

Sat. Oct 16, 2021

## ROOM B

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-2

chairperson: Keisuke Yoshida (Tohoku University), Makoto Naoi (DPRI, Kyoto Univ.)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

○ Takumi Aoki<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup>, Jesse Kears<sup>2</sup>

(1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

○ Takumi MOTOKOSHI<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Yoshihisa Iio<sup>3</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>4</sup>, Aitaro Kato<sup>4</sup>

(1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○ Makoto NAOI<sup>1</sup>, Keiichi IMAKITA<sup>1</sup>, Youqing CHEN<sup>1</sup>, Kazune YAMAMOTO<sup>1</sup>, Rui TANAKA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>2</sup>, Tsuyoshi ISHIDA<sup>1</sup>, Eiichi FUKUYAMA<sup>1</sup>, Yutaro ARIMA<sup>3</sup> (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC)

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○ Keisuke YOSHIDA<sup>1</sup>, Hiroo Kanamori<sup>2</sup> (1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology)

11:45 AM - 12:00 PM

[S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

○ Kantaro Kawai<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup> (1. ERI, UNIVERSITY

OF TOKYO)

12:00 PM - 12:15 PM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## PM-1

chairperson: Shiro Hirano (Ritsumeikan Univ.)

1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the  $\omega^{-2}$ -model, the cube law, and the GR law○ Shiro HIRANO<sup>1</sup> (1. College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.)

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-24] **Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor**○ Satoshi IDE<sup>1</sup> (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:00 PM

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

## PM-1

chairperson: Noa Mitsui (Nagoya University)

2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○ Satoko MUROTANI<sup>1</sup> (1. National Museum of Nature and Science)

2:00 PM - 2:15 PM

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○ Noa MITSUI<sup>1</sup>, Takeshi Sagiya<sup>1</sup> (1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University)

2:15 PM - 2:30 PM

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○ Yoshiaki ORIHARA<sup>1</sup> (1. Tokyo Gakugei University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○ Hiroo NEMOTO<sup>1</sup> (1. Ritsumeikan Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM

---

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-2

chairperson: Keisuke Yoshida (Tohoku University), Makoto Naoi (DPRI, Kyoto Univ.)

Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

---

- [S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults  
○Takumi Aoki<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup>, Jesse Kears<sup>2</sup> (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)  
11:00 AM - 11:15 AM
- [S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake  
○Takumi MOTOKOSHI<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Yoshihisa Iio<sup>3</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>4</sup>, Aitaro Kato<sup>4</sup>  
(1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)  
11:15 AM - 11:30 AM
- [S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory  
○Makoto NAOI<sup>1</sup>, Keiichi IMAKITA<sup>1</sup>, Youqing CHEN<sup>1</sup>, Kazune YAMAMOTO<sup>1</sup>, Rui TANAKA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>2</sup>, Tsuyoshi ISHIDA<sup>1</sup>, Eiichi FUKUYAMA<sup>1</sup>, Yutaro ARIMA<sup>3</sup> (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC)  
11:30 AM - 11:45 AM
- [S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan  
○Keisuke YOSHIDA<sup>1</sup>, Hiroo Kanamori<sup>2</sup> (1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology)  
11:45 AM - 12:00 PM
- [S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves  
○Kantaro Kawai<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup> (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)  
12:00 PM - 12:15 PM

## Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

\*Takumi Aoki<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup>, Jesse Kearsse<sup>2</sup>

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の1つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して求めることは重要な課題である。近年、過去の地震で観測された条線と単純な平面断層での動的破壊モデルによって、地震時に断層面上に記録される条線の湾曲と破壊伝播方向との間の関係性が示され (Kearsse et al., 2019; Kearsse and Kaneko, 2020)、地質的観察から破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な断層面で記録された条線には、この関係性と湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。このような湾曲が逆向きになっている条線を説明するため、本研究では地表付近に形状を与えた断層や複雑な形状を持つ断層モデルを用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、平面断層の場合と逆向きの凹凸を持つ条線が得られた。これは断層に形状を与えることで断層面上の初期応力が変化し、特にその鉛直成分の変化によって逆向きの湾曲が得られたと考えられる。また本研究では、特に初期応力が深さとともに増加するようなモデルでは地表面近くで逆向きの湾曲が得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の向きを逆にすることが難しいことも分かった。本研究の結果から、複雑な断層形状を持つ地点での条線の解釈には地形の影響を考慮する必要があり、条線の湾曲から破壊伝播方向を推定する際には断層形状が単純な地点での観察を用いるべきであると考えられる。

## Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

\*Takumi MOTOKOSHI<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Yoshihisa Iio<sup>3</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>4</sup>, Aitaro Kato<sup>4</sup>

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

通常の断層運動（ダブルカップル型地震：DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層の破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域では様々な研究がされており、この地域では2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測が行われた（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020) は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いてP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究は、P波のスペクトルからNDC地震とDC地震の特徴を比較することで、NDC地震への理解を深めることを目的とする。

本研究では、NDC地震とDC地震について、観測点ごとにP波到達時間前後のスペクトルを求め、これらをコーダ波のスペクトルで規格化することで、各観測点のスペクトルの特徴を見た。また、震源球上でP軸、T軸を通る観測点を選択し、スペクトルの変化を確かめた。観測点選択の際はコーダ波/ノイズのスペクトル比が2以上となる周波数が多い観測点を選択した。

解析の結果、DC地震とNDC地震で震源スペクトルに大きな違いは見られなかった。そのうえ、地震によってはノイズが大きく、広い周波数域でスペクトルの特徴を正確に見ることができなかった。そのため、近接するDC地震とNDC地震について、各観測点のP波スペクトルとその比の特徴をみたが、同様に観測点の位置とスペクトルの関係は見られなかった。今回は少数の地震について震源スペクトルの特徴を確認したため、今後はより多くの地震とDC地震・NDC地震の組み合わせの震源スペクトルの特徴を確かめることで、NDC地震の発生過程を考察していく。

## Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

\*Makoto NAOI<sup>1</sup>, Keiichi IMAKITA<sup>1</sup>, Youqing CHEN<sup>1</sup>, Kazune YAMAMOTO<sup>1</sup>, Rui TANAKA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>2</sup>, Tsuyoshi ISHIDA<sup>1</sup>, Eiichi FUKUYAMA<sup>1</sup>, Yutaro ARIMA<sup>3</sup>

1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC

圧電素子を用いたAE (Acoustic Emission) センサは、数cm規模の室内実験から数十m規模の現場計測において破壊現象の監視に用いられる。数100 kHz以上の高周波で高い感度を得られるので、地震計では検知できない微小な破壊を検出できるが、その周波数特性は複雑であり、かつ設置状態の影響を大きく受けるので、波形記録やスペクトルを用いて詳細な解析を行うことは簡単ではない。例えば、個々のセンサの微妙な接着状態の違いによってその感度が倍半分程度変化するので、振幅を用いた解析にはそれぞれのセンサの感度評価・補正が必要であるし、絶対感度が不明であるため波形記録から破壊の規模を求めることも困難である。本研究では、1) AEセンサの指向性を独自推定、2) 実際に用いる設置方法における周波数特性をレーザー・ドップラー速度計を用いて評価、3) 実験毎に全センサの相対感度を音波透過試験によって評価、することでこれらの問題を解決し、室内水圧破碎実験で得られたAEの地震モーメント $M_0$ を評価するとともに、Multiple Empirical Green function法 (MEGF法; Hough et al. 1999) によってそのコーナー周波数 $f_c$ を評価した。

解析には、Tanaka et al. (2021; GJI) が実施した山口県産黒髪島花崗岩を用いた実験と、Naoi et al. (2020; GJI) が実施した米国産イーグル・フォード頁岩を用いた実験で得られたAEデータを用いた。実験は、65x65x130 mmの直方体形状に整形した供試体を用いて実施し、供試体長手方向に5 MPaの一軸載荷を加えた状態で、供試体中央部に穿孔した破碎孔に流体を圧入することで実施した。AEデータは、供試体表面に設置した24個のAEセンサ (共振型AEセンサ8個、プリアンプ内蔵高感度AEセンサ16個) によって、10 MHz sampling, 14bitの連続収録によって取得した。得られた連続波形データから、波形切り出し、走時自動検測、震源決定を行ってAEカタログを作成し、これらのイベントに対して、 $M_0$ と $f_c$ の推定を実施した。

個々のAEのP波スペクトルに対し、1) -3) の影響を補正した観測スペクトルに、理論スペクトルをフィッティングして $M_0$ ,  $M_w$  (モーメント・マグニチュード) を評価したところ、-9.2から-6.8の $M_w$ を得た。 $M_0$ の評価に必要な放射パターン係数の補正は、Naoi et al. (2020; GJI), Tanaka et al. (2021; GJI)が、各センサの相対感度とセンサ指向性を評価・補正した上で求めたモーメント・テンソル解を用いて行った。これらの先行研究では、イーグルフォード頁岩ではほぼすべてのAEが開口型であること、黒髪島花崗岩の実験では、剪断・開口・閉合型を含む多様なメカニズムのAEが生じたことがわかっている。

次に、AEセンサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能なMEGF法を用いて個々のイベントの $f_c$ を推定したところ、100-1000 kHzの範囲の値を得た。測定帯域が狭いことや、AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかるために、結果の解釈に注意が必要であるが、得られたAEに対して、1) せん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的な $M_0$ - $f_c$ 関係を持つイベントが震源メカニズムによらず多発した、2) 特に開口成分が卓越するものに対して、上記スケール則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントが多発した、という結論が得られた。2) からは、震源における高い間隙流体圧の存在が、開口変位の発生と低周波成分の卓越に寄与することが示唆される。

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) および、科研費 (16H04614), 京都大学教育研究振興財団の援助により行われました。

## Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

\*Keisuke YOSHIDA<sup>1</sup>, Hiroo Kanamori<sup>2</sup>

1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology

Although the corner frequency is widely used in earthquake source studies, its relation to physical source parameters is often ambiguous. Specifically, the source corner frequency or source duration does not explicitly include information about the complexity of the source process. The radiated energy is a more direct physical quantity for studying the dynamic characteristics of earthquake rupture. In Japan, high-quality seismic waveform records are available from the dense national seismic networks, which allow the determination of detailed source time functions even for small earthquakes ( $M_w > 3.3$ ) (Yoshida, 2019). We systematically examined the radiated energy of small earthquakes in Japan using the abundant source time function data.

We estimated the radiated energy of earthquakes for which the moment tensor is listed in the F-net moment tensor catalog from 2004 to 2019 ( $M_w 3.3-5.5$ ). The waveform data were derived from the stations of national universities, JMA, NIED Hi-net, F-net, and V-net. We applied the deconvolution algorithm developed by Ligorria and Ammon (1999) that employs the method of Kikuchi and Kanamori (1982) to SH waves and estimated the apparent source time functions (ASTFs). We used the waveforms of smaller earthquakes that occurred close to the target earthquake ( $< 3$  km) with magnitude differences from 1 to 2 as the empirical Green's functions (eGFs). We first applied a low-pass filter to the raw velocity waveforms, with a cut-off frequency increasing with  $M_0^{-1/3}$  of the target earthquake.

For approximately 1300 earthquakes ( $M_w 3.3-5.5$ ), we derived ASTFs at more than ten stations. Many earthquakes show a coherent azimuthal dependence of AMRFs. Some earthquakes are characterized by distinct multiple pulses (Fig. 1), indicating complex ruptures of multiple patches. Then, we estimated the radiated energy  $E_R$  from each AMRF using the method of Vassiliou & Kanamori (1982). We also measured the source duration  $T$  and computed the radiated energy enhancement factor (REEF; Ye et al., 2018). As representative values of  $E_R$ , source duration  $T$ , and REEF for each earthquake, we used the median of the results estimated from the different AMRFs.

The estimated values of  $E_R$  are generally proportional to  $M_0$ , with a typical ratio  $E_R/M_0$  of about  $3.6 \times 10^{-5}$ . The duration cubed,  $T^3$ , tends to be proportional to  $M_0$ , with a typical value of  $M_0/T^3$  about  $3.9 \times 10^{16}$  (in SI unit). This corresponds to a stress parameter of 2.0 MPa in Brune's (1970) model. REEF is typically  $\sim 3$  but tends to be larger for multiple shocks. We do not see significant spatial variations of  $E_R/M_0$ ,  $M_0/T^3$  and REEF, or any clear dependence of these parameters on depth, focal mechanism, and seismicity type.

The scaled energy  $E_R M_0 = 3.6 \times 10^{-5}$  obtained in this study for small earthquakes ( $M_w < 5.5$ ) is comparable to the estimates for larger earthquakes (e.g., Kanamori et al., 2020) in Japan.  $E_R/M_0$  in our dataset does not significantly vary with the earthquake size, as suggested by Ide et al. (2001). The typical values of  $T/M_0^{1/3}$  and REEF in our data set tend to be smaller than those of larger global earthquakes (Duputel et al., 2013; Ye et al., 2018). At face value, this suggests that small earthquakes have simpler source processes than large ones. However, this trend may be affected to some extent by our low-pass filter with a relatively low cut-off frequency.

Although the median values of  $E_R/M_0$  and  $M_0/T^3$  are fairly constant with  $M_0$  (or Mw), the individual values do vary over an approximately 1.5 order of magnitude.  $E_R/M_0$  in our dataset generally increases with  $M_0/T^3$  with an approximate slope of 0.5 on the log-log plot. This suggests that  $M_0/T^3$  or stress parameter can be used to approximately estimate the scaled energy. However, the proportionality relationship does not hold for complicated ruptures (high REEF events). The variation of REEF ranging from 1 to 40 obtained in this study suggests that considerable rupture complexity is involved in small earthquakes too.



## Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

\*Kantaro Kawai<sup>1</sup>, Nobuki Kame<sup>1</sup>

1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震の動的破壊は断層周辺に質量再分配を引き起こし、また地震波は岩石の密度変動を伴いながら伝播する。両過程はP波到達前に過渡的な重力変動を引き起こす。このようなP波前重力信号は、既往研究において複数の大地震のデータ中に検出されてきた。しかし、検出は垂直成分に限定されノイズの高い水平成分は利用されてこなかった。

木村(2020, 学位論文)は、Hi-net水平加速度計(tiltmeter)アレイデータ解析から2011年の  $M_w$  9.1 東北沖地震におけるP波前重力信号の水平成分を初めて検出した。これを、広域帯地震計の信号垂直成分と組み合わせ3成分全波形を用いて震源パラメータのグリッドサーチを行ったところ、断層の傾斜角  $\delta$  を  $11.5^\circ$ - $15.3^\circ$ 、 $M_w$  8.75-8.92 に制約することに成功した。地球自由振動の理論研究において地震波の励起は、 $\delta$  が小さく震源が浅い地震に対して地震モーメントを  $M_0$  とすると  $M_0 \sin(2\delta)$  に近似的に比例し、 $\delta$  と  $M_w$  はそれぞれ独立に決定できない量であることが示される(Kanamori and Given, 1981)。木村の研究は従来の自由振動理論では説明されていないP波前信号の震源励起依存性を示している。そこで本研究では、この新たに見いだされた信号特性を理解することを目指して、理論波形合成計算コードを用いた数値実験を行った。

数値実験には Zhang et al. (2020)と Wang et al. (2017)によって開発された計算コード QSSPEGS\_potential\_Code を用いた。この計算コードは、従来の長周期地震波形成計算と同じ弾性重力完全結合の方程式を用いて現実的な地球構造におけるP波前重力信号の波形合成を可能にする。これまでに提案されてきた計算法と異なり、一切の近似計算をしていないことが特徴であり、また現実的な時間で実用制度の波形を得ることができる。ここでは、2011年  $M_w$  9.1 東北沖地震の傾斜角を系統的に変化させた模擬P波前重力信号波形を合成し、振幅の傾斜角依存性を調べた。点震源を仮定し、 $M_w = 9.1$  に固定し、 $\delta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  と変化させた。観測点を神岡として、地動加速度  $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ 、重力場の変化  $\delta\mathbf{g}$  のそれぞれの成分を合成し、これらを用いて観測されるP波前重力信号を求めた。ここで、加速度センサーの出力  $\mathbf{s}$  は重力変化そのものではなく、地動加速度の影響を受け  $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$  となることに注意が必要である。

結果、 $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$  と  $\delta\mathbf{g}$  の水平成分は共に  $\sin(2\delta)$  の依存性を示すが、信号出力  $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$  には  $\sin(2\delta)$  とは異なる傾斜角依存性がみられた。計算前の想定通りに  $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$  と  $\delta\mathbf{g}$  は  $M_0 \sin(2\delta)$  で震源励起され、これらの差をとると新しい傾斜角依存性が現れる結果となった。一方、想定とは異なり  $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$  と  $\delta\mathbf{g}$  の垂直成分の振幅は共に、 $\sin(2\delta)$  の依存性を示さなかった。逆に、 $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$  は  $\sin(2\delta)$  の依存性を示す結果となった。このP波前重力信号  $\mathbf{s}$  の  $\delta$  依存性は水平成分と垂直成分ともに木村(2020)の実データ解析結果と調和的である。しかし、数値実験の垂直成分の結果は想定しておらず、今後、地球自由振動の理論との整合性との検討が必要である。

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.)

Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

---

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the  $\omega^{-2}$ -model, the cube law, and the GR law

○Shiro HIRANO<sup>1</sup> (1.College of Sci. &Eng., Ritsumeikan Univ.)

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-24] **Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor**

○Satoshi IDE<sup>1</sup> (1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:00 PM

# Stochastic source time functions satisfying the $\omega^{-2}$ -model, the cube law, and the GR law

\*Shiro HIRANO<sup>1</sup>

1. College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.

震源時間関数(STF)は、地震時の断層面上の滑り速度分布を空間積分した時系列である。多くの震源過程インバージョンの結果がデータベースに集積された結果、STF について以下の経験則が明らかにされている:

**経験則1)** STF は連続で、有限の持続時間を持ち、多くは非負かつ単峰。

**経験則2)** STF を時間積分したモーメント関数は、破壊開始からの経過時間の3乗に比例して成長。

**経験則3)** STF の Fourier 振幅スペクトルは  $\omega^2$ モデルで良く近似される。

**経験則4)** 最終的なモーメントの出現頻度は Gutenberg-Richter 則に従う。

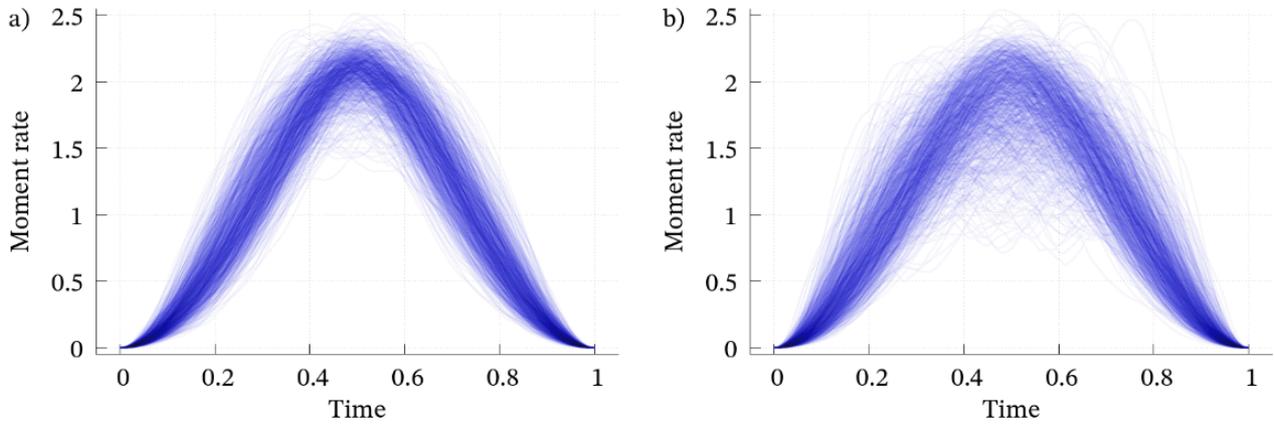
経験則1については、ごく最近定量化され、STF の8割は単峰、2割は複峰であることが分かっている [Yin+ 2021 SRL]。この傾向と例外の存在は、震源過程のモデルが概ね単純でありながら、ある程度の複雑さもまた要求されることを示唆している。また、個々の事例においては充分滑らかな関数というわけではなく、多少の擾乱を伴う時系列であることも明らかである。経験則2および3については、古くから知られ、これらを説明する様々な震源モデルが提唱されてきた。しかし古典的な亀裂モデルなどは前述の擾乱を容易に再現できない。一方で非平面断層などの動学的モデルは、パラメタ数と計算機負荷の双方に難があり、データを高精度に説明するには不可欠であるものの、全く別の単純なアプローチもまた、困難を補い理解に資する可能性がある。更に経験則4も踏まえると、現象の細部は割愛するとして、統計的に経験則を満たす確率論的アプローチが有効であろうと考えられる。

地震にまつわる統計的性質を理解するための確率論的方法として、確率微分方程式(SDE)によるモデル化が複数試みられてきた。SDE とは、微分方程式にノイズ項を加えて積分することにより、ランダムさを内包した系をモデル化するものである。先駆的なものは繰り返し地震の間隔 [Matthews+ BSSA 2002] やスロー地震 [Ide 2008 GRL] について、いずれも長時間を意識したものである。これらは通常地震イベントの STF をモデル化するものではないが、地震学における SDE の有効性を示唆している。より短時間の現象としては、破壊の最中における断層面上の運動方程式に摩擦法則とノイズを導入した事例 [Wu&Chen 2019 arXiv; Wu+ 2019 Chaos] があるが、残念ながら定常状態を意識したものであり、地震の開始と停止については度外視されている。

そこで本研究においては、地震時の STF を SDE に基づいてモデル化し、経験則1-4を満足することを示す。ただし SDE の性質から必然的に、確率変数の時系列は、その振幅スペクトルが  $\omega^{-1}$  に漸近するブラウン運動である。従って1つの確率変数の時系列だけでは、通常地震についての経験則3を満たすことはできない。そこで、スペクトルが  $\omega^{-1}$  に漸近する時系列を2つ用意し、その畳込み積分が STF であると解釈することで、経験則3を満たすことができる。これを発想の起点として、Bessel 過程と呼ばれる SDE を考える。Bessel 過程の解は必ず非負で、かつパラメタを適切に設定すれば有限持続時間を持つことが数学的に示されているため、経験則1を満たす上で都合が良い。また、パラメタ如何では持続時間の出現頻度がべき分布で近似され、従って経験則4も満足する。残された経験則3については、本研究の数値計算により統計的に満たされることが明らかになった。従って、4つの経験則は全て、2つの Bessel 過程の畳込み積分によって説明可能である。なお、2つの Bessel 過程の持続時間は確率によって決まるためそれぞれに異なるが、両者が大きく異なる場合には経験則3が満たされない。そこで両者の比を2以内(case A)に制限した場合と10以内(case B)に制限した場合を考え、後者のほうが STF に多様性が生じることが分かった(Figure 1)。

最後に、2つの Bessel 過程の畳込み積分が持つ物理的意味について考察する。Aki&Richards の表現定理から、STF は断層面上の応力降下速度の空間積分と、それに対する断層滑りの自己応答関数の畳込み積分で記述でき

る. 前者の応力降下速度が Bessel 過程だとすると, 断層全体で積分した滑りと応力の時系列は, 臨界滑り量が最終滑り量の20-50%程度であるような滑り弱化則と等価であることがわかった. 後者については, 今なおその意味が自明ではないが, 少なくとも断層の自己応答が線形弾性体のものではなく, 断層破碎帯などに起因する散乱波などのランダムネスが卓越するものであると予想される.



**Figure 1.** The 1,000 computed convolutions of the two Bessel processes for (a) case A and (b) case B. Time scale and total moment are normalized.

## Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor

\*Satoshi IDE<sup>1</sup>

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

テクトニック微動と低周波地震（LFE）は、広帯域スロー地震の高周波（1Hz以上）成分の異なる表現であり、様々な地域で発見されている。LFEは微動の構成要素と考えられているが、長時間続く微動の中には、構成要素とみなせるLFEを見つけることが困難な場合も多い。そこで本研究では一般的に微動中から合成LFE、つまり微動発生地域におけるインパルス的な震源からの地動応答を抽出する新しい手法を開発した。合成LFEは、多くの観測点で同時に発生する微動信号のインパルス性を用いて定義され、規格化してスタックした微動波形の絶対振幅最大値を最大化することで抽出される。この最大化関数は、極めて多峰的なので、遺伝的アルゴリズムと反復的改善を組み込んだ最適化手法を用いて最大化する。まず、この手法の妥当性をテストデータに適用して検証した後、近隣でLFEがほとんど検出されていない微動活動に適用する。一例は、潮汐応力に非常に敏感であることが知られている岡山の微動である。この微動に対して抽出した合成LFEは、正確な震源位置の決定や、マッチドフィルター解析による長期にわたる包括的な微動活動の把握に役立つ。具体的には海溝軸から遠く離れているにもかかわらず、岡山の微動の深さは約26kmと極めて浅いことがわかる。このように、LFEを微動のインパルス性を用いて新たに定義できることは、連続する微動活動は、ランダムな揺らぎで構成されているという仮説を支持する。スロー地震の挙動をより深く理解するためには、このようなランダム性を定量的に特徴づけることが重要である。

---

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

## PM-1

chairperson: Noa Mitsui (Nagoya University)

Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

---

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○Satoko MUROTANI<sup>1</sup> (1.National Museum of Nature and Science)

2:00 PM - 2:15 PM

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○Noa MITSUI<sup>1</sup>, Takeshi Sagiya<sup>1</sup> (1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University)

2:15 PM - 2:30 PM

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○Yoshiaki ORIHARA<sup>1</sup> (1.Tokyo Gakugei University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○Hiroo NEMOTO<sup>1</sup> (1.Ritsumeikan Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM

## Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

\*Satoko MUROTANI<sup>1</sup>

### 1. National Museum of Nature and Science

2021年は東日本大震災から10年となる年である。国立科学博物館（以下、科博）では、地震発生日である3月11日を含む約1か月間（3月9日～4月11日）を会期として、企画展「東日本大震災から10年—あの日からの地震研究—」を開催した。災害を風化させないため、当時の被害や復興の様子を振り返るとともに、この10年間の地震調査研究の成果や科博がこの10年間でやってきた標本レスキュー活動や復興支援事業についても紹介した。科学系博物館での展示であるため、ただ東日本大震災のことを振り返るだけではなく、地震調査研究というサイエンスの部分に重点を置き、私たちは前を見て進んでいるということを示す展示を目指した。コロナ禍の中、入場人数や展示場所の制限を行うなかでの開催ではあったが、約3万人の方に足を留めていただいた。

本展示は第1会場5章＋第2会場という構成とした。1章は「東北地方太平洋沖地震と東日本大震災」として、地震の概要や当時の被害状況を岩手県の津波被災資料（東北地方整備局より借用）とともに振り返った。2章は「地震調査研究の貢献」として、この10年間の大きな成果と言える日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や緊急地震速報の改良、2020年から導入された津波フラッグ（気象庁より借用）の紹介など、震災以降に巨大地震に対する防災・減災に向けて行われてきている調査研究の一部を紹介した。この企画展の目玉となったのは海底地震津波観測装置（日本電気株式会社・防災科学技術研究所より借用）で、展示ホール中央に展示したが、かなりのインパクトを与えたようである。来場者からは、津波フラッグの取り組みを始めて知ったというコメントが多かった。3章は「くり返し起こる地震・津波」として、東北地方をくり返し襲った地震・津波について紹介した。日本三代実録における869年貞観地震の記述や、明治三陸地震、昭和三陸地震に関する資料、ならびに仙台平野での津波堆積物のはぎ取りとその調査風景（産業技術総合研究所より借用）を展示した。また、今年には1891年濃尾地震から130年という節目の年でもある。4章では「いつでもどこでも地震は起こる」として、海域で発生した観測史上最大の地震である2011年東北地方太平洋沖地震に対して、陸域で発生した観測史上最大の地震である1891年濃尾地震の写真を展示した。5章は「国立科学博物館の取り組み」として、この10年間に科博として行った被災地の標本レスキュー活動や復興コラボミュージアム活動について紹介した。さらに第二会場では「東日本大震災からの復興と伝承」として、この10年間の三陸地方の復興の様子を辿った映像や写真（NHKテクノロジーズより借用）とともに、東日本大震災に関する伝承施設の紹介パネルを展示した。

展示できたのは震災に関するほんの一部であり、関連する講演会を開催することもできなかったが、会期中は春休みだったということもあり、親子連れや友人同士で観に来られた方が多かった。展示を見ていく中で、改めて思い出したことや自分がすべきことを考えることができた、という感想も見られた。今後も博物館という強みを生かし、展示等を通して、来館者に地震・津波や防災に関する教育や普及に努めていきたい。最後に、本展示にあたっては多くの方々にお世話になりました。深く感謝申し上げます。

# Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

\*Noa MITSUI<sup>1</sup>, Takeshi Sagiya<sup>1</sup>

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

活断層で起きる地震に備えるには、ハザード情報の適切な提供が必要である。しかし、活断層の情報は不確実性を有する。例えば、一つの断層帯における震源断層の区間を正確に決定できないという不確実性が、マグニチュードや再来間隔、地震動の大きさの不確実性を生じる。

この問題に対して現在は、活断層地震に関する確率を計算し、公表する方法で対処している。具体的には、各活断層帯において今後30年以内に発生するM7.0以上の活断層地震を確率で表し、確率に応じたランクで発表する方法（主要活断層の長期評価）ならびに、各地域におけるM6.8以上の活断層地震の発生確率を発表する方法（活断層の地域評価）が地震調査研究推進本部（以降、地震本部）によって行われている。

確率を用いた対処方法について、活断層の長期評価内容を国民にわかりやすく伝えられるように表現を工夫してきたことを高く評価する声もある（山口、2008）。一方、これらの評価が適切に理解されず、本来の意図とは異なる形で使用される事例が指摘されている。また、別の視点からの批判として、Geller（2011）は、確率論的地震動予測地図で高い発生確率を示す場所が過去約30年間の被害地震の発生場所と一致しないことを示している。地球科学的に算出される地震動予測地図と、人間の時間スケールで把握できる被害地震が一致しないということは、地震動予測地図は元々人間が理解しにくい情報である可能性を示す。

これらの状況を考慮して我々は、最初の取り組みとして、現在の活断層情報の伝え方、すなわち、地震本部による公表結果（活断層の長期評価と地震動予測）の適切さを検討する。公表結果の受け止め方に関する調査は、地震本部が一般国民や地方公共団体を対象に行っている（文部科学省、2011-2019）。一方、活断層や地震に関する専門家の意見は、長期評価や地震動予測の作業過程では反映されているが、公表結果の認知度や評価は明らかになっていない。

そこで本研究では、長期評価や地震動予測地図の公表結果について、活断層や地震の専門家へのアンケート調査を実施した。調査対象は、日本活断層学会会員262人および日本地震学会代議員123人である。調査期間は令和3年2月22日～令和3年3月4日（日本活断層学会は令和3年2月24日～令和3年3月4日）である。インターネット上のセルフアンケートサイトQuestantを利用したウェブ調査を行い、各学会のメーリングリストを通じて、回答の協力を依頼した。有効回答数は全体47件（うち、回答者の所属学会は、活断層学会のみ36.2%、地震学会のみ27.7%、両学会34.0%）であった。

アンケート結果から、まず、自治体職員には活断層に関する情報を幅広く知っていて欲しい、という期待の高さが読み取れた。また、改善案の検討で参考にすべき下記の回答傾向が得られた。

1. 科学的妥当性&信頼性を重視
2. 長期評価等の発信方法：改善の余地が多い
3. 他機関との連携の必要性
4. 評価と災害と関係を述べる必要がある
5. 公表結果の活用方法について言及することが必要
6. 外部の知見を取り入れることが必要

その他、情報提供先の区別や新手法への評価など、意見が分かれる検討課題の存在も明らかになった。例え

ば、委員経験の有無によって「活断層の地域評価」の認知度の違いや、他機関との連携に関する考え方の違いが見られた。後者について、委員経験のない回答者は「情報を受け取る側（住民や自治体）」の視点に立ち、利便性の改善や知識の理解度を考慮した意見が多かった。一方、委員経験者は「情報の発信側（政府）」の視点に立ち、各省庁の目的の違いや、情報を統一する正当性を考慮した意見がしばしば見られた。このように、専門家間でも一つの問題に対して視点の違いに基づく意見の違いがみられたことは重要である。また、このような意見の違いは、専門家間の議論によって、解決策を示せる可能性が考えられる。

上記の意見を、一般国民ならびに地方公共団体を対象とした調査結果（文部科学省、2011-2019）と比較した。その結果、住民は知識より予測される災害を重視する点、地方公共団体は情報源の信頼性や発信方法の改善を求める点など、専門家と共通する意見が多くみられた。また、これらの比較により、専門家を含めた情報発信側の課題も明らかになった。例えば、知識を得る重要性を含めて住民に伝えるよう工夫する、市区町村の防災が中央防災会議や都道府県の指針に沿って行われていることをふまえて情報提供方法を改善する、などの課題が挙げられる。

上記の意見や検討課題は、多角的な視点から具体的な改善策を検討すべきである。そのため、地震動や災害関連などの専門家や地方公共団体の防災担当者、防災関連団体、地域住民への調査を行い、意見を集約して改善案の提案につなげることが今後の課題である。

#### 謝辞

本調査研究においてアンケート調査にご協力いただいた日本活断層学会ならびに日本地震学会の皆様には感謝の意を表します。

## Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

\*Yoshiaki ORIHARA<sup>1</sup>

### 1. Tokyo Gakugei University

週刊ポストでは年に数回、株式会社地震科学探査機構（JESEA）による地震予知情報に近い「MEGA地震予測」を掲載している。2021年4月26日に“予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア”と題したWeb記事がNEWSポストセブンから配信された（NEWSポストセブン, 2021）。「MEGA地震予測」は、データの扱い方から予測の出し方、自己評価など様々な点で問題があると指摘されている（織原・長尾, 2015; 川崎・加藤, 2016; 横山, 2020）。しかし、週刊誌などのメディアによる宣伝の影響もあり、否定的な主張は世間になかなか広まらない。

今回のNEWSポストセブンの記事はYahoo Newsでも取り上げられた（Yahoo, 2021）。Yahoo Newsの大半は記事ごとに読者のコメントが掲載されている。この「MEGA地震予測」の記事についても、肯定的、否定的両方のコメントが掲載されていた。そこで、本研究ではこのコメントから、なぜ信じるのか、または信じないのか、その理由を探ることを試みた。肯定的なコメントとしては、注意喚起としてこのような活動を受け入れる意見や、「MEGA地震予測」の村井俊治氏を専門家として応援する意見などがみられた。一方、否定派のコメントは、データの扱い方に関する問題点の指摘、必ず当たるような言い方への批判などであった。また、今回の記事については、予測対象期間であるGW（ゴールデンウィーク）中に該当する地震が発生している（2021年5月1日宮城県沖で最大震度5強の地震）。地震発生後、肯定派のコメントは予想が当たったと賞賛する声が多かった。これに対し否定派は、予測範囲の広さを問題視するコメントが多くみられた。

### <引用文献>

NEWSポストセブン, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア,  
<[https://www.news-postseven.com/archives/20210426\\_1654811.html?DETAIL](https://www.news-postseven.com/archives/20210426_1654811.html?DETAIL)>, (参照2021-5-6).  
織原義明・長尾年恭, 2015, 地震前兆現象を科学する, 祥伝社新書, 232pp.  
川崎一郎・加藤照之, 2016, 科学史・科学哲学の枠組みを借りた地震予知研究についての論点整理の試み, 地震2, **69**, 11-22.  
横山裕道, 2020, 迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい, 地震ジャーナル, **70**, 55-58.  
Yahoo, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア, <  
<https://news.yahoo.co.jp/articles/a9f45647b8ce8b00189151ea0b80afe8514b7715>>, (参照2021-5-6).

### <謝辞>

本研究は東京大学地震研究所共同利用（2020-KOBO08）の援助を受けました。

# Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

\*Hiroo NEMOTO<sup>1</sup>

1. Ritsumeikan Univ.

## 1. はじめに

平成20（2008）年改訂小学校学習指導要領（以下、旧小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、旧中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、旧小中学習指導要領と記す）の告示以降、平成29（2017）年に改訂された小学校学習指導要領（以下、現行小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、現行中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、現行小中学習指導要領と記す）が告示されるまでの間に、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成28年（2016年）熊本地震など最大震度7を記録する大震災を伴う事象が発生している。気象事例でも、平成24年（2012年）九州北部豪雨、平成26年（2014年）8月豪雨、平成27年（2015年）9月関東・東北豪雨など激甚な被害をもたらした気象災害が発生してきている。こうした自然災害の多発を受け、小中学校にて地震や気象、および自然災害に関して旧小中学習指導要領による学びから現行小中学習指導要領による学びにて具体的にどのような変更があったのかを調査分析しておくことは、今後の地震教育、地震防災・減災教育等を考える上で必要であると考え、現行課程の教科書分析を行った。なお、高等学校での学びに関しては、平成30（2018）年改訂の高等学校学習指導要領による学習開始が令和4（2022）年以降であることから、2021年時点では取り上げられない。

## 2. 資料

本発表では、自然現象、自然災害のうち、小中学校「理科」での地震、地震防災・減災の学びに焦点をあて、旧小中学習指導要領および現行小中学習指導要領での課程（以下、順に旧課程、現行課程と記す）による「理科」教科書の記載内容の比較分析および考察を行った結果を報告する。よって、用いた資料は旧課程および現行課程での小中学校「理科」の全教科書（小学校6種類、中学校5種類）である。なお、旧課程での分析に関しては根本（2015a：2015b）にて報告済みである。例えば、旧課程小学校「理科」では、6種類の教科書に共通して使われている地震に関係する用語は僅かに2語（地震、断層）だけであったことを報告している [根本（2015a）]。

## 3. 結果および考察

現行課程の小学校「理科」教科書では、6種類の教科書に共通して使われている地震に関係する用語は“地震”、“断層”、“津波”の3語となっている。平成23年（2011）年東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けた結果と考えられる。“断層”と“地震”との説明が地震学におかしな記述となっている教科書が旧課程の小学校「理科」教科書では6種類中5種類あったが [根本（2015a）]、現行課程の教科書では6種類中1種類と改善が進んでいる。この1種類の教科書の説明文も、地震学的に正しい記載であるとも読み取れなくは無いことから、日本語の問題と言えるのかもしれない。

現行小学習指導要領では内容の取扱いにて『自然災害についても触れること。』と旧小学習指導要領には記されていない文言が加わった。これを受け、6種類の教科書ともに震災、火山災害の記述が行われるようになったが、取扱いの分量には差が生じている。ページ数で比較すると、火山災害と合わせて3ページの教科書もあれば7ページの教科書もある。使われている用語も教科書により大きく異なっており、例えば、緊急地震速報は4種類の教科書で使われている一方、防災倉庫、稲むらの火、ハザードマップなどは1種類の教科書で使われているだけである。こうした現状は、小学校段階で伝えるべき地震防災・減災に関わる用語選択が、各教科書出版社の判断によっているために生じている可能性が高い。「理科」にて取り扱う地震防災・減災に関係する用語や内容の整理が必要である。

字数制限の関係で「社会科」や現行課程の中学校「理科」教科書の内容に関して本予稿では触れないが、小学校「理科」教科書と同様の課題が浮かび上がってきている。

#### 4. まとめ

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書の分析から、地震に関する記載の改善が見られていること、および小中学習指導要領での記載の変化により震災、地震防災・減災に関する記述が加わったが、その内容は教科書毎に開きのあることが明らかとなった。今後、小学校段階および中学校段階にて「理科」にて取り扱うべき、地震防災・減災、震災に関して使用する用語および内容の整理を行い提案する必要がある。

#### 参考文献

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書。

根本泰雄, 2015a, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 44-48.

根本泰雄, 2015b, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 56-60.

< <https://www.zisin.jp/publications/pdf/monograph4.pdf> >