $L_i=1\text{ km}$ のボックスで分割したとき、地震を含むボックスの総容量 V (km^3) を体積とする。クラスターの地震数を n 個とすると、地震数密度は n/V (個/ km^3) と定義される。

4.1 クラスターのフラクタル次元

図8は $n \geq 100$ 個から成る図7のクラスター17組について、ボックス計数法によるフラクタル解析結果を示している。ここでボックスの長さ L は、対数軸上で等間隔となるように比較的細かく取り、各 L について1個以上の地震を含むボックスの数 N を計数した。最小のボックスは $L=0.5\text{ km}$ 、また $N=1$ となる最大の L は各クラスターを覆う直方体の最大長である。(1)式で定義される

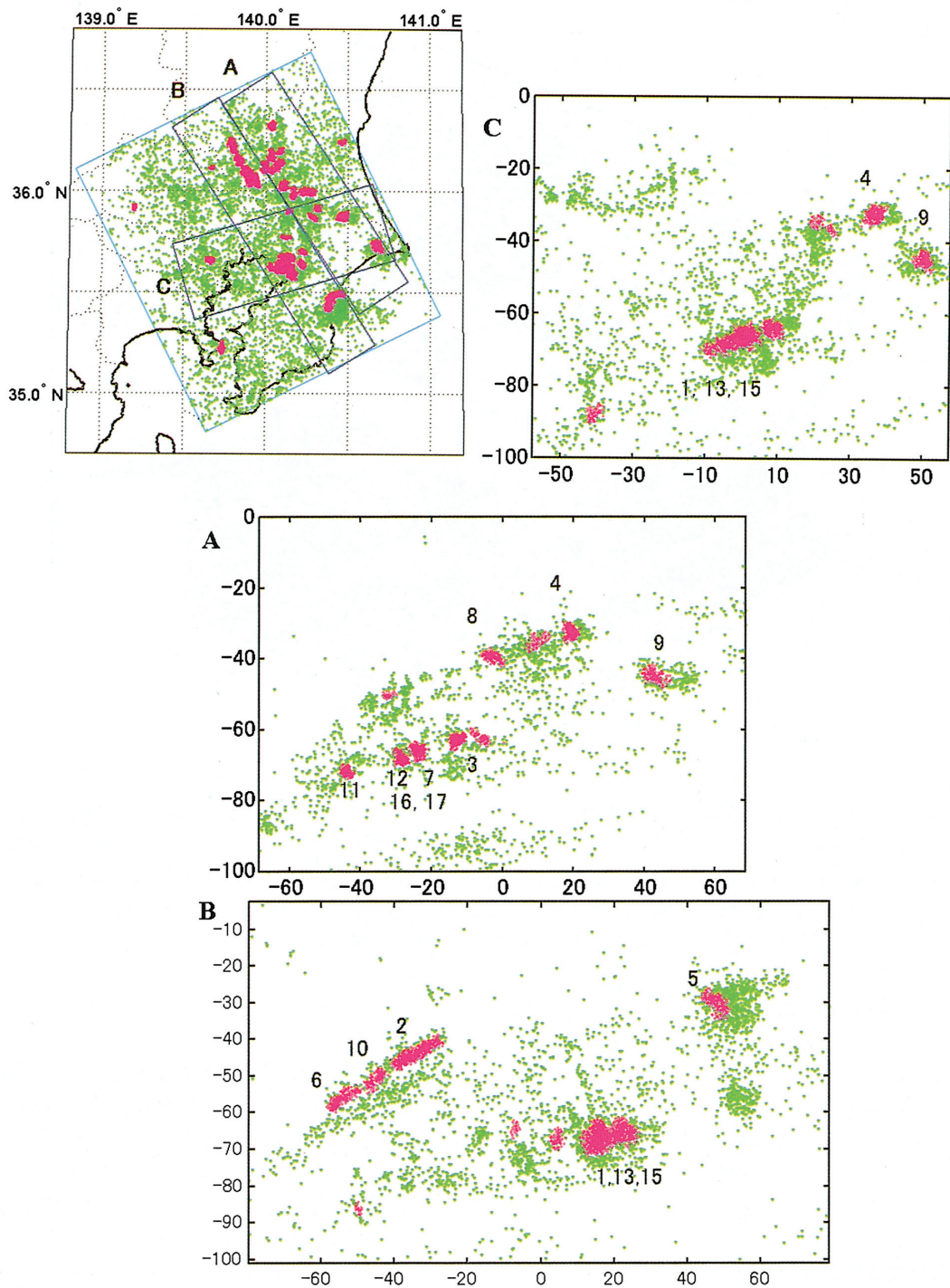


図 6 対象領域のクラスター (赤紫) と非クラスター (緑) の震央分布, および矩形域 A, B および C の鉛直断面における震源分布。断面図中の番号は, 図 7 のクラスターの番号に対応する。

Fig. 6 Epicentral distribution of clusters (magenta) and non-clusters (green), together with vertical cross-sections of hypocenters in the rectangular boxes A, B and C. Numbers assigned to clusters correspond to the cluster number shown in Fig. 7.

フラクタル次元 D は、図 8 の各クラスターの $\log N$ 対 $\log L$ の分布から、ほぼ直線となる区間を目で判断し最小二乗法により求めた。

図 8 の全体の特徴として、地震数 n が多いクラスターほど、広い範囲で $\log N$ 対 $\log L$ は直線関係にあり、かつフラクタル次元 D が大きい傾向がみられる。隣接するクラスター同士、例えば千葉県中部の C1, C13 および C15, 茨城南西部の C2, C6 および C10 を比べると、地震数密度 ρ には各々の領域で大きな違いはないが、 D は地震数 n が少ないクラスターほど小さい。 n が少ない場合、 $\log N$ 対 $\log L$ の直線部分が限られるため、 D の誤差は大きいと推定される。いずれにせよ、図 8 の解析結果は、 D の最大は 1.9 前後で 2 を超えないことが特徴である。

4.2 フラクタル次元と他の量との関係

図 9 は、図 8 で求めた各クラスターのフラクタル次元 D と地震数 n 、体積 V ($L=1$ km のボックスの総容量)、地震数密度 ρ 、およびクラスターの中心の深さ (Depth)、の間の諸関係を示したものである。このうち、(a) の n 対 V の関係は、全体的な比例関係、すなわち ρ が概ね一定であることを示している。しかし、(b), (c), (d) のように、 ρ 対 V 、 ρ 対 n および ρ 対深さの関係を細かくみると、 V が小さく n が少ない小クラスターの中に、 $\rho \geq 3$ となるような ρ の大きいクラスターがあり、それらの多くは深さ 60~70 km に位置している。

図 9(e) の D 対 ρ の関係は、ばらつきが大きいものの、全体に ρ が大きくなると D が小さくなる傾向を示している。また、(h) の D 対深さの関係も、ばらつきは相当大きい、全体として深さに対し D は減少傾向にある。一方、(f) の D 対 V の関係、および(g) の D 対 n の関係は、 V と n が小さな値のとき、 D は V や n の増加に伴い急速に大き値をとるが、 $V \geq 200$ km³ 位、 $n \geq 400$ 個程度で、 $D=1.9$ 前後に収束する傾向がみられ、興味深い特徴である。

4.3 全体の震源分布とフラクタル解析

以上は、個々のクラスターについてのフラクタル解析であるが、対象域全体についての解析結果を図 10 に示す。(a) はすべての震源、(b) と (c) は、各々上述のリンク法で分離した非クラスターとクラスターの全震源について、空間分布とボックス計数の結果を示している。(a) および(b) と、(c) との間の著しい違いは、これらの図から明瞭である。全震源(a)と非クラスター(b)の震源は、プレート形状を反映して立体的に広がって分布し地震数密度 ρ が小さい。それらの $\log L$ 対 $\log N$ は、 $L=10$ km 程度以上で勾配が急な直線関係にあり、 $D=2.27$ と 2 より大きな値になる。 $L=10$ km 程度以下では勾配が徐々に緩くなり直線から外れる。すなわち、 L が小さくなるほどボックスに入る地震の割合が減り空のボックスが増える。一方、(c) のクラスター全体の集合は、限られた領域に斑点状に分布し ρ が大きい。その $\log L$ 対 $\log N$ は全体にわたって概ね直線的な関係にあり、特に直線関係が安定な $L=1, 2$ km~8 km 位の範囲で $D=1.5$ となる。

5. 考察と議論

5.1 リンク法について

リンク法による地震クラスター抽出では、震源の数と震源決定精度、また用いるアルゴリズムにより、抽出されるクラスターの数や広がり、震源密集度に違いが生ずる。第 3 節で適用したアルゴリズムのパラメータ R や $N1, N2$ の取りかた、対象領域や M の下限の設定、震源の誤差、また期間毎に同数サンプルを取った時の時間変化等、リンク法の条件や操作によりクラスターがどのように生成され変化するかは興味深く、パラメータの合理的な組合せ方と合わせて今後検討したい。

5.2 震源の占める体積・地震数密度

図 1, 図 5 や図 6 の震源分布図をみると、震源はある大きな空間領域を占めるようにみえるが、対象域全体の中で震源が実際に占める体積の割合は極めて小さい。岡田 (1996) は、地震活動が高い関東・東海地域の 20 km 以浅、東西 380 km、南北 300 km を稜長 1 km のボックス (素領域) に分け、地震を含まない領域が全体の 98.3%、地震数 1~9 個の領域が 1.6%、10 個以上が残り 0.06% となる結果を示した。地震活動域はこのように局所的に極めて限られ、上記の震源を含む稜長 1 km のボックスの総容積から求めた地震数の密度 ρ も、高々 2~6 個/km³ である。

5.3 フラクタル次元

前節のボックス計数によるフラクタル解析から、地震数 n が少なく地震の占める体積 V が小さいクラスターほど、フラクタル次元 D が小さく求まる傾向、一方、 n の増加とともに D が 1.9 程度に漸近する特徴 (図 9(f)) がみられた。また、クラスター全体についての解析からは $D=1.5$ 前後が求められた (図 10(c))。すなわち、クラスターの集合については概ね $D=1.5 \sim 1.9$ となる結果が得られた。一方、全地震および非クラスターの集合は、プレートの形状を反映するように三次元的に疎に分布し、それらのフラクタル次元は $D=2.3$ 程度となった。

これらのことは、クラスターを構成する震源は、面的または線状に近い形態で分布することを示唆する。ひとつには、地震数が十分でないことによる見かけ上の可能性も考えられるが、図 9(g) のように地震数が増えても $D=1.9$ 程度に収まる傾向がみられる。つまり、クラスターはもともと面的に発展し、地震数が多く体積の大きなクラスターほど、クラスター内の隙間を面的に埋め、 D が 2 に近づくのではないだろうか。また、ばらつきが大きいものの、 D は、地震数密度 ρ およびクラスターの深さとともに、全体に 1.5 程度に減少する傾向がみられた (図 9(e), (h))。その一解釈として、深い地震ほど限られた領域に震源が集中して空間充填率が増え、面状から線状分布へ変わることが考えられる。また、今回の解析では深さ 60~70 km 台のクラスターが多く、その深さ近辺の物質分布と構造が特に D に反映されている可能性もあり、対象地域を絞った詳細な解析が必要である。

Robertson *et al.* (1995) は、カリフォルニア中部と南部の 4 つの震源分布域のフラクタル解析から、震源決定

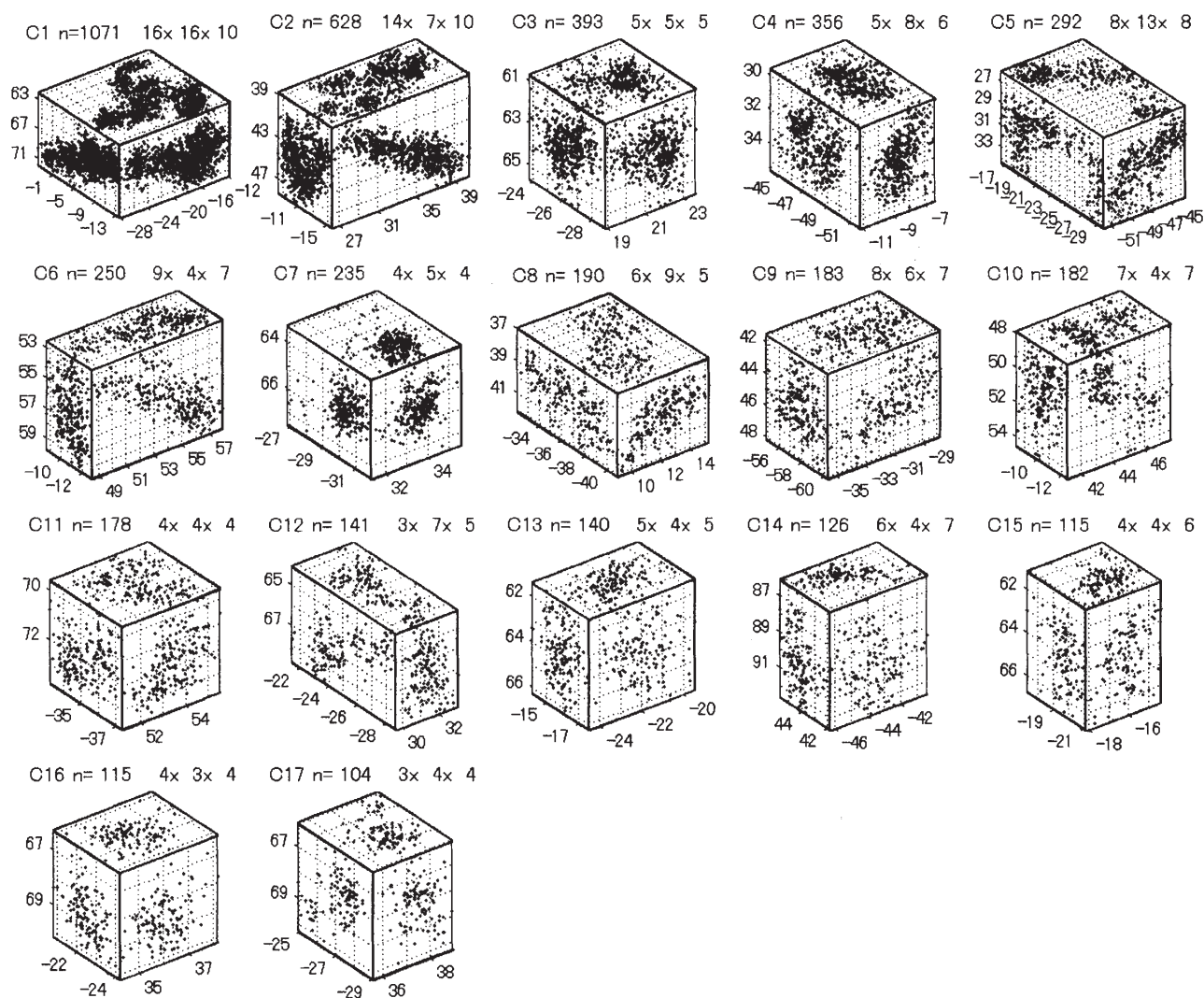


図7 リンク法で抽出されたクラスターのうち、地震数 n が100個以上から成るクラスター17組 (C1~C17)の震源分布を、クラスターを覆う直方体領域の平面と断面に示す。数値は直方体の三辺の長さ(単位: km)

Fig. 7 Hypocenter distributions of 17 sets of clusters (C1-C17) derived using the link method and containing the number of hypocenters, n , exceeding 100 are projected on the surface of the covering rectangular prisms. The three numerals show the lengths (km) of the sides of the prism.

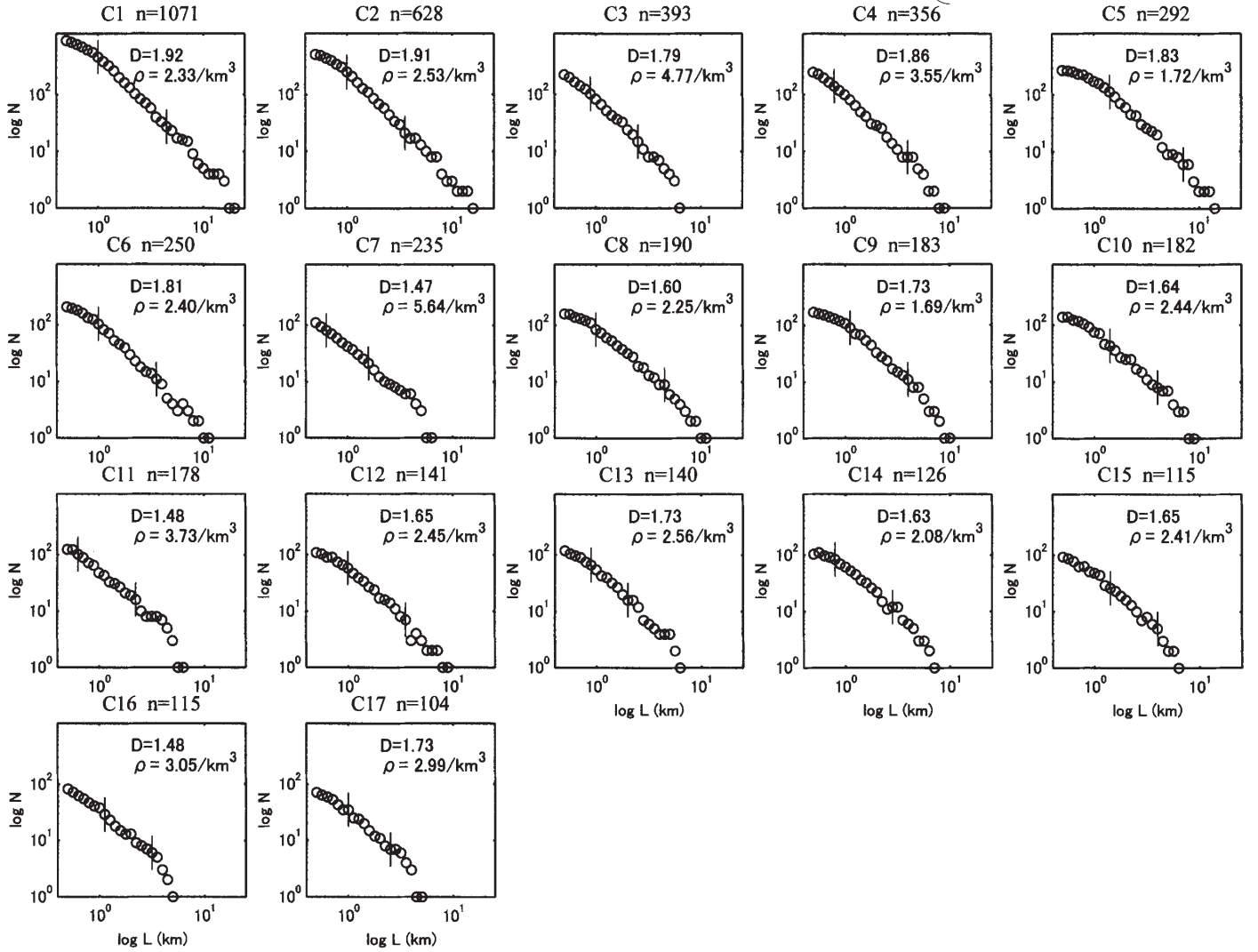


図8 17組のクラスターについて、ボックス計数法によるフラクタル解析結果。フラクタル次元 D は、 $\log L$ と $\log N$ の関係が直線となるような区間(2本の縦棒の間)の傾きから求めた。 ρ は、 $L=1$ km のボックスにおいて、少なくとも1個の震源を含むボックスの総容量 V (km³) から求めた単位体積の地震数(個/km³)。地震数 n が多いほど D が大きい傾向がみられるが、最大値は $D=1.92$ で2を超えない。

Fig. 8 Results of fractal analysis using a box counting method for the 17 sets of clusters. The fractal dimension, D , of each cluster is obtained from the slope of the linear limit of $\log L$ versus $\log N$ as shown by two vertical lines. Event density, ρ , (events/km³) is the number of hypocenters per unit volume estimated from the total number of boxes having length $L=1$ km and including at least one hypocenter. Though the fractal dimension D has a tendency to increase with the total number of hypocenters, n , the largest value is $D=1.92$ at most and does not exceed $D=2$.

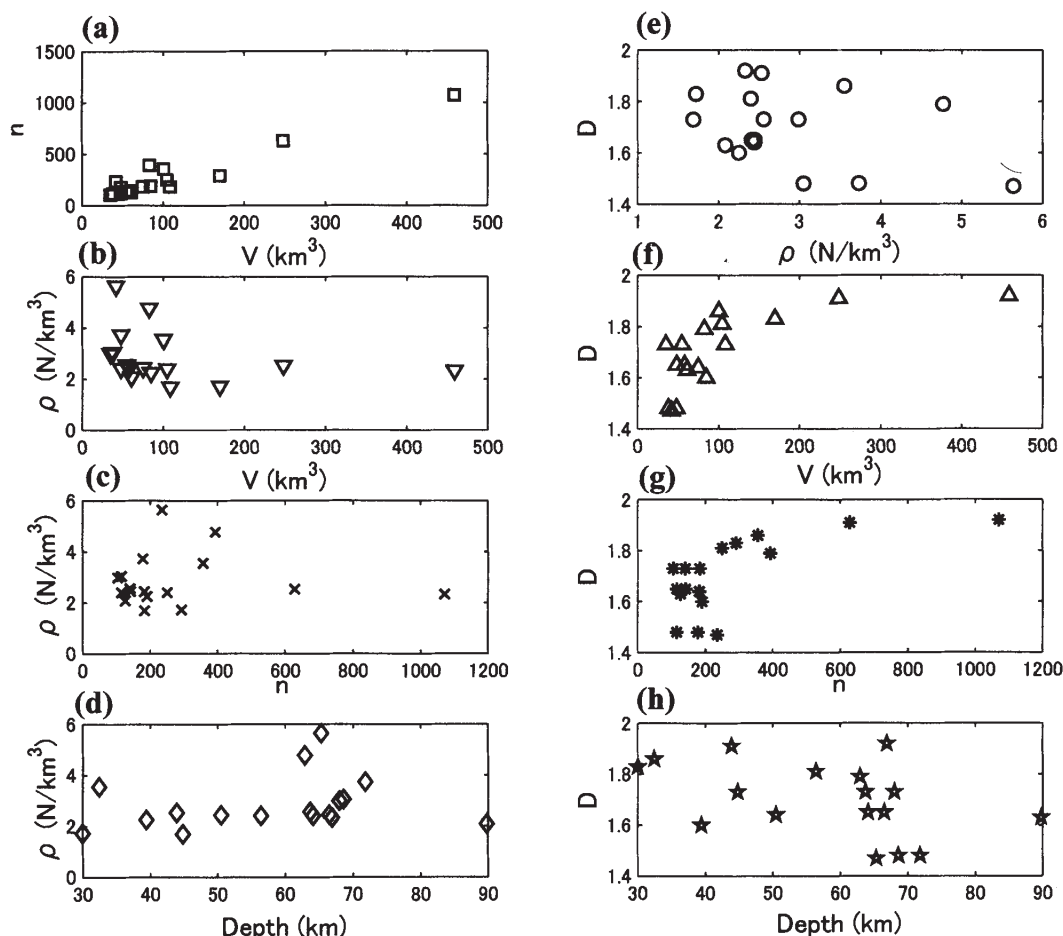


図 9 17 組のクラスターについて、地震数 n ，フラクタル次元 D ，地震を含む体積 V (km^3)，地震数の密度 ρ (個/ km^3)，および震源の深さ (km) の関係

Fig. 9 The relationships among the total number of hypocenters n in a cluster, fractal dimension D , event volume V (km^3), events density ρ (events/ km^3) and focal depth (km) for the 17 sets of clusters.

の精度が高いほど D が小さくなること、またいずれの地域も D が 2 以下となる結果を得た。彼らはこの $D \leq 2$ を断層系のパーコレーションモデルから解釈している。上述のように今回の解析では震源が比較的深く、断層面と震源分布の関係は明らかでないが、 $D \leq 2$ はカリフォルニアの場合と整合し、クラスターの震源分布の特性を示すものかもしれない。また、最近 Rubin *et al.* (1999) は、サンアンドレアス断層沿いの多数の微小地震の震源を、波形データから極めて正確に決め、断層運動方向への震源の線状分布 (streaks) を見出している。このような震源分布のフラクタル次元は、さらに 1 次元的な値に近づくと推定される。関東と東海地域のプレート境界付近の震源分布についても、波形データに戻って精緻な震源決定を行い、例えばプレート相対運動方向へ線状配列しているか等を検証することは可能なことと思われる。

6. まとめ

- (1) 関東地域の震源密集域の空間分布を定量的に解析するため、まず対象地域を選定し、震源再決定した。ルーチンの震源に比べ震源の誤差は約半分になる結

果を得た。これに基づき解析は、 $M \geq 2$ ，発震時誤差 ≤ 0.3 秒，東西と南北方向の誤差 ≤ 1.5 km，および深さ方向の誤差 ≤ 2 km の 13,812 個の震源について行なった。

- (2) 対象地域からクラスターを取り出すため、リンク法により震源距離 1.5 km 以下の震源を連結するアルゴリズムを用いて総計 29 組のクラスターを抽出した。
- (3) クラスターのうち、100 個以上の地震から成るクラスター 17 組について、ボックス計数法でフラクタル解析を行い、フラクタル次元 D を求め、概ね $D = 1.5 \sim 1.9$ となる結果を得た。 D は、クラスターを構成する地震の数とともに増える傾向、また、ばらつきは大きい、地震数の密度、および深さとともに減少する傾向がみられた。
- (4) 対象域全体のクラスターとその他の地震の集合 (非クラスター) を比べると、クラスター全体は空間的に局在し、フラクタル次元は $D = 1.5$ 前後となるが、非クラスターは三次元的に広がって分布し、 $D = 2.3$ 程度となり、クラスターと非クラスターの顕著な違

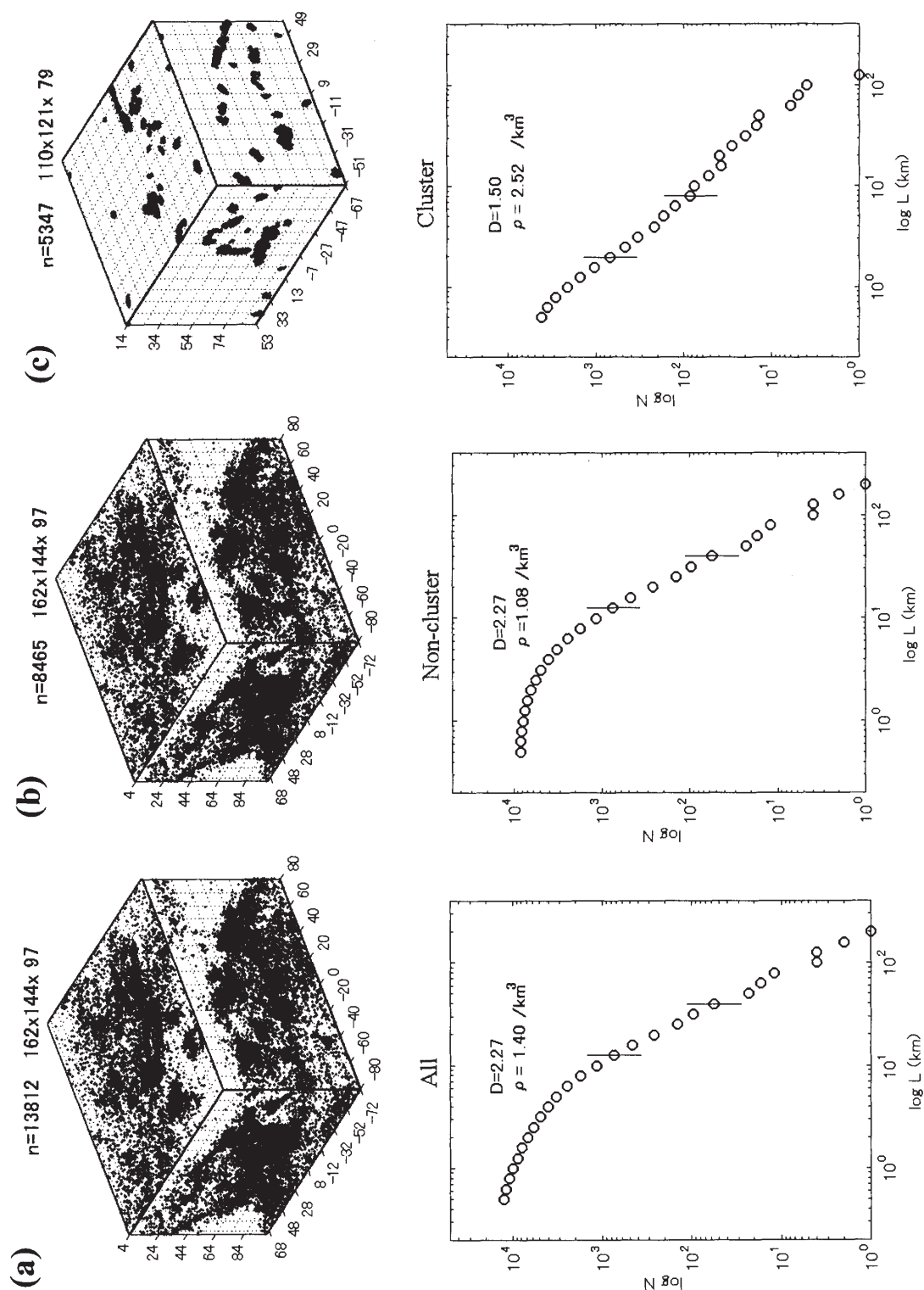


図 10 対象域の全地震(a), 非クラスター(b), およびクラスター(c)の空間分布とフラクタル解析結果, (a)および(b)と, (c)の間には著しい違いがみられる。
 Fig. 10 Spatial distribution and the result of fractal analysis for all earthquakes (a), non-clusters (b) and clusters (c) in the target rectangular prisms, respectively, showing a remarkable difference between (a) and (b), and (c).

いが見出された。

謝辞

本研究の資料は、特別研究プロジェクト「関東・東海地域における地殻活動に関する研究」によっている。プロジェクトメンバーおよび関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 松村正三・岡田義光・堀 貞喜(1988)：地震前兆解析システムにおける地震データ(高速採取データ)の処理。国立防災科学技術センター研究報告, No. 41, 45-64.
- 2) 野口伸一(1998)：関東地域の地震活動・発震機構・火山フロントとフィリピン海および太平洋プレートの沈み込み。地震研究所彙報, 73, 73-103.
- 3) 岡田義光(1988)：震源計算・発震機構計算プログラムの改良。国立防災科学技術センター研究報告, No. 41, 153-162.
- 4) 岡田義光(1996)：関東・東海地域における人工震源の分布とその時間的変遷。防災科学技術研究所研究報告, No. 57, 33-57.
- 5) Robertson, M.C., C.G. Sammis, M. Sahimi, and A.J. Martin (1995): Fractal analysis of three-dimensional spatial distributions of earthquakes with a percolation interpretation, *J. Geophys. Res.*, **100**, 609-620.
- 6) Rubin, A.M., D. Gillard and J. Got (1999): Streaks of microearthquakes along creeping faults. *Nature*, **400**, 635-641.
- 7) 高安秀樹(1986)：フラクタル。朝倉書店, 186pp.
- 8) Turcotte, D.L. (1997): Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Second Edition, Cambridge Univ. Press, 398pp.
- 9) 鶴川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司(1984)：関東・東海地域地震観測網による震源決定法について。国立防災科学技術センター研究速報, No. 53, 1-88.
- 10) 宇津徳治(1984)：地震学, 第 2 版。共立出版, 310pp.
- 11) 宇津徳治(1999)：地震活動総説。東京大学出版会, 876pp.

(原稿受理：2000 年 11 月 30 日)

要 旨

関東地域の震源密集域からクラスターを抽出し定量的に解析するため、まず対象地域の震源を決定して精度を上げることを試みた。ルーチンの震源に比べ、震源の誤差は約半分に改善され、 $M \geq 2$, 発震時誤差 ≤ 0.3 秒, 東西と南北方向の誤差 ≤ 1.5 km, および深さ方向の誤差 ≤ 2 km の 13,812 個の震源について解析を行なった。

震源密集域からクラスターを取り出すため、リンク法により震源距離 1.5 km 以下の震源を連結するアルゴリズムを用いて、総計 29 組のクラスターを抽出した。このうち、100 個以上の震源から成るクラスター 17 組について、ボックス計数法でフラクタル解析を行い、フラクタル次元 D を求め、 $D=1.5 \sim 1.9$ となる結果が得られた。

フラクタル次元 D は、クラスターの地震数とともに増える傾向がみられた。また、 D と単位体積の地震数、および D と深さの関係には、やや逆相関傾向がみられた。対象域全体のクラスターとその他の地震の集合(非クラスター)を比べると、クラスター全体は空間的に局在し $D=1.5$ 前後となるが、非クラスターは三次元的に疎らに分布し、 $D=2.3$ 程度となり、クラスターと非クラスターの顕著な違いが見出された。クラスターを構成する震源は、本質的に面状または線状分布することが示唆される。

キーワード：地震クラスター、フラクタル解析、リンク法、関東地域の震源分布