

地震予知へのエキスパートシステム適用の 可能性について*

横田 崇**・溝上 恵***・伊藤秀美**・中村正夫***・山本雅博****・野竹正義****

§ 1. はじめに

近年、主要都市部での人口、建築物の超過密化、ライフラインの多様化・高度化など著しいものがあり、主要都市部が大地震に直撃された場合には想像を絶する災害となるであろう。地震災害をいかに防止、軽減するかは国家的に取り組まなければならない重要課題であり、構造物の耐震、免震技術に関する研究も進み、防災を考えた街づくりも提唱されているが、それにもまして、地震の発生を事前に行うことができれば地震防災対策は一層効果的なものになると考えられる。

地震の発生に結びつく前兆現象を観測するという地震予知の基本戦略の一環として、地震活動、地殻活動などの観測手法、データ処理手法およびそのシステム化などについては著しい成果を上げつつある。特に、地震波の処理や異常検出については、統計的手法を背景とした自動化が既に進みつつある。しかしながら、異常現象の分類、前兆の識別等の予知判断に関しては、専門家の経験的判断に依存して膨大なデータを比較・検討しているのが現状であり、これら作業のシステム化が強く望まれている。

このような専門家(expert)の持つ経験知識(heuristics)を計算機で利用することは、従来非常に困難であると考えられていたが、最近の人工知能(AI: Artificial Intelligence)分野の目覚ましい発展により比較的容易に実現することが可能となりつつある。

本研究では、地震予知の分野の経験的知識を利用するために、AI、特に知識工学において最も期待の

高い応用分野であるエキスパートシステムを用い、その適用の可能性について技術的検討を行った。地震予知手法のシステム化は、地震活動の監視の面ばかりでなく専門家の判断を支援するうえでも意義は大きい。また、地震発生過程の理解にも大きく貢献するものと考えられる。

§ 2. 地震予知判断手法の問題点とエキスパートシステム

地震予知戦略は、各種の観測データから地震の発生に結びつく前兆現象を捉え、それら前兆現象から地震の起るべき「場所」、「規模」、「時期」を予測しようとするものである。実際には、観測された前兆現象の種類や時期に応じて、将来起きるであろう地震の「場所」と「規模」と「おおまかな時期」を予測しようとする「長期的予知」と、地震直前の異常現象を捕えられて地震が「いつ」発生するかを予測しようとする「短期的予知」の二段構えになっている。最近では、これらの時期の間に、地震の発生が「確実に近づいてきた」事を予測する「中期的予知」の戦略も用いられるようになってきている。

観測データの中に異常が発見されると、その異常が地震発生に結びつく「直前の」真の異常現象(前兆現象)か否かが、過去の事例や現在までに積み上げてきた知識・経験などを基にあらゆる角度から総合的に判断される。しかしながら、その判断は専門家の豊富な経験的知識に委ねられており、例えば「空白域の認識」を一つの例にとっても、「地震活動が低いことの認識基準」のほかに、元来地震が発生しない場所なのか否か、震源の決まらない場所なのかあるいは過去の震源データの無い(少ない)場所(時

* Yokata, T., M. Mizoue, H. Ito, M. Nakamura, M. Yamamoto and M. Notake: An Expert System for Earthquake Prediction

*: 気象研究所地震火山研究部

** : 東京大学地震研究所

*** : 気象庁地震火山部地震予知情報課

**** : 三菱総合研究所

期) なのか否かなど、地震活動に関する知識のみではなく、過去のデータに対する知識や観測点の配置形態の震源計算に及ぼす影響など様々な要素を総合して判断されている。即ち、専門家は、膨大な多岐にわたる観測データや解析結果の中から判断する必要な情報を有機的に結び付けて取りだし、かつ事態の経過の中でそれら情報を取捨選択しながら判断している。

現在の地震予知の方法をシステム化するためには、このような専門家の判断過程・手順をアルゴリズム化しなければならない。しかし

- 1) 数多くの学説と現象に関する断片的知識
- 2) 「異常な変化」、「活動の増加(減少)」などのあいまいな基準
- 3) 地震発生の時間的、空間的特異性、
- 4) 多岐にわたる多量の観測情報と関連分野の多様化、

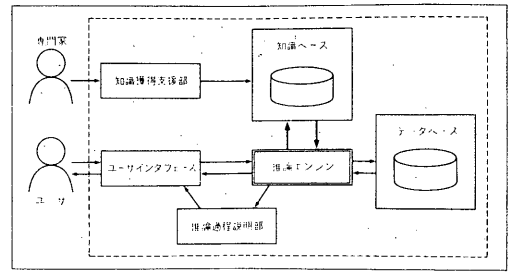
など多くの問題点があり、方法論的に確立していない手順をシステム化するという難しさがある。つまり、現状の地震予知は、理論的に取り扱う事が困難な要素を多く含み、複雑であいまい性の強い問題領域と言うことが出来る。このような問題領域の解決手段の1つとして、エキスパートシステム(たとえば上野, 1985)の手法を利用することが有効と考えられる。

エキスパートとは、問題領域におけるエキスパート(専門家)の知識を利用して、エキスパートと同程度の能力で問題解決を図る、あるいはその助けをする事を目指すシステムのことである。一般的なエキスパートシステムは、知識ベース部、推論エンジン部、知識獲得支援部、ユーザインタフェース部、推論過程説明部、データベース部から構成される(第1図)。各構成要素の機能概要は以下の通りである。(知識ベース部): 対象とする分野の知識が集積されたものであり、その分野の教科書的な知識およびエキスパートから獲得した経験的知識(ヒューリスティクス)が一定の表現形式で蓄積されてある。

(推論エンジン部): 与えられたデータあるいは事実をもとに知識ベース内の知識を利用して結論を導く推論制御をおこなう。

(知識獲得支援部): エキスパートから与えられた知識を知識ベースに入力すると同時に知識の矛盾の発見、知識の体系化を支援する。

(ユーザインタフェース部): システムとの対話を簡単に実行出来るようにシステムからの出力をユーザ



第1図 エキスパートシステムの基本構成図。

ーに判り易い表現に変換するなどの機能を持つ。

(推論過程説明部): 結論に至った推論過程の理由を説明する。知識の修正や専門家を支援するうえでも不可欠な機能。

(データベース部): 推論を進める過程で入力されたデータを保存したり、外部のデータベースから直接入力されたデータを管理する。

エキスパートシステムの最大の特徴は、知識と推論が渾然一体となった従来型プログラミング手法に対し、知識を蓄えた知識ベース部と推論機構部とが分離されていることにある。このため、従来の手続き型プログラミングではアルゴリズム化が困難であった経験的知識を、述語論理に基づき人間の思考形態に近い形で表現し知識ベースに蓄え利用することが出来る。そして知識の追加、修正に対しては、従来型プログラミングに比べ、知識ベースを操作するだけで容易に行うことが出来る。さらに確信度の概念を利用することにより、あいまいな知識を取り扱うことも可能となる。

また、単に推論結果のみを示す通常のプログラムシステムと比べ、推論過程説明部の機能、

WHY: 質問の理由を問返す、

HOW: 推論の根拠を質問する、

RULE: 知識ベース内のルールを表示させる、

WHAT: 求まっている属性の値を調べる、

などにより、後からその推論の筋道を説明することが出来る。

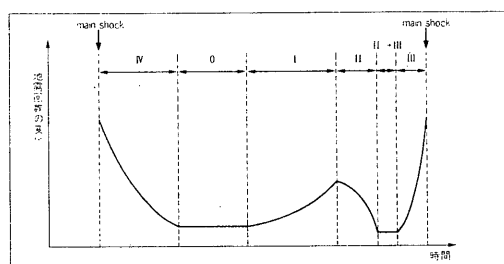
ヒューリスティクスを用いて問題解決を図る方式は、常に最適解を与える保証はない。また専門家の経験則や見解の差異により、常に同一解が得られる保証もない。しかしながら方式が明確でない困難な問題に対し、発見的な経験則(エキスパートのヒューリスティクス)に基づき問題解決を図ることができ、現在の地震予知の領域において非常に有効であると思われる。

§ 3. 和歌山地域の地震発生における Stage 分類

エキスパートシステム、特に知識ベース部と推論エンジン部の利用の良否の技術的検討をするために、「地震の活動期 (STAGE) の判断」という診断型の問題を取り上げ、和歌山地域を対象として知識ベースを作成した。今回、この地域を対象としたのは、次の理由からである。

和歌山市付近では、1965年以降、東京大学地震研究所和歌山微小地震観測所にて、長期間にわたる精度の良い震源データが得られている。この地域の地震活動については溝上ほか(1978, 1988)にて詳しく調査されており、1968年 (M 4.8), 1977年 (M4.7) の2回の本震など、同一断層に起因すると思われる M5 程度の地震が約10年周期で繰返し起ることが知られている。さらに、Sodolevほか(1989)は、本震が発生してから次の本震が発生するまでの期間を幾つかの特徴あるSTAGEに分類し、それぞれのSTAGEにおいて特徴的な地震活動があることを報告している。従って、この地域の地震活動については、精度の良い観測データ豊富にあり、地震発生に関する知識についてもかなり明確化されていることから、観測事実と知識および推論結果との比較・評価を比較的容易に行うことが出来るからである。

第2図にSTAGE分類とそれぞれのSTAGEに対応する地震域内での地震回数変化を模式的に表したものを示す。



第2図 地震回数変化とSTAGE分類の模式図。
ローマ数字はSTAGEを表す。

STAGE Oは定常状態の活動期(静穏期)、STAGE Iはゆるやかではあるが少し大きめの地震を含み地震回数が増加していく時期で、地震発生のための歪がいよいよ蓄積し始めた時期である。STAGE IIは一旦増加した地震回数が減少し始め、地震発生のため

の準備がほぼ整い始めた時期である。STAGE II-IIIは地震発生の直前に地震活動が全く静穏化する空白期で、地震発生の満を持している時期である。STAGE IIIは小さな地震を含み地震回数が増加し、本震の発生につながる時期である。和歌山地域の地震の場合、本震発生前1カ月~1週間程度である。STAGE IVはいわゆる余震が発生している時期である。

各STAGEに対応する特徴は、対象地震域内の地震回数のみではなく、その周辺領域も含み、震源分布、発生間隔、b値、放出エネルギーなどの項目にも表われている。また、ソビエトにおける巨大岩石実験においてもSTAGE 0~IIIに対応した類似の特徴が得られており(Sodolevほか(1978))、これら特徴も整理して用いた。

§ 4. 知識ベースシステムの構築

「STAGE判断」を行う診断型のエキスパートシステムという問題を取り上げたことから、推論エンジンとして後向き推論を基本とするプロダクションシステムを採用した。後向き推論とは、目標とする結論を仮定し、結論部を満足するか否かについてルールの条件部を調べていく方法である。

知識表現の方法としては、推論エンジンの機能に従い、プロダクションルールと呼ばれる方式を取った。プロダクションルールとは、条件部と結論部から構成され、「もし~ならば~である」というif-then型で知識を表現したものである。この条件部、結論部に記述される元となる事実を、事象と呼ぶ。事象は属性名と属性値という組で表現され、

属性名 (属性値)

という形で記述される。今回の知識ベースは、このプロダクションルールの集合で構成されている。

あいまいな知識を利用したり知識間に優劣をつけたりするために、それぞれの知識(ルール)に確信度(CF: Certainty Factor)をつけて利用した。確信度を用いることにより、診断型の後向き推論の最終推論の結果は、それぞれのSTAGEである可能性を確信度の大きさで評価できる。確信度は、1を最大値とし、否定的ルールも利用できるよう-1を最小値としている。通常、確信度は、0~1である。

プロダクションルールの条件部には、複数のルールを組合せて条件を作る方法として、1) AND条件、2) OR条件、3) COMBINATION(COMB)条件の3種類の方法が選択利用できるようにした。いずれ

の条件を使用するかは、知識によって異なる。

AND条件は全てのルールを満たす必要があり、OR条件はいずれか1つのルールを満たせば良い。COMB条件は、全てのルールを満たす必要がある点に於いてはAND条件と同じであるが、確信度の計算方法について他の条件と異なる。

簡単のために「もしA * BならばCである(c)」と言うルールにおいて、A、Bとも満たされている場合を考える。このルール自体の確信度は、cである。ここで、*は、AND,OR,COMBのいずれかを取るものとする。ルールA、ルールB(A、Bは必ずしもルールである必要はない)の確信度を、それぞれa、bとする。このとき、このルールの確信度CFは、次のようになる。

AND : CF=c min{a,b}.

OR : CF=c max{a,b}.

COMB: CF=c(a+(1-a)b).

COMBは、条件が成立した場合、OR条件よりもその確信度を高める関係である。

今回のルールとしては、

- 1) 地震回数変化の特徴に関するルール
- 2) 震源分布変化の特徴に関するルール
- 3) 地震発生間隔の特徴に関するルール

rule (61,	地震回数(増加)
-->	(回数の特徴(stage1), 0.50)).
rule (62,	and(地震回数(増加),
	増加傾向(ゆるやか)).
-->	(回数の特徴(stage1), 0.60)).
rule (63,	地震回数(減少)
-->	(回数の特徴(stage2), 0.50)).
rule (64,	and(地震回数(減少),
	stage2的減少(yes)).
-->	(回数の特徴(stage2), 0.60)).
rule (65,	and(減少の継続(yes),
	stage1の確認(yes),
	stage1の増加より(急激))
-->	(stage2的減少(yes), 0.80)).

第3図 プロダクションルールの例。数値は確信度を示す。

4) b 値変化の特徴に関するルール

5) 放出エネルギー量の特徴に関するルールの5項目に関するルールと、これらを使った推論を制御するためのルールから成る。STAGE判断の特徴に関するルール数は全部で195個である。第3図に、これらルールの例を示す。

§ 5. 知識ベースシステムの検証

エキスパートシステムの適用の可否の検証を以下の手順により行った。

- 1) 1968年, 1977年の本震前のデータのみを用い、その時点でのSTAGE判断を行い、事実とシステムの判断結果とを比較する。
- 2) 比較結果から、知識ベースの修正、補充を行う。

この1), 2)の繰返しから満足のいくSTAGE判断の結果を得るように知識ベースの構築を行った。そして、この知識ベースを1977年以降のデータに適用し、現在までのSTAGE判断を行い、事実と一致するか否かの推論を試みた。

第4図に、知識ベースシステムの実行例を示す。

```

***** CONSULTATION on stage START *****
[1] stage の評価年を入力して下さい ?
      please input number : 1977
[2] 評価月を入力して下さい ?
      please input number : 2
[3] 評価日を入力して下さい ?
      please input number : 20
***** MESSAGE *****
最近の震央分布図を表示して下さい !
グラフィックディスプレイから次のコマンドを入力します
$ EMAP (return)
.....please hit return key
[4] 前年の判定結果を入力して下さい ?
      1. stage1
      2. stage2
      3. stage2-3
      4. stage3
      5. stage4
      6. stage0
      0. input is over
      select please : 2
      cl value : 0.80
      select please : 0
      .....
[16] 直前のエネルギー放出は確認されますか ?
      1. yes
      2. no
      0. input is over
      select please : 1
      cl value : 0.70
      select please : 0
      .....
<<< The values of エネルギーの特徴 are as follows. >>>
      エネルギーの特徴 is stage3 (0.51)
<<< The values of 現在の stage are as follows. >>>
      現在の stage is stage2-3 (0.67)
      現在の stage is stage3 (0.24)

```

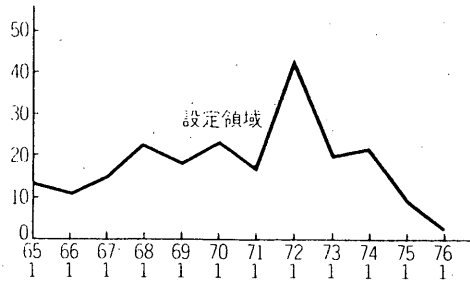
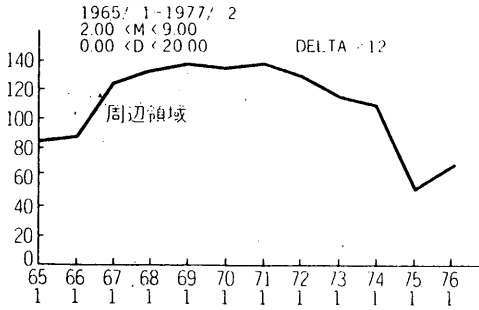
第4図 推論実行例。

テストケースの評価年月日は1977年2月20日で、データは評価年月日以前のデータのみを使用している。

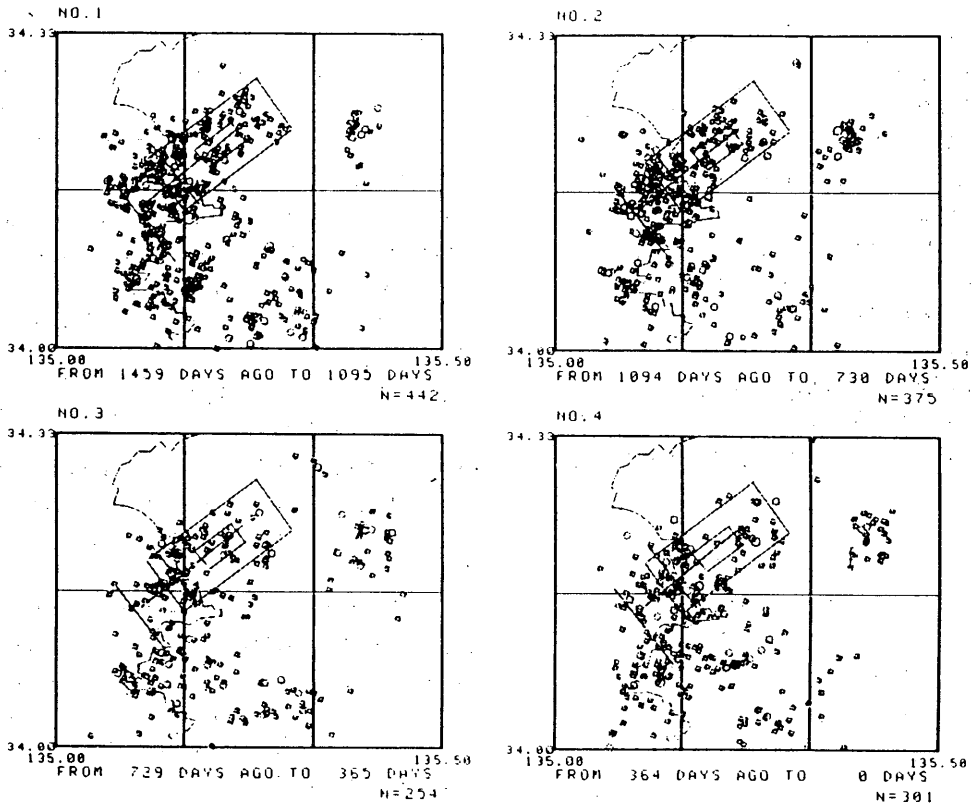
操作は、まずSTAGE判断を行う評価年月日が質問され、ユーザがそれらを入力すると、その時点までの観測データを用いたデータ解析が行われる。第5図、第6図に解析表示の例を示す。その後、各質問事項に順に答えていくと最終的に判断された結論

が現在のSTAGEとして出力される。

第4図の実行例は、前年度判定STAGE II (0.8) から、現在STAGE II-III (0.67)、STAGE III (0.24) へと移り変わってきている。実際、1977年7月6日にはM4.7の地震が発生しており、知識ベースの性能および判定結果は良好である。



第5図 地震回数の変化図。右は設定領域内の回数変化。左は周辺領域内の回数変化。



第6図 震央分布の変化図。

§ 6. 地震予知支援システムの構想

プロトタイプ知識ベースシステムの構築を通じ、専門家の経験的知識を利用する点において、エキスパートシステムは、従来プログラムシステムに比べ非常に有効であることが分かった。

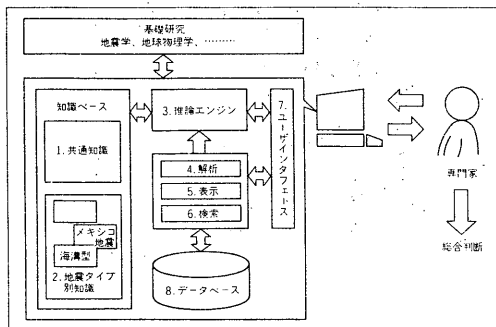
今後ますます巨大になっていくであろう観測データ、解析データなどを用いて「迅速かつ総合的な異常判断、総合判断」、「判定機関への情報提供の充実化」などのシステム化は強く望まれるところである。もちろん予知の判断を100パーセント機械にまかせることは不可能であるが、専門家の最終的判断を迅速に、正確に、そして容易に行うことが出来るための支援的要素の強いシステムが必要である。

ここでは、エキスパートシステムの手法をさらに進め、「地震予知支援システム」の構想を提案する。ここで言う地震予知支援システムとは、自動的に地震予知を行うシステムではなく、予知のための専門家の意志決定を支援する知的な情報提供システムである。

地震予知支援システムの全体構成とその位置付けを第7図に示す。これは、

- 1) 知識ベース部（地震発生の共通知識、地域別・タイプ別地震発生の知識など）
- 2) 推論エンジン部（異常判断、総合判断を支援する機能）
- 3) 地震現象の解析パーツ
- 4) オリジナルデータ・解析結果の表示パーツ
- 5) データ検索パーツ
- 6) ユーザ・インタフェース
- 7) データベース（地震活動、地殻活動などのデータやそれらの解析データ）

等々のエレメント・パーツから構成されるシステム



第7図 地震予知支援システムの構想図。

である。

現在のシステムでも3), 4), 5), 7)の機能は年々充実してきているが、本システムにおいて1)知識ベース, 2)推論エンジンを用いた異常判断, 総合判断を支援機能が導入される。また、他のパーツも最新の技術を用いて充実させる必要があり、特に、6)ユーザインタフェース部には、情報提供(入出力)の方式に知的さを持たせ、現在行われている操作より遥かに便利で迅速かつ信頼性の高いシステムを作ることが可能であると考えられる。

知識ベースにおける知識の表現形式としては、地震予知にかかわる知識を整理するに適した表現に応じて、プロダクションルール、フレームなどを利用する。また知識ベース部の構成としては、地震全般に共通する知識と個々の地域や地震別に存在する知識や専門家により異なる見解の知識もあり、これら知識を階層化・構造化して持つ必要がある。

ここで、共通知識とは、例えば、地震発生系列における本震-余震型、前震-本震-余震型、群発地震型などの特徴、地震規模と頻度に関するG-R式等々であり、地震タイプ別知識とは、各地域や地震に固有の性質や知識で、断層の存在場所、地震発生の周期等々と言ったものである。

先に述べた和歌山地域の地震は内陸型地震の1つであるが、これと同じルール（和歌山タイプと呼ぶ）が適用できる地域や地震もあると思われる。また、海溝型の地震についても、発生間隔や空白域の形成において典型的な様相を示すことが知られており、これらについても知識ベースの構築が図れるものと期待できる。

これら種々の地域や地震別の知識パーツを充実させ、モジュール化していく必要があり、これらの知識ベースは新たな地震の事象により正確化、分類化されていく。また個別のルールから共通のルールを抽出することにより、地震発生の本質の理解にも利用できる。

地震予知支援システムとユーザとの関係は、計算機が得意な部分は計算機が、人間の得意な部分は人間が行うと言ったシステムと人間の協同関係にある。

一方、このようなシステムを導入することにより、あいまいな異常判断や予知判断の根拠を洗い直すことも可能であると考えられる。

§ 7. おわりに

エキスパートシステムの手法を地震予知の分野に適用することの可能性について検討した。その結果、エキスパートシステムは専門家の経験的知識を使用する点において非常に有効であり、かつその知識の修正、追加についても従来のプログラミングシステムに比べ非常に容易であることが分かった。

一方、システムと人間との協同関係という観点から地震予知の問題を捉え、人工知能分野の手法を取り入れた「地震予知支援システム」という専門家の意志決定を支援する知的な情報提供システムの構想を提案した。

人工知能分野の研究においては、最近、人間の脳のメカニズムについての研究が進み、ニューロコンピュータやファジィ理論を応用したあいまい情報の処理のメカニズムなどその成果には目覚ましいものがある。

地震発生過程の研究についてはいうまでもなく、これらの技術の地震予知への適用は非常に重要であり、現在、地震予知支援システムの構想に基づき研究を行っている。この成果については、稿を改めて報告する。

本研究は、東京大学地震研究所地震予知観測室所有のデジタル・エクイップメント社製のMicro VAX II 上にて行った。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京大学地震研究所鷹野澄助教授、気象研究所前田憲二研究官、気象庁地震予知情報課横山博文係長、三菱総合研究所後藤寛子副研究員、小木哲郎副研究員、高堂谷正樹副研究員には多大な協力を頂いた。地震観測所松本英照所長には有益な助言を頂いた。併せて深謝いたします。

参考文献

- 上野晴樹(1985): 知識工学入門, オーム社
 M. Mizoue, M. Nakamura, K. Seto and M. Ishiketa (1978): Earthquake Prediction from micro-earthquake observation in the vicinity of Wakayama city, northwestern parts of the Kii peninsula, Central Japan, J. P. E. vol 26, pp 397-416.
 溝上 恵, 中村正夫(1988): 和歌山平野とその特質, 月刊地球 Vol 105 pp 278-288
 G. Sodolev, H. Spetzler and B. Salov (1978): Precursors to failure and rock while undergoing an elastic deformations. J. G. R. Vol 83, No4
 G. Sodolev, M. Mizoue and M. Nakamura (1989): Comparison analysis of laboratory and field data concerning earthquake preparation process (投稿中)