

安定陸塊域の活断層

TOGO, Masami / 東郷, 正美

(出版者 / Publisher)

法政大学地理学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

JOURNAL of THE GEOGRAPHICAL SOCIETY OF HOSEI UNIVERSITY / 法政地理

(巻 / Volume)

47

(開始ページ / Start Page)

9

(終了ページ / End Page)

20

(発行年 / Year)

2015-03

安定陸塊域の活断層

東郷 正美

安定陸塊域（SCR）でも大地震が起こることを世界の歴史が証明している。我々人間の生活舞台となっているSCRでの地震発生は、言うまでもなく重要な自然災害の誘因として注視されねばならない。このような視点をもつてSCR地震・断層研究が、1980年代後期から本格化し、軌道に乗る。本稿では、このSCR地震・断層に関する研究史を概説し、これまでの成果と残された課題を整理する。

I はじめに

“SCR earthquake”・“SCR fault”という語に、1990年代以降、接することが多くなった。SCRは、stable continental regionの略称であり、人によっては、同義のstable continental craton、あるいは、stable cratonic coreに注目して、SCCを用いる。安定大陸域で起こる大地震やその震源となる断層活動に注目した用語である。“安定大陸域で起こる大地震”という表現を奇異に感じる人も少なからずいよう。「安定地域」とは「激しい地殻変動

がない地域」を意味し、大地震の発生や火山活動とは無縁の存在と受け取るのが一般的である。変動帯域に生きる人々にとって大地震は共とする存在であり、その震源となる「活断層」もすでに馴染みとなっているが、SCR域では、言うまでもなくそれらは永らく考慮外におかれてきた。しかし、これまでに発生した地震の記録をみれば、SCR域で起こったものは数多くあり、その中にはマグニチュード6～7クラスの大震災も含まれていたことに気づく(図1)。SCRは我々の生活舞台である。都市化の進展で密なる生活域がSCRの多くを占め

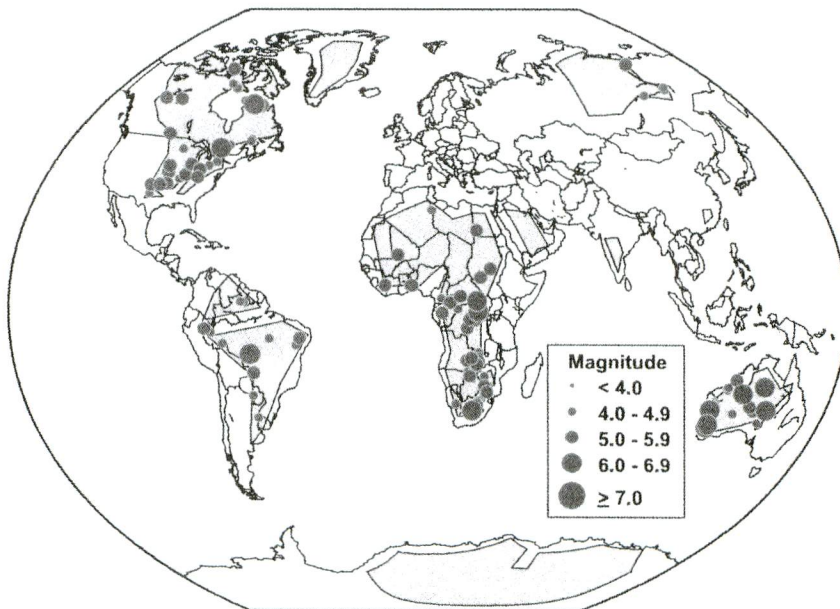


図1 世界におけるSCR分布とその地震活動(Fenton *et al.*, 2006)

網点部がSCR域にあたるが、それぞれの広がりにはJohnson(1989)が定義して区分したものと異なっている。Johnson(1989)は、基本的に先カンブリア系岩盤からなる楯状地・卓状地に古生代褶曲帯を加えたものの分布域をSCRとみなし、それに該当する地域を世界で9つ区分したが、ここでは先カンブリア系岩盤からなる地域を中心にする考えに基づいているため、それぞれ小さく描かれている。

るに至った今日において、その直下で起こるこの種の地震は、規模が小さくても大きな災害を引き起こす恐れがあり、社会的脅威として注視すべき存在となった。SCR地震の一般性を知り、発生の構造的背景・メカニズムを解明してその予知を実現することが緊急の重要課題として浮上してきているのである。

II 1811-12年New Madrid地震

アメリカ合衆国で、同国本土部で発生し地震の規模別ランキングで永らく第一位の座にあったのが、この1811-12年New Madrid地震である。ミシシッピー川の中流、オハイオ川の合流点を少し下った地点を震源としたこの地震は、1811年12月から翌年2月にかけて3連発した大地震群からなり、その規模は、12月16日に発生した最初の大地震がM8.1、1月23日と2月7日のものがそれぞれM7.8、M8.0とされた(Johnston,1996c. 近年USGSはそれぞれ7.7, 7.5, 7.7の値を用いている)。独立後間もない時代の未開地の広がる内陸部での出来事で、被害の実態は正確に把握されていないが、震央付近一帯ではMMI震度階XI相当域が出現したとされている(Nuttli,1973)。同国では、1886年8月31日にも“東部”・大西洋岸近くでM7.3の大地震(1886年Charleston地震)が起こり、60名の死者がでた¹⁾。これらは、典型的なSCR大地震であり、その発生が現代であれば、この国最悪級の自然災害を引き起こしたに違いないと誰もが思う出来事であった。

北米の“西部”では、1906年のM7.8の大地震で、新興の大都市San Franciscoが壊滅的な被害を被る。最近では、この時の死者の数は3000人にのぼり、被害総額も5.24億ドルに達していたとみられている²⁾。プレート境界に当たるSan Andreas断層の活動で生じた大地震で、この時、同断層の北部区間に沿い長さ470kmに達する地表地震断層が出現した(Thatcher *et al.*,1997など)。“西部”域では、この後もSan Andreas断層沿いやBasin and Range地区で地表地震断層を伴った大地震・被害地震が相次いで起こり続けた(Bonilla,

1967; Wallace, 1990; U.S.Department of the Interior and Commerce, 1971; dePolo *et al.*,1991; Hart *et al.*,1993; Caskey *et al.*,2000など)。このような事態を受けて、北アメリカ・プレート西縁部の変動帯を対象とした地震学、そして活断層学は大いに発展することとなる。

地震学や活断層学が変動帯の学としての性格を強め、成果をあげていく中で、アメリカでは、1970年代中頃、非変動帯域の大地震「1811-12年New Madrid地震」に関する調査研究が表面化する(Mckeown and Pakiser, 1982)。この出来事は、「アメリカ最大地震New Madrid地震はなぜ安定陸塊域で起こったか」という“seismological enigma”(Johnston and Schweig,1996)への挑戦を意味し、これが原点となってNew Madrid地震で象徴される“SCR earthquake”研究への流れが導かれる。“SCR earthquake”という概念を持ち出してその調査研究の必要性和意義を唱えたJohnson (1989), Johnston *et al.* (1994)はこの過程で登場し、SCRを改めて定義した(図1)うえでそこで起こった歴史地震のカタログ作り、そして、これを基礎資料にしてSCR地震の一般性について検討を始める(Johnston, 1996abcなど)。

III 「SCR地震」研究から「SCR断層」研究へ

変動帯とは全く無縁のオーストラリア大陸、その中央部において顕著な地表地震断層を伴った大地震が1986年と1988年に相次いで発生するという出来事が起こった。前者がMarryat Creek地震(Ms5.8)、後者はTennant Creek地震(Ms6.3~6.7)と呼ばれている(Bowman,1992)(図2)。この大陸では、1968年Meckering地震(Ms6.8)、1970年Calingiri地震(Ms5.1)、1979年Cadoux地震(Ms6.0)でも、それぞれ長さ約37km, 3.2km, 15kmの地表地震断層が生じている(Gordon and Lewis, 1980; Lewis *et al.*,1981; 松田, 1982; 東郷, 1992a, 2004)。この後僅か10年の内にそのような事例がさらに2つも追加され、1989年には東部のNew Castleを襲った地震³⁾でついに死者を出すことになったオーストラリアでは、これらを単に珍しい

安定陸塊域の活断層

出来事として見過ごせない事態となり、震災が自然災害問題上一級の課題として明確に認知されるに至る。

SCR地震に関心を寄せるアメリカの活断層研究者はこの一連の出来事を見逃さず、1988年Tennant Creek地震発生後直ちに本格的な現地調査に取りかかった (Crone *et al.*,1992; Machette *et al.*,1993)。彼らの調査は、地表変位に関する記載学的レベルにとどまらず、トレンチ法を用い、断層活動履歴の解明をも目指すものであった。SCR地震の本質をその震源となる断層の構造とその活動性に照らして解き明かそうとする意図が明確に読み取れる。斯くして安定大陸“オーストラリア”は、SCR断層研究の主舞台となる。Tennant Creek地震断層・Marryat Creek地震断層に引き続いて南オーストラリア州Eyre半島にあるRoopena断層

(Dunham,1992)、西オーストラリア州南西部のHyden断層 (Chin *et al.*,1984) が調査対象に選ばれ (Crone *et al.*,2003)、さらに地元オーストラリアの研究者を巻き込んでタスマニア島のLake Edgar断層のトレンチ調査 (McCue *et al.*,2003; Clark *et al.*,2011a) へと進んでいく。調査対象となったこれらの断層は、1968年Meckering地震以降、既存調査研究の再点検と新たな地形・地質調査の展開で、新鮮な低断層崖を伴った断層として知られるようになったものの一部にあたる (図2)。

オーストラリアにおけるSCR断層調査と平行して北米でも、同じ観点からオクラハマ州のMeers断層 (Donovan *et al.*,1983; Ranmelli and Slemmons, 1986; Madole, 1986, 1988; Crone and Luza, 1986; Luza *et al.*,1987) やコロラド州のCheraw断層 (Scott, 1970)、Anton escarpmentを

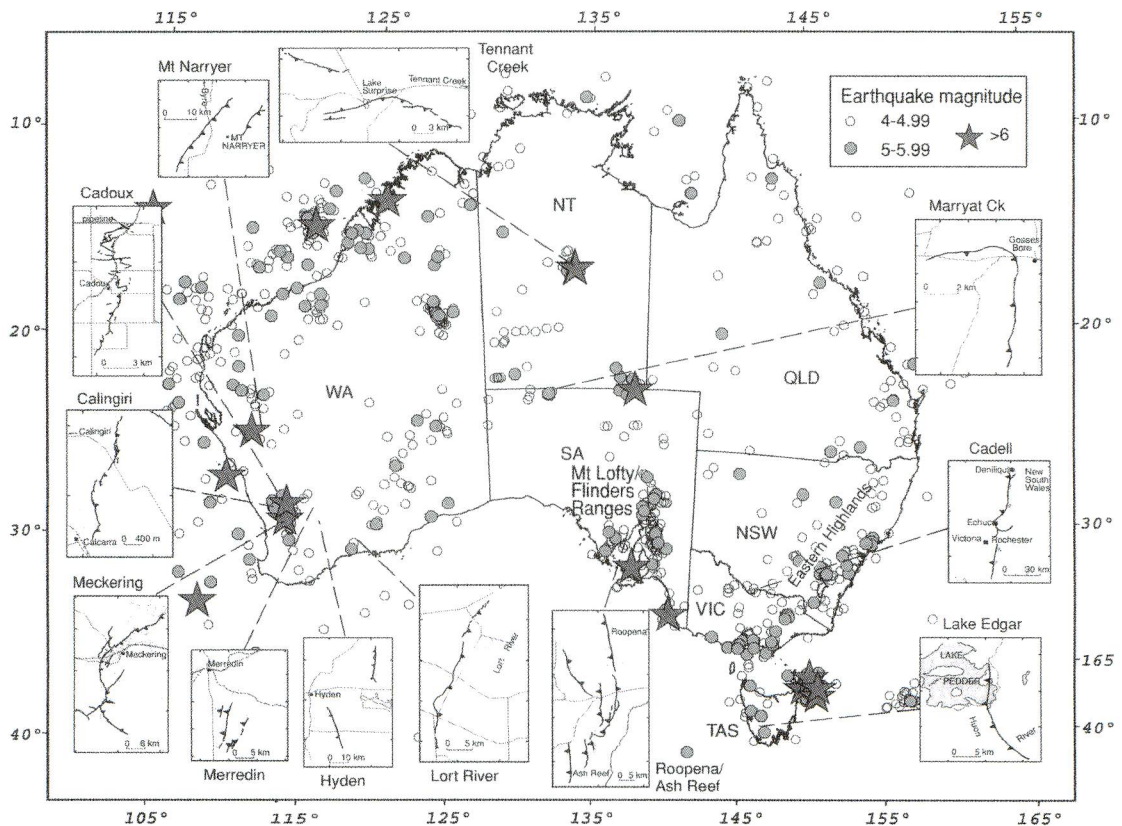


図2 オーストラリアにおける地震活動(1900—2002)と地表地震断層・若い低断層崖を伴う断層の分布 (McCue, 2001に基づく Clark and McCue, 2003)

対象とした調査研究が進められた (Crone and Luza, 1990; Crone *et al.*, 1997b; Noe, 2010). これらはいずれもロッキー山脈東側山麓線から遠く離れたグレートプレーンズ区内に位置しており, Meers断層については, 左ずれの活断層と見なせ, その最新活動は1200-1300年前にあったことが, また, Cheraw断層も, 最近の2~2.5万年内に3回活動を繰り返していることが明らかとなっている.

IV もう一つのSCR断層研究

北西ヨーロッパのバルト海周辺地域は, 世界的な楕状地の一つとして知られ, 最終氷期には北西ヨーロッパ域に広がった広大な大陸氷床の核心部となったところでもある. フェノスカンジア楕状地あるいはバルト楕状地の名で知られるこの地域において, 最終氷期に形成された氷河地形を変位させて生じた低断層崖がいくつも存在すること

を明らかにしたのは, Kujansuu (1964) であった (東郷・井上, 2001). Kujansuu (1964) が取り扱ったのは, フィンランド北西部域で見出された6つの事例であったが, その後, この種の調査研究は周辺域に拡大し, 今日では, このような若い低断層崖地形 post-glacial faultscarp の分布状態の全容が明らかとなっている (例えば Donner, 1995; Olesen *et al.*, 2004). 図3は, post-glacial faultscarp の分布が集中するスカンジナビア半島北部域の様子を表しているが, これを見ると, 低断層崖は一定の方向性をもって発達することが分かる. これらのほぼすべてが逆断層崖と見なされている (Olesen *et al.*, 2004, 2013).

この地域では, 後氷期に著しい土地の隆起が起こっている. 隆起速度は, 大陸氷河の核心部 (バルト海北部ボスニア湾北西部) でもっとも大きく, そこから周縁部に向けて減ずる傾向を示すことから, この隆起現象は, ここに存した大陸氷河の融解・消滅, すなわち地表過重の減少に伴う地殻のアイソスタティック・リバウンド glacio-isostatic rebound に起因する曲隆運動と見なされている. 図3のように, post-glacial faultscarp

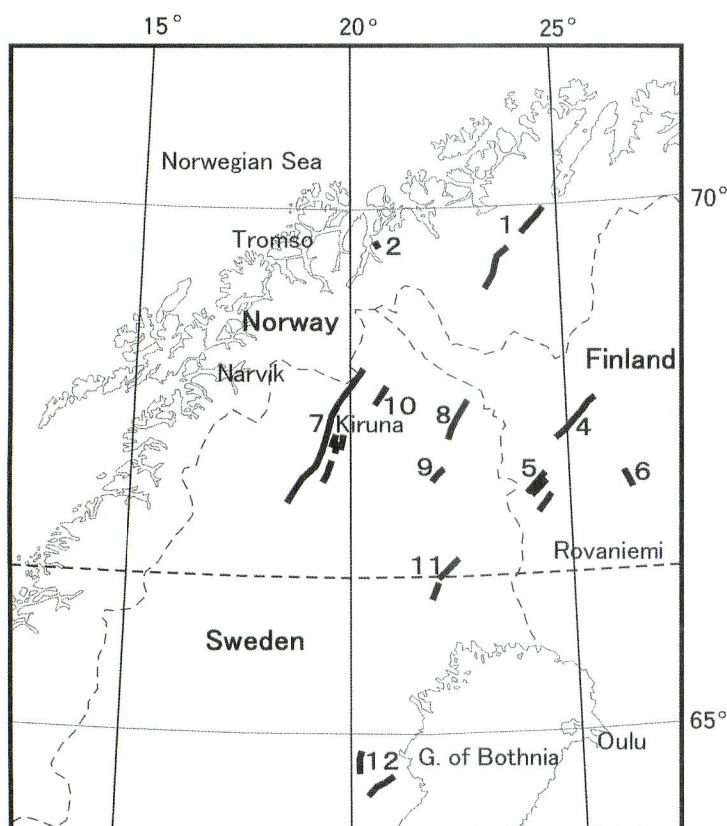


図3 スカンジナビア半島北部における post-glacial faultscarp の分布 (Olsson *et al.*, 2004 に基づいて作成)

- | | |
|--|--|
| 1:Stuoragurra fault (80km,7m), | 2:Nordmannvikdalen fault (2km,1m), |
| 3:Berill fault (2.5km,3m), | 4:Suasselkä fault (48km,5m), |
| 5:pasmajärvi-Venejärvi fault (15km,12m), | 6:Vaalajä fault (6m,2m), |
| 7:Pärve fault (150km,13m), | 8:Lainio-Suijjavaara fault (55km,c.30m), |
| 9:Merajärvi fault (9km,18m), | 10:Pirttimys fault (18km,2m), |
| 11:Lansjärvi fault (50km,22m), | 12:Burträsk-Bastuträsk fault (60km,c.10m). |

※() 内の数値 [前者:断層の長さ, 後者:断層崖の比高].
3:Berill faultはこの図の外, ノルウェー南部に位置する.

群は、このような変動が進行する地域にあって、その等隆起速度線と調和する方向性を持つことから、glacio-isostatic reboundによる地殻の変形、歪みの集中と関係して生じたものと考えられる (Donner, 1995). 東郷・井上 (2001) は、かつてこれら postglacial fault を、その地形形態的特徴から高角の逆断層と考え、このような低断層崖は、glacio-isostatic reboundの進行に伴いその縁辺部でそれまでの伸張応力場が圧縮性応力場に反転した結果、伸張応力場で生じた正断層群の一部が、逆向きに再動して形成された可能性があるとした。glacio-isostatic reboundに関連づけた断層研究は、その後、ヨーロッパの他の地域へと拡散し (Mohr, 1986; Davenport *et al.*, 1989; Superson *et al.*, 2013など)、さらに、北アメリカにも波及してカナダなどで盛んに試みられることとなる (Oliver *et al.*, 1970; Thompson, 1981; Adams, 1989; Adams *et al.*, 1993; Fenton, 1994など)。

V 1989年Ungava地震がもたらした興奮

1989年12月25日にこのUngava地震は起こった。カナダ東部のラブラドル半島からさらに北に突出するUngava半島の中部に震源を持つMs6.3のこの地震は、長さ8.5kmの顕著な地表地震断層 (最大上下変位量: 1.8m) を伴ったこと、そして、発生場所がカナダ楕状地の中であったこと (Adams *et al.*, 1992) で、北米のSCR地震・断層研究者の関心がこれに集中することとなる。Crone (1991) を皮切りにして、雑誌「ネイチャー」紙上でこの地震がもつ特別な歴史的意味を、Adams *et al.* (1991)、そしてJohnston (1992) が次々と指摘する。後二者がこのとき用いた論文のタイトル、"The first surface faulting from a historical intraplate earthquake in North America", "Intraplate not always stable" から、地表地震断層を伴ったSCR地震の発現という、北米では歴史上初の出来事に自ら立ち会えたことによる興奮ぶりがうかがえる。1989年Ungava地震は、直ちに地表地震断層を伴ったSCR歴史地震の仲間入りし、この時点で、そのような事例は、既知の1891年

Cutch地震, 1939年Accra地震, 1966年Sudan地震, 1968年Meckering地震, 1970年Calingiri地震, 1979年Cadoux地震, 1983年Guinea地震, 1986年Marryat Creek地震, 1988年Tennant Creek地震にこれに加わって10例となった (Machette *et al.*, 1993; Crone *et al.*, 1997a)。

1989年Ungava地震の震源地は、最終氷期に巨大なローレnciaイド氷床が発達した地域内にあり、その中心部のやや外側に位置している。このことは、1989年Ungava地震がglacio-isostatic reboundと関係したものであることを強く示唆する。glacio-isostatic reboundと関係した postglacial faultingによる低断層崖形成の場に立ち会った人は未だ全く知られていない。今回の出来事がこの種のものなら世界初の目撃経験となり、その歴史的意味はより大きいと思えるが、この側面に触れる向きは未だない。北欧で始まったglacio-isostatic rebound で生じる断層の研究とSCR断層研究の流れは、この1989年Ungava地震をもって交わったように思える。しかし、上述のMeer断層やCheraw断層、Roopena断層、Hyden断層などはprehistoric SCR断層として扱われるが、図3の断層群をその仲間に入れる人は今のところいない。

VI その後の展開

1990年代以降において、地表地震断層を伴った地震の発生が相次いでいるSCRが2つある。オーストラリア大陸では1960年代~1980年代に5つも地表地震断層の出現を見たことを上述したが、ここでは、2007年に西オーストラリア州の南西端部でKatanning地震 (Mw4.7) が起こり、長さ約1.3kmの地表地震断層が、さらに2012年に南オーストラリア州で発生した Ernabella (Pukatja) 地震 (Mw5.4: ML:5.7) でも長さ約1.6kmの地表地震断層が出現したことが確かめられている。前者は、SAR (Synthetic Aperture Radar) による探査によって捉えられたもので、その上下変位量は最大約25cmと推定されている (Dowson *et al.*, 2008)。後者は、先に取り上げた1986年Marryat Creek地

震の震源とごく近い位置（僅か70kmほど西）で発生したもので、詳しい現地調査により逆断層型で地表を最大約50cm上下変位させたことが明らかにされている（Clark *et al.*,2014）。オーストラリア大陸では、1968年Meckering地震以後約45年の間に、地表地震断層を伴った地震が7つも起こっており、平均1度/約7年という発生頻度は、変動帯でも異例の範疇に入るといえよう。オーストラリアでは、断層地形研究は意外にも古くからテーマの1つとなっていた（Twidale, 1971；Ollier,1981；東郷, 1992bなど）。その成果の再評価作業や新たな活断層調査も進展しており（Quigley *et al.*,2006；Clark *et al.*,2010；McPherson *et al.*,2012など）、オーストラリアは、その後もSCR地震・断層研究の主舞台で有り続けている。

地表地震断層を伴った地震が頻発しているもう1つのSCRは、インド半島部（インド楕状地）である。その北西部で1819年に起こったCutch（Cuch,Kach,Kachchh,Kutch）地震は、Ms7.25～8.25の大～巨大地震で、長さ90km以上で最大7～9mの上下変位をともなった地表地震断層を出現させたこととされ（Bilham, 1999など）、いち早くSCR大地震・断層事例の1つに採用された（Machette *et al.*,1993；Crone *et al.*,1997a）。これの近くで1997年にJablpur地震（Mw5.8）、そして、2001年にはBhuj地震（Mw7.7）が、また、これらに先だつ1993年にはデカン高原の中央部でKillari（Latur）地震（Ms:6.2）が発生している。規模の大きかった1993年Killari（Latur）地震では最大70cmの上下変位を伴った長さ1～1.5kmの、2001年Bhuj地震では長さ2.6～3km（上下変位15～25cm）の地表地震断層が生じている（Seeber *et al.*,1996；Ramesh and Estabrook,1998；Rajendran,C. and Rajendran,K.,1999；McCalpin and Thakkar, 2003など）

インド楕状地におけるこのような地震は、ここがオーストラリアと違って人口密度の高い地域であるだけにいずれも大被害地震となっており、1993年Killari（Latur）地震、2001年Bhuj地震では、それぞれ1.1万人、2.5万人余の死者がでている（Gupta,1993；McCalpin and Thakkar, 2003）。

SCR地震の脅威を目の当たりにして（Gupta, 2006）、これに対する世界的関心はいやがおうに高まり、アラビア半島部や中国、南米のブラジルなどでもSCR地震が取り扱われるようになった（Al-Heety, 2005；Liu,2001；Barros *et al.*,2009など）。ヨーロッパでトレンチ法を用いた古地震研究（Camelbeeck and Meghraoui, 1998；Ferry *et al.*,2005など）に出会うようになったのも、SCR地震・断層研究の世界化の現れと思える。

VII SCR断層研究の成果と課題

SCR域において新規に出現した地表地震断層や既存の低断層崖を伴った新期断層に関する実態調査が進行した結果、SCR断層の所在や分布状態がより詳しく分かってきた。とりわけこの種の調査研究が著しく進展したオーストラリアでは、驚くべきことにSCR断層およびその可能性のあるものが今では200～300も抽出・認定されており（Clark, 2010, Clark *et al.*, 2011b, 2012）、それらの所在を示す詳しい分布図すなわち大陸全域をカバーする詳細活断層図ともいえるものが出来上がっていて政府HPでこれが公開されている³⁾。

1990年代以降、新規地表地震断層だけでなく低断層崖を伴った新期断層をも対象にして活動履歴調査が積極的に展開されてきた結果、SCR断層の多くは「逆断層であり」、そして、「繰り返して活動している」というさらに特筆すべき事実も明らかとなった。その繰り返しの間隔についても、「何万年～何十万年あるいはそれ以上と極めて長い」らしいということも示唆されている（図4）。SCR断層の本質解明に供する基礎資料は、着実に集積されつつあるといえよう。しかし、侵食作用の卓越する広大なSCR域において、小さい変位地形のみを手がかりにしてSCR断層を探し出すのは極めて難しく、また、トレンチ法が有効に働く場所も極めて限られるので、これまでに判明した以上のような興味深い諸事実も、現状では量的にも質的にも限られた調査結果が示唆するものでしかないと思われ、受け止めざるを得ない。①SCR断層がどこにどのように分布するか、②それぞれの断層とし

安定陸塊域の活断層

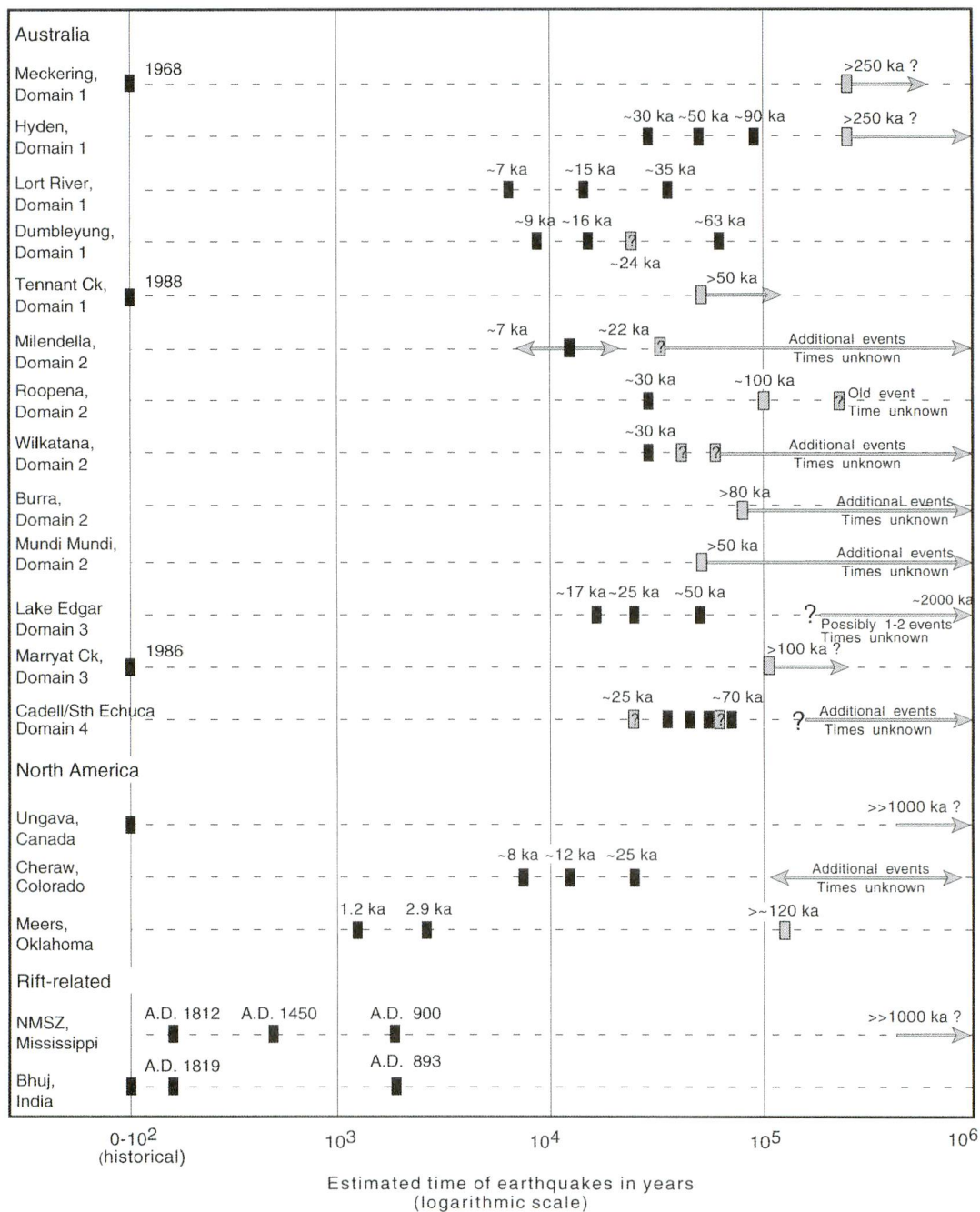


図4 SCR断層の活動履歴 (Clark *et al.*,2012)

ての性格 (断層の型, 変位量), ③活動履歴 (活動時期とそれごとの変位様式・変位量), ④ “②や③” についての地域性などを調べ尽くす努力を

なお継続すべき段階にあると考える。

VIII あとがき

SCR地震・断層研究の動向をその初期にまで遡って整理してみた。安定陸塊域で発現する地震・断層活動は、決して偶発的なものではなく、SCR現象としてSCRの本質に関わらせて理解すべきとする問題意識は定着したといえよう。上に触れたように侵食が卓越する場におかれた活動周期が極めて長い活断層、その活動実態を把握する作業は、言うまでもなく難題であり、俄に進むとは思えない。成果の期待できる場所・対象を選び、調査方法を大いに工夫して臨む必要がある。その意味で、SCR断層研究では視野外におかれている？いわゆるpostglacial faultscarp, 例えば図3の低断層崖群などは、最終氷期末期以後に時代を違えて生じた地形・堆積物群と接していることから、形成期や成長過程を比較的容易に把握でき得る対象として注目に値する。

本稿は、2014年5月10日の法政大学地理学会定例総会関連行事の一つとして行った同表題の講演の骨子にしたがい、講演でおもに取り扱った2章～5章の内容に6～7章を補充してまとめたものである。このような機会を与えて頂いた法政大学地理学会に謝意を表する。

注 記

- 1) http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1886_09_01.phpによる。
- 2) http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1906_04_18.phpによる。
- 3) Geoscience Australia Newcastle Earthquake Report (http://www.ga.gov.au/metadata-gateway/metadata/record/gcat_69527)による。
- 4) <http://www.ga.gov.au/earthquakes/staticPageController.do?page=neotectonics>参照。

参 考 文 献

- 東郷正美 (1992a) : オーストラリアの地震と地震断層。月刊地球, 号外5, 89-97.
- 東郷正美 (1992b) : オーストラリア, ビクトリア州域における第四紀断層運動。法政地理, 20, 13-26.
- 東郷正美 (2004) : 1970年Calingiri地震で生じた地表地震断層。法政大学多摩研究報告, 19, 1-12.
- 東郷正美・井上泰生 (2001) : フェノスカンジヤ楕状地に発達する完新世の低断層崖, 法政大学多摩研究報告, 16, 1-16.
- 松田時彦 (1982) : 安定大陸に生じた地震断層—西オーストラリアのメッケリング地震—。科学, 52, 136-144.
- Adams, J. (1989) : Postglacial faulting in eastern Canada : origin and seismic hazard implications. *Tectonophysics*, 163, 323-331.
- Adams, J., Wetmiller, R. J., Hasegawa, H. S. and Drysdale, J. (1991) : The first surface faulting from a historical intraplate earthquake in North America. *Nature*, 352, 617-619.
- Adams, J., Percival, J. A., Wetmiller, R.J., Drysdale, J.A. and Robertson, P. B. (1992) : Geological controls on the 1989 Ungava surface rupture: A preliminary interpretation. *Geol. Surv. Canada Paper 92-C*, 147-155.
- Adams, J., Dredge, L., Fenton, C., Grant, D. R. and Shilts, W. W. (1993) : Late Quaternary faulting in the Rouge River Valley, southern Ontario : Seismotectonic or glaciotectionic?. *Geol. Surv. Canada Open File Report*, 2652, 63p.
- Al-Heety, E. A. M. (2005) : Historical Seismicity of the Stable Continental Regions (SCRs) in the Arabian Plate (Preliminary Study). *MESF Cyber J. Earth Science*, 3, 22-41.
- Barros, L.V., Assumpçã, M., Quintero, R. and Caixeta, D. (2009) : The intraplate Porto Gaúchos seismic zone in the Amazon croton, Brazil. *Tectonophysics*, 469, 37-47.
- Bilham, R. (1999) : Slip parameters for the Rann of Kachchh, India, 16 June 1819 earthquake, quantified from contemporary accounts, quantified from contemporary accounts. In *Stewart, I. S. and Vita-Finzi, C. (eds): Coastal Tectonics, Geological Society London*, 146, 295-318.
- Bonilla, M.G. (1967) : Historic Surface Faulting in Continental United States and Adjacent Parts of Mexico.

- U.S. Atomic Energy Commission Report, TID-24124*, 32p.
- Bowman, J. R. (1992) : The 1988 Tennant Creek, northern territory, earthquakes : A synthesis. *Australian J. Earth Sciences*, 39(5), 651-669.
- Camelbeeck, T. and Meghraoui, M. (1998) : Geological and geophysical evidence for large palaeo-earthquakes with surface faulting in the Roer Graven (northwest Europe). *Geophysical J. International*, 132, 347-362.
- Caskey, S. J., Bell, J. W., Slemmons, D. B. and Ramelli, A. R. (2000) : Historical surface faulting and paleoseismology of the central Nevada seismic belt. *Geological Society of America Field Guide*, 2, 23-44.
- Chin, R. J., Hickman, A.H. and Thom, R. (1984) : *Hyden 1:250 000 scale geological series sheet and its explanatory notes*. Geol. Surv. Western Australia, 21p.
- Clark, D. (2010) : Identification of Quaternary scarps in southwest and central Western Australia using DEM-based hill shading : application to seismic hazard assessment and neotectonics. *International J. Remote Sensing*, 31(23), 6297-6325.
- Clark, D. and McCue, K. (2003) : Australian paleoseismology : towards a better basis for seismic hazard estimation. *Annals of Geophysocs*, 46(5), 1087-1105.
- Clark, J. D. A., Gibson, D. and Apps, H. (2010) : The use of LiDAR in applied interpretive landform mapping for natural resource management, Murray River alluvial plain, Australia. *International J. Remote Sensing*, 31(23), 6275-6296.
- Clark, D., Cupper, M., Snadiford, M. and Kiernan, K. (2011a) : Style and timing of late Quaternary faulting on the Lake Edgar fault, southwest Tasmania, Australia : Implications for hazard assessment in intracratonic areas. In *Audemard, M. F. A., Michetti, A. M. and McCalpin, J. P. (eds) : Geological Criteria for Evaluating Seismicity Revisited : Forty Years of Paleoseismic Investigation and the Natural Record of Past Earthquakes, Geological Society of America Special Paper 479*, 109-131.
- Clark, D., McPherson, A. and Collins, C. D. M. (2011b) : *Australia's seismogenic neotectonic record : A case for heterogeneous intraplate deformation*. *Geoscience Australia Record* 2011/11, 95p.
- Clark, D., McPherson, A., Van Dissen, R. (2012) : Long-term behavior of Australian stable continental region (SCR) faults. *Tectonophysics*, 566-567, 1-30.
- Clark, D., McPherson, A., Allen, T. and De Kool, M. (2014) : Coseismic surface deformation caused by the 23 March 2012 Mw5.4 Ernabella (Pukatja) earthquake, central Australia : Implications for fault scaling relations in cratonic settings. *Bull. Seismological Society of America*, 104, 24-39.
- Crone, A. J. (1991) : Earthquakes in aseismic zones. *Nature*, 352, 570.
- Crone, A. J. and Luza, K. V. (1986) : Holocene deformation associated with the Meers fault, southwestern Oklahoma. *Oklahoma Geol. Surv. Guidebook* 24, 68-74.
- Crone, A. J. and Luza, K. V. (1990) : Style and timing of Holocene surface faulting on the Meers fault, southwestern Oklahoma. *Bull. Geological Society of America*, 102, 1-17.
- Crone, A. J., Machette, M. N. and Bowman, J. R. (1992) : Geologic investigation of the 1988 Tennant Creek, Australia, Earthquakes – Implication for paleoseismicity in stable continental Regions. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 2032-A, 51p.
- Crone, A. J., Machette, M. N. and Bowman, J. R. (1997a) : Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australia and North American quaternary faults. *Australian J. Earth Sciences*, 44(2), 203-214.
- Crone, A. J., Machette, M. N., Bradley, L. A. and Maham, S. A. (1997b) : *Late Quaternary surface faulting on the Cheraw fault, southeastern Colorado*. U.S. Geol. Surv. Geological Investigation Map I-2591.
- Crone, A. J., De Martini, P. M., Machette, M. N., Okumura, K. and Prescott, J. R. (2003) : Paleoseismicity of two historically quiescent faults in Australia : Implication for fault behavior in stable continental regions. *Bull. Seismological Society of America*, 93, 1913

- 1934.
- Davenport, C. A., Ringrose, P. S., Becker, A., Hancock, P. and Fenton, C. (1989) : Geological investigation of late and post glacial earthquake activity in Scotland. In *Gregersen, S. and Basham, P. W. (eds) : Earthquakes at North Atlantic Passive Margins : Neotectonics and Postglacial Rebound*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands, 175-194.
- Dawson, J., Cummins, P., Tregoning, P. and Leonard, M. (2008) : Shallow intraplate earthquakes in Western Australia observed by Interferometric Synthetic Aperture Radar. *J. Geophysical Research*, **113**, B11408 (19p).
- dePolo, C. M., Clark, D. G., Slemmons, D. B. and Ramelli, A. R. (1991) : Historical surface faulting in the Basin and Range province, western North America : Implications for fault segmentation. *J. Structural Geology*, **13**(2), 231-136.
- Donner, J. (1995) : *The Quaternary history of Scandinavia, World and Regional Geology 7*. Cambridge Univ. Press, 200p.
- Donovan, R. N., Gilbert, M. C., Luza, K. V., Marchini, D. and Sanderson, D. (1983) : Possible Quaternary movement on the Meers fault, southwestern Oklahoma. *Oklahoma Geology Notes*, **43**(5), 124-133.
- Dunham, M. N. E. (1992) : *The geomorphological nature and age of the linear escarpments of northeastern Eyre Peninsula*. Honors Degree Thesis, University of Adelaide, Adelaide, South Australia, 43 p.
- Fenton, C. (1994) : Postglacial faulting in eastern Canada. *Geol. Surv. Canada Open File Report 2774*, 99p.
- Fenton, C. H., Adams J. and Halchuks, S. (2006) : Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical and Geological Engineering*, **24**, 579-592.
- Ferry, M., Meghraoui, M., Delouis, B. and Giardini, D. (2005) : Evidence for Holocene palaeoseismicity along the Basel-Reinach active normal fault (Switzerland) : A seismic source for the 1356 earthquake in the upper Rhine Graven. *Geophysical J. International*, **160**, 554-572.
- Gordon, F. R., and J. D. Lewis (1980) : The Meckering and Calingiri earthquakes October 1968 and March 1970. *Geol. Surv. Western Australia Bull.*, **126**, 229p.
- Gupta, H. K. (1993) : The deadly Latur earthquake. *Science*, **262**(5140), 1666-1667.
- Gupta, H.K. (2006) : Stable continental regions are more vulnerable to earthquakes than once thought. *EOS*, **79**(27), 319-321.
- Hart, E. W., Bryant, W. A. and Treiman, J. A. (1993) : Surface faulting associated with the June 1992 Landers earthquake, California. *California Geology*, **46**(1), 10-16.
- Johnston, A. C. (1989) : The seismicity of 'stable continental interiors'. In *Gregersen, S. and Basham, P. W. (eds.) : Earthquakes at North Atlantic Passive Margins : Neotectonics and Postglacial Rebound*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands, 299-327.
- Johnston, A. C. (1992) : Intraplate not always stable. *Nature*, **335**, 213-214.
- Johnston, A. C. (1996a) : Seismic moment assessment of earthquakes in the stable continental regions - I. Instrumental seismicity. *Geophysical J. International*, **124**, 381-414.
- Johnston, A. C. (1996b) : Seismic moment assessment of earthquakes in the stable continental regions - II. Historical seismicity. *Geophysical J. International*, **125**, 639-678.
- Johnston, A. C. (1996c) : Seismic moment assessment of earthquakes in the stable continental regions - III. New Madrid 1811-1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophysical J. International*, **126**, 314-344.
- Johnston, A. C. and Schweig, E. C. (1996) : The enigma of the New Madrid earthquake of 1811-1812. *Annu. Rev. Earth and Planetary Sci.*, **24**, 339-384.
- Johnston, A. C., Coppesmith, K. J., Kanter, L. R. and Cornell, C. A. (1994) : The earthquakes of stable continental regions : Assessment of large earthquake potential. *Electric Power Research Institute Palo Alto, California Report TR-102261*, 309p.
- Kujansuu, R. (1964) : Nuorista siirroksista Lapissa. *Geologi, Suomen Geologinen Seura-Geologiska Sällskapet*

安定陸塊域の活断層

- i Finland*, 1964(3-4), 30-36.
- Lewis, J. D., Daetwyler, N.A., Bunting, J. A. and Moncrieff, J. S. (1981) : The Cadoux earthquake, 2 June 1979. *Geol. Surv. Western Australia Report*, 11,133p.
- Liu, L. (2001) : Stable Continental Region Earthquakes in South China. *Pure and Applied Geophysics*, 158, 1583-1611.
- Luza, K. V., Madole, R. F. and Crone, A. J. (1987) : Investigation of the Meers Fault, southwestern Oklahoma. *Oklahoma Geol. Surv. Special Publication 87-1*, 75p.
- Machette, M. N., Crone, A. J. and Bowman, J. R., 1993) : Geologic investigations of the 1986 Marryat Creek, Australia, earthquake : Implications for paleoseismicity in stable continental regions. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 2032-B, 1-29.
- Madole, R. F. (1986) : The Meers fault : Quaternary stratigraphy and evidence for late Holocene movement. *Oklahoma Geol. Surv. Guidebook 24*, 55-67.
- Madole, R. F. (1988) : Stratigraphic evidence of Holocene faulting in the mid-continent : The Meers fault, southwestern Oklahoma. *Geological Society of America Bull.*, 100(3), 392-401.
- McCalpin, J. P. and Thakkar, M. G. (2003) : 2001 Bhuj-Kachchh earthquake : surface faulting and its relation with neotectonics and regional structures, Gujarat, western India. *Annals of Geophysics*, 45(5), 937-956.
- McCue, K. E. (2001) : *Earthquake epicentres in Australia 1841-2000 and recent fault scarps*. Geoscience Australia, Canberra.
- McCue, K. F., Dissen, V., Gibson, G., Jensen, V. and Boreham, B. (2003) : The Lake Edgar fault : an active fault in southwestern Tasmania, Australia with repeated displacement in the Quaternary. *Annals of Geophysics*, 46(5), 1107-1117.
- Mckeown, F.A. and Pakiser, L.C. (1982) : Investigations of the New Madrid, Missouri, earthquake region. *U.S. Geol. Surv. Professional Paper 1236*, 201p.
- McPherson, A., Clark, D., Cupper, M., Collins, C. D. N. and Nelson, G. (2012) : The Cadell fault : a record of long-term fault behavior in south-eastern Australia. *Australian Regolith and Clays Conference Mildura 2012 Proceedings*, 7-16.
- Mohr, P. (1986) : Possible late Pleistocene faulting in Iar (West) Connacht, Ireland. *Geological Magazine*, 123(5), 545-552.
- Noe, D.C. (2010) : Anton escarpment paleoseismological investigation, Washington County, Colorado. *NEHRP Program FY-2007 report*, 1-19.
- Nuttli, O.W. (1973) : The Mississippi Valley earthquakes of 1811 and 1812 : intensities, ground motion and magnitudes. *Bull. Seismological Society of America*, 63, 227-248.
- Olesen, O., Blikra, L. H., Braathen, A., Dehls, J. F., Olsen, L., Rise, L., Roberts, D., Riis, F., Faleide, J. I. and Anda, E. (2004) : Neotectonic deformation in Norway and its implications : a review. *Norwegian J. Geology*, 84, 3-34.
- Olesen, O., Bungum, H., Dehls, J., Lindholm, C., Pascal, C. and Roberts, D. (2013) : Neotectonics, Seismicity and contemporary stress field in Norway – mechanism and implications. In *Olesen, L., Fredin, O. and Olesen, O. (eds) Quaternary Geology of Norway. Geol. Surv. Norway Special Publication*, 13, 145-174.
- Oliver, J., Johnson, T. and Dorman, J. (1970) : Postglacial faulting and seismicity in New York and Quebec. *Canadian J. Earth Science*, 7(2), 579-590.
- Ollier, C. D. (1981) : *Tectonics and Landforms*. Long-man, London, 324p.
- Quigley, M. C., Cupper, M. L. and Sandiford, M. (2006) : Quaternary faults of south-central Australia : paleoseismicity, slip rates and origin. *Australian J. Earth Sciences*, 53, 285-301.
- Ramelli, A. R. and Slemmons, D. B. (1986) : Neotectonic activity of the Meers fault. *Oklahoma Geol. Surv. Guidebook 24*, 45-54.
- Ramesh, D. S. and Estabrook, C. H. (1998) : Rupture histories of two stable continental region earthquakes of India. *Proceeding Indian Academy of Science (Earth and Planet.Sci.)*, 107(3), L225-L233.
- Rajendran, C. P. and Rajendran, K. (1999) : Geological

- investigations at Killari and Ter, central India and implications for paleoseismicity in the shield region. *Tectonophysics*, 308, 67-81.
- Scott, G.R. (1970) : Quaternary faulting and potential earthquakes in east-central Colorado. *U.S. Geol. Surv. Professional Paper 700-C*, 11-18.
- Seeber, L., Ekström, G., Jain, S. K., Murty, C.V. R., Chandak, N. and Armbruster, J. G. (1996) : The 1993 Killari earthquake in central India : A new fault in Mesozoic basalt flow?. *J. Geophysical Research*, 101 (B4), 8543-8560.
- Superson, J., Huber, M. and Zglobicki, W. (2013) : Conditions of development of structural relief in crystalline rocks (case study : Murmansk upland and Kandalakha region, Kola Peninsula, Russia). *Landform Analysis*, 22,103-109.
- Thatcher, W., Marshall, G. and Lisowski, M. (1997) : Resolution of fault slip along the 470-km-long rupture of the great 1906 San Francisco earthquake and its implications. *J. Geophysical Research*, 102(B3), 5353-5367.
- Thompson, W. B. (1981) : Postglacial faulting in the Vicinity of the Norumbega fault zone, eastern Maine. *U.S. Geol. Surv. Open-File Report 81-1039*, 17p.
- Twidale, C. R., (1971) : *Structural Landforms*. Australian National University Press, Canberra, 247p.
- U.S. Department of the Interior and Commerce (1971) : The San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971. *U.S. Geol. Surv. Professional Paper 733*, 254p.
- Wallace, R. E. (1990) : The San Andreas Fault System, California. *U.S. Geol. Surv. Professional Paper 1515*, 282p.