

# 国際応用地質学会第 11 回アジア地域会議 (ARC-11) が開催される ネパールの応用地質

長谷川修一 (香川大学)

Ranjan Kumar Dahal (Tribhuvan University)

## 1. はじめに

ネパール連邦民主共和国 (以下ネパール) は、2008 年に王制が廃止された連邦民主共和国で、東、西、南の三方をインドに、北方を中国チベット自治区に接する東西方向に細長い内陸国である。2011 年の人口調査では 2650 万人と集計されているが、IMF によると 2016 年 10 月時点の人口は約 2900 万人と推計されている。

ネパールは、インド・アリア系の民族とチベット・ミャンマー系民族からなる多民族・多言語国家で、公用語のネパール語以外に約 90 の異なる言語や地域語を持つ 100 以上の民族が一応平和に暮らしている。また、民族とカーストが複雑に関係し、宗教もヒンドゥー教 (元国教)、仏教、アニミズム等が混在している。ネパールは、人類が平和共存するうえでモデルとなる国であろう。

2015 年 4 月 25 日にネパール中部で発生したゴルカ地震 (Mw7.8) では、ネパール国内だけで約 9000 人が亡くなり、50 万人が家を失い、数十万の建物が被害を受けた。また、この地震によって震源域のカトマンズ盆地にある世界文化遺産の建造物が倒壊するなど、主要な外貨獲得産業である観光業が大打撃を受けた。地震後 2 年経過した

が、経済力に乏しく、政治的な混乱もあり、復旧、復興は進んでいない。

このネパールのカトマンズ市で 2017 年 11 月 28~11 月 30 日に国際応用地質学会第 11 回アジア地域会議が開催される。ネパールは、南側のインド亜大陸が北側のユーラシア大陸に衝突し、その下に沈みこんで形成されたヒマラヤ山脈の中央部に位置している (図-1)。ネパールはヨーロッパのアルプス山脈と同じ衝突帯に位置するが、地震などの地質災害や建設工事に係る地質工学的課題は、アルプスよりむしろ沈み込み帯に位置する日本との共通点の方が多い。

ここでは、応用地質学的視点からみたネパールの魅力を紹介する。

## 2. ネパールの地形

ネパールの地形は、地質構造帯とほぼ調和的な東西方向の地形列からなり、北からチベット高原、トランス・ヒマラヤ、高(大)ヒマヤラ、ヒマラヤ前縁、ミッドランド、マハバーラト山脈、デュン盆地、シワリク丘陵及びテライ平原に大別される<sup>2)</sup>(図-1)。

高(大)ヒマラヤは 6000m 以上の山岳地からなる世界の屋根である。ここでは、氷河による侵食作用によって岩肌が露出した長大斜面が形成されている。トランス・ヒマ

ラヤ及びヒマラヤ前縁は、高(大)ヒマラヤの前山を形成する大起伏山地で、長大な斜面が形成されている。

ミッドランドは、北側のヒマラヤ前縁とマハバーラト山脈の 3000m 級の山脈の間の地帯で、山間盆地が点在するヒマラヤにおけるオアシスのような地帯である。ミッドランドでは大規模な地すべりによって形成された緩斜面と地すべり堰き止め湖跡の段丘や盆地に耕地と居住地が集中している。

首都のカトマンズがあるカトマンズ盆地は、周囲を山地で囲まれた高ヒマラヤから堆積物が供給されない盆地で、厚い湖成堆積物から構成されている<sup>3)</sup>。ここでは住宅の建材に湖成粘土を焼成した煉瓦を利用している。一方、ヒマラヤのトレッキング<sup>4)</sup>の拠点であるポカラ盆地は、アンナプルナ山塊から供給された氷河湖決壊洪水堆積物がセティ川の溪谷を埋め立てて形成された盆地で、後氷期以降の河川侵食によって段丘となっている所もある。ここでは、住宅の建材に河床や段丘を構成する変成岩礫や基盤岩から採石した石材を使用している。

マハバーラト山脈には、急峻な長大斜面が発達し、大規模な地すべりによって形成された緩斜面に耕地と人家が集中している。これに対して、シワリク丘陵は標高 1000m 級の山地で、軟岩が不安定な急斜面を形成しているため山地斜面は耕地や居住地としてあまり利用されていない。

テライ平原は、第四紀の厚い未固結堆積物からなる平野で、亜熱帯の気候・植生・景観が特徴である。耕地と居住地は平坦なデュン盆地とテライ平原に集中し、ネパールの農業と人口を支えている。

### 3. ネパールの気候

ネパールには南北約 200km の間に、標高約 70m のテライ平原の亜熱帯から標高 8000m を超える高ヒマラヤの極地までの高度差に起因する気候区がある(図-2)。また、降雨は 6 月から 9 月のモンスーン期に集中し、毎年のように豪雨による洪水や土砂災害によって大きな被害が発生している<sup>2)</sup>。モンスーンによる降雨はヒマラヤ山脈の南側に集中し、豊富な降雨によって稲作が営まれているが、ヒマラヤ山脈の北側のチベットは乾燥気候となっている。ちなみに、首都カトマンズの年間平均降水量は、その南にそびえるマハバーラト山脈の陰になるので約 1400mm と東京並みであるが、アンナプルナ山塊のお膝もとのポカラでは約 4000mm に達し、アンナプルナ山塊の北側のジョムソンでは約 250mm と著しく少ない。ネパールのトレッキングは 10 月にモンスーンが終わって、天候が安定する(晴天が続く)11 月がベストシーズンである。

### 4. ネパールの地質と地質構造

ネパールの地質は、北からチベット・テーチス帯、高ヒマヤラ帯、低ヒマラヤ帯、シワリク帯、テライ帯に大別される<sup>2)</sup>(図-3)。

高(大)ヒマラヤは、テーチス海に堆積した白亜紀の堆積岩および変成岩類それに貫入する中新世花崗岩類からなる。

低(小)ヒマラヤは、変成岩、古生代と中生代の堆積岩および古生代の花崗岩類から構成されている。なお、ミッドランドの高(大)及び低(小)ヒマラヤ帯の岩盤は、風化が岩盤の深部まで進行し、赤色風化殻が形成されている。

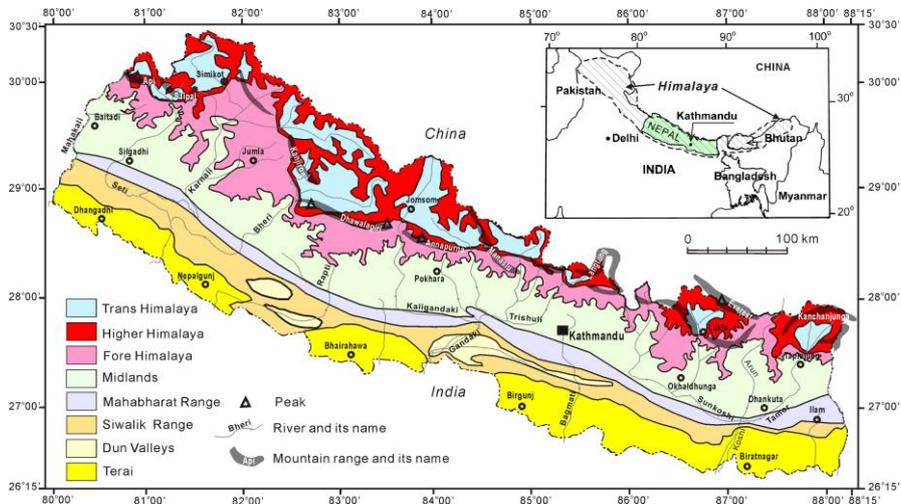


図-1 ネパールの地形区分 (Ranjan Kumar Dahal 原図)

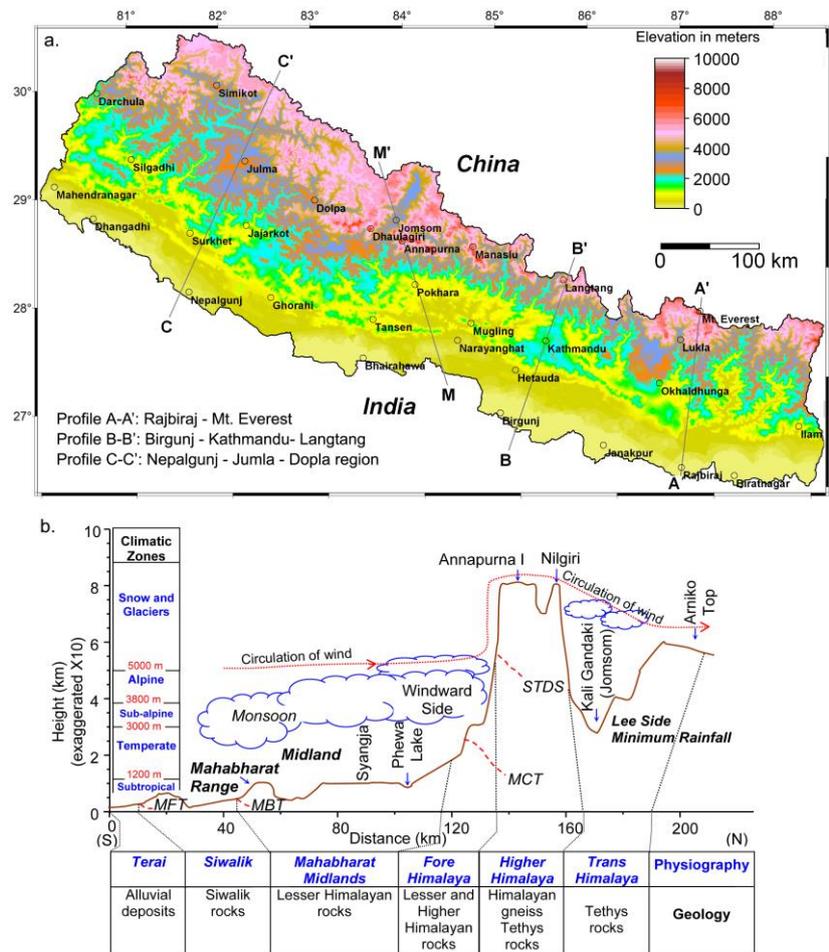


図-2 a.ネパールの高度分布と b.模式南北断面 (Ranjan Kumar Dahal 原図)

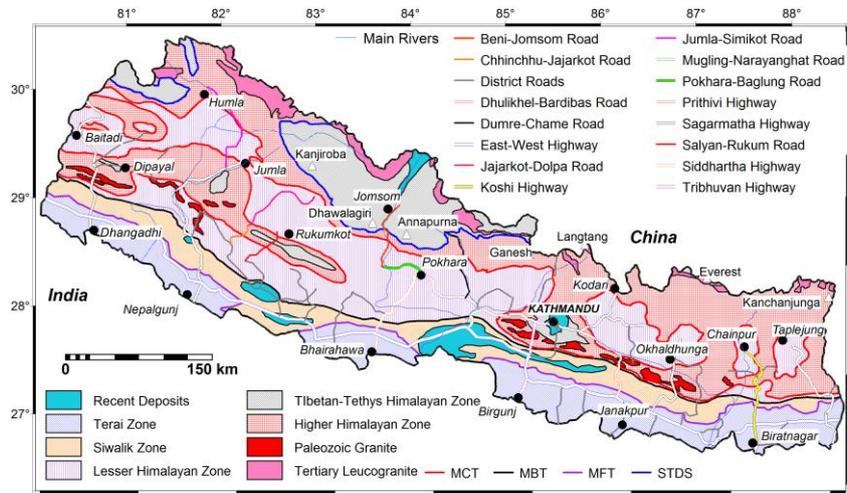


図-3 ネパールの地質区分と主要道路 (Ranjan Kumar Dahal 原図)

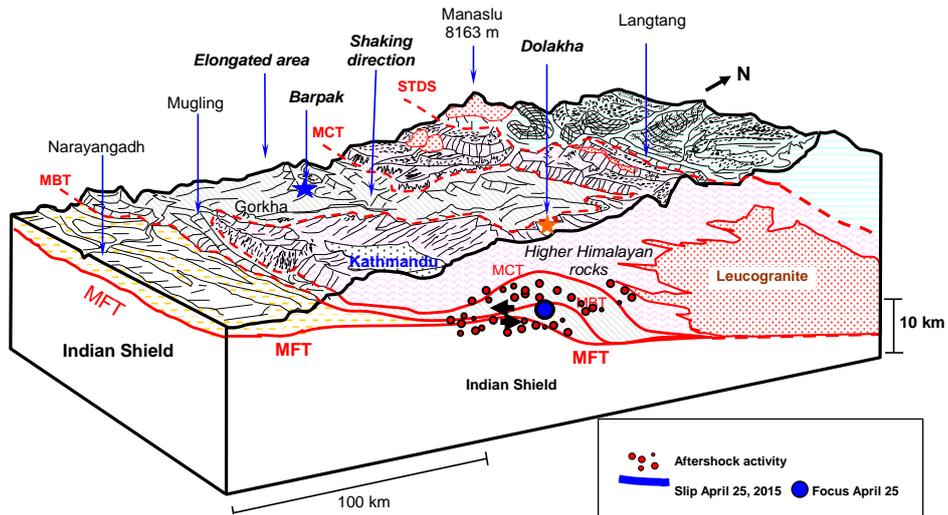


図-4 2015年ゴルカ地震の余震分布 (Ranjan Kumar Dahal 原図)



図-5 2015年ゴルカ地震では、斜面崩壊は高ヒマラヤに集中し、震源地のミッドランドではほとんど発生しなかった。

外ヒマラヤ (Sub-Himalaya)はシワリク (Siwalik) 帯とも呼ばれ、ヒマラヤ前縁に堆積した新第三紀の堆積岩からなる。テライ平原は、第四紀の厚い未固結堆積物からなる平野で、亜熱帯の気候・植生によって南アジアの景観を呈している。

前述の地質帯の境界には、大断層が東西に走っている。高ヒマラヤと低ヒマラヤの境界は、プレート衝突によって形成されたとされる主中央衝上断層 (MCT : Main Central Thrust) である。MCT に沿って認定された活断層は西ネパールに限られ、低角衝上断層によって高ヒマラヤを成長させたMCTは役割を終えているようである<sup>5)</sup>。

低ヒマラヤと外ヒマラヤ (シワリク) の境界は、主境界衝上断層 (MBT : Main Boundary Thrust) で、MBT に沿っては顕著な活断層活動が連続的に認められ、シワリク山地の背後で低ヒマラヤは急崖をもってそそり立っている<sup>5)</sup>。

シワリク山地とテライ平原 (ガンジス平野) との地形境界を形成しているのがヒマラヤ前縁衝上断層 (MFT : Main Frontal Thrust) である。この断層に沿って活断層帯が形成され、沈み込み帯のメガスラストの地表地震断層に対応している。

## 5. ヒマラヤ山脈の形成過程

ヒマラヤ山脈の形成は、約 5000 万年前にインド亜大陸がアジア大陸へ衝突開始したことに始まる<sup>6)</sup>。その当時は、インド亜大陸がインダスツァンポー縫合帯でアジア大陸の下に沈み込んでいたが、約 3000 年前に沈み込みが現在の MCT に移動した。その結果、2500-1500 万年前に優白色花崗岩の貫入と同時に沈み込んだインド亜大陸が

急上昇し (ヒマラヤの急激な上昇)、2200-1900 万年前にテーチス海に堆積した地層が北へ滑り落ちたと推定されている (STDS の活動)<sup>6)</sup>。なお、カトマンズ盆地には低角度ないし南に傾斜する MCT 上盤側の高ヒマラヤの変成岩類等が分布する。この南傾斜の MCT はヒマラヤ山脈の隆起に伴う重力滑動による根無しすべり面で、本来の MCT とは区別すべきかもしれない。優白色花崗岩の貫入後、沈み込みは 1500 万年前以降に MBT に移動して、マハバート山脈を隆起させた。現在、沈み込みのメガスラストの地表地震断層は MFT に移動し、シワリク丘陵を隆起させている。

なお、2015 年ゴルカ地震では、震源域のミッドランドで隆起し、背後の高ヒマラヤは沈降した<sup>7)</sup>。これは高ヒマラヤの隆起は、プレートの沈み込みによるメガスラストではない可能性を示している。

## 6. 応用地質学的視点から見たネパールと日本の類似性

ヒマラヤ山脈は衝突で形成された山脈なのに対して、日本列島は沈み込み帯の島弧である。このようにネパールと日本とは、プレートテクトニクスとしては異なる環境にあるにもかかわらず、ネパールと日本の地形・地質および景観には類似した点も多い<sup>8)</sup>。

### (1) 巨大地震の脅威

日本列島は、沈む込む太平洋プレート及びフィリピン海プレートによって沈み込み帯の巨大地震と内陸の活断層による直下型地震の脅威にさらされている。また、ヒマラヤもインド亜大陸プレートとユーラシアプレートの衝突帯にあたり、ネパールでは

約 100 年間隔で M8 クラスの沈み込み帯の巨大地震に襲われてきた<sup>9)</sup>。なお、活断層による直下型地震も想定されるが、大規模な地すべり地形が形成されているため、変動地形によって確認されている活断層は限定的である。

2015 年 4 月にネパール中部で発生したゴルカ地震 (Mw7.8) は、プレート境界沿いの巨大地震であったが、震源断層面が MFT に達しなかったため、マハバーラト山脈、シワリク丘陵及びテライ平原における被害は軽微で、被害はミッドランド以北に集中した<sup>10)</sup>。また、乾季の終わりの 4 月～5 月に大地震が発生したため、河道を閉塞するような大規模な地すべりやヒマラヤ津波にたとえられる氷河湖決壊洪水が発生しなかった。それでも、ネパールでは地震によって約 9000 人が亡くなり、50 万人が家を失い、数十万の建物が被害を受けた。

この地震で特筆すべきことは、カトマンズ盆地では、厚い湖成堆積物が短周期成分を減衰させ、周期約 6 秒の長周期地震動が卓越し、観測された最大加速度も 200gal に達しなかったことである<sup>10)</sup>。このため、世界遺産に指定されている仏塔等の長周期の建造物には大きな被害が発生したが、耐震性の低い RC 建造物が倒壊を免れ、首都カトマンズの機能が保たれた。また、乾期の時期と地下水の汲み上げによって地下水位が低下していたことも、液状化被害の発生を少なくしたと思われる<sup>10)</sup>。

斜面崩壊は震源断層直上のミッドランドでは少なく、震源断層から離れたヒマラヤ前縁と高ヒマラヤで多発した (図-5)。これは、ミッドランドを構成する山地斜面が古期地すべり起源の緩みの著しい岩盤から構

成されているため、短周期成分の強振動が減衰したためと推定されている<sup>11)</sup>。カトマンズ盆地における建物被害が甚大にならなかったのは、長周期地震動は、地すべり起源の厚い緩み岩盤と厚い湖成堆積層による 2 重のクッションによって短周期の強震動が減衰したと推定される。

## (2) 高い山に中新世の花崗岩

ネパールと西南日本は地形配置および地質構造が類似している<sup>8)</sup>。また西南日本外帯と高ヒマラヤの高まりには、中新世の花崗岩類が分布している<sup>12)</sup>。すなわち、西南日本外帯では、赤石山脈 (南アルプス) の駒ヶ岳 (2967m)、紀伊半島の大峰山 (1915m)、四国では石鎚山 (1982m)、九州では宮之浦岳 (1935m) のように、地域の最高峰付近には中期中新世の花崗岩体もしくは火砕岩が分布している。

一方、高ヒマラヤにおいてもエベレスト (8850m)、マナスル (8125m) のように山体には中新世の年代を示す優白色花崗岩が貫入している (図-3, 4)。この花崗岩類は、主として堆積岩起源の地殻物質が部分もしくは全溶解して形成されたと考えられている<sup>13)</sup>。

西南日本外帯の山地とヒマラヤ山脈の高ヒマラヤは沈み込み帯における巨大地震の際には沈降しているので、外帯山地と高ヒマラヤの隆起には、相対的に密度の小さい中新世花崗岩の浮力が関係している可能性が高い<sup>12) 14)</sup>。また、仏像構造線などの大断層が第四紀における活動が認められないのは、断層面を貫いた外帯花崗岩が杭になっている可能性が指摘されている<sup>14)</sup>。同様に MCT が活動性を失い、MBT ヘシフトしたのも MCT を貫いた優白色花崗岩の杭効果

の結果と推定される。

なお、西南日本における外帯花崗岩は、2500-1500 万年前の日本海拡大直後に形成された。それにしても、2500-1500 万年前に優白色花崗岩の貫入に伴うヒマラヤの隆起が日本海の拡大時期と一致しているのは偶然だろうか。大変興味深い。

### (3) 非火山地帯における熱い温泉

西南日本外帯とネパールには第四紀の火山は分布していないが、中期中新世の花崗岩体と密接に関係した温泉が分布している。

西南日本外帯には、紀伊半島の湯の峰温泉（泉温 90℃）等のように、第四紀の火山地帯でないにもかかわらず通常的地温勾配よりはるかに高い温泉がある<sup>15)</sup>。西南日本外帯の温泉の周辺には、大峰酸性岩類のような中期中新世花崗岩が分布していることが多いので、このような非火山地帯の温泉は中期中新世花崗岩体が関係していると推定される<sup>16)</sup>。また、紀伊半島南部の温泉の熱源には、スラブ起源の高温流体の寄与が推定されている<sup>17)</sup>。

一方、ヒマラヤにも数多くの温泉が知られ、その最高温度は 71℃である<sup>18)</sup>。これらの温泉は、地下深部に浸透した天水が花崗岩貫入マグマの潜熱によって加熱され、MCTやMBF等の大断層帯に沿って湧出する、いわゆる構造規制型温泉であると解釈される<sup>18)</sup>。

### (4) 非火山地帯の熱水変質の重要性

紀伊半島には、西南日本外帯には第四紀の火山がなく、また新第三紀の火成岩体の分布もわずかなため、熱水変質作用による岩盤劣化が見逃されてきたが、その地質工学上の重要性が認識されるようになった。例えば、四国の中央構造線沿いでは中期中

新世火成活動に伴う熱水変質が、地すべりの素因<sup>19)</sup>や掘削岩盤の膨張<sup>20)</sup>や<sup>21)</sup>の原因となっている。同様の熱水変質作用は、中央構造線付近だけでなく、地質帯を問わず西南日本外帯に広く存在する可能性が高く、地すべりや深層崩壊の素因として注目される。

ネパールにおいて低ヒマラヤ帯の大規模地すべりのすべり面粘土が、中新世優白色花崗岩の貫入後の熱水変質によって形成されたと推定されている<sup>22)</sup>。ネパールにおいても、熱水変質起源の粘土帯・粘土脈は地すべりの素因として、またトンネル掘削時の地山の押し出しの原因として今後注目されるであろう。

## 7. 会議後の JSEG 特別巡検 (Ex-5: カトマンズーゴルカーポカラ 3 日間) の見学予定箇所

### (1) 12 月 1 日

カトマンズからポカラへの国道沿いの斜面災害と対策及びゴルカ地震の震源地を見学 (バスでの移動)。この区間に道路沿いの斜面災害については<sup>23)</sup>の報告がある。

**Stop 1 (Nagdhunga): Naubise –Thankot**  
道路トンネルが計画されている丘陵は古期地すべり岩体か？

### Stop 2 (Dharke)

1993年7月に発生した大規模土石流堆積物の観察及び露頭があれば MCT の観察

### Stop 3 (Krishnabhir)

大規模地すべり地形と降雨による斜面崩壊との関係、植生工主体の安価な斜面崩壊対策。

### Stop 5 (Lunch at River Side Spring Resort)

トリスリ川の段丘地形

### Stop 6: (Gorkha 宮殿)

ゴルカ地震の震源地の被害と復興状況

(2) 12月2日

テーマ：ポカラ盆地の成り立ちと地質災害

### Stop 7 (World Peace Pagoda)

ポカラ渓谷とアンナプルナ山塊の地形

### Stop 8 (Seti 川河床)

段丘堆積物 (Pokhara gravel) は氷河湖  
決壊洪水堆積物か？

### Stop 9 (Sarangkhot)

アンナプルナ山塊に連続する Seti 川の段  
丘 (「応用地質」平成 29 年 4 月号表紙)

### Stop 10 (Armala)

段丘面上 sink hole の形成過程

### Stop 11 (Tatopani)

MCT 近くの温泉と 2013 年に発生した晴  
天の突発洪水 (土石流)

### Stop 12 (Davis fall and Guptheswor)

Pokhara gravel 中の洞穴

注：希望者は、2 日午後の国内便でポカラ  
空港からカトマンズ空港へ移動可能。

(3) 12月3日

午前の国内便でポカラ空港からカトマン  
ズ空港へ (天気が良ければ左窓側の席から  
マナスル等のヒマラヤの高峰を観察)。カト  
マンズ到着後、希望者は世界遺産復興状況  
の視察の予定。

## 8. おわりに

ヒマラヤ山脈は北緯 30° 付近を中心に  
東北東から西南西方向に約 2400km に連な  
る 8000m 級の峰々が連なる地球上最大の  
高まりで、厚さ約 12km の対流圏最大の障  
壁となって、偏西風等に大きな影響を与え、  
南西アジアの乾燥気候と東南アジアのモン  
スーン気候を形成した<sup>6)</sup>。東南アジアのモ

ンスーン地帯の多くは亜熱帯から温暖帯の  
位置する稲作地帯で、納豆などの発酵食品  
とお茶の文化がある。このように考えると、  
日本の食文化はヒマラヤ山脈の形成の副産  
物ではないだろうか。またヒマラヤの急速  
な隆起と日本海形成の同時性の意味とその  
地質工学的評価は応用地質学の第一級の課  
題かもしれない。

なお、本資料のカラー版は学会ホームペ  
ージの国際応用地質学会 IAEG 情報に掲載  
しているので活用いただきたい。

## 参考文献

- 1) 在日ネパール国大使館ホームページ  
<http://www.nepalembassyjapan.org/japanes>  
(2017 年 3 月 22 日閲覧)
- 2) Dahal R.K., Hasegawa, S. (2008) :  
Representative rainfall thresholds for  
landslides in the Nepal Himalaya,  
Geomorphology, Vol. 100, pp.429-443.
- 3) 酒井治孝 (2005) : ヒマラヤ山脈とチベット高  
原の上昇プロセス：モンスーンシステムの誕生  
と変動という視点から、地質学雑誌, Vol. 111,  
No.11, pp.701-716.
- 4) Upreti B. N. and Yoshida M. (2005) :  
GUIDBOOK for HIMALAYAN TREKKERS,  
Department of geology, Tri-Chandra Campus,  
Tribhuvan University, 165p.
- 5) 中田高 (1997) : ヒマラヤの隆起と活断層, 貝  
塚爽平編「世界の地形」, 東京大学出版会,  
pp.29-38.
- 6) 酒井治孝 (1997) : 地球環境変化とヒマラヤ・  
チベット山塊の役割 モンスーン気候はいつ始  
まったのか? その地質学的証拠, 地学雑誌  
Vol.106, No.2, pp.131-144.
- 7) 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター

- (2015) : 「だいち 2 号」によるネパール地震の観測結果について (4), (2017 年 3 月 22 日閲覧)  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img\\_up/jdis\\_p al2\\_npl-eq\\_20150502.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jdis_p al2_npl-eq_20150502.htm)
- 8) 吉川宏一・大野博之・稲垣秀輝・平田夏実(2003): オムニスケープジオロジー—ネパールと四国の比較—, 応用地質, Vol. 44, No.1, 14-24.
- 9) 吉田勝・B.N.ウプレティ(2006) : 中部ヒマラヤ 巨大地震とカトマンズの危機, 地学教育と科学運動, No. 53, 41-51.
- 10) 檜垣大助・長谷川修一・八木浩司・若井明彦 (2015): ゴルカ地震によるネパールでの地盤災害緊急調査報告. 日本地すべり学会誌, Vol.52, No.4, 43-46.
- 11) 長谷川修一・野々村敦子・Ranjan Kumar Dahal・Manita Timilsina (2016) : 2015 年ネパール・ゴルカ地震震源域のミッドランドではなぜ斜面崩壊が少なかったのか?, 文部科学省科学研究費補助金(特別研究促進費)「2015 年ネパール地震と地震被害に関する総合調査」報告書, pp.45-61.
- 12) 長谷川修一・矢田部龍一・Netra P.Bhandary・中島淳子・高橋治郎・北川隆司(2004) : ネパールにおける斜面災害の地質的背景—四国との類似性—, 地盤災害・地盤環境問題論文集, No.4, pp.81-86.
- 13) 石原舜三(1985): チベット—ヒマラヤ衝突帯の花崗岩類, 地質ニュース, No. 374, pp.6-17. 14) 長谷川修一(2009) : 14Ma 花崗岩体と西南日本外帯のネオテクトニクス, 電力土木, No. 341, pp.3-8.
- 14) 長谷川修一(2009) : 14Ma 花崗岩体と西南日本外帯のネオテクトニクス, 電力土木, No. 341, pp.3-8.
- 15) 金原啓二(1991) : インド・ユーラシアプレート衝突(ヒマラヤ地域)の地熱・温泉資源, 地質ニュース, No. 446, p.18-32.
- 16) 巽 好幸(2014) : 和食はなぜ美味しい——日本列島の贈りもの, 岩波書店, 181p.
- 17) 花室孝広・梅田浩司・高島勲・根岸義光(2008) : 紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史, 岩石鉱物科学, Vol. 37, pp.27-38.
- 18) 金原啓二(1991) : インド・ユーラシアプレート衝突(ヒマラヤ地域)の地熱・温泉資源, 地質ニュース, No. 446, p.18-32. 金原啓二(1991) : 日本温泉・鉱泉分布及び一覧, 地質調査所, pp.394.
- 19) 田村栄治・長谷川修一・渡辺弘樹・宮田和幸・矢田部龍一・内田純二(2007) : 中央構造線沿いの熱水変質に起因する地すべり, 地すべり, Vol. 44, No.4, pp.222-236.
- 20) 田村 栄治・浄内 明・松崎 伸一・長谷川 修一(2007) : 結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起メカニズム, 応用地質, Vol.48, No.2, pp.80-89.
- 21) 吉田幸信・安藤幹也・赤木渉・菅原大介・田村栄治・長谷川修一・鈴木昌次・中川浩二(2006) : トネルの地山挙動を予測する和泉層群の岩盤特性区分, 応用地質, Vol.47, No.2, pp.877-876.
- 22) Hasegawa S., Dahal R.K., Yamanaka M., Bhandary N.P., Yatabe R., Inagaki H. (2009); Cause of large-scale landslides in Lesser Himalaya of central Nepal, Environ Geol, Vol.57, pp.1423-1434.
- 23) 稲垣秀輝・Bhandary N. P., 矢田部龍一・長谷川修一(2007) : ネパール最重要道路のハザードマップとリスク管理, 日本地すべり学会, Vol. 43, No. 6, 38-45.