統計的アプローチによる地殻活動解明 ——(II) 各種地殻活動情報と大規模内陸地震発生との 総合相関評価システム構築——

中部大学地球ウォッチ・市民安全センター* 河村 将
中部大学工学部理学教室** 工藤 健
名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻附属地震火山・防災研究センター*** 山岡 耕 春
名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻**** 古本 宗 充

Understanding of Crustal Activity with Statistical Approaches:

II. Construction of a Statistical Validation System for Comprehensive Understanding and Monitoring of Crustal Activities

Masashi KAWAMURA

Earth Watch—Safety Net Research Center, Chubu University
Matsumoto-cho 1200, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

Takeshi KUDO

Department of Natural Science and Mathematics, Chubu University
Matsumoto-cho 1200, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

Koshun YAMAOKA

Research Center for Seismology, Volcanology, and Disaster Mitigation,
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Muneyoshi FURUMOTO

Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate
School of Environmental Studies, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

(Received May 12, 2010; Accepted September 29, 2010)

We developed a comprehensive statistical validation system of crustal activities with which to easily address spatially and temporally sufficient range of a database of geophysical measures. The system involves carrying out the following four processes: (1) creating the database of geophysical measures with spatially and temporally gridded and other convenient formats, (2) comparing any two geophysical measures, at least one of which is time-variable, (3) classifying the spatiotemporal relationship of these geophysical measures into some types by defining a statistical index, and (4) evaluating and validating the relationships between classification results and the occurrence of target physical events such as large inland earthquakes. With the system, we aim for making a statistical model, or an appropriate rule for monitoring of crustal activities. Formulation of the rule is, in turn, expected to lead to comprehensive understanding of crustal activities. Here, we focused on the

* 〒487-8501 春日井市松本町 1200

** 〒487-8501 春日井市松本町 1200

*** 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

**** 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

relations of seismicity and strain rate to introduce the conception and algorithm of the system. The system requires input of the database and other parameters and leads to output of various spatiotemporal distributions, 2-by-2 contingency tables, and probability gains for prediction and alarm rates for target physical events.

Key words: Crustal activity, Statistical validation, Spatiotemporal relationship, Probability gain, Prediction rate

§ 1. はじめに

筆者らは、日本列島の各地域について地殻活動を反映する各種物理指標 (geophysical measures) 間の時空間関係を統計的に精査し、(1) 大規模内陸地震発生を含む地殻活動モニタリングシステムを構築し、モニタリングに有効な統計指標を提示すること、(2) 地殻活動間の因果関係を物理モデルにより表現すること、を目指している。そのために、必要な基本システムを設計し構築した。具体的には、各種物理指標データベース [河村・他 (2010)] をもとに、地殻活動モニタリングに有効なルールを構築するまでの各計算モジュール (別々のファイルにコードを記述) (§ 2.1 参照) を作成、それらをつなぎ合わせることでシステム化した。各計算モジュールはいずれも Matlab 言語で記述してある。将来的には、解析支援用プログラム [内藤・吉川 (1999)] のような汎用性も考慮したシステムの高度化を検討している。

地殻活動を総合的に解明するには、数多くの物理指標間関係に介在する物理を明らかにする必要がある。異なる物理指標間関係に注目することの重要性に関しては、これまでに異なる物理指標間の関係に着目した研究で興味深い相関が見られること [例えば、Schorlemmer *et al.* (2005), Oncel and Wilson (2006), 石辺・島崎 (2008), Ishibe *et al.* (2009)], さらに異なる物理指標は地殻活動の異なる側面を反映しているが互いに独立ではないこと [例えば、Imoto (2006, 2007)], などが指摘されている。複数の観点 (物理指標間関係) から地殻活動を評価し、その中から地殻現象間の相互関係を反映した有効な情報を抽出していくことが冒頭の 2 つの目標を達成するうえで重要な作業となる。これは、地殻活動の解明に向けた 1 つの新しいアプローチであり、その概要については、河村・他 (2010) に示した。

筆者らはまず、地殻内部の活動と地表変形との相互作用に着目した。その際、データベース化した地殻変動指標 (面積歪み速度・最大せん断歪み速度: 地表の伸縮・変形の指標) と地震活動指標 (地震エネルギー・地震数: 地下の活動の活発さの指標) を用いた統計的アプローチにより、それらの間に成り立つ時空間関係を精査してきた [河村・他 (2010)]。

本報告では、まず地殻活動総合相関評価システムの概

念と流れについて説明する。次に、システム運用の具体例を紹介する。ここでは、地下の活動の活発さを反映し質・量ともに最も充実している地震活動データ (気象庁一元化震源データ) と日本列島全体の地表の伸縮・変形を捉える GPS データ [畑中・他 (2003)] を入力データとした。これらの関係の時間変化は、水平 2,000 km・厚さ 30 km スケールの薄い板で起こる地殻内部の活動と地表変形との相互作用の時間変化を反映していると考えられる。そこで、各地域におけるこれら相互の時間変化の様式を統計的に評価した。そのうえで、上記相互関係の時間変化様式と大規模内陸地震発生との関連性評価を試みた。

内陸地震発生との関連性に関して統計的評価を行うためには、各期間の物理指標間関係を反映する有効な統計指標を導入し、その時空間変化様式を定量的にかつ自動的に評価するシステムの構築が重要となる。ここでは、地殻活動間の関係評価のための最適ルールを自動処理により選出するアルゴリズムの検討が必要となる。ここで自動処理とは、計算に必要な各種パラメータとそれらの検討範囲を入力すると、あらかじめ指定した基準に従い複数ルールの評価・比較から最適パラメータセット決定までが反復計算によって行われるという意味である。

本システムでは、International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection による確率予測に関する提言 [山岡 (2010)] の § 4 F (地震予測方法の検証) を参考にし、最終的に 4 象限表 (4 分割表)・確率利得 [Aki (1981), 前田 (1993), Helmstetter *et al.* (2007)] を導出する。システム運用の具体例を示すために、地殻変動指標と地震活動指標の関係と大規模 ($M \geq 6.0$) 内陸地震 (本震) 発生との関連性を統計的に評価・検証した。

§ 2. 地殻活動総合相関評価システムの概念

2.1 システム概要

河村・他 (2010) で述べたように、筆者らは、(1) 物理指標間の時空間関係、(2) 統計的アプローチ、という 2 つの重要な観点に注目しながら、各種地球科学データを同一グリッド形式に変換し、相互を比較するためのシス

Fig. 1. Algorithm of a statistical validation system for comprehensive understanding and monitoring of crustal activities. Step 1: Creating a database by integrating various datasets obtained by observation into those with a unified gridded data format; Step 2: Comparing any two geophysical measures, at least one of which is time-variable; Step 3: Calculating a statistical index clearly characterizing the spatiotemporal relationship of these geophysical measures, which is classified into a couple of types; Step 4: Statistically evaluating and validating the relationship between the temporal changes in statistical index and the occurrence of target physical events such as large inland earthquakes based on a contingency table and probability gains of prediction and alarm rates for the events. The most appropriate rule for understanding and monitoring of crustal activities is determined in terms of the probability gain.

テムを構築してきた。現在は、各種物理指標データベース [河村・他 (2010)] をもとに、地殻活動モニタリングに有効なルールを構築するまでの一連の流れをシステム化するに至っている。

Fig. 1 は、筆者らのシステムの概念・アルゴリズムである。これは、河村・他 (2010) に、確率利得算出に基づく統計的評価・検証プロセスを新たに導入したものである。本システムは、Unix 上でも Windows 上でもソフトウェアをインストールすれば動作する Matlab 言語を用いて構築してきた。各ステップは必要ファイル・調整パラメータの入力を要求し、結果をファイルに出力する各々独立した計算モジュールの形となっているが、各ステップにおいて要求される入出力情報については、2.2～2.5 節に記述した。実際のシステム運用上のつながりという観点からすると、各ステップは、データベース構築部分 (ステップ 1) と、物理指標間関係と大規模内陸地震発生との関連性を表すルール構築の部分 (ステップ 2～4) に分けられる。つまり、ステップ 1 はステップ

2 以降の部分と自動的につながっているわけではない。ステップ 2 で、使用データベースおよびその他の必要な調整パラメータ (2.2～2.5 節, Fig. 2, Table 1 参照) を入力すると、ステップ 4 まで解析が進み、自動的に結果に関する情報を格納するテキストファイルや図のファイルが作成される仕組みになっている (2.2～2.5 節参照)。

ステップ 1 では、地球科学データ (地震活動 [気象庁一元化震源データ], GPS 地殻変動 [畑中・他 (2003)], 重力 [地質調査所 (2000), Gravity Research Group in Southwest Japan (2001)], 熱構造 [田中・他 (2004)] など) から同一グリッド形式の物理指標を算出し、データベース化する。ステップ 2 では、ステップ 1 で構築したデータベースから任意の 2 つの物理指標を照合する。ステップ 3 では、物理指標間の関係を数値で表現する。新しく導入したこの数値を統計指標と呼ぶこととする [河村・他 (2010)]。さらに、定義した統計指標の時間変化を算出する。システムには、統計指標時間変化の計算アルゴリズムを、データベース構築モジュールや後述す

る4象限表計算モジュールおよび確率利得計算モジュールと同様、1つの独立したモジュールとして組み込んである。異なる統計指標を定義する際は、対応する統計指標時間変化計算モジュールを作成し、システム運用時に入れ替え可能な形にしてある。§1で述べたように、各モジュールはいずれもMatlab言語で記述してある。ステップ4では、日本列島で発生した大規模内陸地震発生など興味の対象となる現象と統計指標時間変化様式との関係を、各空間グリッドにおける統計指標時間変

化様式の情報を入力すると確率利得を出力する関数（評価関数）に基づき、検討する（2.5.2節参照）。このように、4象限表に基づき、最終的には、確率利得を出力して異なる物理指標の間の関係と興味の対象となる現象との関連性を統計的に評価・検証する。

地殻活動総合相関評価システムでは、このような統計的評価・検証に至る手続きを、地殻活動間の関係を反映するルール候補について繰り返し行い、それらの中から最適なルールを見いだす。最適ルールを導出するアルゴ

<Schematic explanation on adjustable parameters at STEPS 2 ~ 4>

<Approval method of temporal change in statistical index at STEP 3>

<Schematic explanation on calculation of temporal change in statistical index at STEPS 3~4>

リズムは、各種調整パラメータ (2.2~2.5 節, Fig. 2, Table 1 参照) を変化させることによって比較対象となる複数のルール候補を用意し、その後それらの確率利得値を計算・比較することにより、最も高い値を示すものを現段階で地殻活動を反映する最適なルールとする、というものである。システム運用の過程で出力される各情報ファイルは、適用パラメータの違いに応じて階層化し保存される。本システムでは、(1) 物理指標組合せ、(2) 統計指標時間変化様式の有意性検定で用いられる有意水準、(3) 有意性検定方法、の順に階層化している (ただし、今後システム汎用化の過程でこの階層そのものやそれらの順序は変わりうる)。ここでは (1) が最上位のディレクトリとなるようにし、各種情報ファイルは (3) の下に格納されるようにしている。これら出力情報ファイル名にはどのような調整パラメータを使用したかを反映するように工夫してある。

次節以降では、物理指標として地殻変動指標 (面積歪み速度・最大せん断歪み速度) と地震活動指標 (地震エネルギー・地震数) を選択し、興味の対象となる現象として $M \geq 6.0$ の大規模内陸地震 (本震) を考えた場合のシステム運用事例を示す。

2.2 ステップ 1 (データベース作成)

本ステップでは、観測データから物理指標データベースを作成する。例えば、国土地理院 GPS データと気象庁一元化震源データを入力し、同一時間空間グリッドフォーマットの地殻変動指標 (面積歪み速度・最大せん断歪み速度) と地震活動指標 (地震エネルギー・地震数) を出力する [河村・他 (2010) の Fig. 2(a)~(d)]。今回のシステム運用にあたっては、これら地殻変動指標と地震活動指標を使用することとする。データベース化にあたっては、GPS・震源データの期間にして 1998 年 4 月 1 日から 2009 年 3 月 31 日までに相当するものを使用した。参照した GPS 観測点数は、参照期間により 5 点

前後変化するものの、いずれも 1996 年に稼働を始めた約 820 点である。地殻変動指標および地震活動指標の計算方法は河村・他 (2010) に従った。出力ファイルは参照期間ごとにまとめられ、そのフォーマットは、地殻変動指標 (経度、緯度、面積歪み速度 (参照期間のデータを用いて評価した 1 年あたりの変化)、最大せん断歪み速度、変位速度、傾斜速度、回転速度)、地震活動指標 (経度、緯度、地震エネルギー (参照期間あたりの総量)、地震数 (参照期間あたりの総量)) となっている。

2.3 ステップ 2 (物理指標照合作業)

本ステップでは、異なる物理指標の照合作業を行う。ステップ 1 で出力した同一グリッド形式の地殻変動指標と地震活動指標を、空間範囲を指定して (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (1)), 入力する。ここで選択するフォーマットのグリッド間隔は、空間軸方向 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (2)), 時間軸方向 3 カ月 (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (3)) であり、各々の日付 (時間グリッド) における各物理指標の値はその日付を中心とした前後 1 年間 (計 2 年間) のデータを使い計算されている (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (4))。さらに震源データに関しては、深さ範囲 30 km 以浅 (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (5)), マグニチュード範囲 1.0 以上 (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (6)) を使いデータベース化されたものを使用する。使用した地殻変動・地震活動データベースで用いられているスムージングパラメータは、河村・他 (2010) および Fig. 2 上段右パネルおよび Table 1・重み調整パラメータ (7)・取り込み半径パラメータ (8a)・(8b) を参照されたい。上述のように、本稿では使用した地震のマグニチュード下限を一律に 1.0 としたが、実際には、詳細な日本列島 Magnitude completeness (M_c) 時空間変化を考慮に入れる必

Fig. 2. Schematic explanation on adjusted parameters given at Steps 2 to 4 and on the calculation of statistical index for a circular region centered in a calculation spatial grid at Step 3; the calculation is for a time window centered in a calculation time grid. Information on the adjusted parameters is also tabulated in Table 1. Here, we defined the statistical index as the mean of the absolute value of dilatation rate or maximum shear strain rate, which was calculated from the grids ranking in the top 20% in terms of seismic energy or number of earthquakes (grey grids in the upper middle panels (a) and (b)). According to Kawamura *et al.* (2010), geodetic measures (dilatation rate and maximum shear strain rate) and seismicity measures (seismic energy and number of earthquakes) for each grid were calculated by relating them to the displacement rates for GPS stations (open triangle in the upper middle panel (a)) and the magnitudes for hypocenters (open circle in the upper middle panel (b)) in a circular region, respectively. We weighted the observation errors for GPS stations and seismicity measures for hypocenters depending on the distances between the calculation grid (black square) and the other grids in the circular region as shown in the upper middle panels (a) and (b), respectively. The vertical axis in each of the upper right panels show the distances relative to the calculation grid.

Table 1. Tabulated information on input parameters required at each step of the system. The related schematic explanation should be referred to Fig. 2.

No.	Parameter
(1)	Range of region for analysis
(2)	Interval between spatial grids
(3)	Interval between time grids
(4)	Time period referred to for calculating geophysical measures such as dilatation rate for each time grid
(5)	Range of depth
(6)	Range of magnitude
(7)	Smoothing (weight-adjusting) parameters for obtaining spatially-gridded geophysical measures
(8)	Search radius for applying smoothing parameters to area centered at a calculation grid
(9)	Search radius for calculating statistical index for area centered at a calculation grid
(10)	Approval method for classifying the temporal change in statistical index into three types
(11)	Confidence level for statistical approval
(12)	Calculation period of total seismic energy released following calculation period of temporal change in statistical index
(13)	Lower limit of total seismic energy released during period (12) which is regarded as seismically active
(14)	Definition of large inland earthquakes (lower limit of magnitudes)

Fig. 3. Scatter diagram showing the comparison (Step 2 in Fig. 1) between geodetic and seismicity measures for a two-year time window centered in a time grid.

要がある。今回は、解析対象範囲が主に日本列島内陸地域（北海道・本州・四国・九州）であることや、ステップ4におけるルール構築の際に年間 $M4.0$ 相当以上のエネルギーを開放している空間グリッドに注目していることから、平均して $M_c=1.0$ とみなしても、今回のシステム運用結果に与える影響は小さいと判断した。しかし、今後のシステム運用目的によっては M_c の時空間分布を詳細に考慮することが重要になるので、この問題については今後システム汎用化の過程で、日本列島 Magnitude completeness (M_c) 時空間分布を新しい情報データベースとして整えていくか、システム運用の際に M_c の計算を逐一行う計算モジュールを新たに作成することで対処していく必要がある。

このような各種調整パラメータを使って作成された地

殻変動指標と地震活動指標を照合したときの様子の一例を表したものが、Fig. 3 の散布図（相関図）であり、本ステップにおける出力となる。この分布の時間変化に注目することにより地殻活動の時間空間的特徴に関する情報が得られる。Fig. 3 の+印は、ある時間窓・空間範囲における実際のプロットである。各計算グリッドを中心とした少なくとも半径 60 km までの円領域および同スケールの矩形領域を解析空間範囲として設定した場合、分布の形は明瞭な相関関係を示さなかった。

2.4 ステップ3（統計指標の導入）

2.4.1 概要

本ステップでは、物理指標間関係の時間変化を数値で表現する。ステップ2で出力した散布図の分布様式をうまく定量化する方法を考え、定量化された数値をここでは統計指標と呼ぶ〔河村・他 (2010)〕。2.3 節で述べた散布図や河村・他 (2010) の Fig. 3 に示した散布図の分布様式は、明瞭な相関関係にはない。したがって、地殻変動指標と地震活動指標との関係をうまく抽出するには、統計指標として相関係数という単純なものではなく、より複雑なものを導入する必要がある。したがって、本稿では別の観点から統計指標を定義した（具体的導入手順は次節で詳しく説明）。

本ステップでは、ステップ2で出力した散布図の他に、各空間グリッドにおける統計指標時間変化を算出する際に参照する円領域の半径（Fig. 2 上段中パネルおよび Table 1・パラメータ (9)）（矩形領域の指定も可能であり、その場合は、緯度方向・経度方向の長さを指定）、統計指標時間変化の検定方法（前半平均値と後半平均値との差、回帰直線傾き）（Fig. 2 中段パネルおよび

Table 1・パラメータ (10a), (10b))・有意水準 (両側 90%, 95%, 99%) (Fig. 2 中段パネルおよび Table 1・パラメータ (11)) を入力情報として要求する。本稿では、半径 60 km 以内の円領域を参照し、時間変化の有意性検定では帰帰直線傾きに注目した方法を使用、有意水準として両側 95% ($\alpha=0.05$) を選択した結果を示している (2.4.2 節および付録参照)。その結果、空間グリッドごとに、その地域の地殻活動を反映すると考えられる統計指標各種時間変化様式が算出され、出力ファイルに保存される。出力ファイルフォーマットは、(統計指標時間変化算出期間、経度、緯度、検定統計量実現値、時間変化様式 (有意な増加・有意な減少・有意な変化なしのいずれか)) である。日本列島内陸地域全体を含めた任意の空間スケールにおける統計指標の時間変化様式は、地殻活動の時間推移を総合的に評価する (ここでは、地殻変動指標と地震活動指標の関係と大規模内陸地震発生との関連性を統計的に評価する) ルール作りの出発点となるものである。最適ルールを統計的評価に基づき決定するために、さまざまな統計指標を試行錯誤的に導入することが必要となる。

2.4.2 統計指標とその時間変化様式の具体例

本稿で紹介する統計指標は、以下の手順により作成した。

- (1) ある時間窓 (注目する時間グリッドの前後 1 年間: 計 2 年間) (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (4))・ある空間範囲 (注目する空間グリッドを中心とした半径 60 km の円領域) (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ (9)) において、地震活動指標 (地震エネルギー・地震数) の値が上位 20% 以内に入る空間グリッド (Fig. 2 上段中パネル (a), (b)・灰色グリッド領域) をすべて選出し、そのグリッドにわたる地殻変動指標 (面積歪み速度 (絶対値)・最大せん断歪み速度) の平均値を計算 (Fig. 2 上段中パネル (a), (b))。
- (2) 時間窓を一定間隔ずらして、プロセス (1) を実行。これを繰り返して、統計指標の時間変化を算出。この際、時間変化様式を「有意な減少」・「有意な増加」・「有意な変化なし」の 3 種類に分類 (分類手順詳細は付録参照)。
- (3) 空間範囲を変えて、プロセス (1)~(2) を繰り返して、統計指標時間変化様式の空間分布を作成。

以上のようにして、各空間グリッドで算出される 3 種類の統計指標時間変化様式が、前節で述べたフォーマットで出力ファイルに保存される。2.1 節に記述したように、統計指標時間変化様式を算出するアルゴリズムを、

将来的な汎用性を考慮に入れ、その定義ごとに 1 つの独立したモジュールとして組み込めるように設計してある。

河村・他 (2010) の Fig. 4 では、一例として、2004 年新潟県中越地震震源周辺領域において、地震発生に先行する期間の統計指標時間変化様式を示した。それは、中越地震発生に先立って相対的に規模の小さい地震によるエネルギー開放が歪み速度の小さい領域 (グリッド) で際立つようになるというものであった。河村・他 (2010) の 4.1.2 節で導入した統計指標は、本節で導入した統計指標とほとんど同じ内容の定義であるため、得られる時間変化様式の傾向もほぼ同じ結果となっている。

今回の地殻活動総合相関評価システム構築により、地殻変動指標と地震活動指標の関係と大規模内陸地震発生との関連性を統計的に評価するという観点から、このような傾向が広い時間空間範囲の中でどう位置づけられるのかを検討できるようになった。

2.5 ステップ 4 (興味ある現象との関連性評価)

2.5.1 概要

Fig. 4 は、地殻活動総合相関評価システムにより、地殻活動を統計的に評価するためのルールを構築する流れを概念的に示したものである。構築にあたっては、International Commission on Earthquake Forecasting for Civil Protection の声明内容 [山岡 (2010)] の § 4 F (地震予測方法の検証) を参考にした。ここでは、大規模 ($M \geq 6.0$) 内陸地震 (本震) を興味ある地殻現象として考え、地震発生の警報発令ルールを構築する場合について説明する。

筆者らによる研究では、物理指標間関係がどのように時間変化するかに着目する。その中では、一方のデータ蓄積が十分であっても他方が不十分であるという状況が生じ得る。したがって、現状ではデータ蓄積を進めながら、警報発令のための最適ルール作りを行っていく (学習期間)。

現在、筆者らは、解析期間内でルールは変更することなく、将来においても同様の検証が継続できるシステムを構築している。もし、ルールを更新する場合には、スタート時点に立ち戻って全解析期間に再検証を加える。もし十分な解析期間が確保できた場合は、解析期間中に仮想現在を仮定して、それ以前のデータから作り出されるルールに基づいて仮想未来への適用可能性を議論できるモジュール構成を考案する。

本稿で紹介する例でいくと、学習期間内で警報発令ルールを導出して、同じルールが仮想未来において適用可能かどうか検証を重ねる。うまく適用できないと評価された場合は、スタート時点に戻って再学習を行う。こ

Fig. 4. Conceptual diagram of evaluation and validation at Step 4 in Fig. 1, showing a process for formulating an appropriate rule for comprehensive understanding and monitoring of crustal activities.

の反復検証過程をコンピュータに自動で処理させながら最適な警報発令ルールを導出する。現在までのデータ蓄積期間が短いため、本稿で紹介するルールは、すべてのデータ蓄積期間を学習期間にあてて試行錯誤した例である。

本ステップでは、ステップ3で新しく導入した統計指標の時間変化様式と、興味の対象となる地殻現象との関連性を統計的に評価・検証する。関連性の存在が評価・検証されれば、その統計指標の時間変化様式が地殻活動の総理解や地殻活動モニタリングに有効な情報となる可能性がある。各統計指標についてこのような関連性を統計的に評価・検証することで、最適な統計指標を選択する。

上述したように、本稿では、日本列島で発生した大規模($M \geq 6.0$)内陸地震(本震)発生を興味の対象となる地殻現象と考え、内陸地震発生と統計指標時間変化との関連性を統計的に評価・検証する。ここでは、ステップ3で出力した統計指標時間変化様式の情報と、ステップ1で構築した地震活動指標データベースを入力情報として使用する。さらに、システムは、調整パラメータとして以下の3つを要求する。

- 統計指標時間変化(有意な減少・有意な増加・有意な変化なし)の算出期間直後の地震活動度を参照する期間の長さ (Fig. 2 下段パネルおよび Table 1・パラメータ(12))
- 地震活動度が高いとみなす開放エネルギー総量の下限值 (Fig. 2 下段パネルおよび Table 1・パラメータ(13))

- 大規模内陸地震の定義(下限マグニチュード) (Fig. 2 上段左パネルおよび Table 1・パラメータ(14))

本ステップでは、各空間グリッドに対する統計指標時間変化様式とその時間推移に関する情報(ステップ3の出力ファイル)をもとに、次のような情報を出力するモジュールを設計した: 各時間範囲における統計指標時間変化様式の空間分布 (Fig. 5), 統計指標各時間変化様式の占有面積の時間変化 (Fig. 6), 統計指標が有意に減少する領域面積と有意に増加する領域面積の比の時間変化 (Fig. 7)。

Fig. 5 は、パネル(a)に示した時間範囲における統計指標時間変化をもとにしたもので、次の手続きを経て得られる。ステップ3で3種類に分類した統計指標時間変化にそれぞれ対応する空間範囲を色分けして表示する(有意な減少・有意な増加・有意な変化なしは、それぞれ赤色・青色・緑色に対応)。このうち特に、パネル(a)に示した時間範囲の直後1年以内に設定値(ここでは 6×10^{10} Nm ($M4.0$ 相当))以上の地震エネルギーを開放した空間範囲は高い地震活動を示すものとして注目し、色を変えて表示する(同様にして濃赤色・濃青色・濃緑色に対応)。したがって、濃色範囲は純色範囲の部分集合である。こうして得られる空間分布が Fig. 5 である。パネル(a)から(d)は異なる物理指標組合せに対する同じ時間範囲の結果を表し、(a)面積歪み速度(絶対値)—地震エネルギー、(b)最大せん断歪み速度—地震エネルギー、(c)面積歪み速度(絶対値)—地震数、(d)最大せん断歪み速度—地震数、の組合せとなっている。

Fig. 6 は、3種類の統計指標時間変化様式について、

Fig. 5. Spatial distributions of three types of temporal changes in statistical index (pure red: significant decrease, pure blue: significant increase, pure green: insignificant change), which are obtained by comparison between (a) the absolute value of dilatation rate and seismic energy per two years, (b) maximum shear strain rate and seismic energy per two years, (c) absolute value of dilatation rate and number of earthquakes per two years, (d) maximum shear strain rate and number of earthquakes per two years. Superimposed in dark colors are the same distributions of areas in which seismic energy more than or equal to $M4.0$ (6×10^{10} Nm) was radiated during one year after the time period shown in panel (a). Temporal changes in statistical index were classified using T approval with a confidence level of 95% of linear trend obtained by least squares fitting. The numbers of dark-red, dark-blue, and dark-green grids, which are normalized by those of their corresponding pure-color ones, are here defined as #PTN1, #PTN2, and #PTN3, respectively, for convenience in Figs. 6 and 7.

設定値 (6×10^{10} Nm) 以上の地震エネルギー開放を伴う占有面積 (Fig. 5) の時間変化を折れ線グラフで表したものである (ただし、各時間変化様式の全占有面積で規格化してある)。ここでは、統計指標時間変化算出の際に参照する時間範囲は、範囲の始まりに対応する時間グリッ

ドを固定し、終わりに対応する時間グリッドを3カ月ごとにとずらしていった (Fig. 2 下段パネル)。横軸に示された日付は、各時間範囲の終わりを表す (Fig. 2 下段パネル)。黒矢印は $M \geq 6.0$ 内陸地震 (本震) 発生の日付を表す。パネル (a) から (d) はそれぞれ Fig. 5 に示したの

Fig. 6. Temporal variation in #PTN1, #PTN2, and #PTN3 (ref. Fig. 5). Black arrows correspond to the occurrence date of $M \geq 6.0$ inland earthquakes. The horizontal axis denotes the time grid corresponding to the end of the time period referred to for calculation of the temporal change in statistical index. The beginning of each time period is fixed to April 1, 1998. Panels (a) to (d) correspond to different four pairs of geodetic and seismicity measures, which are the same as those in Fig. 5.

Fig. 7. Temporal variation in the ratio of #PTN1 to #PTN2 (ref. Fig. 5). Black arrows and the horizontal axis denote the same parameters as in Fig. 6. Panels (a) to (d) correspond to different four pairs of geodetic and seismicity measures, which are the same as those in Figs. 5 and 6.

Table 2. Contingency tables showing the relations between a warning rule and the occurrence of (a) $M \geq 6.0$ inland earthquakes, (b) only the first three $M \geq 6.0$ inland earthquakes, (c) $M \geq 5.0$ inland earthquakes, (d) $M \geq 5.5$ inland earthquakes, (e) $M \geq 7.0$ inland earthquakes. The condition in which $\Delta(\#PTN1/\#PTN2) < 0$ implies that the trend of $\#PTN1/\#PTN2$ is negative, and is regarded as the warning rule here. The four figures for each element correspond to the following four pairs of geodetic and seismicity measures from left: the absolute value of dilatation rate and seismic energy, maximum shear strain rate and seismic energy, the absolute value of dilatation rate and the number of earthquakes, and maximum shear strain rate and the number of earthquakes.

(a)		Occurrence of inland earthquakes ($M \geq 6$)	Nonoccurrence	Prediction rate
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) < 0$	5 / 5 / 4 / 3	7 / 12 / 7 / 10	0.417 / 0.294 / 0.364 / 0.231
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) > 0$	0 / 0 / 1 / 2	13 / 8 / 13 / 10	
	Alarm rate	1.00 / 1.00 / 0.80 / 0.60		
	Probability gains of prediction and alarm rates: 3.56 / 2.49 / 3.00 / 1.97 and 3.58 / 3.49 / 2.73 / 2.13			
(b)		Occurrence of inland earthquakes ($M \geq 6$)	Nonoccurrence	Prediction rate
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) < 0$	3 / 3 / 2 / 1	5 / 7 / 5 / 6	0.375 / 0.300 / 0.286 / 0.143
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) > 0$	0 / 0 / 1 / 2	9 / 7 / 9 / 8	
	Alarm rate	1.00 / 1.00 / 0.67 / 0.33		
	Probability gains of prediction and alarm rates: 3.14 / 2.50 / 2.35 / 1.15 and 3.00 / 3.00 / 2.00 / 1.00			
(c)		Occurrence of inland earthquakes ($M \geq 5$)	Nonoccurrence	Prediction rate
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) < 0$	8 / 11 / 8 / 8	4 / 6 / 3 / 5	0.615 / 0.579 / 0.667 / 0.533
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) > 0$	6 / 3 / 6 / 6	7 / 5 / 8 / 6	
	Alarm rate	0.53 / 0.73 / 0.53 / 0.53		
	Probability gains of prediction and alarm rates: 1.78 / 1.75 / 1.93 / 1.70 and 7.99 / 10.8 / 7.87 / 8.03			
(d)		Occurrence of inland earthquakes ($M \geq 5.5$)	Nonoccurrence	Prediction rate
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) < 0$	6 / 6 / 6 / 5	6 / 11 / 5 / 8	0.462 / 0.316 / 0.500 / 0.333
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) > 0$	2 / 2 / 2 / 3	11 / 6 / 12 / 9	
	Alarm rate	0.75 / 0.75 / 0.75 / 0.63		
	Probability gains of prediction and alarm rates: 2.10 / 1.41 / 2.18 / 1.59 and 5.47 / 5.54 / 5.28 / 4.82			
(e)		Occurrence of inland earthquakes ($M \geq 7$)	Nonoccurrence	Prediction rate
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) < 0$	1 / 1 / 1 / 0	11 / 16 / 10 / 13	0.083 / 0.059 / 0.091 / 0.000
	$\Delta(\#PTN1 / \#PTN2) > 0$	0 / 0 / 0 / 1	13 / 8 / 14 / 11	
	Alarm rate	1.00 / 1.00 / 1.00 / 0.00		
	Probability gains of prediction and alarm rates: 1.00 / 0.70 / 1.12 / 0.00 and 1.00 / 1.00 / 1.00 / 0.00			

と全く同じ物理指標組合せに対する結果を表す。

Fig. 7 は、Fig. 6 の折れ線グラフで、青色に対する赤色の比をとったものである。つまり、統計指標の有意な減少および増加を示す面積の優劣（増加に対する減少の比）がどう時間変化するかを示している。次節で述べるように、この時間変化が、今回の警報発令ルールの内容に直接関連している。パネル (a) から (d) はそれぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示したのと全く同じ物理指標組合せに対する結果を表す。黒矢印および横軸の表示方法は、Fig. 6 と同じである。

最終的には、

- (1) 統計指標時間変化様式に基づく警報発令ルールと内陸地震発生との関連性を示した 4 象限表 (Table 2)
- (2) 構築しようとする地殻活動総合相関評価モデル（ルール）のすでに確立しているモデルに対する優劣を客観的に表す尺度：確率利得

の結果をテキスト形式のファイルに出力する。本稿で示す 4 象限表と確率利得の定義および計算手順については次節で詳述する。

ここで、本稿における「警報発令ルール」という用語の使用について説明しておく必要がある。システムの運用では、地震発生予測でよく用いられる警報発令ルールと地震発生との関係をまとめた 4 象限表作成・確率利得算出のプロセスを経ることから、本稿で構築しようとするルールのことを、ここでは、「警報発令ルール」と呼んでいる。しかし、実際には Figs. 6, 7 における横軸の各日付に対応する縦軸の値算出時に、その日付の直後 1 年間の地震活動情報（地震エネルギー）が用いられてい

ることに留意されたい (Fig. 2 下段パネルのパラメータ (12) 参照)。本稿で示すルールの例は、事前に警報を発令できる形ではないが、地殻変動指標—地震活動指標間関係と大規模内陸地震発生との間の関連性を評価できるように作成してある。このようなアプローチで明らかにされる関連性は、実際に前もって発令される警報発令ルールを構築していくうえで有効な基礎情報となる。

2.5.2 統計的評価・検証プロセスの具体例

本節では、各空間グリッドに対する統計指標時間変化様式とその時間推移に関する情報（評価関数入力）をもとに、地殻活動総合相関評価で最も重要なプロセスとなる 4 象限表作成から確率利得算出（評価関数出力）までの流れについて、具体例により説明する。本稿で示す地殻活動総合相関評価は、地殻変動指標と地震活動指標との関係と $M \geq 6.0$ 内陸地震（本震）発生との関連性評価である。前節最終段落で述べたように、本稿で示すルールに対し「警報発令ルール」という言葉を使用しているものの、地殻変動指標—地震活動指標間関係と大規模内陸地震発生との間の関連性を内陸地震発生に先立ってだけでなく、発生以後の期間 (Fig. 2 下段パネルおよび Table 1・パラメータ (12)) も含めた地震活動度情報を反映するように作成している。

4 象限表は、統計指標時間変化様式に注目して作成した警報発令ルールと $M \geq 6.0$ 内陸地震（本震）発生の有無との関係を 4 種類 (a, b, c, d) に分類したものである (Table 3)。Table 3 の各列は、観測対象の物理現象（ここでは大規模内陸地震）が発生した (Yes) か否 (No) かを表す。一方、各行は、観測対象となる物理現象の発生が、構築しようとするルールに従っている (Yes) か否

Table 3. Model contingency table for explaining the relation between a formulating rule and the occurrence of physical events such as large inland earthquakes. The relation can be classified into the following four elements: a : the number of “yes” warnings accompanied by the occurrence of events, b : the number of “yes” warnings not accompanied by the occurrence of events, c : the number of “no” warnings accompanied by the occurrence of events, d : the number of “no” warnings not accompanied by the occurrence of events.

Occurrence of event consistent with rule?	Event observed?	
	Yes	No
Yes	a	b
No	c	d

(No) かを表す。ルールに従う (Fig. 7 のグラフ傾きが負となる) 期間を A 期間, ルールに従わない (Fig. 7 のグラフ傾きが正となる) 期間を B 期間とすると, Table 3 の各要素 (a, b, c, d) の意味は次のようになる。

a : A 期間中に大規模内陸地震が発生した回数。

b : A 期間中にもかかわらず大規模内陸地震が発生しなかった回数。

c : B 期間中にもかかわらず大規模内陸地震が発生した回数。

d : B 期間中に大規模内陸地震が発生しなかった回数。

上記 a, b, c, d の定義より, $a+b$ および $a+c$ は以下のように解釈される。

$a+b$: A 期間の総数。

$a+c$: 観測対象の大規模内陸地震の総数。

例えば, 構築しようとするルールに従い内陸地震が発生すれば, Table 3 の a にカウントが 1 つ加えられる。このように, 4 象限表作成は, 警報発令ルールを統計的に評価するために必要不可欠なものである。

本稿で試行した警報発令ルールは,

- (1) 統計指標が有意な時間変化 (減少・増加の 2 通り) を示す。
- (2) 統計指標時間変化算出期間に続く 1 年の間 (Fig. 2 下段パネルおよび Table 1・パラメータ (12)) に, 高い地震活動 ($M \geq 4.0$ に相当する地震エネルギー開放) を伴う。

の 2 点に注目して作成した。警報発令ルールに従う期間, 高い地震活動を伴う有意な 2 種類の統計指標時間変化様式の占有面積比が時間とともに減少している期間とした (Fig. 7)。これは, Fig. 7 においてグラフの傾きが負になっている期間に相当する。このような警報発令ルールを作成したのは, 河村・他 (2010) の Fig. 4 のような統計指標の減少を示す占有面積とそれとは逆の増加を示す占有面積との優劣が, 内陸地震発生と関連しているかどうかを統計的に評価・検証することを意図したからである。

確率利得は, 4 象限表をもとに算出される。これは, 構築しようとする統計の評価モデル (ルール) に基づく的中率や予知率が, すでに確立している別の統計モデルに基づくものに比べ, どれくらい有意であるかを示す客観的尺度である。ここでは, 前田 (1993) と Table 3 を参考にして, 的中率・予知率を次のように定義する。

$$p = a / (a + b)$$

$$f = a / (a + c)$$

さらに, 構築中のモデルに基づく的中率 p と予知率 f および確立されたモデルに基づく的中率 p_0 と予知率 f_0 を用いて, 的中率と予知率に対する確率利得 g_p と g_f は

それぞれ次のように表される。

$$g_p = p / p_0$$

$$g_f = f / f_0$$

構築しようとするモデル (ルール) に基づく的中率 p や予知率 f は, 実データに基づく 4 象限表と上記定義に従い, 計算する。同モデルの比較の対象となる確立されたモデルとしては, ランダム現象モデルを考えた。ランダム現象に基づく的中率 p_0 及び予知率 f_0 の計算にはいくつかの方法があるが, ここでは時間空間の各方向にブートストラップ法を適用し, シャッフルされる空間分布およびその時間推移をランダムデータとみなした。具体的には, 以下の手順を踏んだ。

- (1) ある時間範囲に対して得られる統計指標時間変化様式の空間分布に対してブートストラップ法を適用し, 空間分布をシャッフル。
- (2) 時間範囲を変えて, プロセス (1) を実行。これを繰り返し, シャッフルされた空間分布の時間推移を得る。
- (3) (2) で得られた時間推移に対してブートストラップ法を適用して時間推移をシャッフル。

上記手順を 100 回繰り返すことにより, 100 通りのランダムデータおよび対応する 4 象限表を作成した。それらの平均値をとることによりランダム現象の的中率 p_0 及び予知率 f_0 を算出した。

上記ランダムデータ作成の定義に従い, 予知率 p と的中率 f のそれぞれについて確率利得 g_p, g_f を計算したところ, 面積歪み速度 (絶対値) と地震エネルギーの組合せが有意で最も高い値を示し, $p = 3.56$ および $f = 3.58$ という結果となった (Table 2(a))。また, 期間前半の 3 つの $M \geq 6.0$ 大規模内陸地震が発生した段階でルール作成を行い (Fig. 4 に従い期間途中に仮想現在を設定しそれ以前を学習期間とみなし), 確率利得を算出しても, 面積歪み速度 (絶対値) と地震エネルギーの組合せが有意で最も高い値を示すという結果は変わらなかった (Table 2(b))。この結果は, 3 つの発生段階における最適ルールが, その後さらに 2 つ発生して合計 5 つの大規模内陸地震が発生した現段階においてもそのまま機能している (現段階では解析期間のスタート時点に立ち戻ることによるルールの変更・再構築を行わない) ことを意味する。これらの確率利得 g_p, g_f 算出結果から, 面積歪み速度 (絶対値) と地震エネルギーの組合せには大規模内陸地震の発生条件を最もよく反映した情報が含まれていることが示唆される。ただし, 標本数 (大規模内陸地震数) の少なさが同じ結果をもたらしている可能性も排除できない。いずれにしても現在は引き続きルール構築のための学習期間と位置づけるべき段階である (Fig. 4)。

さらに、大規模内陸地震の定義 (Fig. 2 パラメータ (14)) の結果への影響を調べるために、マグニチュード範囲を $M \geq 6.0$ 以外に $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 7.0$ と変化させてシステムを運用すると、得られる的中率 p の確率利得 g_p は、地殻変動指標と地震活動指標を使った4つの異なる組合せの間で差が小さくなる傾向を示した (Table 2(c)-(e)). 現段階では、大規模内陸地震の定義を $M \geq 6.0$ としたときに、面積歪み速度 (絶対値) と地震エネルギーの間に最も強い関連性が見られている。しかしながら、上述のように、これらの関連性を厳密に評価するにはまだ標本数が不十分である。標本数を稼ぐには十分に長い時間か広い空間範囲が必要となる。日本列島内陸地域を対象とする場合、空間範囲が限られてくるので、ある程度時間をかけてルール作りのためのデータを蓄積することが必要である。また、地殻変動指標と地震活動指標との関係と内陸地震発生との関連性は地域ごとに異なる可能性があるため、個々の事例に着目したルールを作ることも検討すべきであろう。そのためには、空間範囲を狭くする必要があるが、上記のように標本数が足りないという理由から現状では日本列島内陸全域を解析対象とせざるをえなかった。

もし、クーロン破壊応力変化などによる影響が及ぶ程度まで空間範囲を狭くしても同様の傾向が保持されるのであれば、Fig. 6 および Fig. 7 から、本稿で紹介した警報発令ルールの意味は、次のように解釈できるであろう。まず、変形速度の小さくなっていく領域で相対的に高い地震活動度を示す状況が卓越しピークに達した後、一定期間内に内陸地震が発生しやすい、という傾向が読み取れる。これは物理的には、「対象領域の断層面内のアスペリティで固着が進行して変形速度が小さくなっていき、応力蓄積が限界に近づく」と微小地震活動が活発になり、活動のピークに達してしばらくして、内陸地震が発生する。」というプロセスを反映している可能性が考えられる。この解釈の正当性を議論するには、さらなるデータの蓄積後、比較的狭い空間範囲における警報発令ルールの統計的評価・検証を経る必要がある。

§3. ま と め

筆者らの構築した地殻活動総合相関評価の基本システムは、異なる物理観測量 (物理指標) の間に成り立つ時間空間関係を統計的に評価・検証することで、地殻活動モニタリングのための最適ルールを見出すことを目的としている。本稿では、日本列島内陸地域を対象にして、データベース化した地殻変動指標 (面積歪み速度・最大せん断歪み速度) と地震活動指標 (地震エネルギー・地震数) の間に成り立つ時間空間関係を統計指標で表現し

分類した。さらに、分類した時間空間関係と内陸地震発生との関連性を、4象限表作成と確率利得算出に基づき統計的に評価・検証するプロセスを具体例で示した。この関連性の統計的評価・検証は、大規模内陸地震警報発令のための最適ルール構築のために必須となるプロセスである。ルールは必ず一貫した内容でなければならない。もし、ルールを更新する場合には、スタート時点に立ち戻って全解析期間に再検証を加えることになる。現状は、蓄積期間の短い観測量が存在することから、引き続きデータベースの蓄積を進めながら、警報発令のための最適ルール作りを行っていく学習段階にある。今後、複数の警報発令ルールを構築し、構築後の期間への適用を通じて統計的評価・検証を行っていく必要がある。

謝 辞

勝俣 啓氏と匿名の査読者によるコメントは本稿を改善するうえで大変参考になった。ここに記して感謝し上げる。本研究は、2006年度に採択された文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業 (学術フロンティア推進事業) による補助を受けて行われた。本稿で使用したデータベースの作成にあたっては、気象庁一元化震源データ、国土地理院地殻変動 (GPS) データを使用させていただいた。ここに記して感謝し上げる。

文 献

- Aki, K., 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in "Earthquake Prediction: An International Review", Maurice Ewing Series 4, ed. by D. W. Simpson and P. G. Richards, pp. 566-574, AGU, Washington D.C.
- 地質調査所 (編), 2000, 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査所.
- Gravity Research Group in Southwest Japan (Representatives: R. Shichi and A. Yamamoto), 2001, Gravity measurements and database in southwest Japan, Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya Univ. Museum, Special Rept., No. 9.
- 畑中雄樹・飯塚豊久・澤田正典・山際敦司・菊田有希枝, 2003, Improvement of the analysis strategy of GEONET, 国土地理院報告, **49**, 11-37.
- Helmstetter, A., Y. Y. Kagan, and D. D. Jackson, 2007, High-resolution time-independent grid-based forecast for $M \geq 5$ earthquakes in California, Seism. Res. Lett., **78**, 78-86.
- Imoto, M., 2006, Earthquake probability based on multidisciplinary observations with correlations, Earth Planets Space, **58**, 1447-1454.
- Imoto, M., 2007, Information gain of a model based on multidisciplinary observations with correlations, J. Geophys. Res., **112**, B05306, doi:10.1029/

2006JB004662.

石辺岳男・島崎邦彦, 2008, 大地震の発生地域と地震発生層の厚さ, 統計数理研究所共同研究集会「地震活動のモデルと予測に関する研究」報告書 19—共研—5002.

Ishibe, T., K. Shimazaki, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2009, Correlation between the dCFF caused by large historical earthquakes and recent seismic activities, EOS Trans. AGU, **90**(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S51C-1436.

河村 将・工藤 健・山岡耕春・古本宗充, 2010, 統計的アプローチによる地殻活動解明—I) 統一化された形式をもつ日本列島地殻現象データベース構築—I, 地震 **2**, **63**, 21–33.

前田憲二, 1993, 直前の前震による本震発生の経験的予報—伊豆の場合—, 地震 **2**, **45**, 373–383.

内藤宏人・吉川澄夫, 地殻変動解析プログラム MICAP-G の開発, 地震 **2**, **52**, 101–103.

Oncel, A. O. and T. Wilson, 2006, Evaluation of earthquake potential along the Northern Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea using comparisons of GPS strain and seismotectonic parameters, Tectonophysics, **418**, 205–218.

Schorlemmer, D., S. Wiemer, and M. Wyss, 2005, Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes, Nature, **437**, 539–542.

田中明子・山野 誠・矢野雄策・笹田政克, 2004, 日本列島及びその周辺域の地温勾配分布及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 DGMP-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

山岡耕春, 2010, 地震予測に関する国際委員会, News-Letter, 21, No. 6, 7–15.

付 録

2.4.2 節で触れた, 統計指標時間変化を「有意な減少」, 「有意な増加」, 「有意な変化なし」の 3 様式に分類する方法を説明する.

ここでは, 時間を x , 統計指標を y と表す. いくつか試行した方法のうち, 最小 2 乗法による直線 $y=a+bx$ 回帰から計算される回帰係数 b が統計指標時間変化を表すとした場合について紹介する. この回帰係数 b の正負を評価すると同時にその有意性を検定することにより, 時間変化を 3 様式に分類する. 用いる統計分布は t 分布である.

回帰係数 b の有意性検定の作業手順は, 次のようになる.

- (1) 帰無仮説 (回帰係数がゼロ) の設定.
- (2) 対立仮説 (回帰係数がゼロでない) の設定.
- (3) 検定統計量 T を次式により計算.

$$T=b\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2/\hat{\sigma}_e}$$

ただし, $\bar{x}$ は x の期待値であり, データ数を n とすると

$$\bar{x}=\sum x/n$$

と表される. $\hat{\sigma}_e$ は, 誤差項の標準偏差推定値であり,

$$\hat{\sigma}_e=\sqrt{\sum(y-\hat{y})^2/(n-2)}$$

により計算される. ここで $\hat{y}$ は, 直線回帰式 $y=a+bx$ による y の推定値である.

- (4) 検定統計量 T と棄却域とを比較し, 帰無仮説と対立仮説のうちどちらを棄却するかを決定.