

地震予知の将来は? : 海底観測と陸の観測の連動の提案

笠原 順三・木下 肇

東京大学地震研究所

(1992年7月1日受理)

1. 地震予知の目標

地震の予知と言った場合、地震直前予知と地震長期予報がある。地震発生確率は長期予報の一種である。当然のことながら、地震予知の重要な目標は直前予知、或いは短期予知にあると考えられるが現在までこれらが出来そうなデータや方法に対して我々は見通しを持っているとは言いがたい。いままで前兆現象として報告されているいろいろな事例についてそれらを評価・検討したものはいくつかある (RIKITAKE, 1976; NIAZI, 1982; 静岡県地震対策課, 1985; 力武, 1986; 気象研地震火山部, 1990)。これらのまとめにも明かのように、前兆現象が明らかな事例や地震はそれほど多くなく、また前兆現象が比較的明瞭な場合でもこれを用いて地震判定の公式を作ることは困難である。今まで知られている前兆現象の多くは内陸の地震についてである (例えば, WU 他, 1978)。また内陸、海域を問わず前兆現象が報告されている内でもっとも信頼性が高いものは全体の約 8% であり、その半数が前震活動であった (気象研地震火山部, 1990)。前震か、群発の一部かを地震活動の途中で判断する明確な基準は知られていない。前出の著書ら (気象庁地震火山部, 1990) はできるだけ客観的と言える判断基準で前兆現象の信頼性のランクを決めたが、もっと厳しい判断基準によれば彼らの正しいとした前兆現象も疑わしいという結論になるものがある (WYSS, 1991)。これらのことは、地震前兆現象の研究、あるいは地震予知の研究がいかに困難なものであるかを物語っているものである。これらを考えると、地震対策に対して 2 通りの研究方法が考えられる。1 つは米国のような「予知現象を正面から取り組むのではなく、いかにしたら地震の被害を少なく出来るか」を重点的に取り組む (PAGE *et al.*, 1992) ものである。他の 1 つは「今まで抜けていた地震予知研究の部分をもっと強化すること、それは内陸地震と海溝付近の地震の特徴をもっと明確にし、さらに観測の精度を大幅に向上すること」を行なうことである。「米国地震危険度低下プログラム」は次の 5 つの研究を新しい戦略としている (PAGE *et al.*, 1992)。即ち、1) 地盤の影響、2) 地震ネットワークの充実、3) GPS による測地的変形速度、4) 古地震、5) 断層の物理、である。米国、ソ連、中国、トルコなどでは内陸地震による危険性がほとんどであるのに対して、日本では海溝の

目標: 地震を予知する
予知: 直前予知と長期予報, Probability

地震予知の方法

- 地震(活動)の性質を調べる
 - ちょう密な観測,精密地震波形
 - *精密震源の決定
 - *地震の時間的振舞い
 - *理論的,実験的研究
- 地震活動の場を調べる
 - *地震活動の空間分布
(地震活動域の境界)
(地震空白域)
 - *応力場の推定
 - *地震波速度変化(巨大パイロサイスの連続運転)
- 地殻変動現象 広域応力場の変化
 - *体積歪計
 - *傾斜計
 - *3成分歪変化
 - *異常海面変動
- 地磁気,電位差変動
 - *精密磁力計,地電流
 - *海底磁力計,電位差計
 - *地中電位差計,地中比抵抗変化
- 化学的アプローチ
 - *ラドン濃度変化
 - *希土類元素などの変化
- 生物の変化
 - 定量化しづらい

図1. 地震予知で用いられている方法.

沈み込み帯地震による危険性が大きい。1978年伊豆大島近海地震、1975年ハイチェン地震は前震活動が極めて明瞭であった例外的な地震であり、これらは必ずしも日本付近の巨大地震の予知の決め手になるとはいえないであろう。

短期予知につながると考えられるいろいろな方法をもう一度整理し考えてみる。本論では今までの地震予知に対する取り組み方を整理し、これからの地震予知がどう在るべきか、また何をどうやって行くべきかを論ずるものである。

図1は短期予知を将来の目標としたときの地震予知の方法を著者なりにまとめたものである。これらには、

1. 地震(活動)の性質を調べること

2. 地震活動の場を調べること
3. 地殻変動現象，広域応力場の変化を調べること
4. 地磁気，電位差変動の研究
5. 化学的アプローチ
6. 生物の変化

がある。1)と2)とは重複する部分が多いが、1)は地震そのものの性質の研究である。この中には、震源過程、地震活動の時間的推移の研究がある。これらは、精密震源観測、室内実験、震源過程・理論波形などの理論的考察を必要とする。2)は地震活動を取り巻く場の研究である。これは主として空間の問題を扱う。精密震源決定は地震活動の空間的分布及び地震活動の境界を明瞭にする。やや長期の地震活動のモニターは地震活動空白域を明らかにする。ここに作用している応力場、及びその変化は重要であろう。それはボアホール内で直接応力測定の実績観測を行なうことによって調べることが出来る。広域的場の変化を調べる方法は人工震源による長期観測である。この観測には爆破震源が一般的であるが、ロシア共和国ノボシビルスク・コンピュータセンターでは大型振動装置を開発した。これによって発生した信号を1,000kmもの距離で観測した(ALEKKEEV and KOVAKEVSKY, 私信)。この大型振動装置は地震探査で用いられているパイプロサイズ(コノコ社の商標)に似て正弦波の周波数を連続して変化させ振動させることが出来る装置であり、この振動を一定時間の振動を繰り返す。一回の振動による信号は爆破振動に比べると振幅は小さいが、震源波形と受震波形との相関、各々の信号の重合によってS/Nを大幅に改善できる。この装置は上下振動、水平振動それぞれ別個に起こすことが出来るので、P波震源、S波震源をコントロールすることが出来る。また、震源は振幅、位相の両方の情報を持っている。P波、S波の2つを用いると、VP/VSを得ることが出来る。ただし、VP/VSを用いて地震予知をする方法自体は精度などの問題で疑いがもたれている。またS波震源として用いたとき、振動方向が互いに直交する2方向で振動させることにより、S波の異方性をS波スプリティングによって調べることが出来る。S波スプリティング異方性は岩石中の鉱物の選択方位(Preferred Orientation)によっても生じるが、岩石や地層の断裂によっても生じる。特に、断裂組織の内部に、マグマや地下水は流入すると断裂構造に起因した異方性は著しくなるであろう。伊東沖の火山性群発地震などの場合にはマグマの貫入によるS波のスプリティングがあるかも知れない。震源域が地震発生前だけ数日程度の短時間の変動をする場合には1年程度の間隔の測定ではこれを明らかにすることが出来ない。ただし、Crampinらの地震予知にS波スプリティングを用いる提案に対して、Wyss等は懐疑的である(WYSS, 1991)。

地殻変動によって代表されるような応力場の変動は従来から地殻変動の測定に用いられているような伸縮計、傾斜計、ボアホール型体積歪計、3成分歪計等によって測定することが出来る。これらによる今までの観測では、現在の分解能と気圧、地下水、トンネルの経年変形などの影響が大きな要因となって地震や広域変動に伴うような本当の地殻変動がなかなか取り出せない。また、分解能をあげるため多数の歪計等によ

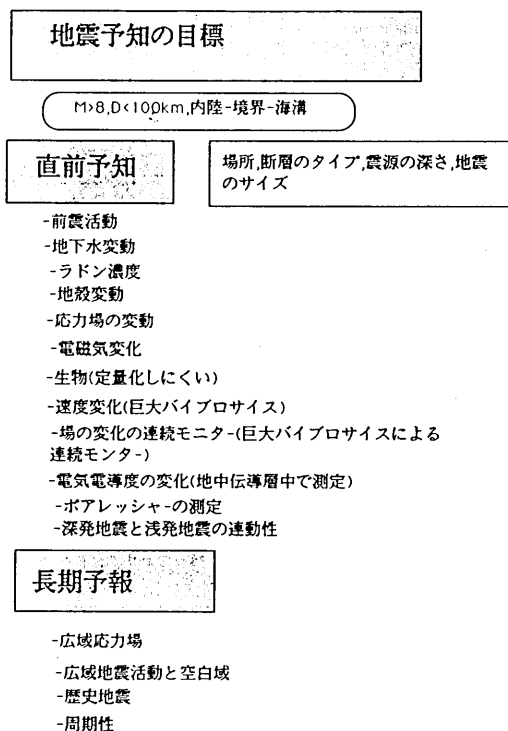


図2. 直前予知と長期予報で用いられ得る方法。

て同時観測を実行してもそこから前兆現象に伴うような相関性の高い信号は得られていない。

地磁気, 電位差, 比抵抗は今まで前兆現象と思われる現象が観測されている。地層の比抵抗(電気伝導度)は地下水の動きに大変敏感である。地下水は地層の圧力勾配や断裂の有無によって大きく変動しそうである。また比抵抗は桁で変化するような物性であるのでこれの連続観測は有望そうである。特にボアホール中の比抵抗の連続測定は時と場所を得れば前兆が出て不思議がないような測定項目であろう。地磁気の変動は地下のCA(電気伝導度異常)に関連しているが地震に伴う変動現象は3例ほど報告されている(気象研究所地震火山部, 1990)。しかし, WYSS等(1991)はSASAI and ISHIKAWA(1980)及びSUMITOMO and NORITOMI(1986)の地磁気変動の結果に懐疑的である。

化学的なアプローチとしてはラドンや希土類元素の濃度変化がある。ラドン変化は1978年伊豆大島近海地震の際に脇田等(WAKITA *et al.*, 1988)によって報告されているが、現在のところどの地震に対しても前兆があるとは限らない。生物の状態変化は最も多く報告されるものであるが、これは真偽を確かめ難かったり、生物種の多さや、現象の多様性のために定量化するのは極めて困難である。

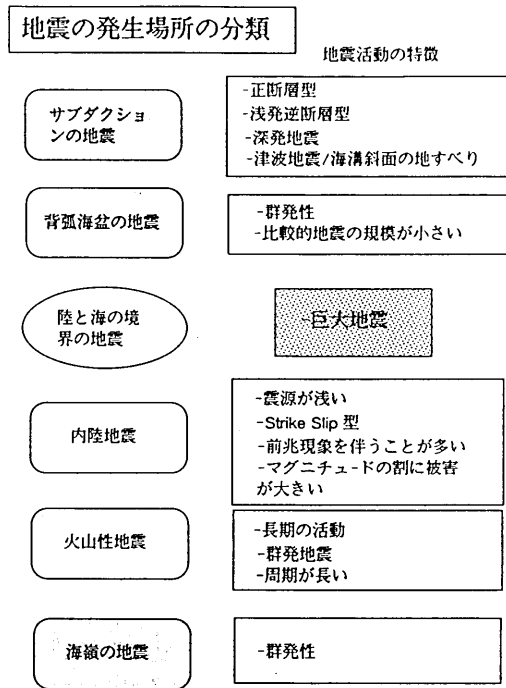


図3. 地震発生場所の分類。海洋域で起きる地震には網目がかかっている。陸と海の境目に巨大地震が発生することが多い。

直前・短期地震予知の目標を $M > 8$, 震源の深さ 100km 以浅, 場所を内陸から海溝, 及びその境界に置くと, この種の予知に有効と思われる観測項目はある程度整理されると思われる。図2はそれをまとめた。直前予知としては前震活動, 電磁場の変化, 巨大パイロサイスによる走時変化, 波形変化の連続モニター, S波スプリティングの連続モニター, 地中における電気伝導度(比抵抗)の連続観測, 深発地震と浅発地震の連動性などが今まで行なわれなかったか, それほど重点的に行なわれなかった項目ではないだろうか。これらの他にも図に挙げたような観測項目は重要だと思われる。しかし, これらを実際に観測するためには観測精度を 1ms 程度まで向上する必要がある。パイロサイスの極めて有利な点は震源波形が同じであることである。波形に変化を生じるのは途中の媒体に変化であるから多数の地点で波形をモニターすることによってどの方向に変化を生じたのかを明らかにすることが出来るのではないか。

長期予報をするためには広域の変動を捉えるような観測項目を実施する必要がある。これには従来の観測方法や研究方法がそれなりの実績をあげてきたと思われる。GPS などによる地殻変動の直接観測は数年間隔の変動を明らかに出来る。

2. 地震の発生場所の分類 (図3)

地震の発生場所による特徴の違いを分類した。地震発生場所は、サブダクション帯の地震、背弧海盆の地震、陸と海の境界の地震、内陸地震、火山性地震、海嶺の地震となる。図では海洋地域で発生する地震に網目がかかっているが、内陸や陸上火山の地震を除いて、多くの重要な地震活動が海洋地域で起きている。言うまでもないが、大きな人的、建物などの被害を出した地震は海洋地域で起きている。特に、浅発逆断層の大地震は海溝から沿岸にかけて発生し、これらが大きな被害をもたらしてきた。新潟地震は海岸線にほぼ沿って起きた。地震活動の特徴は内陸地震と海洋の地震とでは大きく異なる。内陸の地震は震源が浅く、走行断層型が主であり、前震活動や前兆現象を伴うことがある。伊豆半島の地震活動では、群発型の地震の中でやや規模の大きな地震が被害をもたらした。一方海域の地震はその発生場所も陸上の観測点から離れている事もあって前兆的現象(前震活動、地磁気変化、地殻変動、重力変化など)が捉えられていない。前兆的地殻変動がどれ位なのか不明であるが、100~200km 以上も離れた海域で数センチの上下変動や水平変動がせいぜいであるならば、陸上からはとても検出できるような地殻変動量ではない。傾斜変動も似たような状況であろう。

3. どう研究を進めて行くのか

図4は今後の研究の進め方のまとめである。地震予知の目標はすでに述べたが、「そもそも予知は可能なのであろうか?」。はっきりした群発地震や火山性地震は予知と言うまでもなく誰の目にも大きな地震が起きる危険性が迫っていることがわかるであろう。中国の地震予知は1975年ハイチェン地震で大成功を収めた。敢てこのタイプの地震に対して必要なことと言えば、最大のマグニチュードはどれくらいか、いつ起きるのか、深さと震度はどうか、被害の予測はどの程度か、避難の時期はいつにしたらよいのか、など理学の範囲を越えて、工学、心理、行政などが絡んだやっかいな問題になる。これはある程度シミュレーションをすることが出来る。この場合は火山行政工学と似ている。

しかし、「今まで前兆現象がはっきり捉えられないような地震に対して、今後短期予知が出来るような物理、化学的パラメータが隠されているのだろうか?」。別の言い方をすれば「これらの地震に対しても地震予知は可能なのであろうか?」。この問題に対して、地震予知に携わっている誰も現時点では答えることは出来ないだろう。

それでは今までの予知研究の方法は誤りだったのだろうか。これにたいする返答としては3つ考えられる。すなわち、a) 地震予知が出来るような都合の良い地震がたまたま数多く起きなかったか、b) 観測方法が未発達だったり、分解能が十分でなかったり、観測網が十分でなかったりしたこと、あるいはc) 本当に不可能なことに挑戦してきたのか。これに対しても正しい答えを出すことは不可能であるが、前章で述べたように少なくとも大変重要であるはずの海域の地震に対して我々は十分な観測体制を持っていないことは明らかである。一方分解能をあげる努力も続ける必要がある。

すなわち、今まで不十分であった観測項目及び要因は、

目標は何か？

- M>8, D<100km, 内陸-境界-海溝の地震の予知
- 数年以内の中期から数時間の短期予報
- 手段は何でも

予知(短期から中期)はそもそも可能か？

- 現在までの知識では不明

今までの予知の方法は誤りか？

- 不十分な点があったか, うまい地震に出合
わなかったか, そもそも不可能だったか

可能性のある方法は？

今まで不十分だった場所や方法を進める

- 海域の観測(地震, 電磁気, 傾斜)
- 精度を2桁上げる(地震計, 体積歪計, 傾斜計, 電気電導度, 磁
力計, 重力計)
- 地震発生過程の研究(理論, 実験)
- 高密度観測(これは従来の方針), しかし予算が許せば
本質的に誤りではない。
- 前兆が出そうな地震を調べる(群発地震)
- 広域地震連動現象を調べる

図4. 地震予知に対する疑問と地震予知に対し可能性のある方法。

1. 海域の観測,
2. 精度の向上,
3. 地震発生過程の理論的, 実験的研究,
4. 高密度観測,
5. 群発地震を良く調べる,
6. 広域地震連動現象を調べること,

等である。海域の観測は現在極めて手薄である。これらの方法は先に述べた米国の戦略と2)と3)の2つの点を除いて異なっている。

地震予知全体としては以上に述べたような進め方を提案したいが、海域の研究に対してより具体的に取り組み方をまとめてみた。

地震研究所の採るべき方法は？

- 海域と陸域の総合化(例えば,房総沖,相模湾,南海沖)
- ケーブルテレメータ観測によるリアルタイム,高精度海域観測
- 高精度観測機器の開発
- 総合データベースの充実
- 実験的方法
- 理論的方法

他の研究者(国内,国外),社会への還元方法は？

- データの公開(Publicity)
- 機器の共同利用(Sharing)
- 技術移転(Technological transfer)

手前味噌な研究

海域観測では何を行い,何が不足だったのか？

- 海溝直下(機器の耐圧性を解決する)
- 陸と海との同時,共同観測
- 高精度(デジタル観測-16ビットから20ビットへ)
- 総合(地震,地磁気,重力など)観測
- 観測船の不足(長期観測が可能な機器を開発する)
- 連続観測を目標(いままではサンプル的観測だった)

図 5. 地震研究所で効果的な地震予知の戦略と海域の地震観測の戦略。

現在周囲に容易に利用できる観測設備や、データ、システムを考えると、海域と陸域の協力が最も効果的であろう(図5)。特に、伊豆半島から関東付近は地震研究所のデータが最も密な場所である。これに海底地震・地磁気・熱の観測を加え総合観測を実施するのが最も良い。同時にケーブル式の総合データ取得も進めていく必要がある。これらと同時に、観測機器の高精度化を進める。地震形の完全デジタル化、広帯域周期観測、高精度磁力計などを目標とすべきであろう。また、総合的な判断をするためには総合データベースを充実すべきである。

地震予知によって得られたデータや成果は何らかの方法で社会に還元すべきである。これは公開の原則、機器の共同利用、開発した技術の公開(技術移転)等によって行なうべきである。

海底地震観測は我々が今まで実施してきたことであるのでより詳細な改善策を示し

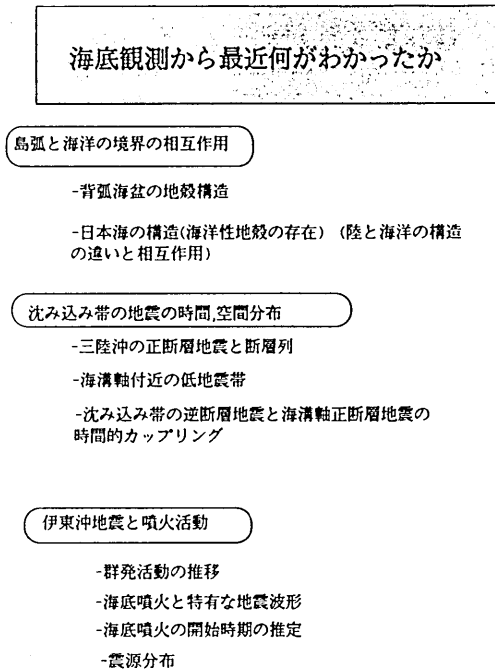


図 6. 海底地震観測から最近わかったこと。

た(図 5)。海底地震の観測では観測船の不足は深刻な問題である。観測船を使うことが出来るかどうかは研究の成果をほとんど決めてしまう。日本の海底研究は大変不利な状況がある。海洋関係における慢性的な観測船の不足の状況があるが観測船を使える環境とそうでない研究機関との不平等な状態がある。これらは今後改善を望みたい。図 6 に海底地震の観測から最近何がわかったかについて記した。

4. 第 7 次地震予知の方向 (図 7)

以上のようなことをふまえて、第 7 次地震予知に対して著者なりに私見を述べたい。まず、今まで極めて不十分であった海域と陸の境界における地震活動の把握をぜひすべきである。これより、この巨大地震発生域である海域、陸域の境界地域における地震活動の時間、空間分布を正確に把握する。また、前兆現象が出そうな場所とは、とりもなおさず将来の震源の真上である。このためには海底地震を含めた海洋地球物理観測が必須である。同時に、観測項目も絞らなければならない。現在の知識から言えば、地震活動、地磁気、重力、傾斜変動、等の観測をリアルタイムで行なうべきである。さらに、まだ我々が未知の物理、化学的パラメータを探す努力もする必要がある。

地震の性格を良く知るために、発生場所による違いを明確にする必要がある。発生場所の違いは地震の時空間分布の違いにも影響を及ぼすし、震源パラメータにも影響

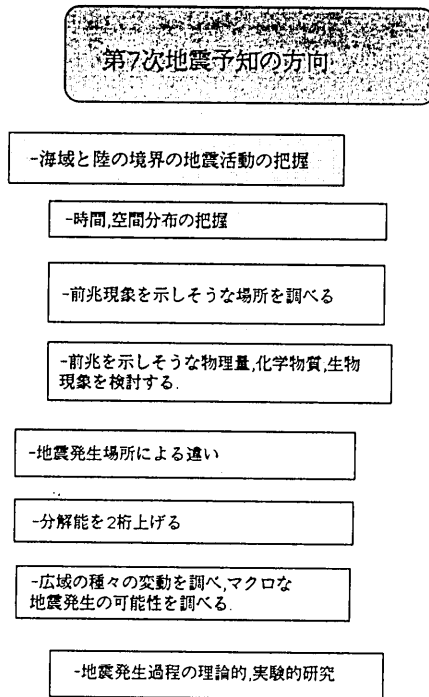


図7. 第7次地震予知の方向.

する。

観測技術はある程度限界に達したと思われがちである。陸上の観測手法は主として、観測・データ処理の自動化に向かってきた。センサーの精度の向上はどちらかと言えば2次的であった。観測精度の向上が期待される物理、化学量としては地磁気、地震、重力、地殻変動等がある。精度の向上は2桁を期待したい。

地震予知にとっては、海底に限らずまだ知らないパラメータがあるはずである。地震現象が発生するまでには将来の地震発生場所に局所的歪が次第に増加するはずである。応力に関しては広域的応力増加か局所的な応力増加なのか不明である。この局所的歪の増加は将来の断層面付近に限られるから、場所をあらかじめ知っていない限り、歪の蓄積の発見は極めて困難であろう。また、地震発生域が陸上でなく海域である場合は陸上からの変動の予測は著しく困難であろう。

以上当たり前の議論を繰り返したかも知れないが、第7次地震予知には過去の地震研究の成果・前兆現象の再評価をし、戦略的に望む必要がある。現在の研究の方向を思い切って変える必要もあるかも知れない。しかし日本と諸外国の間で地震発生の場所の違い、文化、都市の形態、政治体制などを考えると、日本にとって必ずしも米国型の地震予知が良いとはいえないのではないだろうか。

文 献

- ALEXEEV, A.S., and V.V. KOVALEVSKY, 1992, Powerful vibrators for deep earth interior investigations, pre-print.
- 気象研究所地震火山部, 1990, 地震前兆現象のデータベース, 気象研究所技術報告, 26号.
- NAZI, M., 1982, Probabilistic approach to earthquake forecasting, I: Compilation, evaluation and preliminary analysis of data, TERA Report 14-08-001-19908, U.S. Geological Survey.
- PAGE, R.A., D.M. BOORE, R.C. BUCKNAM, and W.R. THATCHER, 1992, Goals, Opportunities, and Priorities for the USGS earthquake hazards reduction program, USGS circular; 1079.
- RIKITAKE, T., 1976, Earthquake prediction, 357pp., Elsevier, Amsterdam.
- 力武常次, 1986, 地震前兆現象, 予知のためのデータベース, 東京大学出版会, 232pp.
- SASAI, Y., and Y. ISHIKAWA, 1980, Tectonomagnetic event preceding a M5.0 earthquake in the Izu Peninsula-Aseismic slip of a buried fault? *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **55**, 895-911.
- 静岡県地震対策課, 1986, 地震前兆現象の現状, 地震予知研究振興会, 146pp.
- SUMITOMO, N., and K. NORITOMI, 1986, Synchronous precursors in the electrical earth resistivity and the geomagnetic field in relation to an earthquake near the Yamasaki fault, southwest Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 971-989.
- WAKITA, H., Y. NAKAMURA, and Y. SANO, 1988, Short-term and intermediate-term geochemical precursors, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 267-278.
- WU, K.-T., M.-S. YUE, H.-Y. WU, S.-L. CHAO, H.-T. CHEN, W.-Q. HUANG, K.-Y. TIEN, and S.-D. LU, 1978, Foreshocks to the Haicheng Earthquake of 1975, Certain characteristics of the Haicheng Earthquake ($M = 7.3$) sequence, *Chinese Geophysics, AGU*, **1**, 289-308.
- WYSS, M. (editor), 1991, Evaluation of proposed earthquake precursors, *AGU*, 94pp.