

# 小繰り返し地震解析による宮城・福島県沖 プレート境界の準静的すべり

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター\* 内田直希・松澤 暢・三浦 哲  
平原 聡・長谷川 昭

## Interplate Quasi-Static Slip off Miyagi and Fukushima Prefectures Estimated from Small Repeating Earthquake Data

Naoki UCHIDA, Toru MATSUZAWA, Satoshi MIURA, Satoshi HIRAHARA,  
and Akira HASEGAWA

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,  
Tohoku University, Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku,  
Sendai 980-8578, Japan

(Received July 28, 2006; Accepted September 15, 2006)

Spatio-temporal distribution of quasi-static slip on the plate boundary east off Miyagi and Fukushima prefectures, NE Honshu, Japan is estimated by using small repeating earthquake data. The analysis of small repeating earthquakes has advantages of relatively high spatial resolution, especially near the trench, and the availability of long-term data (22 years) compared to GPS data. The results show that the repeating earthquakes are distributed outside the coseismic slip areas (asperities) of large earthquakes, showing that fault creep is dominant outside the asperities. The cumulative slip (slip histories) of small repeating earthquake groups reveal the existence of many non-steady aseismic slip events. Most of the episodic quasi-static slip events are associated with  $M \geq 6$  earthquakes and they are frequently seen in the areas near the Japan trench in particular. Minor afterslip ( $\sim 15$  cm) of the 2005 Miyagi-oki earthquake ( $M 7.2$ ) is also estimated in the area which encompasses the coseismic slip area of the 2005 earthquake.

Key words: 2005 Miyagi-oki earthquake, Small repeating earthquake, Quasi-static slip, Aseismic slip

### §1. はじめに

宮城・福島県沖には、太平洋プレートが日本海溝から約 8~9 cm/yr の速度で沈み込んでいる [DeMets *et al.* (1990, 1994)]. 沈み込む太平洋プレートは日本海溝から約 140 km の地点までは  $10^\circ$  程度と非常に低角で陸の地殻に接しており、それより西では約  $27^\circ$  とやや高角になり陸のマントルと接していると推定されている [Umino *et al.* (1995), Watanabe *et al.* (2005)].

このうち、宮城県沖では、1978年宮城県沖地震 ( $M 7.4$ ) を含め、1835年以降に  $M 7.3 \sim M 7.5$  程度の地震が

5回発生していたことが知られている [地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2000)]. 2005年8月16日に発生した  $M 7.2$  の宮城県沖の地震は、これらよりひとまわり小さく、太平洋プレートの沈み込み角が  $27^\circ$  の部分で発生したと考えられる [Watanabe *et al.* (2005)]. またこの地震は、1978年の宮城県沖地震のすべり域の一部を破壊したものと推定されている [Okada *et al.* (2005), Yaginuma *et al.* (2006)].

一方、福島県沖は、微小地震活動は活発であるが、歴史上、1938年の3つの地震以外  $M 7$  クラスのプレート境界地震は知られておらず、1997年から2001年の期間のGPSデータによる推定では、固着は比較的弱いと

\* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

考えられる [Suwa *et al.* (2006)].

Uchida *et al.* (2003) および Uchida *et al.* (2007) は、三陸沖と北海道南東沖のプレート境界における準静的すべり（ゆっくりすべり）の時空間分布を小繰り返し地震 (small repeating earthquake) のデータから推定し、準静的すべりと地震発生との関係について考察した。準静的すべりは、プレート境界の多様な地震活動と密接に関係していると考えられる。本論文では、宮城・福島県沖について過去 22 年間の準静的すべりを小繰り返し地震データに基づいて推定し、2005 年の宮城県沖の地震や他の地震との関係について議論する。

## §2. 解析方法

小繰り返し地震は、プレート境界の非地震性すべり域の中に存在する、孤立した小さなアスペリティが繰り返し破壊するために生じると考えられる [Ellsworth (1995), Nadeau *et al.* (1995), Igarashi *et al.* (2003)]. すなわち、小繰り返し地震のアスペリティでは、1) その周囲の非地震性すべりによって応力が集中し、2) やがてそれがアスペリティの強度の限界に達し、地震が発生する、というサイクルを繰り返す。このような小繰り返し地震発生メカニズムが正しく、小繰り返し地震は、その周囲の非地震性すべりに追いつくように発生すると考えると、逆に小繰り返し地震の積算すべりから、その周囲での準静的すべりの時間変化を推定することができる [Nadeau *et al.* (1995), Igarashi *et al.* (2003), Uchida *et al.* (2003)].

本研究では、同一観測点でのデジタル波形記録を用い、波形の相似性を利用して小繰り返し地震の抽出をおこなった。波形記録は、1984 年以降の東北大学の 13 点の観測点および東京大学の日立、筑波観測点の上下動速度記録を用い、小繰り返し地震の抽出は以下のような手順で行った。

- 1)  $M$  2.5 以上で震央間距離 30 km 以内のすべての地震をペアとして選び出す。
- 2) それぞれのペアの各観測点の波形について P 波初動から 40 秒間の波形のコヒーレンスを計算する。
- 3) 各観測点について、2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Hz におけるコヒーレンスの値の平均が 0.95 以上のペアを抽出する。
- 4) 2 つ以上の観測点で 3) の基準を満たすものを小繰り返し地震のペアとする。
- 5) 同じ地震を含むペア (グループ) は 1 つの小繰り返し地震グループとする。

この基準により、波形の相似性が十分高く、同じアスペリティが繰り返し破壊することにより生じていると考えられる地震 (すなわち小繰り返し地震) が抽出できる。

小繰り返し地震の積算すべり量は、気象庁によるマグニチュードをもとに、マグニチュード ( $M$ ) と地震モーメント ( $M_0$ ) 関係 [Hanks and Kanamori (1979)]

$$\log(M_0) = 1.5M + 16.1, \quad (1)$$

および、地震モーメントとすべり量 ( $d$ ) の関係 [Nadeau and Johnson (1998)]

$$\log(d) = -2.36 + 0.17 \log(M_0), \quad (2)$$

を用いて推定した [Uchida *et al.* (2003, 2004, 2005) と同様]。この関係式は、カリフォルニアのパークフィールドにおける小繰り返し地震を用いて、地震のモーメントおよび発生間隔とクリープ速度との比較から経験的に求められたものである。Igarashi *et al.* (2003) は東北日本沈み込み帯の深さ 40~50 km で繰り返し発生していると考えられる、宮城県沖の  $M$  7.4、釜石沖の  $M$  4.8, 3.5 の地震においても、長期間の平均のすべりレートが、太平洋プレートの沈み込み速度 [DeMets *et al.* (1990, 1994)] とほぼ等しい 8.5 cm/yr であると仮定することによりこの関係が成り立つことを示している。

## §3. 結果

### 3.1 小繰り返し地震の分布と積算すべり

Fig. 1 に小繰り返し地震グループの分布 (橙色丸) を最近の主なプレート間大地震のすべり域 (コンター) [山中 (2003), Yamanaka and Kikuchi (2004), Yaginuma *et al.* (2006)] とともに示す。小繰り返し地震は、主に日本海溝と低角逆断層型地震の発生域の西縁 (黒実線) [Igarashi *et al.* (2001)] の間に位置しており、ほとんどがプレート境界で発生していると考えられる。さらに、その分布は、大地震のすべり域 (コンター) の中心付近には少ない傾向がある。

Fig. 2 では、Fig. 1 で示した 21 個の矩形領域 (A-U) に含まれる小繰り返し地震グループの積算すべりを平均したものを示した。この積算すべりは、それぞれの領域での準静的すべりの時間変化を示していると考えられる [Uchida *et al.* (2003)]. その特徴として、低角逆断層型地震発生域の西縁付近 (領域 A, C, F, J, O; 文字を青色で示す) では比較的すべりレート (積算すべりの傾き) が高く、すべりレートに時間変化が少ないということ、海溝に近い場所 (領域 E, L, Q; 文字を緑色で示す) では、間欠的にすべりレートの加速が見られるということがあげられる。なお、1992 年以前は、収録システムの不安定性や、ダイナミックレンジの狭さなどにより、波形データの欠落の割合がそれ以降に比べ多く、約 3 割のデータが欠落していると推測されるため、すべりレートが実際よりも小さめに見積もられている可能性が高いことに注意が必要である。

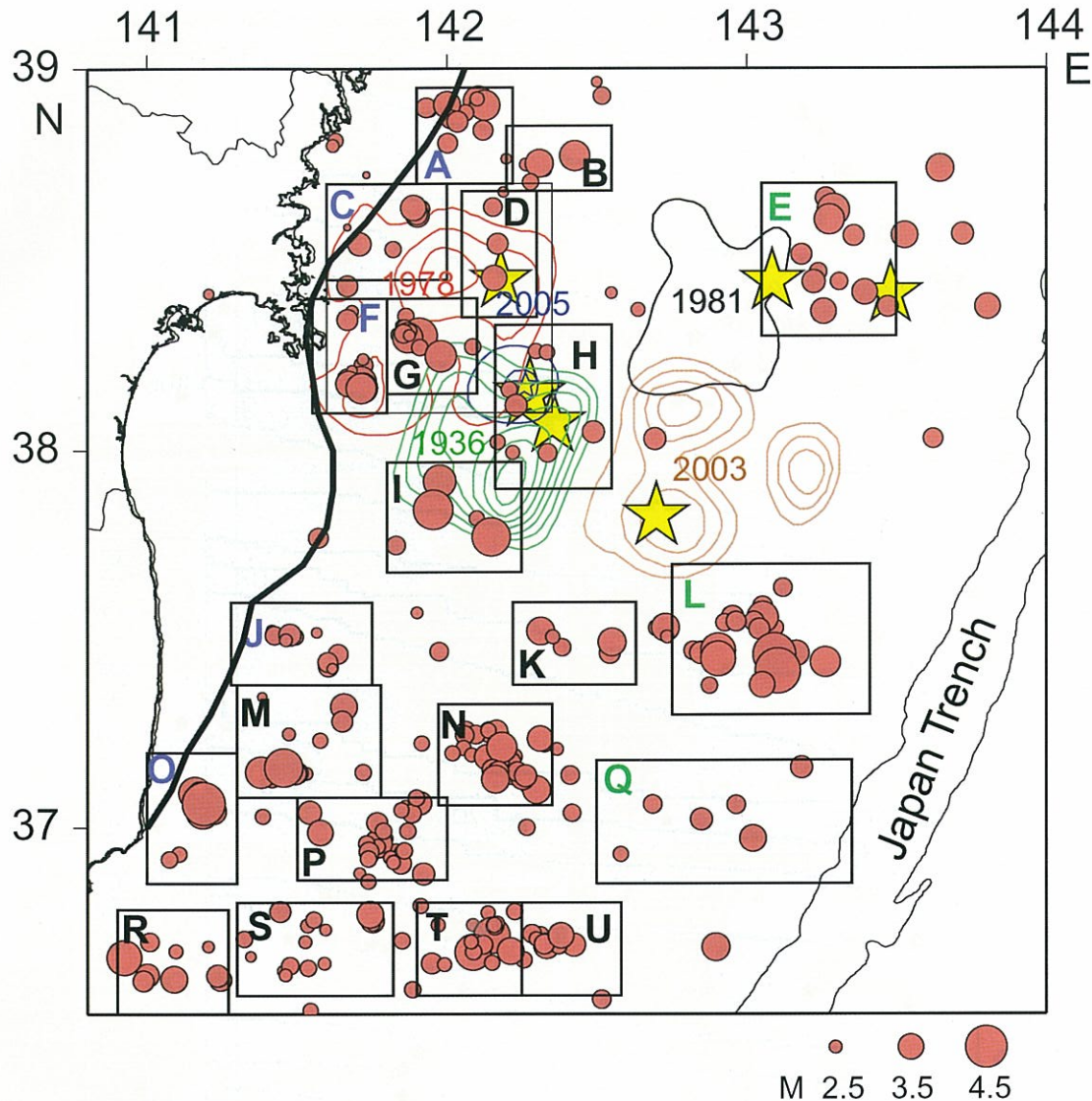


Fig. 1. Distribution of repeating earthquake groups. Each circle is located at the centroid of the hypocenters of the earthquakes belonging to each group and the size of the circle is proportional to the mean magnitude of the group. Contours denote the slip areas for recent major earthquakes [Yamanaka and Kikuchi (2004), Yamanaka (2003), Yaginuma *et al.* (2006)]. The contour intervals are 0.5 m for the 1936, 1978 and 1981 earthquakes, 0.1 m for the 2003 earthquake, and 0.3 m for the 2005 earthquake. Yellow stars denote epicenters of shallow ( $\leq 70$  km) earthquakes with magnitude 6 or larger for the period from 2005 to June 2006. Heavy line shows the western limit of low-angle thrust type earthquake occurrence [Igarashi *et al.* (2001)].

2005年8月16日の宮城県沖の地震 ( $M$  7.2) の周辺では、その発生時 (Fig. 2 の縦線) 以降、領域 D, E, I, K で積算すべりの増加の割合が大きくなっているように見える。

そのほかには、領域 E で 1992 年 7 月 18 日の三陸沖の地震 ( $M$  6.9) の後 (破線丸印 c), 領域 L で、1998 年 (破線丸印 d) および、2003 年 10 月 31 日の福島県沖の地震 [ $M$  6.9; 山中 (2003)] によるすべり域を Fig. 1 に橙色コンターで示す] の前後 (破線丸印 e, ここで見えるステップは  $M$  6.9 の地震の 20 日前に始まり、50 日後に終

わっている) にすべりレートの増加が見られる。

### 3.2 準静的すべりの時空間変化

準静的すべりの時空間分布を詳しく見るために、2 年ごとのすべりレート分布を Fig. 3 に示す。ただし、期間 11 と 12 は 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震 ( $M$  7.2) の発生時で区切った。また、すべりレートは  $0.3^\circ \times 0.3^\circ$  のウィンドウを  $0.1^\circ$  ずつずらしながら、それぞれのウィンドウに存在する小繰り返し地震グループの数が 3 つ以上の場合のみ、それらのグループのすべりレートの平均値を示している。

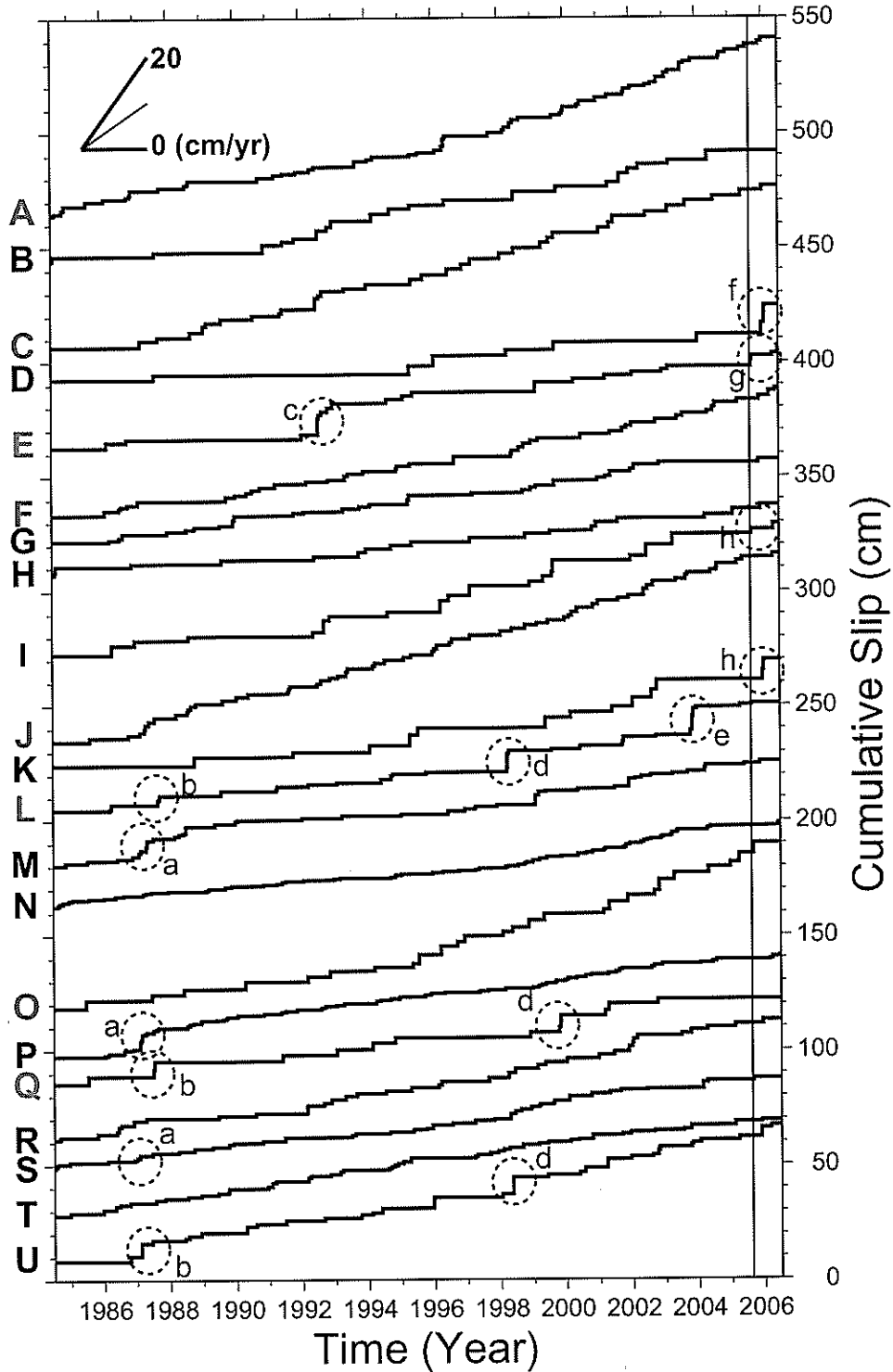


Fig. 2. Averaged cumulative slips for the areas indicated by rectangles in Fig. 1. Occurrence time of the 2005 Miyagi-oki earthquake ( $M 7.2$ ) is indicated by a vertical line. Dashed circles show major slip acceleration events.

すべりレートの空間分布をみると、 $M 6$ 以上の地震(赤星印)や $M 5\sim 6$ の地震(黄星印)と空間的に対応して、高いすべりレートが見られる。特に顕著なすべりの加速が見られるのは、期間2, 5, 8, 10, 12である。期間2(1986~1987年)では、福島県沖の海溝側(破線領域

b)と陸側(破線領域a)ですべりレートが高い。この期間には1987年2月~4月にかけて $M 6.0\sim 6.7$ の地震が6つ発生した。すべりレートの増加は最初の $M 6.4$ の地震(2月6日21時23分)の翌日から始まっている。期間5(1992~1993年)では、1992年の三陸沖の地震

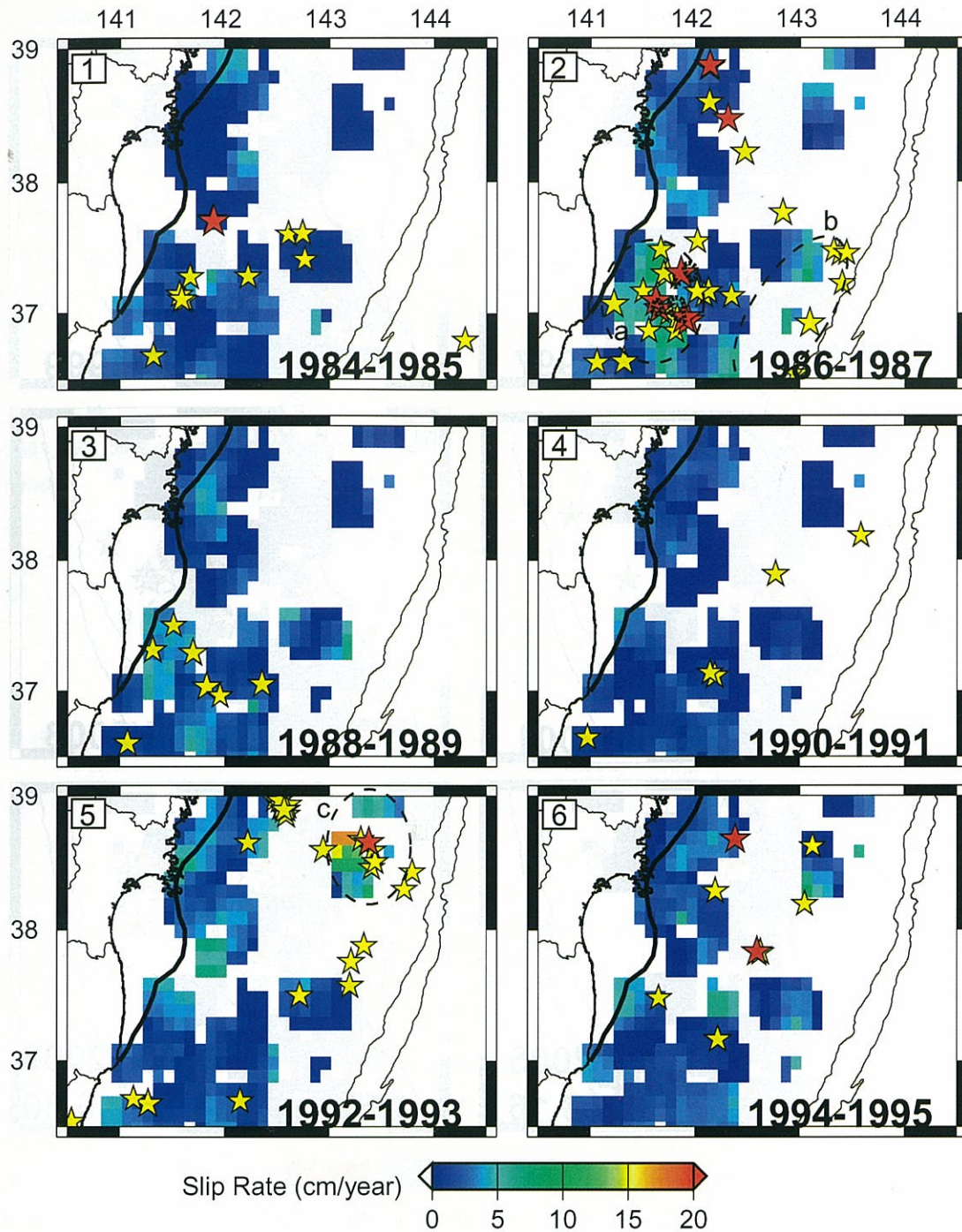


Fig. 3. Slip rate distribution for every two years (Periods 1 to 12). Averaged slip rate for  $0.3^\circ$  by  $0.3^\circ$  area is indicated by color scale at the central  $0.1^\circ$  by  $0.1^\circ$  size cell if three or more repeating earthquake groups are included in the area. Note that the end of the Period 11 is set just before the 2005 Miyagi-oki earthquake and the Period 12 starts at the occurrence of the event. Red and yellow stars denote epicenters of shallow ( $\leq 70$  km) earthquakes with  $M \geq 6$  and  $6 > M \geq 5$ , respectively. Black dotted contours show slip areas for major earthquakes [Okada *et al.* (2001), Yamanaka (2003), Yaginuma *et al.* (2006); see text for further detail]. Black rectangles in the Period I and J, and black contours in the Period L denote areas of non-steady aseismic slip inferred from GPS data analysis [Miura *et al.* (2005), Miura *et al.* (2007)]. Dashed lines indicate major slip acceleration events which correspond to the dashed circles in Fig. 2.

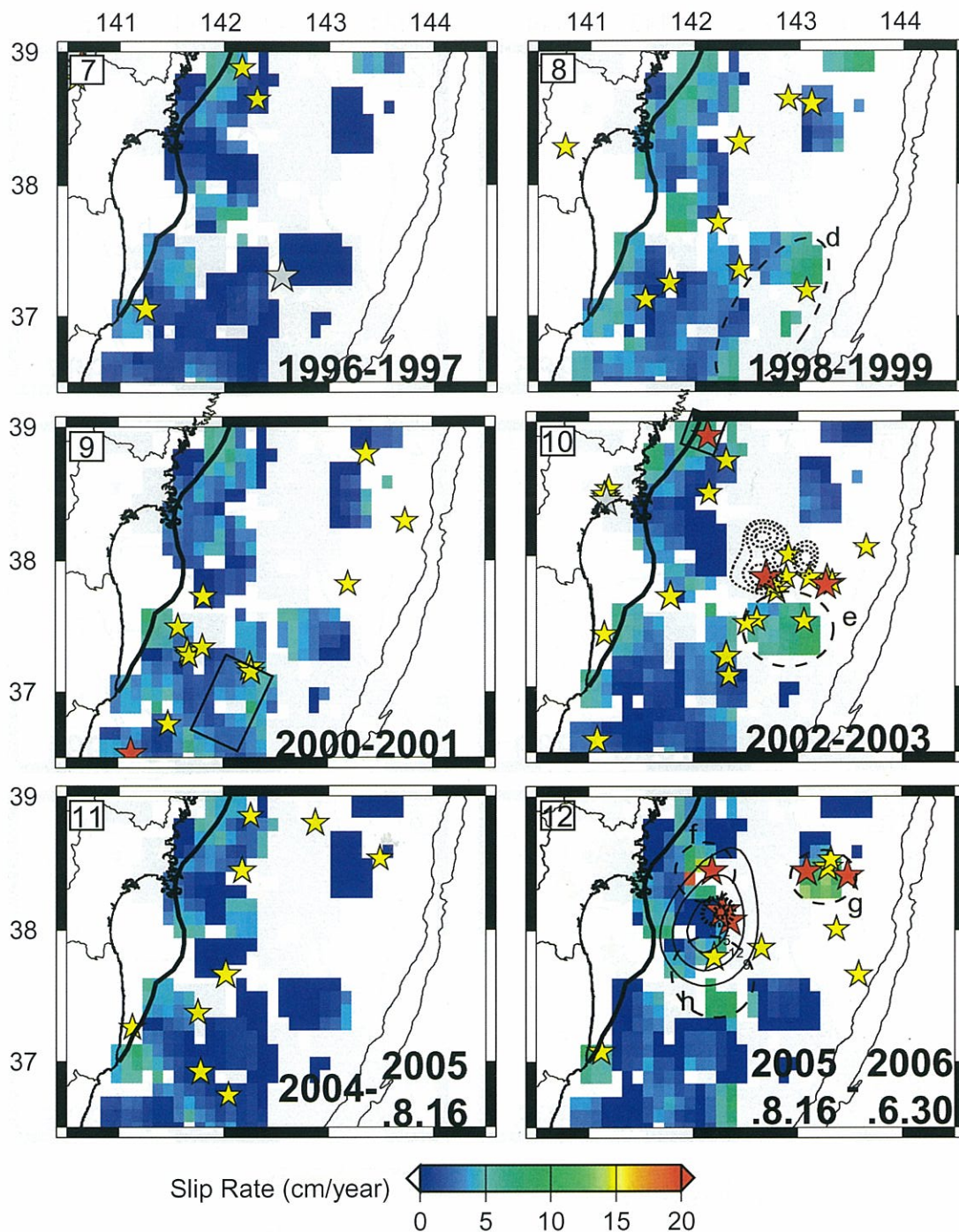


Fig. 3. Continued.

[39.38N, 143.66E,  $M$  6.9] 後、宮城県沖の海溝付近（破線領域 c）でも地震活動があった。ここで見られるすべりレートの増加は、主にこの 1992 年の地震の 4 日後に始まったすべりによるものである。期間 8（1998～1999 年）では、福島県沖の海溝近く（破線領域 d）ですべりレートが高い。この期間に特に大きな地震は発生していない。領域 d の北部のすべりは、1998 年 3 月～4 月の短期間に見られた（Fig. 2 の破線丸印 d）。期間 10（2002～2003 年）では、2003 年の福島県沖の  $M$  6.8 の

プレート境界地震 [山中 (2003) によるすべり域を黒点線のコンターで示す] の南側（破線領域 e）で高いすべりレートが見られる。この高いすべりレートは、Uchida *et al.* (2006) で議論したように、 $M$  6.8 の地震前後にわたって発生したものである。また、この期間 10 には、GPS データの解析から、2001 年 11 月 3 日の宮城県の北部沖の地震 ( $M$  6.1) の後も、余効すべりがあった（矩形領域；すべり量は地震時すべりを合わせて 40 cm）ことが推定されている [三浦・他 (2005)]。小繰り返し

地震からの推定においても、それほど顕著ではないが、高いすべりレートが見られる。

2005年宮城県沖の地震後の期間12では、そのすべり域の南(破線領域h)と北(破線領域f)で若干すべりレートの加速が見られる。これらの場所でのすべりは、南側では、2005年12月2日のM6.6の地震、北側では、2005年12月17日に発生したM6.1の地震後に顕著である。一方、海溝に近い場所(破線領域g)でも2005年8月24日のM6.3の地震後にすべりレートの加速が見られる。

## §4. 議 論

### 4.1 小繰り返し地震の分布と準静的すべりの時間変化の特徴

本研究では、過去約20年間の小繰り返し地震の探索により、大地震の地震時のすべりが大きい領域には小繰り返し地震はほとんど分布していないという結果を得た。このことは、小繰り返し地震が準静的すべり域に囲まれた小アスペリティで発生しているという考えと整合する。

また、小繰り返し地震の積算すべりの時間変化が、海溝近く(プレート境界が浅い場所)ではエピソディック、低角逆断層型地震の西縁付近(プレート境界が深い場所)では定常的に見えるという特徴が見られた。これは、三陸沖で見られた傾向[Uchida *et al.* (2003)]と同様である。三陸沖では、準静的すべりの伝播速度が、浅い場所ほど速いという特徴も見られており[Uchida *et al.* (2004)]、シミュレーションによってもこのような特徴は、説明される[Ariyoshi *et al.* (2007)]。

さらに、2年ごとの準静的すべりの時空間変化(Fig. 3)を見ると、M6以上の地震(赤星印)の後にすべりレートの増加が見られた。これは、M6程度の地震でも余効すべりが生じていることを示している。

### 4.2 福島県沖での準静的すべりの時空間変化

福島県沖では期間2に5つのM6以上の地震が発生した。Fig. 3では、岡田・他(2001)による、1987年2月6日(M6.7)、1987年4月7日(M6.6)、1987年4月23日(M6.5)の地震のアスペリティを黒点線で示した。一連の地震のうち最初の2月6日の地震後からこれらの地震時すべり域を含む領域で準静的すべりの加速が見られており(Fig. 2とFig. 3の破線a)、群発的な地震活動の発生に準静的すべりが介在していたことが示唆される[Matsuzawa *et al.* (2004)]。また、同期間には、海溝付近(Fig. 2とFig. 3の破線b)でも南部では2月、北部では8月~9月にすべりの加速が見られ、海溝近くと深い側で時間的に近接してすべりの加速があったこと

が明らかになった。

同様な特徴は、期間8から9にかけても期間2ほどははっきりしないが見られる。すなわち、期間8では福島県沖の海溝近くですべりレートの加速が見られ(Fig. 3破線d)、一方陸側でも期間8と9で他の期間に比べすべりレートが高いように見える。この期間9では、GPSデータ解析の結果からも2001年2月25日のM5.8の地震後、非正常なすべりがあったことが推定されている[Fig. 3期間9の矩形領域、三浦・他(2005)]。

### 4.3 宮城県沖での準静的すべりの時空間変化

宮城県沖では、2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2)後の期間(期間12)の、その地震時すべり域[黒点線、Yaginuma *et al.* (2006)]の周囲でのすべりレートの増加(Fig. 3破線領域f, h)や、海溝側での本震の8日後のM6.3の地震に伴った準静的すべりの加速(Fig. 3の破線領域g)が顕著である。

GPSデータの解析によって三浦・他(2007)が求めた2005年8月17日~2006年3月29日までの非地震性すべり分布と期間12のすべりレート分布(Fig. 3の黒コンターとカラー)を比べると、すべりの加速領域の広がりはおおよそ対応しているように見える。2005年M7.2の地震後、2006年3月29日までの最大すべり量を比べると、GPSおよび小繰り返し地震による推定は、それぞれ、15 cm, 17 cmで同程度である。ただし、小繰り返し地震の解析結果では、より短波長の変化が見え、広い範囲が均等にすべったわけではなく、固着が強く残っている場所も存在することが示唆される。また、GPSでは、破線gで示した程度の海溝近くの小規模な準静的すべりを検知することは困難であると考えられる。

## §5. ま と め

過去約22年間にわたるプレート境界の準静的すべりの時空間変化を推定した。その結果、最近GPSデータの解析からわかっている非正常すべりイベントに加え、GPS観測網の整備以前の福島県沖での大規模なイベント(1986~1987年)や、GPSでは検知能力の低い、海溝近くの比較的頻繁な非正常すべりイベントの存在が明らかになった。2005年宮城県沖の地震後には、震源の周囲に本震後7カ月で最大17 cm程度の準静的すべりがあったことが推定された。

## 謝 辞

本研究では、東北大学の観測点に加え、東京大学の日立および筑波観測点における、長期間の良質なデータを使用させていただきました。地震の震源およびマグニチュードは気象庁によるものを用いました。また、2名

の匿名の査読者の方々および編集委員の西上欽也氏には、本稿改善に有益な数々のご助言をいただきました。記して感謝いたします。この研究の遂行にあたり、東北大学 21 世紀 COE プログラム「先端地球科学技術による地球の未来像創出」による補助を受けました。

## 文 献

- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2007, The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic slip propagation on a subduction plate boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **256**, 136-146.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, 1990, Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, **101**, 425-478.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, 1994, Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimation of current plate, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- Ellsworth, W. L., 1995, Characteristic earthquake and long-term earthquake forecasts: Implications of central California seismicity, in "Urban Disaster Mitigation: The Role of Science and Technology", ed. by F. Y. Cheng and M. S. Sheu, Elsevier, Oxford, 1-14.
- Hanks, T. C. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa, 2001, Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquake associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A triple-planed deep seismic zone, *J. Geophys. Res.*, **106**, 2177-2191.
- Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JB001920.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2000, 宮城県沖地震の長期評価, <<http://www.jishin.go.jp/main/>> (参照 2006-7-28).
- Matsuzawa, T., N. Uchida, T. Igarashi, T. Okada, and A. Hasegawa, 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 803-811.
- 三浦 哲・油井智史・長谷川 昭・佐藤俊也・立花憲司, 2005, 宮城県沖およびその周辺における最近の地震活動と地殻変動, *月刊地球*, **27**, 126-131.
- 三浦 哲・油井智史・飯沼卓史・佐藤俊也・立花憲司・長谷川 昭, 2007, 2005 年宮城県沖地震 ( $M$  7.2) に伴った地震時・地震後地殻変動から推定されたプレート境界面上のすべり分布, *地震*, **59**, 371-379.
- Nadeau, R. M., W. Foxall, and T. V. McEvilly, 1995, Clustering and periodic recurrence of micro-earthquake on the San Andreas fault at Parkfield, California, *Science*, **267**, 503-507.
- Nadeau, R. M. and L. R. Johnson, 1998, Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790-814.
- 岡田知己・山下哲央・長谷川 昭・小池二郎・高濱聡, 2001, 2001 年 2 月 25 日福島県沖に発生した地震 ( $M$  5.8) の発生過程, 日本地震学会講演予稿集 2001 年度秋季大会, C68.
- Okada, T., T. Yaginuma, N. Umino, T. Kono, T. Matsuzawa, S. Kita, and A. Hasegawa, 2005, The 2005  $M$  7.2 Miyagi-oki earthquake, NE Japan: possible re-rupturing of one of asperities that caused the previous  $M$  7.4 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi: 10.1029/2005GL024613.
- Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato, and K. Tachibana, 2006, Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *J. Geophys. Res.*, **111**, 101029/2004JB003203.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, 2003, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1801, doi: 10.1029/2003GL017452.
- Uchida, N., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, and T. Igarashi, 2004, Pre- and post-seismic slow slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquake data, *Tectonophysics*, **385**, 1-15.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi, 2005, Recurrence intervals of characteristic  $M$   $4.8 \pm 0.1$  earthquakes off-Kamaishi, NE Japan-Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 155-165.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, S. Hirahara, and A. Hasegawa, 2006, Small repeating earthquakes and interplate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake ( $M=7.2$ ), *Earth Planets Space*, **58**, 1577-1580.
- Uchida, N., S. Yui, T. Matsuzawa, S. Miura, and A. Hasegawa, 2007, Interplate quasi-static slip before and after the 2003  $M$ 8.0 Tokachi-oki earthquake estimated from GPS and small repeating earthquake data, submitted to *Geophys. Res. Lett.*
- Umino, N., A. Hasegawa, and T. Matsuzawa, 1995, sP depth phase at small epicentral distances and estimated subducting plate boundary, *Geophys. J. Int.*, **120**, 356-366.
- Watanabe, I., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, G. Fujie, R. Hino, T. Sato, T. Takanami, Y. Murai, M. Nishino, K. Nakahigashi, T. Kanazawa, E. Kurashimo, A. Kato, T. Iidaka, N. Hirata, T. Iwasaki, K. Uehira, S. Miura, and Y. Kaneda, 2005, Seismic structure across asperity area of off-Miyagi earth-



- quake, NE Japan using OBSs, land stations and explosives, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **86**, Fall Meet. Suppl., Abstract T33B-0534.
- Yaginuma, T., T. Okada, Y. Yagi, T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa, 2006, Co-seismic slip distribution of the 2005 off Miyagi earthquake ( $M$  7.2) estimated by inversion of teleseismic and regional seismograms, *Earth Planets Space*, **58**, 1549–1554.
- 山中佳子, 2003, 10月31日福島県沖地震 ( $M$ ; 6.8), EIC 地震学ノート, **159**, <<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo-Note>> (参照 2006-7-28) .
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307, doi: 10.1029/2003JB002683.