

モンスーンはいつ誕生し、どのように変動してきたか？

(2)ヒマラヤ・チベット山塊の上昇の時期を探る

講演者：酒井治孝（理学研究科 地質学鉱物学分野）

報告者：市澤恵爾（理学研究科 地球惑星科学専攻）

1. はじめに

インド亜大陸が約 5500 万年前にアジア大陸に衝突した結果、ヒマラヤ山脈とチベット高原が誕生した。両大陸の衝突は現在も続いており、その結果山脈は上昇を続ける一方、アジア大陸は変形・破壊し続けている。したがって、ヒマラヤ・チベット山塊は衝突型造山運動に関する自然の実験室といえる。そこでヒマラヤを対象として、衝突型造山帯のプロセス・メカニズムに関するスタンダードの確立を目指して数多くの地質学的研究が行われてきた。一方、Hahn and Manabe (1975), Manabe and Broccoli (1990), Broccoli and Manabe (1992), Kitoh (2002)らによる気候モデルを使った数値シミュレーション実験によって、アジア大陸中央部の高度の上昇にともない、モンスーンの強度が増大することが明らかにされている。また Kitoh(2004)は、数値実験によりヒマラヤ・チベット山塊が現在の高度の 60%に達すると、モンスーンに特徴的な降雨帯が形成されることを指摘している。さらに、ヒマラヤ・チベット山塊の誕生はアジア地域にモンスーン気候をもたらしただけでなく、地球規模の寒冷化に大きく関与しているという見解も出されている。そこで、モンスーン気候が誕生した時期を特定し、ヒマラヤ・チベット山塊の上昇とモンスーン誕生のリンケージを解明することを目指して様々な研究が行われてきた。

従来の研究では 10~7Ma にヒマラヤ・チベット山塊が急激に上昇し、それに伴ってモンスーン気候が開始、強化された、とする説が広く受け入れられてきた。しかし 2000 年以降、ヒマラヤ・チベット山塊はそれより以前にすでに現在の高度に達していたとするデータが次々に提示され、モンスーン気候の成立時期について再検討する必要性が生じてきた。本講演では、地球表層の気候・環境の制約条件となっている山脈の古標高に関する問題について、ヒマラヤ山脈とチベット高原を例に、最近の研究成果を紹介する。

2. テクトニクスによる気候変動のコントロールモデル

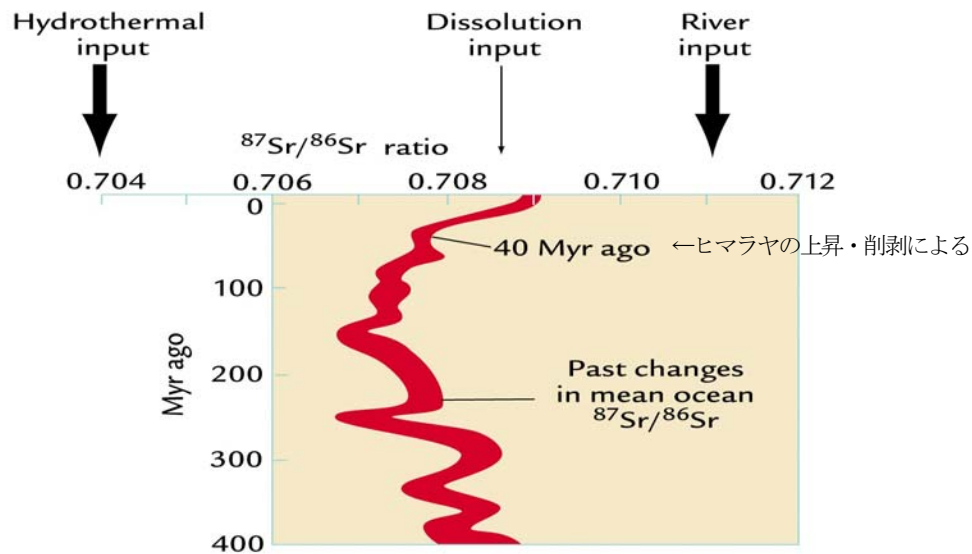
地球における気候変動の要因は、(1)太陽放射の量と地球放射の量の変動、(2)地球内部の熱とガスの放出量の変動、(3)地球上の熱の運搬システムの変動に大別され、変動の周期スケールは数百万~数千万年の長いものから、数千~数年オーダーの短いものまで様々である。このうち、数百万~数千万年の長期間にわたる気候変動は、テクトニクスによってコントロールされていると考えられている。

テクトニクスによる気候のコントロールについては、以下の 5 つの仮説が提案されている。

(1) Uplift and Weathering Hypothesis : 山脈の上昇に伴い化学的風化が強化され、大気中の CO₂の除去が進み、その結果寒冷化が促進される。

●ヒマラヤの例

底生有孔虫の酸素同位体比の研究から、約 50Ma から地球規模で気候が大きく寒冷化に転じたことが明らかになった。また過去 7000 万年間の海水の Sr 同位体比は、40Ma あたりから一気に高い値を示すようになる。⁸⁷Sr は⁸⁷Rb の放射性壊変によって形成されるため、より古い地殻由来の碎屑物のほうが⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比は高い値を示す。このことは、ヒマラヤ・アルプスの形成に伴い大量の古い地殻が地表に露出し、削剥・化学的風化されたことを示唆し、約 50Ma 以降の寒冷化はヒマラヤ・チベット山塊の上昇とリンクしていることが指摘されている。



過去4億年間の海水のSr同位体比の変化 (Ruddiman, 2001)

4000万年以前以降、同位体比が上昇しているのは、ヒマラヤの上昇・削剥によ

(2)BLAG Spreading Rate Hypothesis: プレートの拡大速度によって大気へのCO₂供給量は支配されており、拡大速度が大きくなると大気中のCO₂濃度は高くなり、温暖化が促進される。

(3)Pole Position hypothesis: 極の位置に大陸が存在することにより、大陸氷床が発達し寒冷化が促進される。

(4)Opening & Closure of Gateway Hypothesis: 海峡や地峡が形成により陸海の分布が変化し、海水の循環システムが変化することによって気候が変動する。

(5)Organic Carbon Burial Hypothesis: 有機物が大量かつ急速に埋積されることによりCO₂が除去され寒冷化が促進される。

3. モンスーン気候の成立時期の検討について

●90年代までの研究

ベンガル海底扇状地のボーリング調査によってヒマラヤ・チベット山塊には、10.9~7.5Maと0.9Ma~現在に至るまでの二つの上昇フェーズがあったことが明らかとなり (Amano and Taira, 1992), またオマーン沖のボーリング調査から、寒冷な水塊を好む珪藻の産出開始および浮遊性有孔虫 *Globigerina bulloides* の相対頻度の増加が、それぞれ10Ma以降と8.5Ma~7.4Maにみられ、このころ、オマーン沖において湧昇が活発化したことが明らかになった (高山ほか, 1990; Kroon et al, 1991; Prell and Kutzback, 1992). オマーン沖ではインド洋の夏の強い南西モンスーンが表層の暖かい水塊を除去することにより湧昇が発生することが知られている。つまり、湧昇が強くなった10~8Maは、モンスーンが強くなった時期とされた。

また Hisatomi and Tanaka (1994)はヒマラヤの前縁盆地の堆積物であるシワリーク層群の研究から、9Ma頃河川システムがそれまでの比較的運搬量の少ないものから季節的な降雨と洪水が起こった蛇行河川に変化し、これはモンスーンの開始を示すとした。

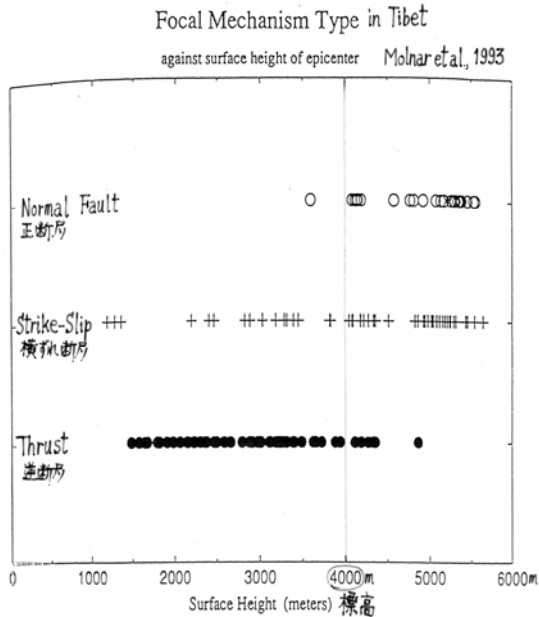
以上のようなデータに加え、1, 2で示した、数値シミュレーション実験によるヒマラヤ上昇とモンスーンの関係やテクトニクスと気候変動の関連性から、ヒマラヤ・チベット山塊の上昇とモンスーン気候の誕生の間には間違いなくリンケージがあると思われてきた。

●2000年以降の研究

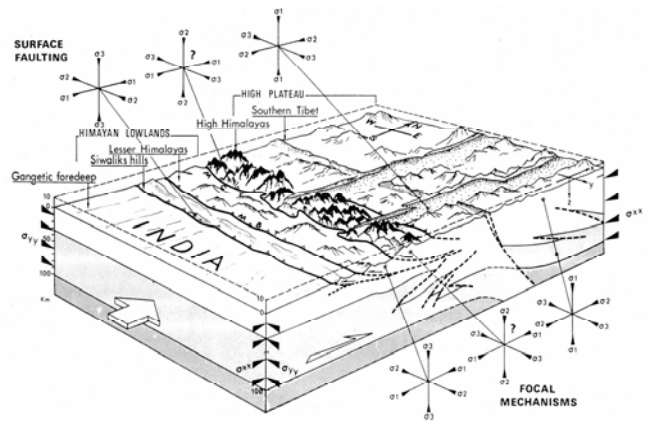
2000年代に入ると、ヒマラヤ・チベット山塊は15~14Maにはすでに現在の高度に達していたというデータが出てきた。その科学的根拠としては以下のことが挙げられる。

(1)活断層と地震の発震機構からの証拠

ヒマラヤ・チベット山塊の標高 4000mを越える地域には、北北東-南南西に正断層群が走り、地溝帯が分布している。この地溝帯の成因は、山塊が高くなり過ぎたためにインドプレートの圧縮力よりも山塊の自重による鉛直方向の応力が大きくなり、主剪断応力の方向が変化したためとされている(Molnar and Tapponnier, 1978 ; Armijo et al., 1986 ; Mercier et al., 1987)。このため、正断層の形成時期は山塊が自重で崩壊するほど高くなった年代を示す。この地溝群の典型的な例とされるネパールヒマラヤのタコーラ地溝を充填するタクマール層群テタン層の古地磁気層序学的研究によると、その基底の年代は 11~10.5Ma まで遡る(Yoshida et al., 1984 ; Garziona et al., 2000)。



ヒマラヤでは標高が4000mを超える地域で、東西引っ張りによる正断層型の地震が発生している(Molnar et al., 1993)



ヒマラヤの地形・地質構造と広域応力場の関係(Mercier et al., 1987)

(2)植物化石の全縁率からの証拠

チベット高原南部(4500m)に分布する、15Ma の地層群から産出した植物化石について、古気候を反映するとされる全縁率に基づいた葉相観分析から古気温と古気候を推定した結果、15Ma にはすでに現在の標高に達していたという結果が得られた。

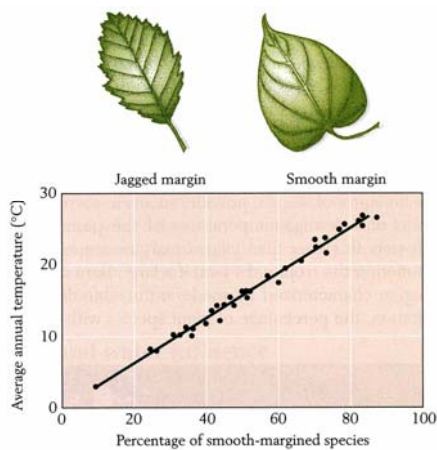
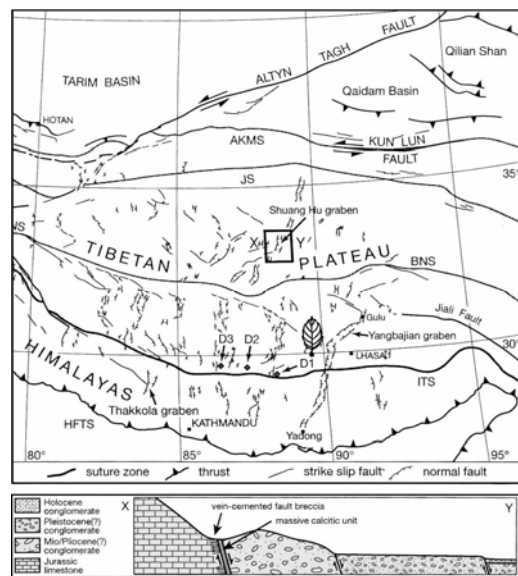


Figure 4-20 Relation between climate and the shapes of leaves of flowering plants. In the modern world, the average annual temperature of a region is closely correlated with the percentage of plant species with smooth margins. (After J. A. Wolfe, Amer. Sci. 66:994-1003, 1978.)



(modified from Blisniuk et al., 2001)

(3)酸素同位体比からの証拠

降水の酸素同位体比には、高度による分別効果が認められている。すなわち、より高高度な場所における降水ほど重い¹⁸Oは少なく、 $\delta^{18}\text{O}$ はより低い値を示す。Garzione et al(2000)はタコーラ地溝からガンジス平原に流れだしているカリガンダキ河とその支流に沿って標高 480~3900mまでの 51 地点で河川水を採取、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の分析を行った。この結果、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は高度の上昇に伴って減少し、-8.1~-21.1‰まで変化、その変化率は-0.33‰/100mであった。またタコーラ地溝中の石灰質堆積物の $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定したところ、下位のテタン層中では-17.2~-23.4‰、その上位のタコーラ層中では-17.8~-23.2‰という値を算出した。この値に現生の河川から得られた関係式を当てはめると、テタン層は $3800 \pm 480 \sim 5900 \pm 350\text{m}$ 、タコーラ層は $4500 \pm 430 \sim 6300 \pm 330\text{m}$ という結果が得られた。現在、タコーラ地溝に流れ込む河川の流域で最も高所は標高約 6700m であり、分析結果の上限とほぼ一致する。すなわち、タコーラ地溝が形成された 10~11Ma には、すでにヒマラヤは現在とほぼ変わらない標高であったと考えられる。

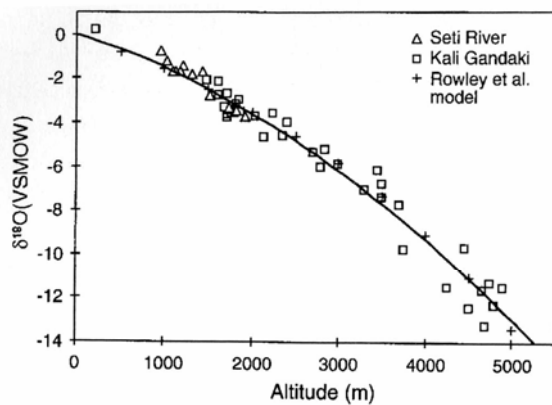


Fig. 7. The Kali Gandaki relationship (black line) compared to the $\delta^{18}\text{O}$ /altitude model of Rowley and Pierrehumbert [54] (crosses) and elevation-corrected data from the Kali Gandaki and Seti River transects. See text for discussion.

EPSL183, (Garzione et al., 2000)

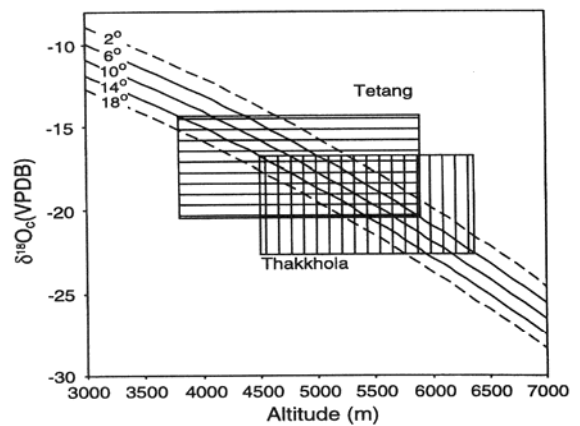
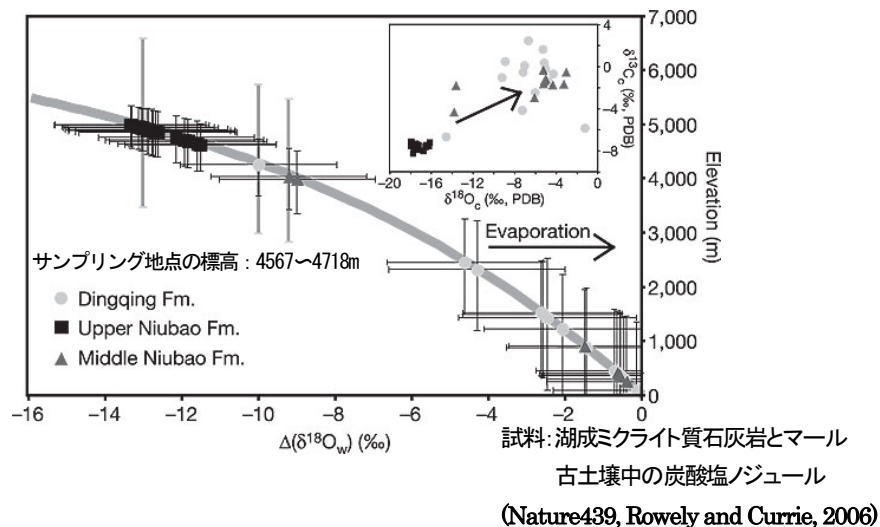


Fig. 8. $\delta^{18}\text{O}_c$ values calculated from the Kali Gandaki relationship for calcite that precipitated from water at temperatures between 2 and 18°C plotted against altitude. Solid lines show 6–14°C, which is the most reasonable range of temperatures for the precipitation of Thakkhola graben carbonates. Boxes show the range of elevations predicted from the range of $\delta^{18}\text{O}_c$ values of Thakkhola Formation carbonates (vertical lines) and Tetang Formation carbonates (horizontal lines). Tetang Formation $\delta^{18}\text{O}_c$ values have been shifted by 3‰ to reflect the difference in source moisture values prior to 7 Ma.

EPSL183, (Garzione et al., 2000)

同様の検討をチベット高原において行ったところ、チベット高原は少なくとも過去 3500 万年にわたって 4000m以上の標高を保っていたことが半明した(Rowley and Currie, 2006)。



このように近年の研究からは、ヒマラヤ・チベット山塊は14~15Ma, 場合によっては35Maにはすでに4000m以上の高さに達していたとする報告が出てきている。これらの年代値が正しく、また前述の数値シミュレーション実験結果等も正しいとすれば、モンスーン気候の開始時期は大きく修正される可能性がある。