



## SYMPOSIUM

インド洋の海洋地質-ODPの成果-

# 古モンスーンと氷期サイ クル, およびチベット氷 床説をめぐって

安成 哲三

やすなり てつぞう

筑波大学地球科学系 講師

原稿受理: 1990年4月24日

編集部

アジアにおけるモンスーン気候の成立は、第三紀以降のヒマラヤ・チベット山塊の隆起・上昇と密接に関連している。そのモンスーンは、第四紀の氷期・間氷期のサイクルに対応して、大きく変動していることも、最近の多くの研究は明らかにしつつある。その中で、“チベット氷床”説が、再び注目され始めている。チベット氷床は、果して存在したか。もし存在していたとしたら、それはどのように維持されていたか。この氷床に代表されるチベット高原の雪氷圏は、地球気候システムの中で、どのような役割を演じてきたのだろうか。この論文では、雪氷圏の変動を媒介とした、ヒマラヤの上昇、古モンスーン変動、および氷期サイクルの密接なリンクの可能性について、ひとつの仮説を提出する。

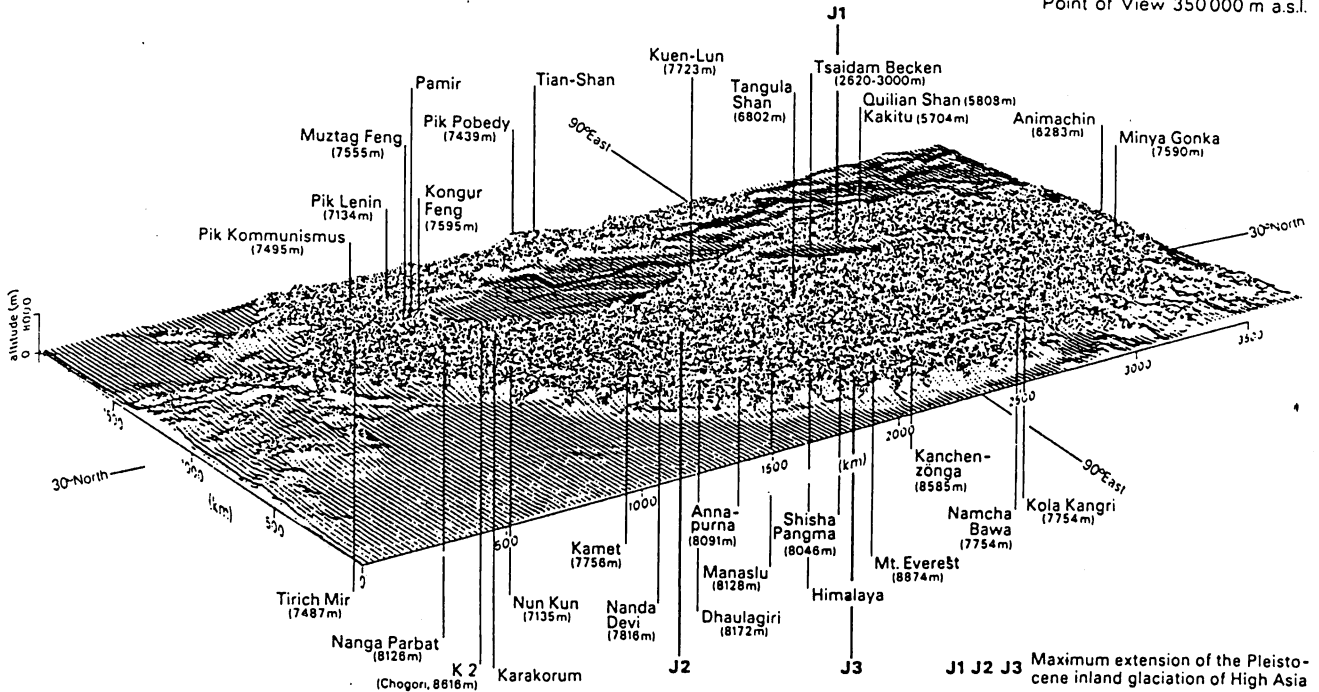
## 1. アジアモンスーンのグローバル性

アジアにおける現在の夏・冬の強大なモンスーンは、チベット・ヒマラヤ山塊の熱的、力学的効果を考慮してはじめて成立しうることが、すでに多くの観測的、理論的研究により指摘されている (Hahn and Manabe, 1975; 安成・藤井, 1983 など)。したがって、現在あるようなアジアのモンスーン気候は、ヒマラヤの上昇と共に確立されてきた、と考えられる (安成, 1980, 1987)。一方、夏のアジアのモンスーンは、北半球に雪氷域が大きく広がった氷期には全般的に弱く、雪氷域の少ない現在のようない間氷期には強いことが、気候モデルによる研究 (Manabe and Hahn, 1977; Prell and Kutzbach, 1987 など) から指摘されている。事実、最近のインド洋での ODP の成果 (Prell and van Campo, 1986; Niituma *et al.*, 1990) は、このことを強く示唆する結果を出している。現在の気候のもとでも、ユーラシア大陸に積雪が多かった年のモンスーンは弱く、少なかった年には強くなることが観測 (Hahn and Shukla, 1976 など) と気候モデルによる研究 (Barnett *et al.*, 1989; Yasunari *et al.*, 1990) の両方から指摘されている。

ところで、アジアモンスーンの変動は、グロー

# HIGH ASIA

Exaggeration 1:15  
Point of View 350 000 m a.s.l.



Block diagram: H.Süssnerberger and Ch. Roesrath

Glaciation: M.Kuhle

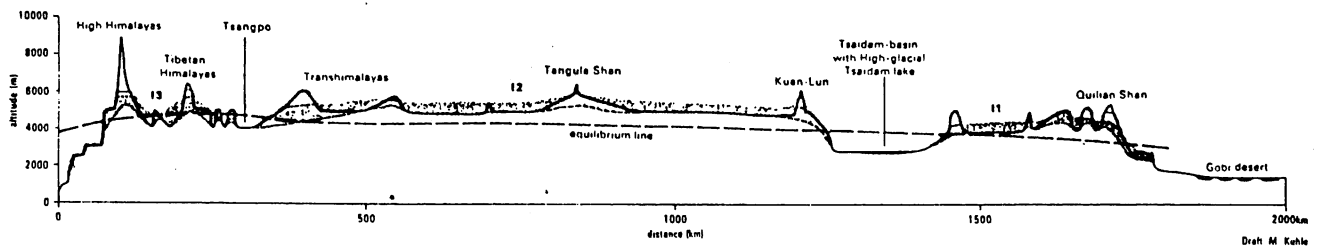


図1 チベット氷床の鳥かん模式図(上)とその南北断面(下)。ハッチ状が氷床域。6,000 m以上のピークのみが氷床の上に出ている。(Kuhle, 1987より引用)。

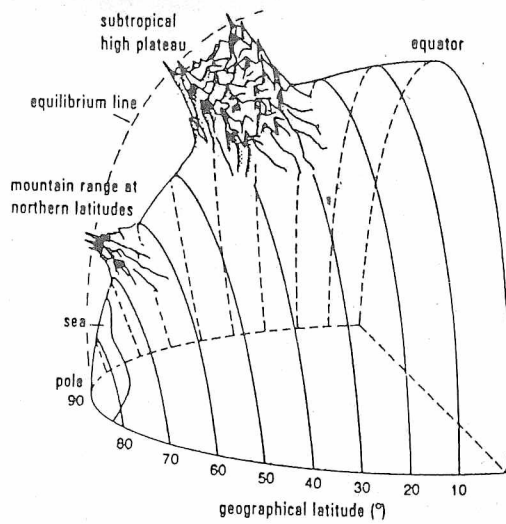
バルな気候変動のローカルな現れまたは応答という見方もできるが、モンスーン循環自体、グローバルなスケールと強大な運動エネルギーを持っており、モンスーンの変動そのものが、グローバルな気候変動の機構に密接にかかわっているという見方もできる(安成, 1984, 1989)。グローバルな大気循環の変動を引き起こす ENSO (エル・ニーニョ/南方振動) とモンスーンの関係は、まさにその典型的な一例と考えられる(Yasunari, 1990; 安成, 1988)。氷期・間氷期サイクルのスケールにおいても、同じことが言えるのではないだろうか。言い換えるならば、氷期・間氷期サイクル

の物理機構にモンスーンの変動自体が大きな役割を果たしている可能性が有り得るのではないかとすると、第四紀におけるヒマラヤの上昇、モンスーン、そして氷期サイクルのあいだには、密接な関係が存在する、という作業仮説が成り立つ。この仮説においては、ユーラシア大陸上、特に、低緯度に位置するチベット高原での雪氷圏変動が大きな意味を持つ可能性がある。

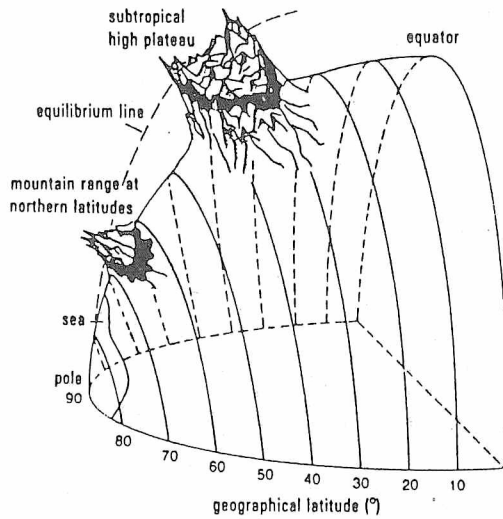
## 2. 新しい「チベット氷床」説をめぐって

氷期には、広大なチベット高原全体がすっかりと雪氷に覆われていたという「チベット氷床」説

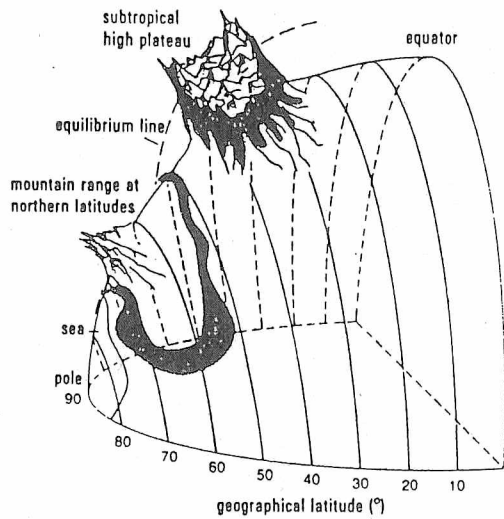
7



2



3



Draft: M. Kuhle/Spektrum der Wissenschaft

図2 クーレによるチベット氷床の形成と、それともなう北半球の雪線低下による極域の氷床の拡大の模式図。1→2→3と時代経過を示す (Kuhle, 1987 より引用)。

は、雪氷屋、気候屋にとっては、なかなかロマンのある説である。この説は1930年に、トリンクラーによって初めて提唱された (Trinkler, 1930) が、ロマンがあるだけに、証拠に乏しく、あまりにもスペキュレーションが多いため、否定され、あるいは無視されてきた。ところが、最近ドイツのクーレ (Kuhle, 1987) は、独自の实地調査を踏まえて、図1に示すような氷床復元図を示し、再びこの説を強く打ち出した。かれはさらに、低緯度でのこの氷床の形成は、北半球全体の寒冷化を促進し氷期の引金になりうる、という興味深い主張をしている (図2)。

しかし、この新しいチベット氷床説も、多くの問題点を含んでいる。まずチベットのような内陸において、図1にあるような大氷床を形成するために必要な水蒸気の供給は、どのようにして可能であろうか。クーレは、この氷床が、大ヒマラヤ山脈がすでに現在のようにチベットの南縁に形成された後の最終氷期に存在したとしているが、現在・過去を含めた地球上の他の氷床が、水蒸気供給の容易な海洋に接した低地に発達していることを考えると、このことは、非常に考えにくい。さらに、チベットでの広大な雪氷域は、当然夏のアジアモンスーンの極端な弱まりを示唆しており、インド洋側からヒマラヤ・チベットへの水蒸気輸送は、更に少なくなるはずである。したがって、現在のヒマラヤの氷河にみられるモンスーン降雪によるかん養機構 (安成・藤井, 1983) は、この場合全く成り立たないであろう。しかしながら、「水蒸気をついたて」としてのヒマラヤ山脈がまだ低く、しかもチベット高原がすでにある程度の高さに達していた時期には、偏西風の擾乱といった別のかん養機構によって氷床が形成された可能性はあろう。この場合、モンスーン循環にとっては、負のフィードバックとして働いたチベット高原の雪氷域は、偏西風の定常波の気圧の谷を高原付近で深め、傾圧性を強めて擾乱を活発化するという過程によって、正のフィードバックとして働いた可能性もあろう。

いずれにせよ、ヒマラヤ・チベット山塊の上昇

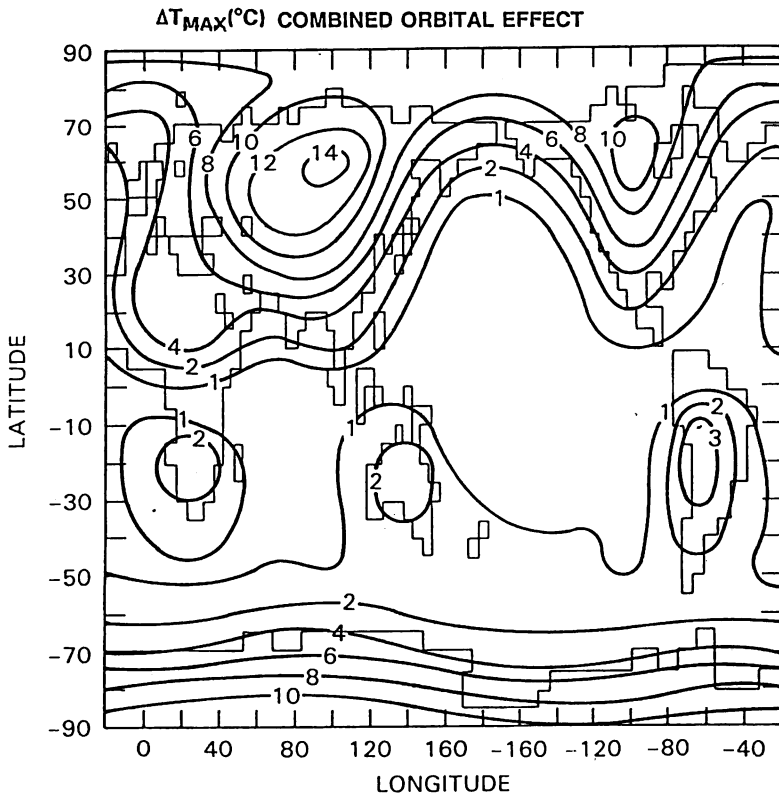


図3 ミランコヴィッチ理論に基づく日射量変動により予想される夏の最高気温の変化量 ( $\Delta T_{MAX}$ ) の分布 (Short *et al.*, 1989より引用).

は、モンスーン気候を成立させていくと共に、雪氷圏に達する高度に達したことにより、モンスーン気候を大きく振動させることにもなったと考えられる。地球のこの気候システムの進化過程において、チベット氷床は、大ヒマラヤ山脈成立以前のチベット付近での雪氷圏の形態であった可能性が高い。山脈成立以降の雪氷圏は、氷期にあたる時期には、大氷床という形ではなく、広域の積雪というかたちで、非常に高くなった高原上での強い日射を大きく反射することにより、やはりモンスーン気候を振動させてきたと考えられよう。

### 3. 氷期サイクルとチベット・ヒマラヤの雪氷圏

もう一つの大きな問題点は、チベット・ヒマラヤ雪氷圏の拡大・縮小が、どのような機構で起こりうるのか、という点である。約10万年と言われる氷期のサイクルそのものについては、ミランコヴィッチ説 (Milankovitch, 1941) に基づく日射量変動にその原因を求める考えが根強く、クー

レ説もその例にもれない。もしそうだとしたら、この日射量変動による地表面付近の大気圏・雪氷圏の変動が、この付近で最も敏感であることが必要であろう。これに関し、最近ショートら (Short *et al.*, 1989) は、海陸分布を考慮した熱平衡気候モデルに、ミランコヴィッチによる日射量の変動を外力として与えて、夏の地表面での最高気温の応答を調べた結果、図3のようにユーラシア大陸の内部が、最も大きく変動することを示した。彼らのモデルには、チベット・ヒマラヤの地形や、雪氷圏のフィードバックも含まれていないので、これらの効果を考慮すると、図3の敏感度の極大が、実質的な大陸度の極大域であるチベット付近にくる可能性は高い。ミランコヴィッチ説に因る日射量変動といった外的強制が氷期サイクルにとって必要かどうかという議論はさておいて、大気圏・雪氷圏のフィードバックが氷期サイクルにとって本質的であるとする、低緯度の高原であるチベット・ヒマラヤ山塊付近でのフィードバックは、極域でのそれよりもはるかに効率的であり重要であ

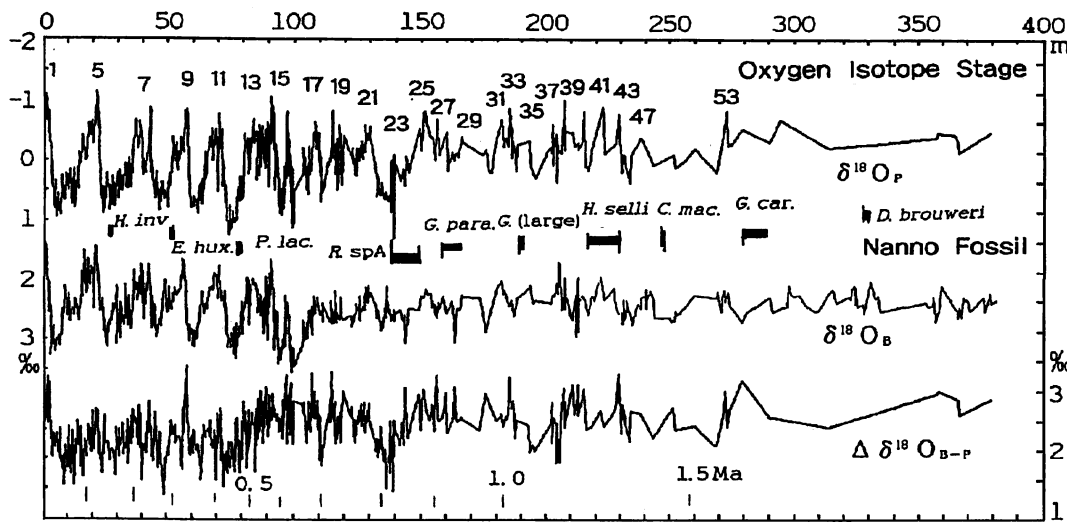


図4 ODP Leg 117 (オマーン沖)の海底コアから求められた表層有孔虫化石(上)と底層有孔虫化石(中)の酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )とその差(下)の時系列(Niitsuma *et al.*, 1990より引用).

ろう。このような第三紀から第四紀にかけての造山運動の、氷期形成に果たす役割の重要性は、今後、大気大循環モデルなどの気候モデルによる実験により、さらに検証する必要がある。

#### 4. モンスーン変動と大気のテレコネクション

最後に、チベット付近での拡大した雪氷圏は、どのようなフィードバック過程を通して、北半球全体の寒冷化を引き起こし、ひいては地球気候をローレンタイド、フェノスカンジナビアという二つの氷床の形成を伴う氷期へと移行させるか、という大問題が残っている。クーレの論文は、この点に関し、雪氷のアルベド効果による半球全体の気温低下を定性的に述べているに留まっている。

雪氷圏の拡大は、既に述べたように、夏のモンスーンの弱化を伴っている。したがって上述の問いは、非常に弱い夏のモンスーンの持続は、北半球の大気循環にどのような変化をもたらすかということに、密接に関連している。これは、全く未解決ではあるが、現在の気候下における弱いモンスーンに伴う大気循環の状態は、興味ある統計的結果を示している(Yasunari, 1988)。即ち、弱いアジアモンスーンの夏には、かざしも側にあたる北太平洋から北米北部にかけて、PNAパターンと呼ばれる偏西風の定常波の大きな蛇行パターンが現れ易く、北米大陸北東部は定常波の深い気

圧の谷が形成され易くなっていることである。北米大陸におけるこの大気循環パターンの持続は、ローレンタイド氷床の形成・維持に非常に都合の良い条件である(Lamb, 1977など)。この北米大陸上に現れる気圧と気温の大きな負偏差は、ユーラシア大陸の春先の多積雪が、引き続く夏の気候状態に与える影響を大気大循環モデルで調べた著者らの最近の数値実験(Yasunari *et al.*, 1990)でも、確認された。すなわち、雪氷域の異常に伴うアジア付近の弱いモンスーンの状態は、偏西風域での定常ロスビー波の伝播というテレコネクション作用を通じて、かざしも側の北米大陸上の大気循環場にも影響を与え、そこに雪氷域の広がりやすい状況を作り出しうるということである。

#### 5. 事実はどうか—ODPによるモンスーン変動の検証

さて、以上にのべた作業仮説—ヒマラヤ・チベット高原の上昇に伴い、地球気候システムは強いモンスーンをもつ系として確立するが、ある時期からチベットの雪氷圏を媒介にして氷期サイクル/モンスーン変動をともなう振動システムへと移行する—は、インド洋でのODPの結果からどのように検証されたであろうか。新妻らのオマーン沖での結果(Niitsuma *et al.*, 1990)の一部を図4に示す。表層および底生有孔虫の $\delta^{18}O$ の結果は、約70万年前から氷期・間氷期の約10万

年周期の気温（海水温）変動が始まり、これにはほぼ対応して、モンスーン湧昇流の強さ（モンスーンの強さ）が変動していることを示している。また、それ以前は高い水温と強いモンスーンが、余り変化なく続いていることが示されており、この頃を境に、チベット高原には、雪氷圏の出現と消長が始まったと推測することもできそうである。

いずれにせよ、ここに述べた気・水圏と岩石圏の壮なる相互作用の解明には、インド洋での海底コア解析の研究と共に、ヒマラヤ・チベットの上昇に関するテクトニクスと雪氷圏変動に関する第四紀学、更に気候モデルによる気候力学的研究を併せた真の学際的研究が必要であろう。

#### 参考文献

- [1] Barnett, T. *et al.* : J. Atmos. Sci., 46, 661-685 (1989).
- [2] Hahn, D. and S. Manabe : J. Atmos. Sci., 32, 1515-1541 (1975).
- [3] Hahn, D. and J. Shukla : J. Atmos. Sci., 33, 2462-2462 (1976).
- [4] Kuhle, M. : GeoJournal, 14.4, 393-421 (1987).
- [5] Lamb, H. H. : Climate, Present, Past and Future, Vol. 2, Methuen, London (1977).
- [6] Manabe, S. and D. Hahn : J. G. R., 82, 3889-3991 (1977).
- [7] Milankovitch, M. : Canon of Insolation and the Ice-Age Problem (translated to English by Israel Program for Scientific Translations. No. 1793, U. S. Department of Commerce and N.S.F., 1969) (1941).
- [8] Niitsuma *et al.* : ODP Leg 117 B vol. manuscript, 117B-168 (1990).
- [9] Short, D. *et al.* : Submitted to Quart. Res. (1989).
- [10] Trinkler, E. : Geogr. J., 75, 225-232 (1930).
- [11] Prell, W. L. and E. Van Campo : Nature, 323, 526-528 (1986).
- [12] Prell, W. L. and J. Kutzbach : J. G. R., 92, D7, 8411-8425 (1987).
- [13] 安成哲三 : 生物科学, 32, 36-44 (1980).
- [14] 安成哲三・藤井理行 : ヒマラヤの気候と氷河, 254p, 東京堂出版 (1983).
- [15] 安成哲三 : 科学, 54, 487-494 (1984).
- [16] 安成哲三 : 月刊「地球」, 9, 685-690 (1987).
- [17] Yasunari, T. : Meteor. Res. Rep. (Univ. of Tokyo), 88-1, 30-39 (1988).
- [18] 安成哲三 : 月刊「海洋科学」, 20, 616-626 (1988).
- [19] 安成哲三 : 地学雑誌, 98, 83-92 (1989).
- [20] Yasunari, T. : Meteor. and Atmos. Phys. (in press) (1990).
- [21] Yasunari, T. *et al.* : (to be submitted) (1990).