

ブータン王国の国家地震観測網の構築支援

Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan

大見士朗・井上 公⁽¹⁾・Dowchu DRUKPA⁽²⁾

Shiro OHMI, Hiroshi INOUE⁽¹⁾ and Dowchu DRUKPA⁽²⁾

(1) 防災科学技術研究所

(2) ブータン王国経済産業省地質鉱山局

(1) National Research Institute for earth Science and Disaster Prevention, Japan

(2) Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs, Kingdom of Bhutan

Synopsis

Bhutan-Himalayan district is located along the plate collision zone between Indian and Eurasian plates, which is one of the most seismically active region in the world. However, there is no seismic monitoring system established in the Kingdom of Bhutan, whose territory is in the center of the Bhutan-Himalayan region. In this project, we are establishing the first national permanent seismic monitoring network in the Kingdom of Bhutan. We started establishing permanent seismic monitoring network of minimum requirements which is composed of six (6) observation stations in Bhutan with short period high sensitivity seismometers, strong motion seismometers, and broad-band seismometers. Obtained data are transmitted to the central processing computers in the DGM (Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs) office in Thimphu. This seismic network is definitely utilized for not only for seismic disaster mitigation of the country but also for studying the seismotectonics in the Bhutan-Himalayan region which is not precisely revealed due to the lack of observation data in the past.

キーワード: ブータンヒマラヤ, 地震観測網, 地震災害軽減, サイモテクトニクス

Keywords: Bhutan Himalaya, seismic monitoring network, seismic disaster mitigation, seismotectonics

1. はじめに

ブータンヒマラヤ地域は、インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突帯に位置しており、その地学的環境から地殻活動が活発であると考えられている。しかしながら、ブータン王国を中心とするその周辺地域においては、いまだに組織的な地震観測研究等がおこなわれておらず、詳細は未知のままである。本計画では、ブータンヒマラヤ山麓に位置する、九州ほ

どの大きさの国であるブータン王国の国家地震観測網の設置を支援し、同国の地震防災に資するとともに、その観測データ解析結果に基づいてこの地域の基本的なサイモテクトニクスを明らかにすることを主たる目的とする。

2. 学術的背景

ブータンヒマラヤは、パキスタン、ネパールなどと

ともにユーラシアプレートとインド亜大陸（インドプレート）の衝突帯に位置している．インドは、相対速度年間約 50mm でユーラシアプレートに衝突しているが、それによって生ずるエネルギーのうち 40% がインドプレートのユーラシアプレート下への沈み込みに、残り 60% がユーラシアプレートの変形に費やされているとされる（たとえば, Lyon-Caen & Molnar, 1983; Bilham et al., 1997; England & Molnar, 1997 など）．後者は、変形のみでなく、この地域での地震発生によっても解消されており、これにより、インド・ユーラシア両プレートの衝突帯は世界有数の地震帯ともなっている (Fig.1)．インド・ユーラシア衝突帯では、中央部のネパールで 2015 年 4 月 25 日に Mw7.8 の地震が発生し 8,800 人以上の死者が出たこと、また西部のパキスタンでは、2005 年に M7.6 の地震が発生し、9 万人を超える死者が出たことなど、地震災害の記憶が新しい (Fig.2)．これに対し、東部のブータンは地震活動の空白域であるという指摘もあり (Bilham, 2004; Bilham et al., 2001 など)、南隣のインド・アッサム地方で 1897 年に発生した M8.3 のシロン地震等、近隣の大地震の記載はあっても、20 世紀中にはブータン国内を震央とする M7 を超える地震は発生していないとされている．また、17 世紀半ばのブータン建国以来の耐震性の低い建造物が各地に現存するなど、この 350 年間は建築物に被害を及ぼす強震動を伴う地震をそれほど経験していないように見える．ところが、2009 年 9 月に、ブータン東部を震源とする M6.1 の直下型地震が発生し、1907 年のブータン王国成立以降、初めての死者を伴う地震災害が発生した．これに加え、2011 年 9 月には、西隣のインド・シッキム州で M6.9 の地震が発生したことにより、ブータン西部のパロ県を中心に、死者こそ出なかったものの、建築物に大きな被害が発生するなど、ブータンヒマラヤ周辺での地震活動の活発化が予想される状況となっている (Photo 1)．

3. 本研究の目標

本研究では、ブータン王国に高感度微小地震計、広帯域地震計、強震計、および震度計から地震観測網を構築して以下のような成果を得ることを目標としている．

3.1. ブータン王国の地震防災に資するデータの提出

前述のように、ブータンヒマラヤ地域では、21 世紀に入ってから、地震活動の活発化が懸念される状況になっているにもかかわらず、組織的な地震観測

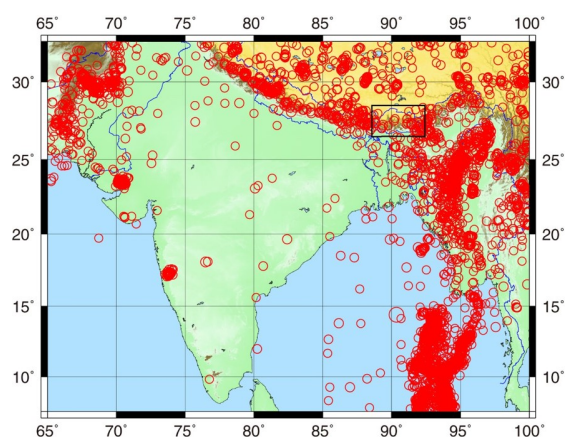


Fig.1a Seismicity in the south Asia from 1960 to 2013. Earthquakes of $M \geq 5.0$ are plotted. ISC catalogue is used. Rectangle shows the location of Bhutan.

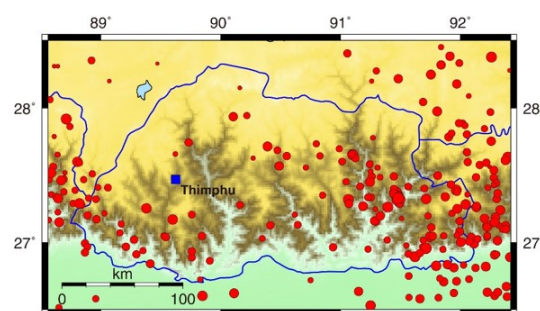


Fig.1b Seismicity in Bhutan from 1960 to 2013. All earthquakes in the ISC catalogue are plotted.

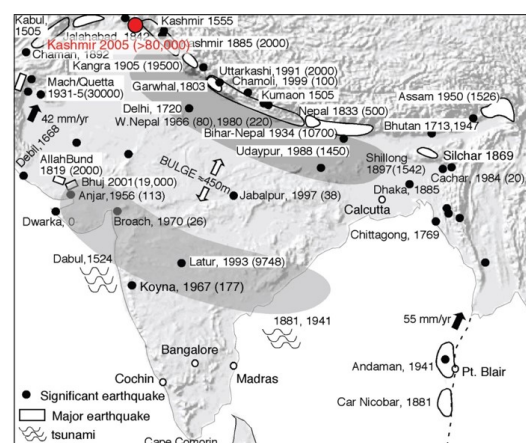


Fig.2 Destructive earthquakes in the India-Eurasia collision zone (modified from Bilham, 2004)

研究等がなされていない。このような状況のなかで、本計画によって構築される地震観測網のデータの解析結果として提出される、ブータン王国国内の微小地震分布やこれと活断層の関係、さらには有感地震時の震度分布状況等の情報は、同国の地震防災政策の基本データとして活用することができる。

3.2. ブータンヒマラヤ地域のサイスモテクトニクス研究

ブータン王国は1950年代まで実質的な鎖国政策を続けていたこともあって、ブータンヒマラヤ近辺での地震観測等の学術調査は遅れている。そのため、ネパールヒマラヤに比べてそのサイスモテクトニクスには今なお不明の点が多い。インド・ユーラシア両プレートの衝突によってもたらされる地殻活動の様相は、両者の正面衝突に相当するネパールヒマラヤ地域と、衝突帯の端部に位置する西部のパキスタンや東部のブータンでは、これが異なっていることが予想される。ブータンヒマラヤ地域で地殻活動研究の基礎のひとつである詳細な地震観測を行うことにより、同地域のサイスモテクトニクスを理解することは、インド・ユーラシア衝突帯に関する知見の空白域を埋めるだけでなく、タイプの異なるプレート収束帯である沈み込み帯に位置する日本のサイスモテクトニクスを異なる視点から理解することにも資することが期待される。同地域のサイスモテクトニクス研究の課題としては、以下のようなことが挙げられる。

(1) ブータン国内の微小地震分布

ブータン国内の地震活動は、これまでグローバルな観測網や近隣諸国の観測網、あるいは国内の短期間のオフライン観測のみでしか捉えられなかったが（たとえば、Drukpa et al., 2006）、これを国内に構築された、いわば震源域の直上の長期連続観測網で観測すると格段に詳細な地震活動が明らかになることが期待される。

(2) 微小地震分布と活断層の対応

ブータンヒマラヤ地域の地震活動は、ブータン国内を通過するインド・ユーラシア衝突帯の既知の大構造線、たとえば、MCT (Main Central Thrust), MBT (Main Boundary Thrust), MFT (Main Frontal Thrust) (Fig.3およびFig.4) のようなプレート境界に関連付けられるものが主体であるのか、それともこれらとは無関係の、地殻内の内部変形に由来するものが主であるのか、は重要な課題である。また、逆に、地震発生分布から地形学的な検出が困難である未知の



Photo 1a Collapsed house by 2009 earthquake in Trashingang (eastern Bhutan) (Komori, J., Pers. Comm.).



Photo 1b Damaged temple by 2011 earthquake in Haa (western Bhutan).

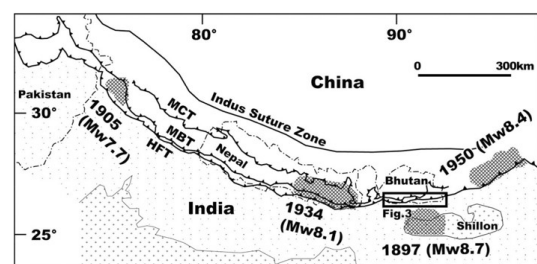


Figure 1 Major tectonic boundaries with rupture zone of great earthquakes along the Himalayan front. HFT: Himalayan Frontal Thrust, MBT: Main Boundary Thrust, MCT: Main Central Thrust. After Yeats et al. (1992).

Fig.3a Tectonic lines along the Himalaya (after Kumahara & Jmyang, 2012).

活断層を検出できるかも知重要である。

(3) 地震発生の応力場の解釈

ブータンで観測される、MCT、MBT、MFTなどのインド・ユーラシア両プレートの境界面やその分岐断層に発生する地震、また、両プレートのそれぞれ内部で発生する地震の発震機構は、これまでに提唱されているインド・ユーラシア衝突帯のテクニクスと整合的であるのか、興味をもたれるところである。また、ブータンヒマラヤ地域では、ネパールヒマラヤ地域に比較して、MFTが明瞭でない(Fig.3b)、さらにはMFTのインドプレート側に1897年のシロン地震を起こしたとされるシロン高地という特異な構造(Bilham and England, 2001)が存在するというような特徴があり、これらに起因した局所的に異なる応力場が観測されるのかも課題である。

4. これまでの経緯

ブータン政府は、2009年9月の国内での地震災害の発生を受け、2011年に新たに同国経済産業省地質鉱山局(DGM, Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs)にSeismology and Geophysics Divisionを創設した。その後、2011年9月に発生した地震災害を受け、2013年に世界銀行より日本開発政策・人材育成基金(PHRD)技術協力(TA)の資金を得て「災害軽減と復興のためのプログラム」を開始し、DGMがその任に当たっている。我々は同プログラムの地震危険度評価のためのコンポーネントの内容の立案に協力するという形で、同国の国家地震観測網の構築を進めている。

我々は、平成25(2013)年の防災研究所共同研究・拠点研究25A-01を初めとするいくつかの資金を獲得することができ、それらの境界条件の変化に沿うように当初の研究計画を修正・立案しながら、実行に移してきた。すなわち、DGMはこのPHRD/TAプログラムの資金で6点の地震観測点の施設の構築およびデータをテレメータ伝送するための設備の整備を行い、日本側は6観測点の地点選定、施設のデザインの決定、さらには設置機器の準備と設置の支援を行う、というものである。

5. 観測網の詳細

5.1. 地震監視観測網

(1) 観測点の配置

PHRD資金により構築中の観測網の観測点分布をFig.5に示す。この観測網には、地震活動の把握の

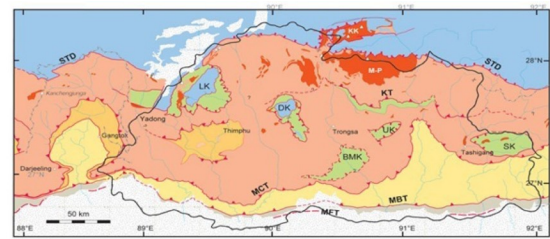


Fig.3b Location of MFT, MBT, and MCT in Bhutan (Drukpa D., Pers. Comm, after Grujic, 2002).

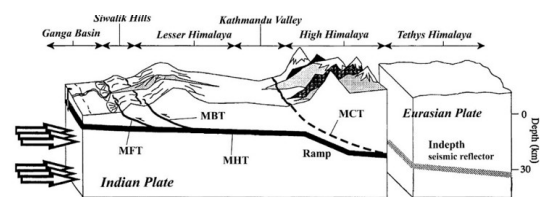


Fig.4 Typical cross section of the Himalayan region (after Takada & Matsu'ura, 2007).

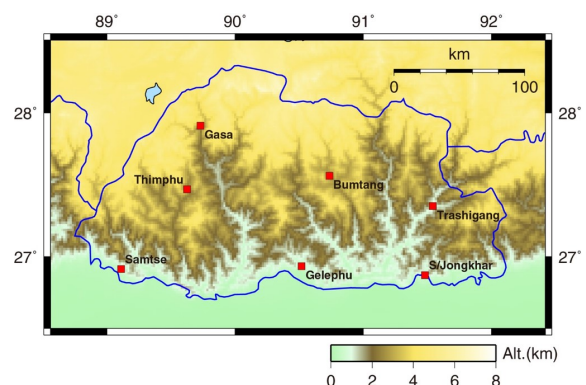


Fig.5 Seismic monitoring network in Bhutan. There are six (6) seismic stations. Short period high sensitivity, broadband, and strong motion seismometers are installed in each station.



Photo 2 Short period seismometers under inspection in DPRI.

ための短周期高感度地震計3成分のほか、強震計3成分、さらに広帯域地震計3成分を設置する。これらの地震計は、日本国内で使用していた中古の機器を整備して使用する。Photo 2に使用予定の地震計の例を示す。

観測点は、首都であるThimphu、中央部に位置するBumthang、東部のTrashigang、インド国境に近いGelephu、さらに南西部のSamtseと南東部のSamdrup - Jongkharの合計6点に設置することとした。このうち、SamtseとSamdrup - Jongkharの2点を除く4点には、平成25年度に著者らが同行し、設置場所の決定を行った。残り2点は、インド領内を通過して到達する必要があるなど、外国人にはアクセスが困難であるため、地点選定はDGMが担当し、平成26年度中に地点選定を完了した。Photo 3に2015年5月に完成したブータン南西部のSamtseの地震観測室の建物の外観を示す。



Photo 3 Seismic vault in Samdrup-Jongkhar (south eastern Bhutan).

(2) テレメータシステムとデータ処理装置

それぞれの観測点には、太陽電池パネルと蓄電池を組み合わせた電源システムを設置し、すべての機器をDCで駆動する。得られたデータは、ブータン国内の国营通信事業会社であるBhutan Telecom Ltd. (BT)の全面的な協力の下、観測点から直近のBTのオフィスまでは無線で、そこから首都ThimphuのDGMのオフィスまでは、BTのバックボーン回線を使用してリアルタイムで伝送する。

データ解析には、チューリッヒ工科大学(ETH)で開発され、グローバルな地震観測網の標準的なデータ処理システムとなっているSeisComp3 (<http://www.seiscomp3.org>; 参照日 2015- 06- 04) を使用する。これは、近隣諸国で運用される地域観測網およびグローバル観測網のデータを容易に統合できるようにするためである。

Fig.6に、各観測点に設置する機器のブロック図を示す。なお、同図には、将来の拡張の可能性を含めてGPS受信機を接続する構想を示している。短周期高感度地震計と強震計のデータはWINフォーマット(ト部・東田, 1992)を出力するデータロガーでA/D変換され、データはWINパケットとして送出される。広帯域地震計のデータは、SEEDフォーマット(<https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/>; 参照日 2015- 06- 04)で出力される。これらのデータは、無線モデム(AirMAX)を介して、近隣のBT社のオフィスへ伝送され、そこからはBT社のバックボーンネットワークに乗せられて首都Thimphuまで伝送される。Fig.7には、データ処理の概要を示す。SeisComp3システムは、SEEDフォーマットのデータは直接受信可能であるが、WINフォーマットのデータはそうで

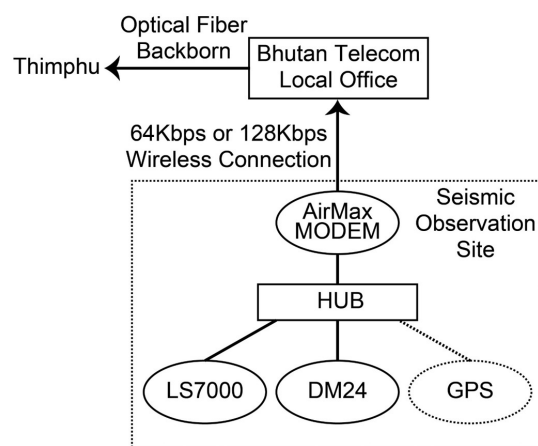


Fig.6 Data logging facilities installed in the seismic vault together with the datalink between observation site and DGM. LS7000 and DM24 show the data logger for seismometers.

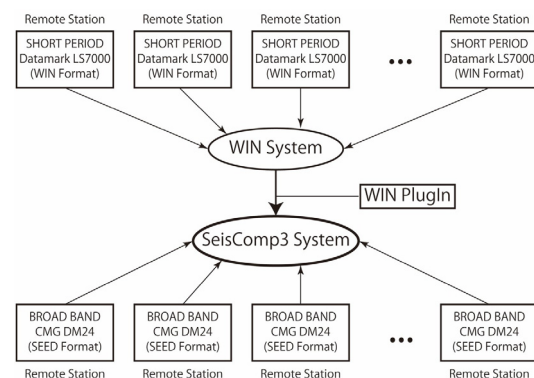


Fig.7 Outline of data processing. All the seismic data are transmitted to the data center in Thimphu. SeisComp3 together with WIN system are installed in the data processing system.

はない。そのため、各観測点から伝送されてきたWINフォーマットのデータについては、SeisCompP3に渡す前にフォーマット変換のためのプラグイン・プログラムを介している。これにより、SeisCompP3上での統合的なデータの処理を可能とする。

5.2. 震度観測網

ブータンは、国内が20のDzongkhag（ゾンカク）と呼ばれる行政区画（「県」に相当）に分割されており、それぞれのゾンカクの中心的な町にDzon（ゾン）と呼ばれる地方政庁兼各地方の中央寺院という性格をもつ建造物がある。それぞれのゾンDzonに震度計を設置し、有感地震の震度情報のみを、行政用のインターネット回線を使用してThimphuのDGMのオフィスに集約する予定である。震度計のネットワークについては、各地のゾンカクとの交渉を継続中であり、平成27年度以降に著者のひとりである井上が中心になって具体的な設計と設置を行う予定である。震度計の設置予定点の分布をFig.8に示す。

6. プロジェクトの現状について

2015年5月現在、DGMは各観測点の観測室の建設を進めている。これらが完成次第、機器の設置を行い、運用を開始する予定である。

また、本計画は、当初は PHRD/TA による財政的サポートのみで始まったものであるが、その後、東南アジア等の津波早期警戒網等の構築を行っている国連組織である RIEMS (Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System for Africa and Asia) やインド資本で建設中の大型水力発電用ダムの電力会社 (PHPA, Punatshan Chhu Hydro Power Plant Authority) 等からの観測網構築支援の申し出があり、それらの機関との調整も行っている。これらの観測点を統合すると、Fig.9 のような地震監視観測網が完成する予定で、地震防災のための基礎データの取得のみならず、同地域のサイスモテクトニクス研究に資する有用なデータを得られることが期待される。

なお、京都大学防災研究所は、ブータンヒマラヤ地域を対象として地震災害のみならず土砂災害等を含めた包括的な防災研究を進めていくため、DGM との間で平成 26 年 3 月に学術交流協定(MoU)を締結した。

謝 辞

本研究に使用した経費は、以下の研究資金によるものである。記して感謝申し上げる。京都大学防災研究所平成 25 年度共同研究・拠点研究 25A-01、同

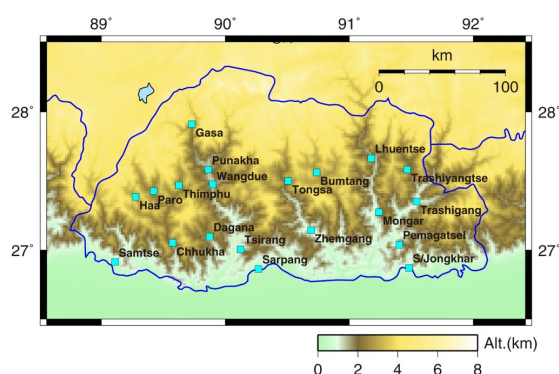


Fig.8 Intensity meter network under design. Instruments are installed in each local government office.

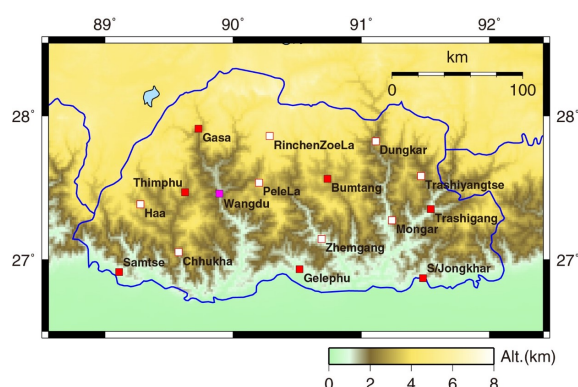


Fig.9 Possible enhanced seismic monitoring network which unified seismic stations of other agencies. Red solid squares are the seismic stations operated by DGM. Red open squares and magenta solid square are the candidate seismic stations planned by RIMES, and PHPA, respectively.

平成 26 年度共同研究・拠点研究 26A-05, 京都大学平成 25 年度融合チーム研究プログラム・SPIRITS-, JSPS 平成 26 年度二国間交流事業共同研究・セミナー（オープンパートナーシップ共同研究）。

DGM との MoU 締結や物品輸出の手続き等について、京都大学宇治 URA 室の吉岡佐知子氏の多大なるご支援をいただいた。記して感謝申し上げる。

参考文献

- ト部 卓・束田進也 (1992): win-微小地震観測網波形観測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版），地震学会講演予稿集，No.2, p.41.
- Bilham, R., Larson, K., Freymueller, J., Project LdyLhim members (1997): GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. Nature 386, pp. 61-64.

- Bilham, R. and England, P. (2001): Plateau Pop-up during the 1897 Assam earthquake, *Nature*, 410, pp. 806-809.
- Bilham, R. (2004): earthquakes in India and the Himalaya: tectonics, geodesy and history, *Annal. Geophys.*, 47, pp. 839-858.
- Drukpa, D., Velasco, A. A., and Doser, D.I. (2006): Seismicity in the Kingdom of Bhutan (1937-2003): Evidence for crustal transcurrent deformation. *J. Geophys. Res.* 111, B06301, doi:10.1029/2004JB003087.
- England, P., Molnar, P. (1997): The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophys. J. Int.* 130, pp. 551-582.
- Grujic, D., Hollister, L. S., and Parrish, R.R. (2002): Himalayan metamorphic sequence as an orogenic channel: insight from Bhutan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198, pp. 177-191.
- Kumahara, Y. and Jamyang, C. (2012): Preliminary mapping for active fault in the southern Bhutan Himalaya, *Bhutan Geology*, 9, pp. 19-23.
- Lyon-Caen, H., Molnar, P. (1983): Constraints on the structure of the Himalaya from an analysis of gravity anomalies and a flexural model of the lithosphere. *J. Geophys. Res.* 88, pp. 8171–8191.
- Takada, Y. and Matsu'ura, M. (2007): Geometric evolution of a plate interface-branch fault system: Its effects on the tectonic development of the Himalayas, *J. Asian Earth Sci.*, 29, pp. 490-503.

(論文受理日：2015年6月5日)