

何故、山陰地方に内陸大地震が発生するのか —比抵抗研究からみえるもの—



塩崎一郎

鳥取大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

山陰地方で発生する内陸地震に関して、時・場所・規模を完全に予知することはできない。しかし、どこで、どれくらいの地震が発生するのか？これに答えることができれば、中国地方の地震災害の軽減の一助となるものと思われる。本稿ではそれに寄与すべく、山陰地方の内陸地震発生域周辺の電気比抵抗研究に携わってきた研究者らの取り組みとその研究成果の概要を記す。山陰地方で得られた最大の成果として、日本海の海岸線に沿う地震活動帯の地殻深部に低比抵抗領域が存在すること、そして、それが定量的内陸地震発生過程モデルの構築に重要な制約条件を与えることができることを記す。

テーマ 比抵抗, 山陰地方, 内陸大地震, 地殻深部低比抵抗領域, 地震空白域

1. はじめに

2011年3月11日に発生した“2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)”が我々に与えた衝撃は計り知れない。地震現象そのものは言うまでもなく、発生した津波、さらには原発災害を引き起こす最悪のシナリオが進行する様相は戦後の日本の来し方を根幹から揺るがす観測史上最大の自然現象に起因する超巨大災害といえよう。この海溝型地震の発生のメカニズムの解明は当然のことながら、学術的には、このような低頻度ではあるが大規模災害をもたらす地震に関して、どのような意識を持って取り組むべきなのか。地球に関する研究を行う者の一人として、その使命と責任の重さをあらためて思い知らされた。

本稿で着目する山陰地方で発生する内陸大地震は、この2011年東北地方太平洋沖地震のような海陸プレート境界型地震とは異なるタイプの地震現象である。しかし、低頻度ではあるが大規模災害 - 地域にとっての大規模災害という意味で - を引き起こすという視点で見れば、山陰地方にとどまらず広く中国地方の人々の暮らしにとって、まさしく同様の脅威になり得る存在であると筆者は認識している。記憶に新しいところでは、2000年に鳥取県西部地震(M7.3)が発生したが、少し時を遡れば、北丹後地震(1927年,M7.3)、鳥取地震(1943年,M7.2)など、この約100年間にいくつものM7クラスの大地震が発生している。

今、山陰地方で発生する内陸地震の発生に関して、時・場所・規模を完全に予知することはできない。しかし、近年の様々な地球物理学的な研究成果により、全く

捉えどころがないかと思えた内陸地震に関する情報が蓄積され、特に、下部地殻の不均質構造に関する研究に基礎をおいた、内陸地震の発生過程に関する研究が、定量的なレベルから定量的なレベルへと進化しつつある⁽¹⁾。このような現状において山陰地方の地震発生メカニズムの解明に資する研究の観点から、これまでに分かったこと、分からないことを取り纏めることは、より確かな定量的内陸地震発生過程モデルの構築、さらには、中国地方の地震災害の軽減の一助となるものと思われる。本稿では、近年、山陰地方の内陸地震発生域周辺の“電気比抵抗研究(以降は比抵抗と記す)”に携わってきた筆者を含む研究グループの取り組みとその成果の概要、そして、今後の課題を記す。

2. 比抵抗及び大地比抵抗の探査方法

本章では、はじめに、読者にとって馴染みの少ないと思われる“比抵抗”という用語を説明する。次に、この比抵抗の探査原理について紹介する。

比抵抗 ρ は物質に固有の電氣的性質を示す物理量である。比抵抗の単位は[Ωm]であり、電流の流れにくさを表す(ちなみに、比抵抗の逆数は電気伝導度 σ である。単位は[S/m]で表される)。地球を構成する物質の比抵抗は、地殻に含まれる間隙水の量やそのつながり方に非常に敏感な物理量であるので、その構造を知ることには地殻内の間隙水の存在状況を推定する有力な手がかりとなる⁽²⁾ため、地殻深度での流体や水の存在に関する調査では欠くことのできない調査方法のひとつと考えられ

ている。さらに、もう一つの特筆すべき点として、比抵抗調査により得られる知見は、他の地球物理学的な探査等（例えば、地震探査や重力探査）とは、感度の異なる、全く独立した情報を我々に与えてくれることを挙げておきたい。

地表付近の高々km 以浅の比抵抗構造調査には有効である人工的な入力源を用いる電気及び電磁気的な探査手法も、地殻やマントル上部の比抵抗構造探査には適用できない。このため、地殻深部の比抵抗構造調査では、広帯域にわたり十分なエネルギーを有する自然界に存在する電磁場を信号として利用する手法が用いられる。この手法のひとつに MT 法 (Magnetotelluric Methods, 以降 MT 法と略す) がある。MT 法は、地表で地球外部に起源をもつ地磁気変動とそれにより誘導された地電流を測定し、その両者間の振幅と位相差をもとに地下の比抵抗構造を推定する手法である。

Cagniard(1953)⁶⁾によって提案された MT 法では、自然電磁場は平面波として大地に直交入射し、大地は水平方向に均質であるという、二つの重要な仮定のもと見かけ比抵抗 ρ_a を次式で定義した⁶⁾。

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2$$

ここで、 E, H はそれぞれ、変動する電場及びそれに直交する磁場、 ω, μ はそれぞれ、電磁波の角周波数、大地の透磁率を表す。(上の仮定は一般的には満たされるわけでない。しかし、ここでは、MT 法 の概念を理解するためにこのシンプルな Cagniard の公式を示しておく。現実的には、大地の比抵抗構造が 2 次元的、3 次元的である場合、電場と磁場の比で定義されるインピーダンス

$Z \left(= \frac{E}{H} \right)$ をテンソル量として取り扱うことになる。))

さて、導電性のある大地に電磁波が入射すると表皮効果現象により、そのエネルギーは深くなるにつれて指数関数的に減衰する。比抵抗 $\rho (= 1/\sigma)$ の一様大地において電磁波の振幅が地表の $1/e$ に減衰する深さ δ を表皮深度 (スキンドープス) と呼び、次式で表わす。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

例えば、表-1⁶⁾で示されるように、 $100\Omega\text{m}$ の一様大地に、 100Hz 、 1Hz 、 0.01Hz の電磁波の入射を考えると、それぞれの表皮深度は 500m 、 5km 、 50km となる。このように、MT 法では、入射する大地の比抵抗が低いほど、入射する電磁場の周波数が高いほど、探査深度は浅くなり、逆に、大地の比抵抗が高いほど、入射する電磁場の周波数が低いほど、探査深度は深くなる。

ところで、自然界に存在する電磁場は様々な発生の起源をもつ。Hz 以上の周波数帯の電磁場で最も重要な源

は気象現象、すなわち、雷活動に由来するものである。また、Hz 以下の周波数帯の自然電磁場変動の源は、地球磁場と太陽から吹きつけられているプラズマ流の複雑な相互作用に由来する⁶⁾。高压電線や電灯線、電気鉄道からの漏洩電流など種々の人工的ノイズの影響を受けやすい我が国の調査では、特に、太陽活動に起源をもつ地磁気あらしと呼ばれる現象の存在は重要である。このような現象を狙い、広帯域にわたり自然信号強度の高い電磁場変動を測定することができれば、より詳細な地殻深部の比抵抗構造の推定が可能になる。

表-1 種々の比抵抗及び周波数に対するスキンドープス(m)⁶⁾

| Frequency, (Hz) | Skin depth (m) for resistivity of | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 | 300 (ohm-m) |
| 1000 | 15.9 | 27.6 | 50.3 | 87.6 | 159.2 | 277.1 |
| 100 | 50.3 | 87.2 | 159.2 | 277.1 | 503.3 | 876.1 |
| 10 | 159.2 | 275.8 | 503.3 | 876.1 | 1591.0 | 2770.0 |
| 1.0 | 503.3 | 872.2 | 1591.0 | 2770.0 | 5032.0 | 8761.0 |
| 0.10 | 1591.0 | 2758.0 | 5032.0 | 8761.0 | 15915.0 | 27705.0 |
| 0.01 | 5032.0 | 8721.0 | 15915.0 | 27705.0 | 50329.0 | 87611.0 |
| 0.001 | 15915.0 | 27580.0 | 50329.0 | 87611.0 | 159154.0 | 277052.0 |
| 0.0001 | 50329.0 | 87216.0 | 159154.0 | 277052.0 | 503290.0 | 876117.0 |
| 0.00001 | 159154.0 | 275801.0 | 503290.0 | 876117.0 | 1591545.0 | 2770525.0 |
| 0.000001 | 503290.0 | 872161.0 | 1591545.0 | 2770525.0 | 5032909.0 | 8761170.0 |

3. 山陰地方の地震・火山研究と比抵抗研究の接点

本章では、山陰地方の地震活動や活構造に関する諸問題⁶⁾を基礎として、この地域での比抵抗研究を実施する意義やその背景を記す。

最初に、山陰地方の地震活動の興味深い特徴に関して述べる。中国地方の日本海側周辺では、顕著な活断層がみられない場所でも内陸の大地震がほぼ線上配列をもって発生し、日本海沿岸にそう地震活動の帯⁷⁾がみられるという観測事実がある。明治以降、M7 前後の浜田、鳥取、但馬、北丹後、そして 2000 年鳥取県西部地震などの内陸大地震が発生した。しかし、これらの大地震を起こした活断層は、あっても活動度の低い活断層である (浜田、但馬については、起震断層らしい活断層は震央付近には見つからない) ことが知られている⁸⁾。このことは、この地域の地震防災を考える際に、活断層の存在を振り所とするような既往の方法論は適用できないことを意味する。新しい考え方に基づく方法論を提案する必要がある。

また山陰地方では地震活動の線上配列に調和的に、三瓶山、大山、扇ノ山など、北部に第四紀火山が疎らに存在する。しかし、これら第四紀火山とプレートの沈み込みとの関係、フィリピン海プレートの沈み込みの北限位置も未解決の問題の一つとして残っている⁹⁾。このように火山フロントも不明瞭で、やや長い期間噴火活動を行っていない火山学的特徴をもつ山陰地方における広域の深部構造探査をもとにした新たな研究の展開が望まれる。

さて、これらの諸問題と比抵抗研究はどのような接点

をもつ可能性があるのだろうか？

Miyakoshi and Suzuki⁽¹⁰⁾は、地磁気変化の空間分布を説明するために、鳥取地震（1943年、 $M=7.2$ ）の地震断層である鹿野・吉岡断層下の地殻中に、南側へ傾斜した電気的良導体が貫入する先駆的な「模式的」比抵抗モデルを提出した（図-1）。このモデルでは、活断層である吉岡・鹿野断層は、電気良導体の北側の境界の地表への延長線として捉えられており、断層下では、貯蔵庫としての良導体から脆性領域に導入された水が微小地震を発生させる可能性が示された。

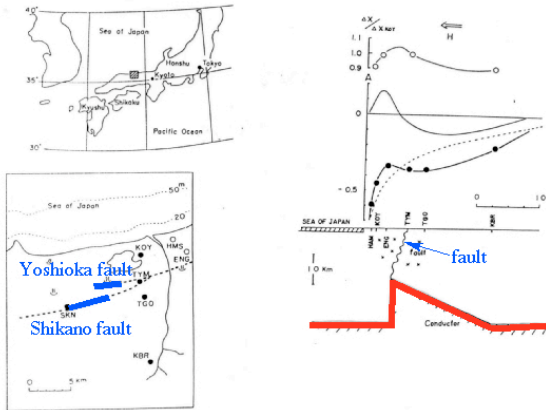


図-1 鹿野・吉岡断層下の「模式的」比抵抗モデル
Miyakoshi らの図に断層位置を青色で、良導体の輪郭を赤色で強調した。

その後、日本列島の大局的な構造を解明するために行われた NTT の通信回線を利用したネットワーク MT 法観測⁽¹¹⁾から明らかになった山陰地方東部(鳥取・郡家・美作)の 2 次元比抵抗構造によると、日本海側沿岸部(すなわち、地震帯周辺部)には、ある程度の規模をもつ低比抵抗領域(数 $10\Omega\text{m}$) がモホ面付近に存在し、地殻下部へくさび状に盛り上がっていることが分かった⁽¹²⁾。Miyakoshi らが提出した「模式的」モデルと調和する全く別の方法論による「定量的」モデルが得られた。ここで、強調したいことは、いずれの研究成果も比抵抗構造と地震活動の関連を示唆していることである。

しかしながら、ネットワーク MT 法観測はマントル上部までを含む大局的な構造を研究対象とする調査方法であるため、山陰地方東部の比抵抗構造と内陸地震活動や活断層との関連性を解き明かすためには、活断層周辺(地震活動の活発な地域帯の概念も含めて)の地表から深部へかけて「定量的かつ詳細な」比抵抗構造が解明されなければならない。また、ほぼ時を同じくして、兵庫県南部地震に関する地震学的研究から内陸大地震の発生に下部地殻深度の流体の関与を示唆する成果が提出された⁽¹³⁾。

このような背景のもと、筆者らの研究グループは「山陰地方には地殻深部流体が存在し、その流体が鳥取県西

部地震をはじめとする大地震を引き起こすとともに、この地方にみられる線状配列を成す微小地震活動の原因となっている。」という作業仮説を考えた⁽¹⁴⁾。この仮説をふまえ、「特に、内陸地震発生の際に注目される活断層下深さ 15~20km 付近の比抵抗構造の精密化」⁽¹⁵⁾により震源域の流体分布や不均質構造を探ることは地震予知研究の最重要課題であると考え、山陰地方東部地域の広域的な比抵抗構造を求め、この仮説の妥当性を検証し、地震活動(震源分布)と地質構造(活断層・第四紀火山など)との関連を探ることを目的とした広帯域 MT 法を用いた観測研究を開始した。

4. 広帯域 MT 法からみえた山陰地方の比抵抗構造

鳥取大学大学院工学研究科は、主に京都大学防災研究所と共同して、これまでに、山陰地方東部において顕著な地震の震源域およびそれらを含み日本海沿岸部に沿う帯状の地震活動域を横切るような測線で、広帯域 MT 法を用いた深部地殻比抵抗構造調査に着手し、現在も継続して、中国・四国地方の比抵抗研究に取り組んでいる(図-2)。ここでは、山陰地方で実施された比抵抗研究成果として、鳥取東部地域で得られた結果を例示することで、この地域の深部比抵抗構造と地震活動との関連性を記す。

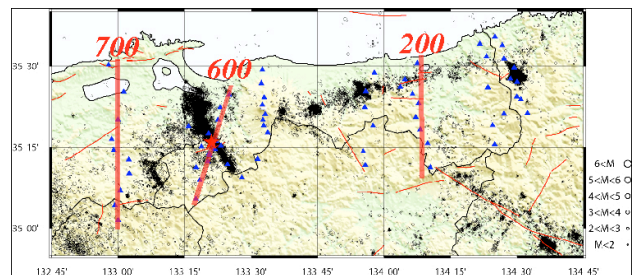


図-2 山陰地方における広帯域 MT 法観測点(▲)と震央(○)の分布図 これまでの山陰地方の観測では兵庫県北部から島根県東部にかけて複数の測線が設定された。本稿で触れる 3 測線の測線の位置及び測線名称を示す。

鳥取東部では、鳥取地震の地震断層である吉岡・鹿野断層を横断するような測線(200 番測線)で 2 次元比抵抗構造モデルが推定された(図-3)。このモデルの特徴は次の通りである。全般的には地殻は $k\Omega\text{m}$ 以上の高比抵抗領域が占めているが、海岸線の地殻深部には $50\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗領域が存在している。1943 年鳥取地震の主破壊はこの深部低比抵抗領域とその上部高比抵抗領域との境界部に位置し、山陰地方の地震活動帯はこの高比抵抗である地殻部分に限られている。この 200 番測線の研究では、先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と調和的な「定量的かつより詳細

な」比抵抗構造を得た。このことにより、比抵抗構造と地震活動の明瞭な関連性を確認した。

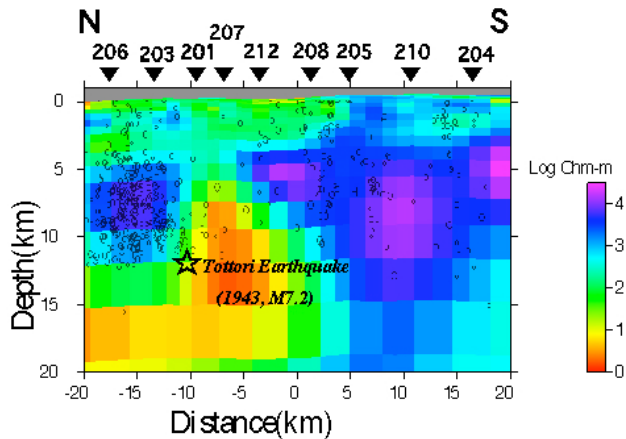


図-3 鳥取県東部の2次元地殻比抵抗構造⁽¹⁶⁾
 図面左が北、右が南を指す。寒色系が高比抵抗を示し、暖色系が低比抵抗を示す。1943年鳥取地震の主破壊の震源位置を星印で示し、他の震源分布を丸印で示す。

その後、この鳥取東部地域以外にも、鳥取県西部地震(2000年、M7.3、図4の600番測線)震源域調査⁽¹⁷⁾をはじめとして、鳥取県中部地震(1983年、M6.2)等、兵庫県北部の地震(2001年、M5.4)など、鳥取県周辺域で発生した顕著な内陸地震の震源域周辺域で同様の調査が実施された。その結果、共通する特徴として、山陰地方東部では日本海の海岸線に沿うようにほぼ東西方向に伸びる地震活動帯の地下には、高比抵抗領域である地震発生層下の地殻深部に低比抵抗領域が存在すること、また、中-大規模地震はこれらの高比抵抗と低比抵抗領域の境界部で発生することが明らかになった。このことが山陰地方の比抵抗研究が明らかにした最大の成果である。

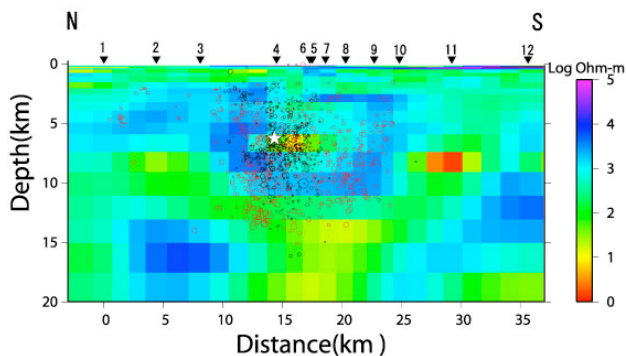


図-4 鳥取県西部の2次元地殻比抵抗構造⁽¹⁸⁾
 2000年鳥取県西部地震の主破壊の震源位置を星印で示し、他の震源分布を○印で示す。

5. 成果は何を意味するのか？

内陸大地震が発生する地殻深部には低比抵抗領域が存在する。そして、大地震の震源を含む特徴的な地震活動はその低比抵抗領域とその上側の高比抵抗領域の境界部分、もしくは、高比抵抗領域側で発生している。山陰地方の広帯域MT法調査から得られたこの成果は、もし、低比抵抗領域が流体に富む領域の存在を表すのであれば、山陰地方の比抵抗研究が検証すべきとした作業仮説と調和的な成果といえる。

では、地殻深部の流体(低比抵抗領域)の存在は地震発生にどのような意味を持つのであろうか？

この問題に関しては、作業仮説作成⁽¹⁹⁾以降に飛躍的に進んだ内陸地震の発生過程に関する地震学的研究成果に関する飯尾によるレビュー⁽¹⁰⁾を参考にして、本稿で述べた研究内容が直接関与した部分の紹介を通して説明したい。

Iioらは、GPSの観測網が導いた新潟-神戸歪集中帯と比して、中国地方及び関東地方北部ではひずみ速度が小さいことに注目し、これは下部地殻の岩石の流動変形のしやすさによるものではないかと考え、流体に関連づけられる比抵抗・ヘリウム3/4比データをも矛盾無く説明できる、Water-Weakened Lower Crust Hypothesis(水で弱体化された下部地殻仮説)と呼ばれる仮説を提唱した⁽⁹⁾。このモデルにより、定性的ではあるが初めて、陸側プレートの下部地殻の不均質性が内陸の変形過程をコントロールする可能性が示された⁽⁹⁾。

さらに、飯尾らは、鳥取県西部地震の合同余震観測のデータをもとにした中国地方広域の応力場の詳細な解析から、山陰地方の地震帯直下に低粘性領域を仮定すると最大主圧縮応力軸の向きの回転という観測結果が説明できる⁽²⁰⁾ことを根拠に、地震帯直下の下部地殻の不均質構造により、直上で応力集中が発生していると考えられる⁽¹⁾とした。つまり、内陸の地震がなぜ起こるのかという謎が、謎でなくなりつつある⁽⁹⁾。

このようにして、陸側プレートの下部地殻の不均質性や断層直下の不均質構造の存在を仮定すると(すなわち、下部地殻に低比抵抗領域(Water-Weakened Lower Crust)の存在を仮定できれば)内陸地震の発生の原因となる局所的な応力集中が起きることを示す初期モデルが提出されるに至った。地震学的な研究成果に、山陰地方の比抵抗研究データを加味することで、少なくとも山陰地方では内陸地震の発生メカニズムを定量的に解明する明確な緒が見えたことになる。このことは内陸地震の発生過程を考える上できわめて重要なことである。

6. 次なる課題, おわりにかえて

前章ではまとめとして、「山陰地方では内陸地震の発生メカニズムを定量的に解明する明確な緒が見えた」と記したが、この記述は、地殻深部の低比抵抗領域はレオロジー的には変形しやすい存在でなければならないことを大前提にしている。では、もはやこれ以上、「水で弱化された下部地殻仮説」の妥当性を検証する必要はないのだろうか？その問いかけに対する手がかりを探しつつ本稿を終えたい。

これまでの比抵抗研究の対象は主に地震活動域に限定されており、これまで述べてきたような比抵抗構造の特徴が山陰地方の地震活動帯特有の構造であるかどうかは、本来、明言できないという立場を取ることが正しい。山陰地方には、上述のような地震活動や大地震の発生がみられる一方、殆ど地震活動がみられない地域も存在している。その代表例が「山陰地方の第三種地震空白域、すなわち、島根半島の付け根の宍道湖南方地域」である²¹⁾²²⁾。この島根県東部の地震空白域下では、下部地殻のみならず、上部地殻にも流体を示唆する深部低比抵抗領域が存在することが分かった²³⁾。今後は、同様の調査を他の地震活動が殆どみられない地域で実施、知見を得ることで、地震活動帯下のみ存在する構造の特徴を明確にすることが必要である。

また、近年、大志万らは、西南日本背弧の地殻・マントル比抵抗構造モデルを構築するために山陰沖・日本海域を含む地域で MT 調査を開始した²⁴⁾。これにより、本稿で紹介した山陰地方に遍くみられる地殻深部低比抵抗領域の源を陸海境界部を超えて水平方向・深さ方向に探る研究が進められつつある。特に、鳥取・島根県境付近には深さ 30km に深部低周波地震が集中して発生する領域があるので、この領域と比抵抗研究を通してみえた深部地殻比抵抗領域の関係を、西南日本背弧の地殻・マントル比抵抗構造という大局的な見地から明らかにし、山陰地方の地震発生原因としての深部地殻流体の起源に迫る知見を得る必要がある。

さらには、2011 年東北地方太平洋沖地震を受けて、山陰地方沖、日本海の地下構造解明もふまえた中国地方を広く取り囲む海底域での活断層研究についてこれから新たな扉を開く必要がある。そしてその際に得られる知見を内陸地震発生過程モデルの構築、並びに、中国地方の地震災害の軽減へ繋げられるよう比抵抗研究を前進させることが求められる。

これらのことが山陰地方の比抵抗研究において今後取り組むべき課題であると考えている。ありがたいことにこの研究には人工的なシグナルは不要である。入力源は自然界に満ちあふれている。私たちはただそれを観測するだけでよい。

謝辞 :

本研究は、鳥取大学工学部及び大学院工学研究科地圏環境工学研究室で、地球電磁気分野の研究を卒業論文や修士論文の研究の一環として取り組んだ、多くの学生達と共に取得した観測データをもとにしている。また、この観測研究の一部は文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けている。

ここに謝意を表します。

参考文献

- 1)飯尾能久：内陸地震の発生過程，地震2，第61巻特集号，S365-S377，2009.
- 2)飯尾能久：内陸地震はなぜおこるのか？，近未来社，2009.
- 3)上嶋誠：3.6電気比抵抗と水，地震発生と水，東京大学出版会，pp.283-296，2003.
- 4)Cagniard, L. : Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, 18, 605-635, 1953.
- 5)Kaufman, A.A. and Keller, G.V. : The magnetotelluric sounding method, 15, Methods in Geochemistry and Geophysics, Elsevier, 1981.
- 6)塩崎一郎，大志万直人：山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の意義，月刊地球，Vol.22，No.1，pp.22-28，2000.
- 7)中尾ら：地震活動帯における空白域と地震発生の関係について，京都大学防災研究所年報，第34号，B-1，pp.231-251，1991.
- 8)松田時彦：第3章地質構造から見た歴史地震，続古地震-実像と虚像（萩原尊禮編），東京大学出版会，pp.39-78,1989.
- 9)伊藤潔：西南日本の地震活動とテクトニクス，地震2，第43巻，pp.555-569，1990.
- 10)Miyakoshi, J. and Suzuki, A. : Geomagnetic Induction Study of the Seismically Active Fault along the Southwestern Coast of the Sea of Japan, J. Geomag. Geoelect., Vol.30, No.5, pp.549-560, 1978.
- 11)Uyeshima *et al.* : Network-MT survey in Japan to determine nation-wide deep electrical conductivity structure, In Seismotectonics at the Convergent (Eds.Y. Fujinawa and A. Yoshida), Terra Science Publishing Company, Tokyo, pp.107-121, 2002.
- 12)塩崎ら：ネットワークMT法観測から得られた中国地方東部の電気比抵抗構造（序報），鳥取大学工学部研究報告，第30巻，第1号，pp.49-60，1999.
- 13)Zhao, D., and Negishi, H. : The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, J. Geophys. Res., 103, pp.9967-9986, 1998.
- 14)塩崎ら：広帯域 MT 法を用いた 2000 年鳥取県西部地震震源域の深部比抵抗構造調査（序報），京都大学防災研究所年報，第 44 号，B-1，pp.293-303，2001.
- 15)大志万直人：地震予知のための電磁気学的ターゲットとは何か？，月刊地球，号外 No.17，pp.169-174，1997.

- 16) Shiozaki *et al.* : Deep crustal resistivity structure derived from the wide band MT investigations in the eastern part of Sanin region, southwestern Honshu, Japan, IUGG2003 JSA10/30P/D-006, XX111 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 2003.
- 17) 2001年地殻比抵抗研究グループ(研究統括：塩崎一郎・大志万直人)：鳥取県西部地震震源域周辺での深部比抵抗構造探査の概要，京都大学防災研究所年報，第45号，B，pp.489-497，2002.
- 18) Oshiman *et al.* : Deep crustal resistivity structure in and around the focal area of the 2000 Tottori-ken seibu earthquake, Japan, IUGG2003 JSA10/30P/D-005, XX111 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 2003.
- 19) Iio, Y., Sagiya, T., Kobayashi, Y. and Shiozaki, I. : Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth and Planetary Science Letters*, 203, pp.245-253, 2002.
- 20) Kawanishi *et al.*: Local stress concentration in the seismic belt along the Japan Sea coast inferred from precise focal mechanisms: Implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2008JB005765, 2009.
- 21) 石川有三：日本列島内陸部の地震活動空白域，月刊地球，Vol.12, No.6, pp.355-361, 1990.
- 22) 石川有三：地震活動空白域の意義，月刊地球，号外No.13, 71-80, 1995.
- 23) Shiozaki *et al.* : A two dimensional resistivity structure beneath the seismic gap in the eastern part of Shimane prefecture, San-in region, Japan, 18th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, El Vendrell, Spain, 2006.
- 24) 大志万直人ら：西南日本背弧における海域・陸域での地磁気電位差観測の概要，京都大学防災研究所年報，第53号，B，pp.181-189，2010.
- 25) Ohmi, S. *et al.* : Deep low-frequency earthquakes near the downward extension of the seismogenic fault of the 2000 Western Tottori earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.56, No.12, pp.1185-1189, 2004.