

石井式歪計・応力計で記録される地震動と地震規模の関係(2) 陶史の森・日吉・正馬様・深地層研(応力)観測点の結果

笠原 稔 (東濃地震科学研究所)

1. はじめに

東濃地震科学研究所では2003年3月30日、多成分歪計の屏風山観測点への設置以降、現在まで、多成分歪計、多成分応力計の設置されたボアホール観測点6ヶ所から成る歪計応力計十字アレイが稼働している。これらで観測されている高速サンプリングによる地震動記録利用の端緒として、観測されている地震動記録の収録を、2016年4月から行ってきた(笠原・他、2017)。それらの解析の初めとして、2016年末までに記録された、屏風山(BYB)観測点(開始2003年3月30日)と東濃地震科学研究所(TRIES)観測点(開始2007年5月16日)の多(4)成分歪計により記録された歪地震動から、弾性体力学の不変量のひとつである直交する歪2成分の和、すなわち面積歪地震動を求め、その最大振幅に注目して、震源距離と地震の規模(ここでは、 M_{JMA})の関係を整理した。その結果は、笠原(2018)に報告されている。ここでは、最初に応力計が設置された陶史の森(TOS)観測点(開始2010年3月15日)、それ以後順次設置された日吉(HYS)観測点(開始2011年9月18日)、正馬様(SBS)観測点(開始2014年2月20日)、深地層研200m(STG)観測点(開始2015年8月19日)、の4応力観測点で2016年末までに記録された応力地震動の歪地震動同様の解析を行った結果を報告する。

2. データ

図1に、東濃地震科学研究所の6点の歪計・応力計観測点の配置を示す。このうち、BYB,TRIES



が歪計観測点で、TOS、HYS、SBS、STG、の4点が応力計観測点である。ここで対象としているそれぞれの応力観測点での観測開始から、2016年末までに収録された地震は、 $M_{2.5}$ から M_{8} 以上 $M_{9.0}$ (M_{9} はTOSのみ)まで、震源距離は27kmから18,932kmの範囲にあり、総数は、TOSで268個、HYSは190個、SBSは128個、STGは84個、である。

ここで、最大振幅としては、各成分毎に見た場合には、震源との相対的位置関係により大きな差が生じることがあるので、直交2成分の和から求められる弾性体力

図1 東濃地震科学研究所の歪計・応力計観測点分布図

学の応力不変量のひとつである“面積応力”を用いることにした。各観測点には、一組の直交 2 成分と、それから45°異なる方向のもう一組の直交 2 成分が設置されている。そのため、1 観測点で、異なる応力計の組み合わせで、2 次元応力の不変量;面積応力、を求めることができる。これらは、当然一致するべきものである。そこで、1 つの地震例について、4 観測点の比較してみた結果を図2に示す。

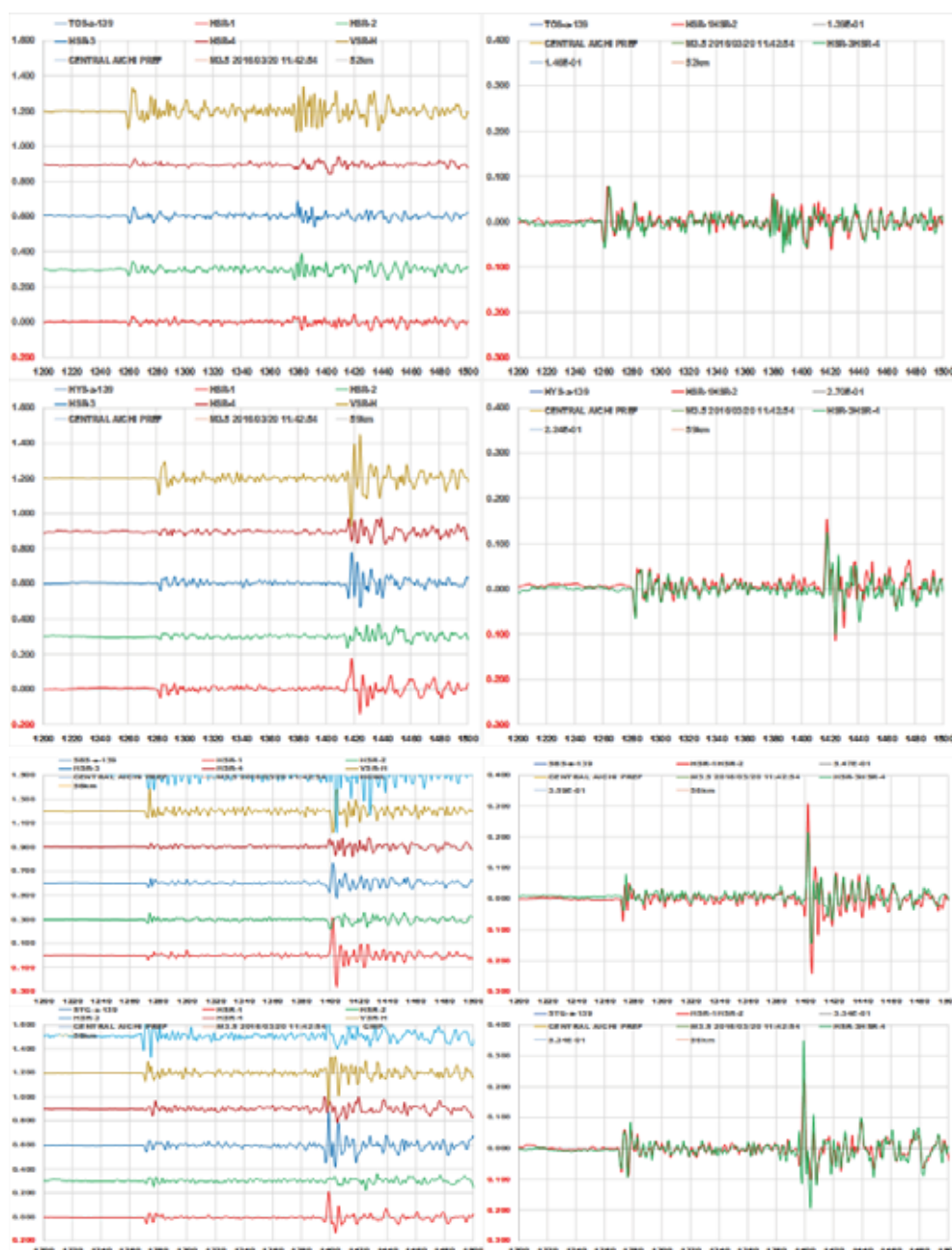


図. 2 各観測点の全成分の応力地震動記録(左)と異なる直交 2 成分から求めた面積応力地震動の重ね合わせ(右)。観測点は、上から、TOS、HYS、SBS、STG。地震は、2016 年 3 月 20 日、愛知県西部、深さ 38km、M3.5。縦軸は、左が 1 目盛 0.2Kpa、右は 0.1Kpa、横軸は、両者共に、1 目盛 1 秒。

この地震は、2016年3月20日11:42'54”、愛知県中部の深さ38kmで発生したM3.5である。図2の左に、各観測点の個々の成分を、下から順に水平4成分（HSR1;赤色、HSR2;緑色、HSR3;青色、HSR4;エンジ色）と上下1成分（VSR-H;茶色）として示してある。図2の右に、各観測点の直交成分の組み合わせで求まる面積応力の不変量、[HSR1+HSR2]の結果を赤線で、[HSR3+HSR4]の結果を緑線で、示してある。どの点についても、両者の一致は周期・振幅共にかなり良いと分かる。なお、SBS、STGでは、孔井内水位、孔井内水圧も観測されており、その成分は図2左の各観測点全成分表示の最上段(水色)に示してある。それらの地震動変動にも興味はあるが、ここでは取り上げない。

収録された地震全部について、[HSR1+HSR2]と[HSR3+HSR4]の最大振幅を比較して見たものが図3である。どの観測点でも、振幅の広い範囲で両者の一致は良いと言える。TOS観測点の、0.1Kpa以下の小振幅での一致が悪いのは、他の点に比べてセンサーノイズが大きいため、簡単な最大振幅の自動検出では正しい最大振幅の位置で検出されていないためと思われる。他の3点は、0.01Kpaまで両者の振幅の一致は良い。これは、HYS観測点設置以降、センサーを改良し、ノイズレベルが一桁減少したためであり、0.01Kpaまでのシグナルを正しく記録できるようになった。

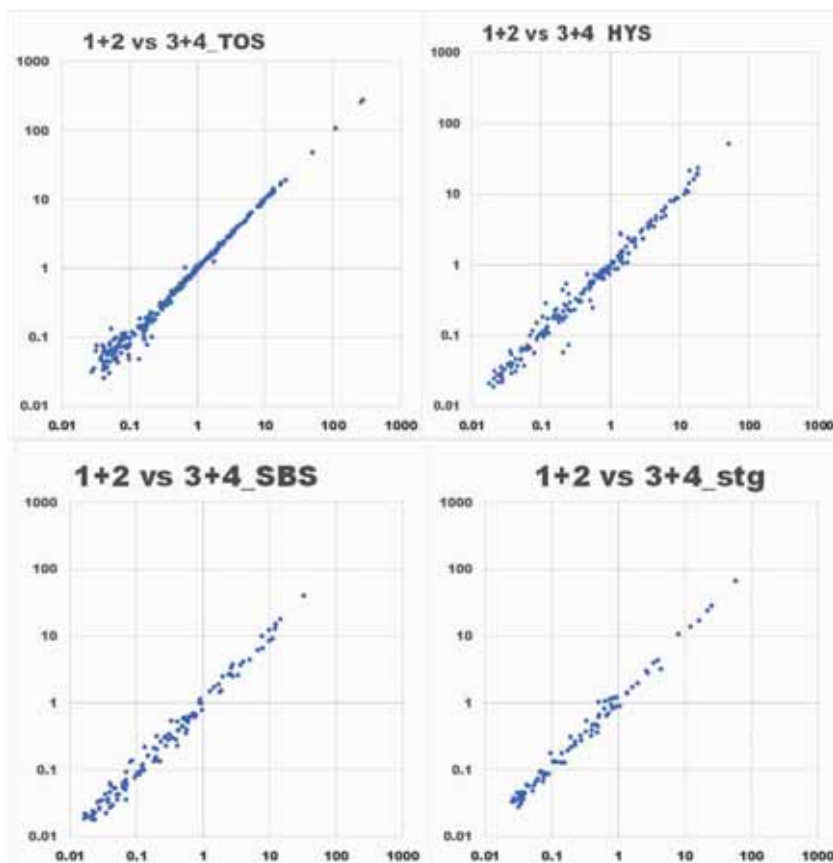


図. 3 各観測点で観測された全地震について、異なる直交2成分から求められた“面積応力” [HSR1+HSR2];横軸、と、[HSR3+HSR4];縦軸、の最大振幅の比較.両軸共に、単位はKpa

3. 地震規模 (MJMA) と面積応力地震動の最大振幅 (σ_{Amax}) と震源距離 (R) の関係 - M- σ -R 関係式の推定

3. 1 陶史の森 (TOS) 観測点

観測された応力地震動記録から、自動的に、最大値、最小値を読み取り、その差を最大振幅として整理している。ただし、整理された結果から異常値とみなされるものについては、再検測した。遠地地震の場合には、記録時間内の潮汐変化による長期変動は差し引いて地震動の最大値を検出した。最初に、観測地震数の多い TOS 観測点について、記録された面積応力地震動の最大振幅 (σ_{Amax} ; kpa) と震源距離 (R; km) の関係を、地震の規模 (ここでは、 M_{JMA}) で区分してプロットした結果が図 4 である。歪地震動について得られた結果 (笠原, 2018) 同様、同一の M に注目すれば、震源距離 1,000km 以内では、観測される最大振幅は、距離の 2 乗に反比例し、同じ距離に注目すれば、最大振幅の対数が、M に比例している。震源距離 1,000km 以上では、観測される

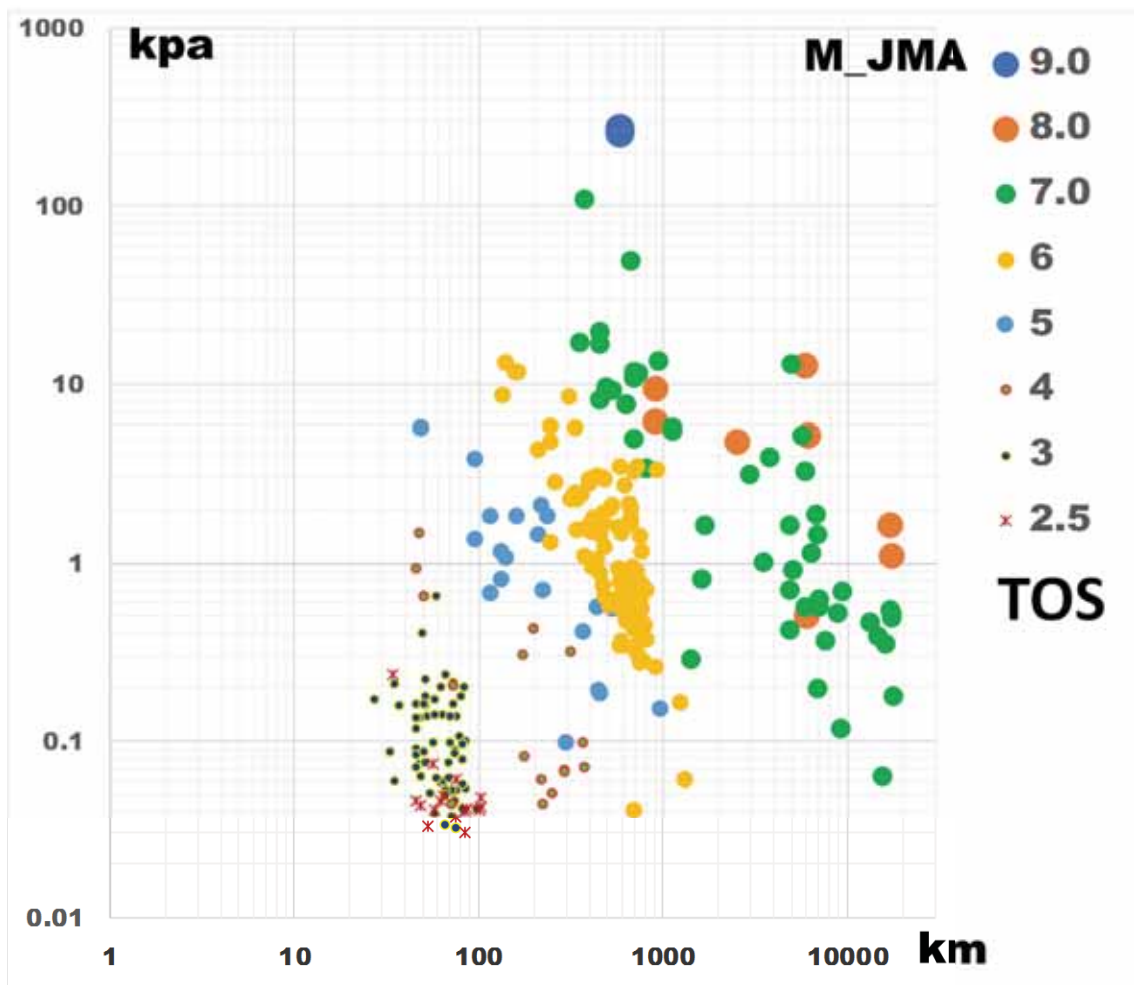


図. 4 TOS 観測点で記録された応力地震動の最大面積応力 (σ_{Amax} ; kpa、縦軸) と震源距離 (R; km、横軸) の M_{JMA} 毎のプロット. 2010 年 3 月 15 日から 2016 年 12 月 31 日までの 268 個の地震.

最大振幅は、距離の 1 乗に反比例し、最大振幅の対数が、M に比例している。震源距離による振幅減衰の差は、最大振幅を示す波動が、前者は実体波であり、後者は表面波であることを示唆しているし、記録を見る限り、そう考えるのが自然である。前者では、S 波到着からすぐに最大振幅を示しているし、後者の場合は、明らかに S 波以後の表面波での振幅が最大振幅となっている。もちろん、震源距離 500~1000km の間で、浅い地震の場合には、最大振幅が実体波的であるか、表面波的であるか、ややあいまいではあるが、震源距離 1000km 以上、以下で、両者を区別することとする。TOS 観測点の結果について、地震規模 (M_{JMA}) と観測される最大面積応力振幅 (σA_{max} ; Kpa) と震源距離 (R ; km) の関係式を前述の特徴と歪地震動から得られた結果を加味して、定数項を簡単にして、最初の (**M- σ -R 関係式**) の近似式として、

$$\text{最大振幅 } (\sigma A_{max}) \text{ が実体波とみなせる場合 } m_b = \log \sigma + 2 \log R + 1 \quad (R < 1000 \text{ km}) \quad (1)$$

最大振幅 (σA_{max}) が表面波とみなせる場合 $m_s = \log \sigma + \log R + 4 \quad (R > 1000 \text{ km}) \quad (2)$ が推定できる。

その結果を、M の区分線として青線と赤点線で、図 4 の結果に重ねて示したものが、図 5 である。これらの式によりきめられる M を、参照した M_{JMA} との差を見ることにより定数項の補正が可能である。まず、観測された地震動の面積応力の最大値、[HSR1+HSR2] と [HSR3+HSR4] の振幅から、2 つの近似式より M (地震規模) を、震源距離 1000km 未満に対しては、**mb12**、**ms34** を、1000km 以上に対しては **ms12**、**ms34** を求めた。それらと M_{JMA} との比較をした結果を図 6 に示す。

図 6 で見るように、M2~9 まで、両者の比例関係はかなり良い。基本的に、観測されている最大面積応力振幅は、前述のような距離減衰に従い、その対数値が M に比例していることを示している。同時に、最大面積応力振幅から求められた **mb**、**ms** の方がやや大きいことも分かる。この分を定数項で補正すればいい。それで、その大きさを見るために、 M_{JMA} と **ms12**、**mb12**、**ms34**、**mb34** の差をとって見たものが図 7 である。図 7 から、明らかに応力振幅から求めた **mb**、**ms** の方が大きいことが分かる。両者の差のメディアンをとると、**mb** に対しては +0.22、**ms** に対しては +0.11 となっている。この分を近似式の定数項補正をすれば、TOS で観測される面積応力最大振幅から地震規模を決めることができる。つまり、TOS 観測点の **M- σ -R 関係式** は、以下ようになる。

$$\text{震源距離 } 1000 \text{ km 未満の実体波的減衰をする範囲では、} m_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.78 \quad (3)$$

1000km 以上の表面波的減衰をする範囲では、 $m_s = \log \sigma + \log R + 3.89 \quad (4)$ となる。この式を適用して図 7 と同様の、 M_{JMA} と面積応力最大振幅から決まる **mb**、**ms** と M_{JMA} の差と M_{JMA} の関係を図 8 に示した。M3 以下の地震の場合は、前述のように S/N が十分でないことからやや大きめに決まる地震が多いが、M3 以上 M9 までは、 ± 0.5 の範囲にほとんどが収まっている。M7.1 (2015 年九州西方沖地震) と M7.3 (2016 年熊本地震) の 2 つの地震は、比較精査の結果、明らかに同程度の震源距離をもつ同じ規模の地震よりも大きな振幅を示している。また、 ± 0.5 以上、以下の遠地地震が数個見られるが、それぞれ発生地域が類似している。つまり、東濃十字アレー観測点への到来方向が関係するのではないかと想定される。これらについては、今後、もう少し系統的に調べるべき課題であろう。

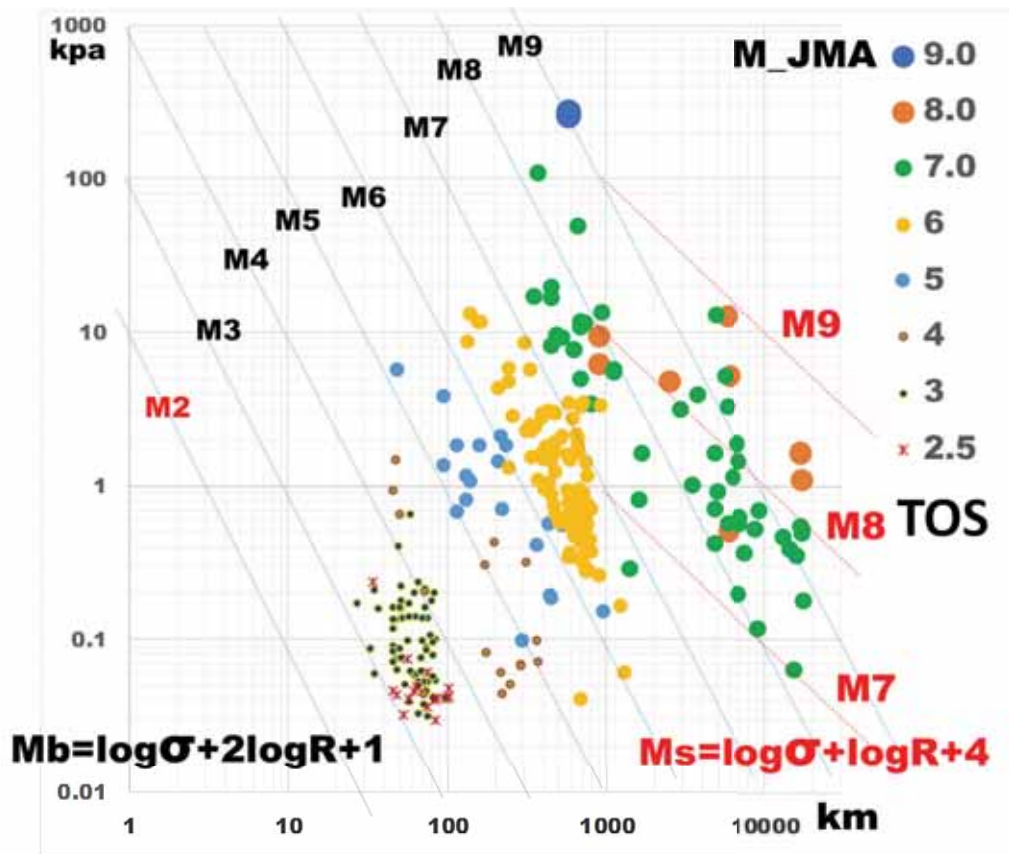


図. 5 TOS 観測点で記録された応力地震動の最大面積応力 (σ_{Amax} ;kpa、縦軸)と震源距離(R;km、横軸)の M_{JMA} 毎のプロット. M による区分線は $M-\sigma-R$ 関係式(本文(1)式、(2)式)による.

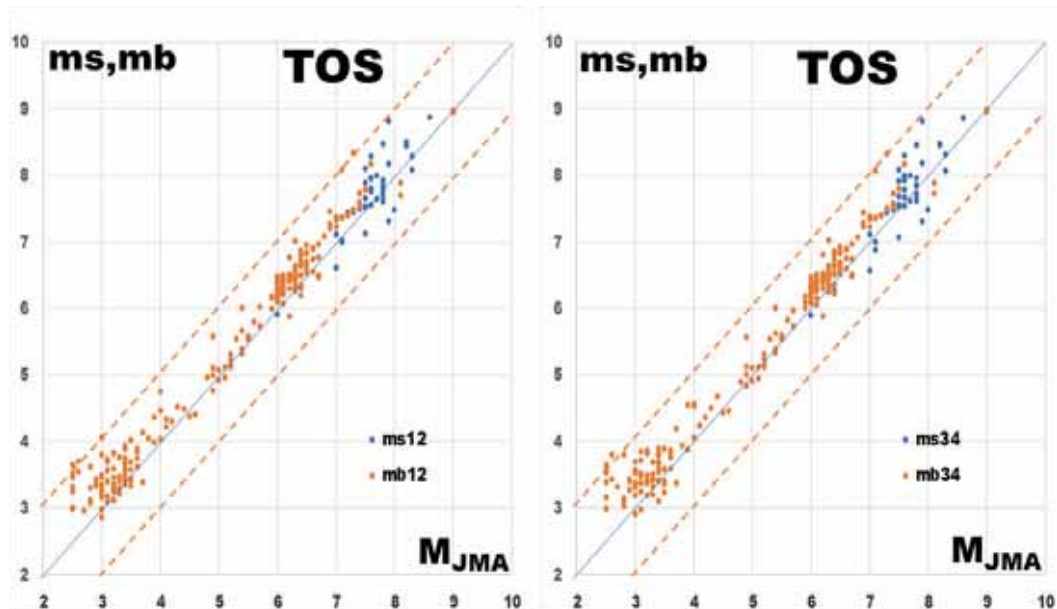


図. 6 $M-\sigma-R$ 関係式(本文(1)式、(2)式)によるTOS観測点で記録された応力地震動の面積応力最大値から求めた ms_{12} 、 mb_{12} と M_{JMA} との比較(左)、同 ms_{34} 、 mb_{34} との比較(右). 青線は1対1で一致する場合、赤点線は、青線から $M \pm 1$ の範囲.

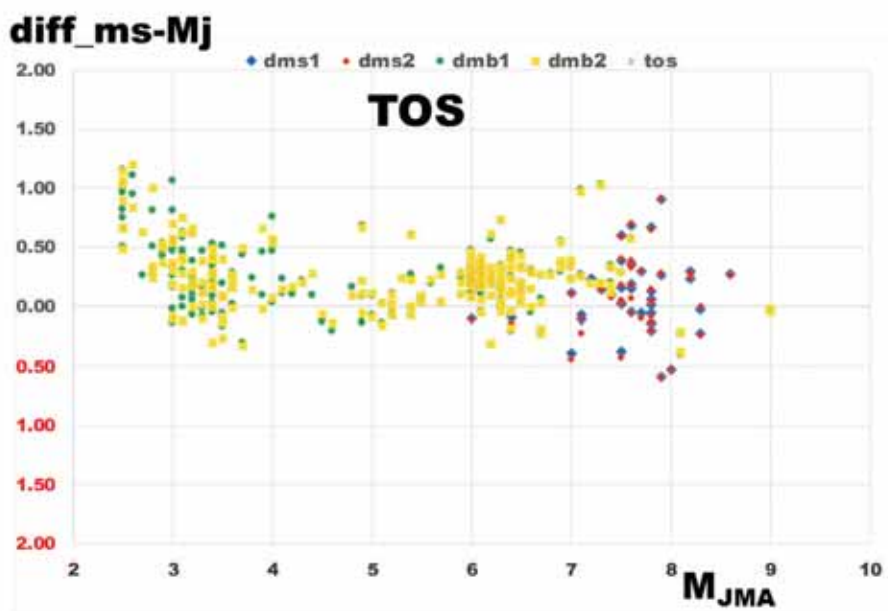


図. 7 M- σ -R 関係式(本文(1)式、(2)式)による最大面積応力振幅から求めたmb、ms と M_{JMA} の差(縦軸)と M_{JMA} (横軸)の関係. TOS 観測点

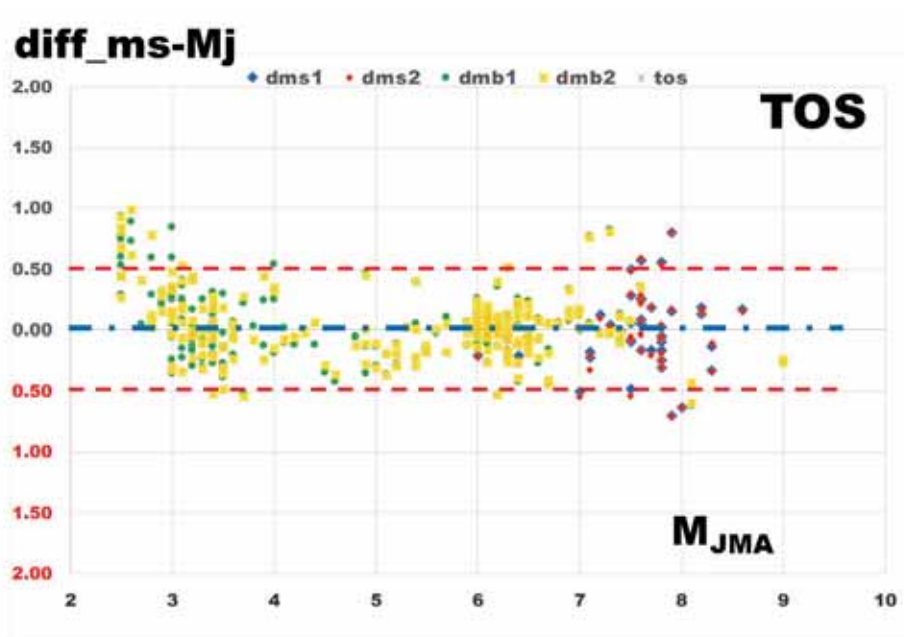


図. 8 TOS 観測点の最適 M- σ -R 関係式(本文(3)式、(4)式)による最大面積応力振幅から求めた mb、ms と M_{JMA} の差(縦軸)と M_{JMA} (横軸)の関係

3. 2日吉 (HYS) 観測点 -M- σ -R 関係式の推定

日吉観測点の観測開始以来 2016 年末までの 190 個の地震について、陶史の森(TOS)観測点

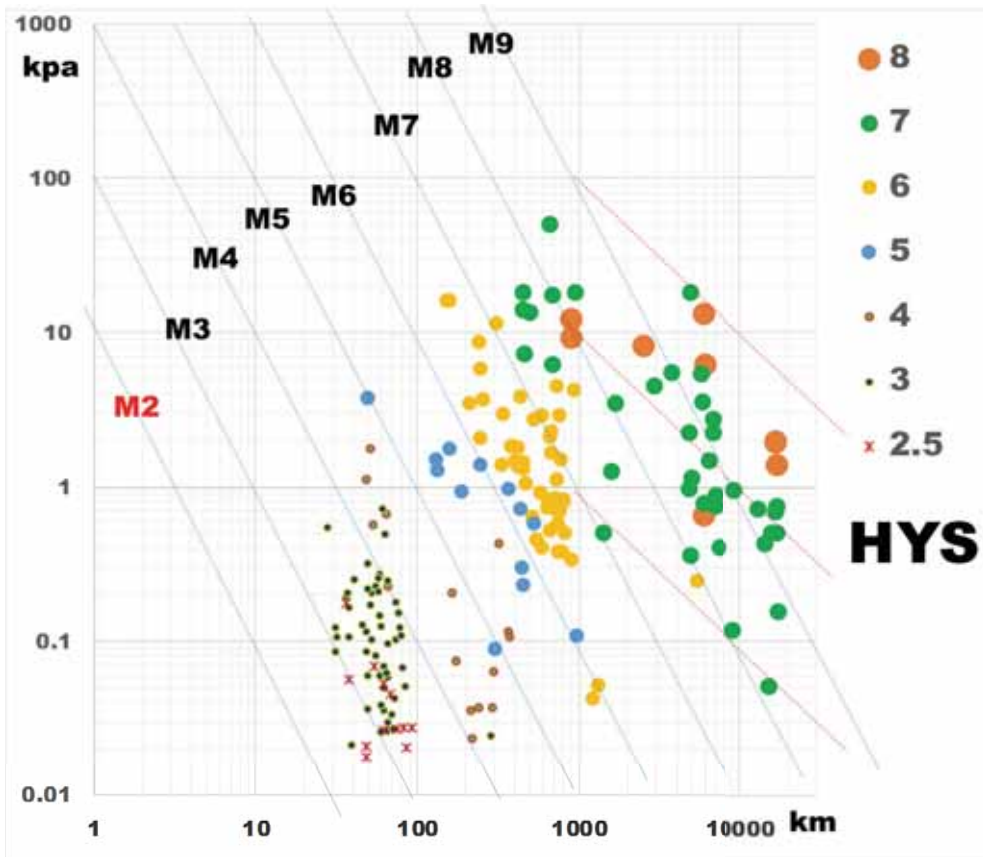


図. 9 HYS 観測点で記録された応力地震動の最大面積応力 (σ_{Amax} ;kpa;縦軸)と震源距離(R;km、横軸)の M_{JMA} 毎のプロット. M による区分線は $M-\sigma-R$ 関係式(本文(1)式、(2)式)による.

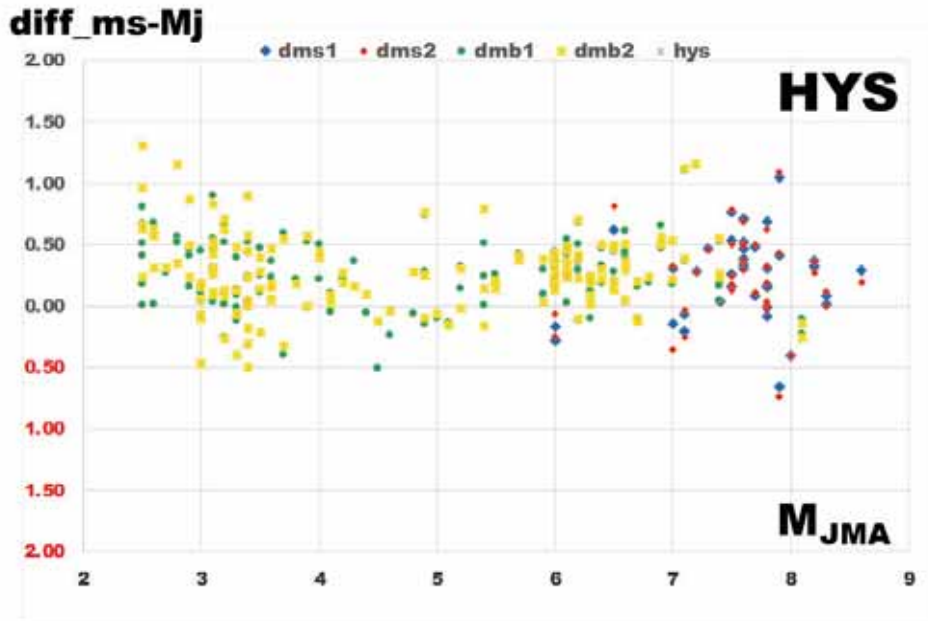


図.10 $M-\sigma-R$ 関係式(本文(1)式、(2)式)による最大面積応力振幅から求めた mb 、 ms と M_{JMA} の差(縦軸)と M_{JMA} (横軸)の関係. HYS 観測点

同様、記録された面積応力地震動の最大振幅 (σ Amax;kpa)と震源距離 (R;km)の関係を、地震の規模(ここでは、 M_{JMA})で区分してプロットした結果が図9である。最初の近似式による、**M- σ -R**関係式(式(1)、式(2))の M 毎の線を示してある。この関係式から求まる応力地震動の**mb**、**ms**と M_{JMA} の差と M_{JMA} の関係で示したものが図10である。

図10から、明らかに応力振幅から求めた**mb**、**ms**の方が大きいことが分かる。両者の差のメディアンをとると、**mb**に対しては、+0.25、**ms**に対しては、+0.27となっている。この分を近似式の定数項補正をすれば、**HYS**で観測される面積応力最大振幅から地震規模を決めることができる。つまり、**HYS**観測点の**M- σ -R**関係式は、以下ようになる。

$$\text{震源距離 1000km 未満の実体波的減衰をする範囲では、 } M_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.75 \quad (5)$$

$$1000\text{km 以上の表面波的減衰をする範囲では、 } M_s = \log \sigma + \log R + 3.73 \quad (6)$$

3. 3 正馬様 (SBS) 観測点 -M- σ -R 関係式の推定

正馬様観測点の観測開始以来 2016 年末までの 128 個の地震について、記録された面積応力地震動の最大振幅 (σ Amax;kpa)と震源距離 (R;km)の関係を、地震の規模(ここでは、 M_{JMA})で区分してプロットした結果が図11である。陶史の森観測点と同じく、最初の近似式による、**M- σ -R**関係式(式(1)、式(2))の M 毎の線を示してある。この関係式から求まる応力地震動の**mb**、**ms**と M_{JMA} の差と M_{JMA} の関係を示したものが図12である。図12から、明らかに応力振幅から求めた**mb**、**ms**の方が大きいことが分かる。両者の差のメディアンをとると、**mb**に対しては、+0.27、**ms**に対しては、+0.13となっている。この分を近似式の定数項補正をすれば、**SBS**で観測される面積応力最大振幅から地震規模を決めることができる。つまり、**SBS**観測点の**M- σ -R**関係式は、以下ようになる。

$$\text{震源距離 1000km 未満の実体波的減衰をする範囲では、 } M_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.73 \quad (7)$$

$$1000\text{km 以上の表面波的減衰をする範囲では、 } M_s = \log \sigma + \log R + 3.87 \quad (8)$$

3. 4 深地層研200m地点 (STG) 観測点 -M- σ -R 関係式の推定

深地層研 200m 地点観測点の観測開始以来 2016 年末までの 84 個の地震について、記録された面積応力地震動の最大振幅 (σ Amax;kpa)と震源距離 (R;km)の関係を、地震の規模(ここでは、 M_{JMA})で区分してプロットした結果が図13である。陶史の森観測点と同じく、最初の近似式による、**M- σ -R**関係式(式(1)、式(2))の M 毎の線を示してある。この関係式から求まる応力地震動の**mb**、**ms**と M_{JMA} の差と M_{JMA} の関係で示したものが図14である。

図14から、明らかに応力振幅から求めた**mb**、**ms**の方が大きいことが分かる。両者の差のメディアンをとると、**mb**に対しては、+0.48、**ms**に対しては、+0.25となっている。この分を近似式の定数項補正をすれば、**STG**で観測される面積応力最大振幅から地震規模を決めることができる。つまり、**STG**観測点の**M- σ -R**関係式は、以下ようになる。

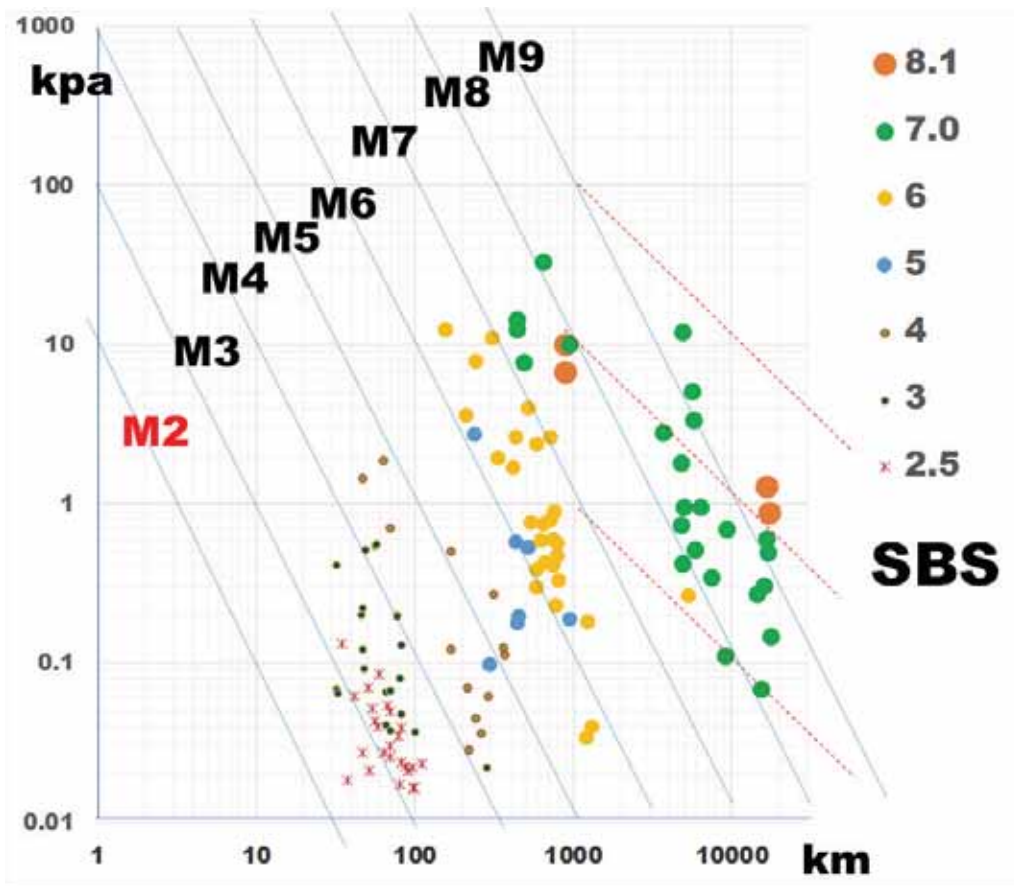


図. 11 SBS 観測点で記録された応力地震動の最大面積応力 (σ_{Amax} ;kpa、縦軸)と震源距離 (R ;km、横軸)の M_{JMA} 毎のプロット. M による区分線は $M-\sigma-R$ 関係式 (本文(1)式、(2)式)による.

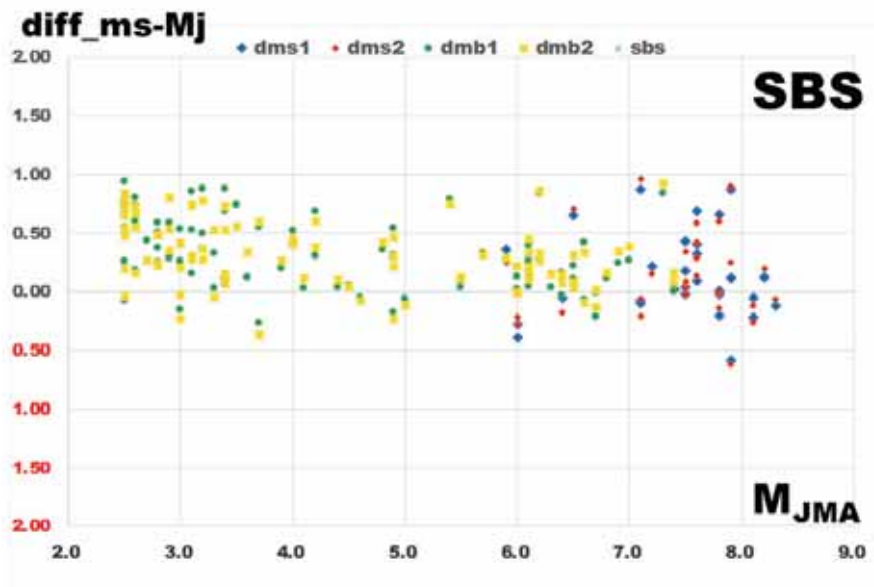


図. 12 $M-\sigma-R$ 関係式 (本文(1)式、(2)式)による最大面積応力振幅から求めた mb 、 ms と M_{JMA} の差(縦軸)と M_{JMA} (横軸)の関係. SBS 観測点

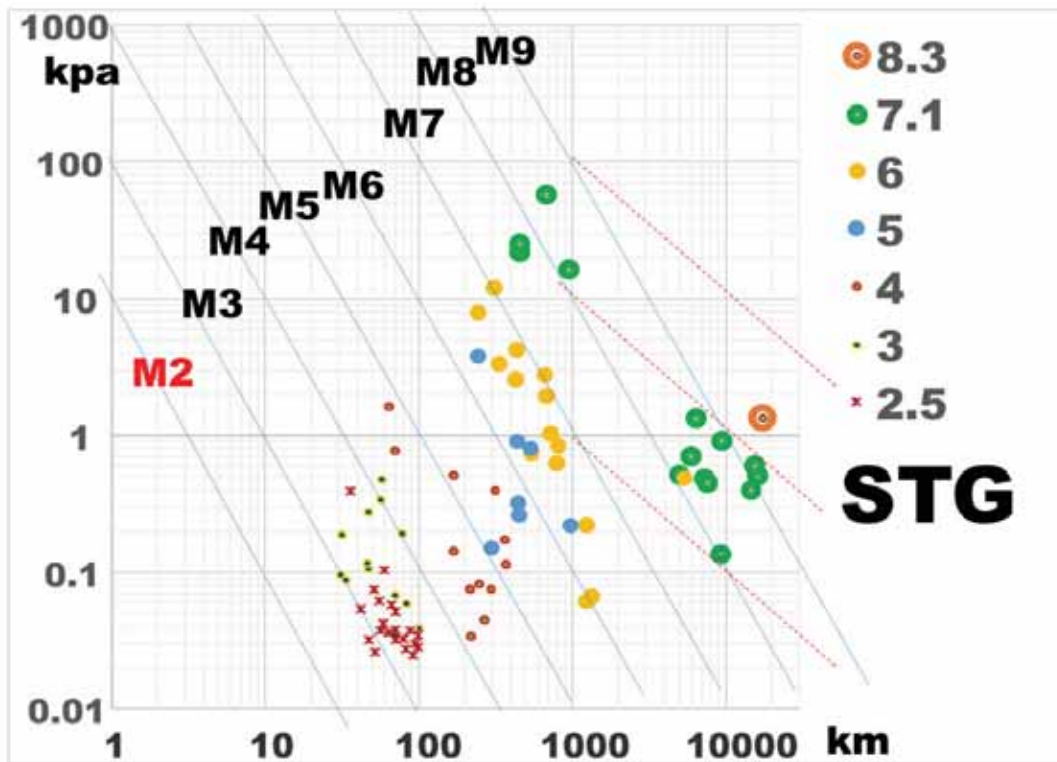


図. 13 STG 観測点で記録された応力地震動の最大面積応力 (σ_{Amax} ;kpa、縦軸)と震源距離(R;km、横軸)の M_{JMA} 毎のプロット. M による区分線は M- σ -R 関係式(本文(1)式、(2)式)による.

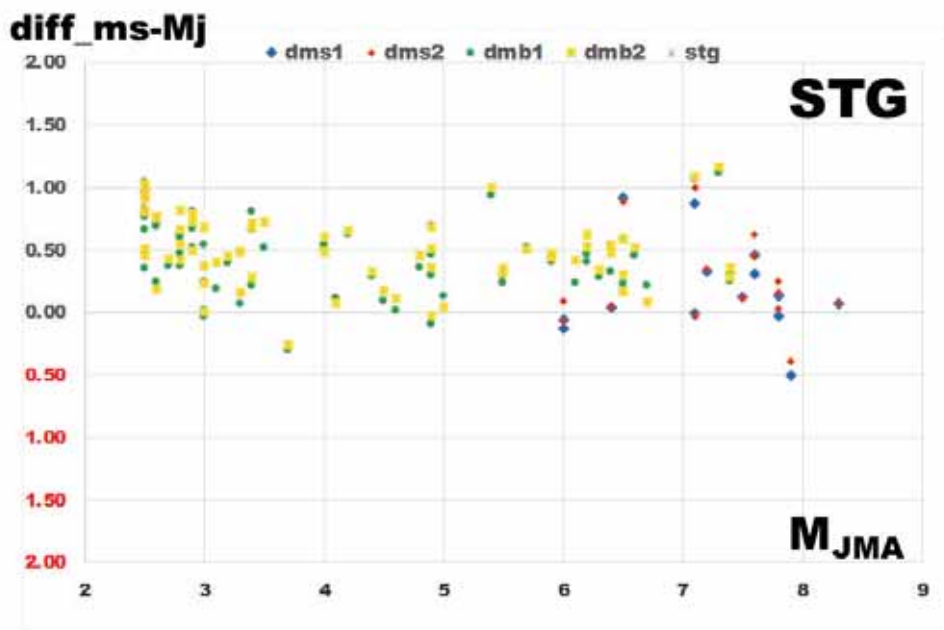


図. 14 M- σ -R 関係式(本文(1)式、(2)式)による最大面積応力振幅から求めたmb、ms と M_{JMA} の差(縦軸)と M_{JMA} (横軸)の関係. STG 観測点

震源距離 1000km 未満の実体波的減衰をする範囲では、 $M_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.52$ (9)

1000km 以上の表面波的減衰をする範囲では、 $M_s = \log \sigma + \log R + 3.75$ (10)

となる。

4. 若干の考察

前章で各観測点の **M- σ -R 関係式** の定数項について議論したが、その値には STG 以外では TOS に比べて大きな違いは見られなかった。定数項の小数点 2 桁目の違いは、M の 0.01 の差を意味しているが、十字アレイ観測網内での観測記録からそこまでの決定精度はないし、理論的にも 1 点の記録から決めかねることは明白であり、前章で仮に求めた各観測点の **M- σ -R 関係式** はもう少し丸める必要がある。もうひとつの各観測点間の比較として、同一地震で観測された応力地震動の最大振幅の比較を行ってみる。ここでは、各観測点の [HSR3+HSR4] の振幅を用いた。TOS を基準にしたほか 3 点との比較図を図 15 に示す。

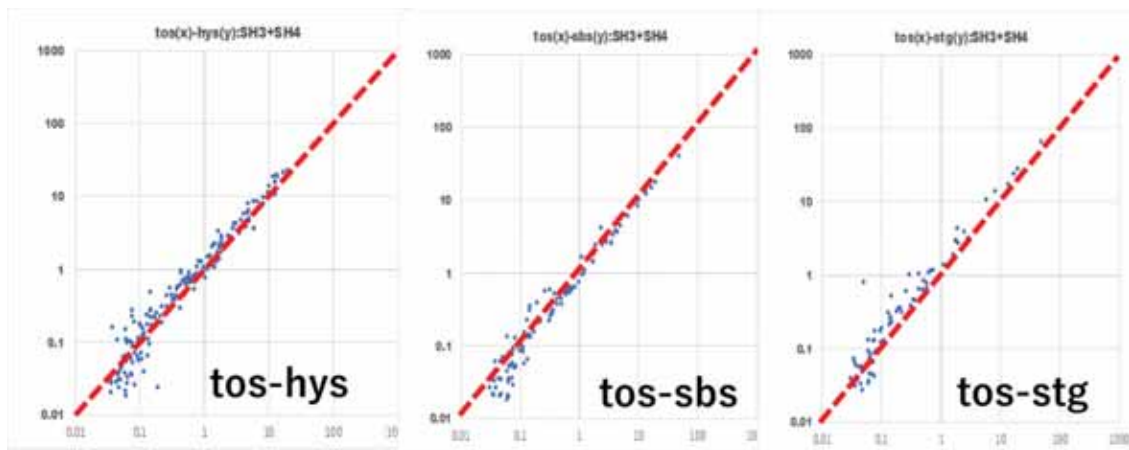


図.15 同一地震の各観測点で記録された最大振幅の比較.横軸 TOS 観測点に対して、縦軸左図は HYS、中図は SBS、右図が STG との比較.

HYS は、やや大きめな振幅を示す傾向はあるがその差は小さい。SBS は、大きめな振幅で小さな傾向があるが、やはりその差は小さい。STG は、明瞭に大きな振幅から小さな振幅まで、TOS よりも大きいことが分かる。この点から、TOS、HYS、SBS の 3 点は、同じ **M- σ -R 関係式** で、括るのが良いと考えられる。定数項に関しては、3 観測点の平均値を用いて、ひとつの式を適用することが妥当だと言える。STG に関しては、M で、0.2~0.3 の差になる振幅差を観測していることから、異なる **M- σ -R 関係式** を採用するのが良い。

5. 結論

東濃地震科学研究所で展開している歪計・応力計の十字アレイの中の、4 点の応力観測点、陶史の森 (TOS) 観測点、日吉 (HYS) 観測点、正馬様 (SBS) 観測点、深地層研究所 (STG)、で

記録される応力地震動の最大振幅(弾性体力学の応力不変量のひとつ、面積応力; σ Amax; kpa)、と地震規模(M_{JMA})、と震源距離(R ; km)の関係(**M- σ -R 関係式**)をしらべた。基本的には、歪地震動について得られた結果(笠原、2018)同様、同一の M に注目すれば、震源距離 1,000km 以内では、観測される面積応力の最大振幅は、距離の2乗に反比例し、同じ距離に注目すれば、最大振幅の対数が、 M に比例している。震源距離 1,000km以上では、観測される最大振幅は、距離の1乗に反比例し、最大振幅の対数が M に比例している。震源距離による振幅減衰の差は、最大振幅を示す波動が、前者は実体波であり、後者は表面波であることを意味している。

4 観測点すべてにおいて、**M- σ -R 関係式** としては、震源距離 1,000km 未満の実体波的減衰をする範囲では、 $M_b = \log \sigma + 2 \log R + \alpha$ 、1,000km 以上の表面波的減衰をする範囲では、 $M_s = \log \sigma + \log R + \beta$ で表せる。 M_{JMA} との比較から各観測点の定数項を決めてみたが、実際の精度として小数点2桁目は意味がなく、陶史の森(TOS)・日吉(HYS)・正馬様(SBS)観測点は、3点の平均(残差 0.02)値を用いて、次のような関係式になる。

$$M_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.75 \quad , \quad M_s = \log \sigma + \log R + 3.87 \quad (\sigma ; \text{kpa})、(R ; \text{km})$$

深地層研200(STG)観測点は、他の観測点よりも、おおよそ2倍近い振幅を記録しており、次の関係式になる。

$$M_b = \log \sigma + 2 \log R + 0.5 \quad , \quad M_s = \log \sigma + \log R + 3.75 \quad (\sigma ; \text{kpa})、(R ; \text{km})$$

これらの結果は、応力計の計測範囲は十分に広く、最大振幅という簡単な指標で、小地震から巨大地震まで($M2 \sim M9$)を ± 0.5 の精度内で、最大振幅が計測された瞬間に地震規模(M)が推定できることを意味しており、至近距離での大地震に対しても飽和することなく、津波予測に対しては非常に有用なことを強調しておきたい。

参考文献

- 石井紘・浅井康広、2017. ボアホール歪・応力観測計器により観測された弾性体力学の
不変量と計器の信頼性、地震 2、第69巻、49-58
- 笠原稔・石井紘・浅井康広、2017. 東濃地震科学研究所の歪計・応力計十字アレイで観測
された地震動記録の収録-その1 東濃地震科学研究所_歪応力地震動記録DBの
構造、東濃地震科学研究所報告、Seq. No. 38、5-22
- 笠原稔 2018. 石井式歪計・応力計で記録される地震動と地震規模の関係(1) 屏風山・
東濃研究所(歪)観測点の結果. 東濃地震科学研究所報告、Seq. No. 40、13-20

