

琉球大学学術リポジトリ

第13章 ヒマラヤの上昇およびナップの数値シミュレーション

メタデータ	言語: 出版者: 築地書館 公開日: 2008-10-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 林, 大五郎, Hayashi, Daigoro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/7688

第 13 章

ヒマラヤの上昇および
ナップの数値シミュレーション

林 大五郎

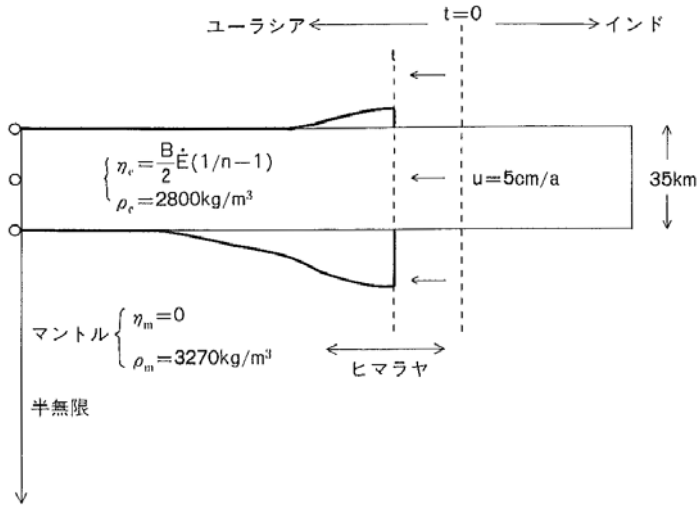


図 13-1
ENGLAND ら(1986, 85, 83, 82)の3次元粘性薄層解析モデルの断面境界条件概念図
 $\eta_c = \frac{B}{2} \dot{E}^{(1/n-1)}$ で B は深度平均強度係数(depth-averaged strength coefficient), \dot{E} は歪速度テンソルの第2不変量, n はべき乗指数(power law exponent)

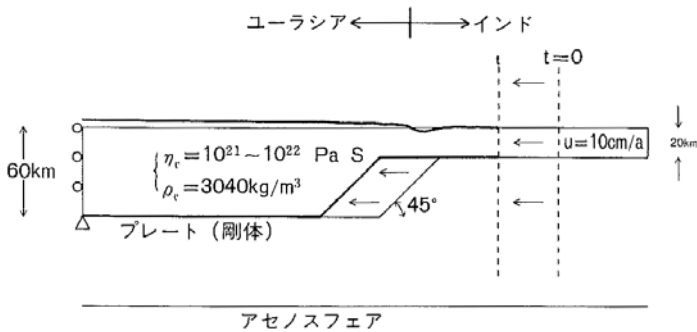


図 13-2
剛体プレートを仮定したモデル(MODEL 9-1, 3, 5)の境界条件概念図
MODEL 13-1, 10-3, 11-1 の場合にはインドプレートは停止している

1. ヒマラヤおよびチベット高原の上昇

ヒマラヤ山脈はいかにして形成されたのか? は, 他の山脈形成とも関連して興味深い問題である。ヒマラヤの上昇に関してつねに論議され, 現在もっとも有力視されているのは, ユーラシアプレートにインドプレートが衝突し, その結果, ヒマラヤ山脈が形成されたとする, いわゆる大陸衝突説である。

この問題は, 最近, P. ENGLAND らによって定量的に取り扱われている(ENGLAND & HOUSEMAN, 1985, 1986; ENGLAND & MCKENZIE, 1982, 1983)。彼らはインド地殻およびアジア地殻を非圧縮性非 Newton 流体とみなし, 粘性薄層解析(thin viscous sheet analysis)による3次元解析を行った。これらのシミュレーションはアジア大陸内部の大構造を説明することを目的として行われ, 興味深い結果を出している。

しかしながら, 彼らのモデルから直接ヒマラヤの上昇を論じるわけにはいかない。このことはアジア-インド断面を考えてみるとはっきりとする。概念図→図13-1に示すように, 彼らの粘性薄層解析の境界条件から得られる結果は, つねにその境界でシャープに切られている。そしてその切られた部分と解析領域に含まれていないインド側の部分に, ヒマラヤが位置している。さらに彼らの粘性薄層解析では取り扱う薄層(大陸地殻)の下部は非粘性流体(完全流体)で占められている。しかし, 大陸地殻の下部にはリソスフェアがあるはずで, これもうまくない仮定である。そのかわり, アイソスタティックな平衡はつねに成立している。いずれにしても衝突モデルとしては, 現在もっとも説得力のあるシミュレーションといえる。

これから述べるのは, とくにヒマラヤとチベット高原の上昇に関するシミュレーションである。これらのモデルでは, さきの ENGLAND らのものとは異なって, 大陸地殻の下部は剛体プレートで占められており, このプレートの北進により, その上部の大陸地殻(非圧縮性 Newton 流体)が変形されるとしたことである。概念図は図13-2に示されるとおりである。この図からわかるように, プレートが剛体であるという仮定は, アイソスタシーの観点からみるとはなはだ都合がわるい。この図に示した範囲内ではアイソスタシーは働かないからである。したがって, 計算された隆起量は, 解析範囲を実際よりせまくとって

表 13-1
モデルの分類(ダイアビルモデルは除く)

	インドプレートによる短縮 (0 - 0.1 Ma ; dt=0.01 Ma)	粘性流動 (0 - 1 Ma ; dt=0.01 Ma)
ダイアビルなし	<p>Model 9-1</p> <p>$\eta_c = 10^{21} \text{ Pa s}$ $\rho_c = 3040 \text{ kg/m}^3$ 10 cm/a</p>	<p>Model 13-1</p> <p>初期形態=Model 9-1の最終形態</p>
小ダイアビルあり	<p>Model 9-3</p> <p>$\eta_c = 10^{21} \text{ Pa s}$ $\rho_c = 3040 \text{ kg/m}^3$ $\eta_d = 10^{20} \text{ Pa s}$ $\rho_d = 2760 \text{ kg/m}^3$ 10 cm/a</p>	<p>Model 10-3</p> <p>初期形態=Model 9-3の最終形態</p>
大ダイアビルあり	<p>Model 9-5</p> <p>$\eta_c = 10^{21} \text{ Pa s}$ $\rho_c = 3040 \text{ kg/m}^3$ $\eta_d = 10^{20} \text{ Pa s}$ $\rho_d = 2760 \text{ kg/m}^3$ 10 cm/a</p>	<p>Model 11-1</p> <p>初期形態=Model 9-5の最終形態</p>

ることともあいまって、過剰な値を示すことになる。このため、このシミュレーションでは隆起量そのものには注目せず、隆起の傾向をみることにする。

これらのモデルでは地殻の厚さをアジアで 60 km、インドで 20 km とし、その間を水平面から 45° をなす傾斜面で連結している。この条件はデータの裏づけなしにとられたまったくの仮定である。プレートを剛体と仮定すると、必然的にアイソスタシーの原理によって地殻の厚化を論じることは不可能となるため、アジア側の地殻を厚くとしている。ここで取り上げるモデルは表 13-1 に一括してある。また解析手法の詳細に関しては HAYASHI(1979) を参照されたい。

1—MODEL 9-1

ヒマラヤの上昇をチベット—インド断面でシミュレート

するため、図 13-3 に示すように深さ 60 km ・長さ 260 km の、その右下隅に傾斜面を有する領域を取り扱う。これを第三紀始新世におけるユーラシアプレートとインドプレートとの衝突直後の状態と考えるわけである。これらは図に示すように 133 節点 108 要素の isoparametric 有限要素に分割される。インドプレートの最大速度は約 10 cm/年であったとされているので、これを境界条件としている。アジア・インド両大陸地殻の密度をともに 3040 kg/cm³、粘性係数を 10²¹ Pa s(10²² poises) とするが、この仮定には疑問がある。すなわち Handbook of Physical Constants(CLARK, ed., 1966) から推算すると、片麻岩は 2670 ~ 2840 kg/m³(平均 2760 kg/m³)、ミッドランド変堆積物およびテチス層群は平均 2700 kg/m³、花崗岩質岩は平均 2670 kg/m³ などとなるが、これらの値をそのまま使用すると、地殻(2700 kg/m³)内で片麻岩(2760 kg/m³)は上昇しない、というより、下降することになる。さら

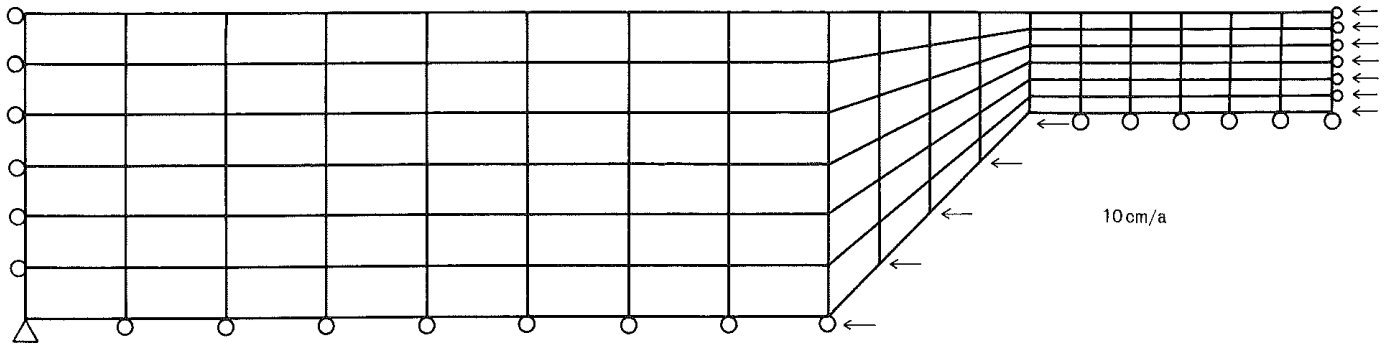


図 13-3
MODEL 9-1 の境界条件および要素分割図

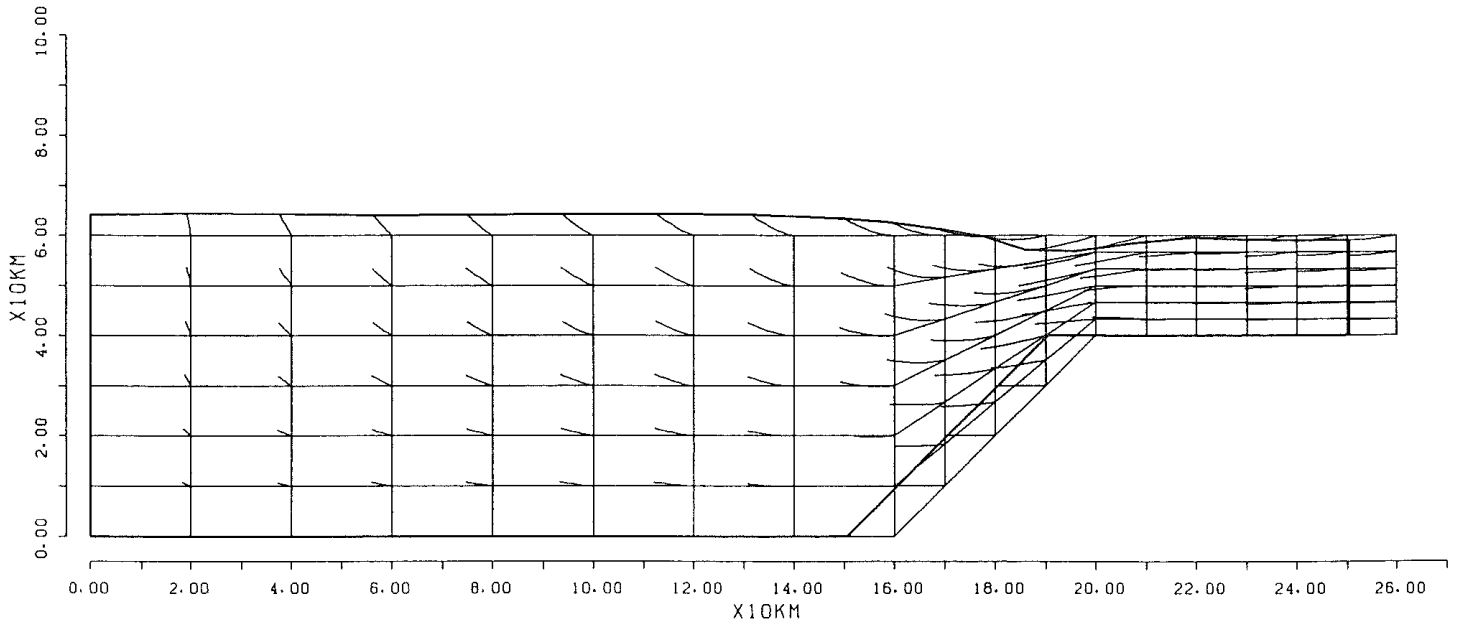


図 13-4
MODEL 9-1 の結果。 実線は初期形状および節点の軌跡，太線は10
万年後の変形形状を示す

に、花崗岩質岩との密度差がひじょうに小さい(30 kg/m^3)
ので効果的なダイアピル上昇は期待できないこととなる。
これらに対処するには、ひとつはダイアピルの密度を測定
値より小さく見積もることであり、他は逆に地殻の密度を
大きく見積もることである。ここでは後者をとった
(HAYASHI & KIZAKI, 1979)。初期形状および節点の軌
跡は実線で、結果は太線で図13-4に示すとおりで、10万
年後にチベット高原は約4000 m隆起し、インド側は1000
~ 500 m沈下している。注目すべきは衝突部分に約
3000mの深さの前縁凹地(foredeep)が生じることである。
インド側地表面からのチベット高原の相対隆起量は約
4000 mであり、前縁凹地からの相対隆起量は約7000 mと
なる。期待されたヒマラヤ山脈は生じていない。図に
示されているようにチベット高原から前縁凹地にかけての
勾配はなめらかである。内部流動は節点の軌跡からわか
るように、チベット高原側では北方上向きで、インド側で

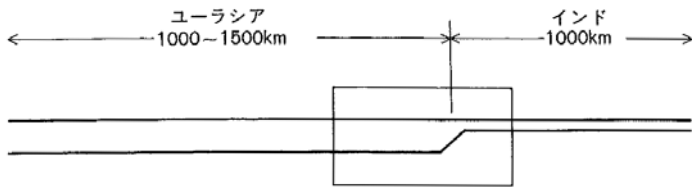


図 13-5
ユーラシア、インドプレート衝突時の断面図。枠内が解析領域

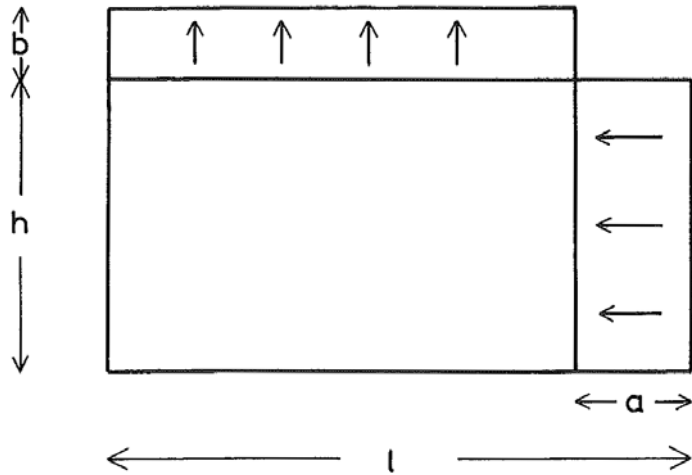


図 13-6
非圧縮性物質の変形(本文参照)

は北方下向きとなっている。この流動により前縁凹地が形成されたのであろう。

この際注意すべきは、さきに述べたように、領域の設定が実際とはかなりちがっていることである。アジア大陸地殻のうち、インドプレートの圧縮に直接反応する部分はおそらくそのチベット高原に相当する部分であろうと推定される。この部分は1000～1500 km程度であろう。したがって、領域も図13-5に示すように大きくとる必要がある。しかしながら、計算の遂行上、図に示す枠内を取り上げたわけである。このために生ずる副作用としては図13-6に示すように、押される物質が非圧縮性ならば——縮まないものであるから——取り扱う領域を実際より小さくすると隆起量は実際にくらべて当然大きくなる。したがって上に述べた隆起量そのものには意味がないということになる。

しかし、計算された隆起量と実際の隆起量とは、地殻の粘性係数が小さければ、つぎのような関係にある。図13-6で最初長さ l 、高さ h の物質が水平方向に押されて a だけ変形し、このために上昇する量を b とすると、非圧縮の仮定から $b = ha / (l - a)$ となる。実際の l は1600 km、解析領域の l は160 km であるから、実際に上昇するはず

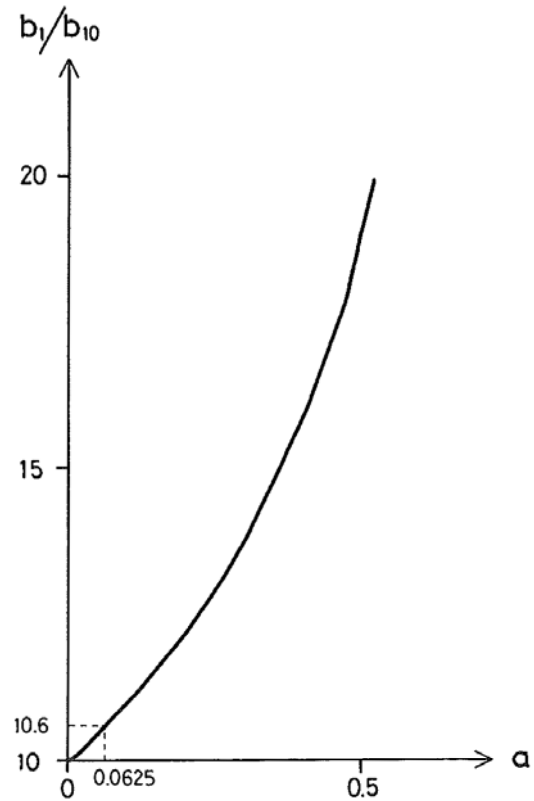


図 13-7
 $b_1/b_{10} - a$ 双曲線図(本文参照)

の量を b_{10} 、計算された上昇量を b_1 とすると、 $b_1/b_{10} = 9/(a-1) + 1$ となる。これをプロットすると図13-7に示されるように双曲線の一部となる。ここで a の範囲はこのシミュレーションでは10 kmを超えない、すなわち $10\text{km}/160\text{km} = 0.0625$ を超えないから、 $10 \leq b_1/b_{10} \leq 10.6$ となる。すなわち実際の隆起量は計算された値の約1/10となる。もちろんこれが成立するのは地表面の起伏が消滅した段階においてではあるが、ひとつの目安となろう。

いずれにしても、ここで問題としているのは、アジアおよびアジアとインドの間に隆起の傾向があるかないかである。注目すべき結果は、アジア側地殻全体が4000 m上昇してチベット高原を形成し、また両プレート衝突部に上昇の傾向はみられず、逆に前縁凹地が生ずる、ということである。

ヒマラヤの地質、とくにネパールヒマラヤに関するデータ(GANSSER, 1964; HAGEN, 1969; HASHIMOTO *et al.*, 1973)をみると、ヒマラヤ中軸部は片麻岩ナップ～ダイアピル、花崗岩質ダイアピルなどからなっていることが示されている。これらのダイアピルの上昇によってヒマラヤの上昇が促されたということは納得のいく説明である。これをつぎのモデルでシミュレートしてみることにする。

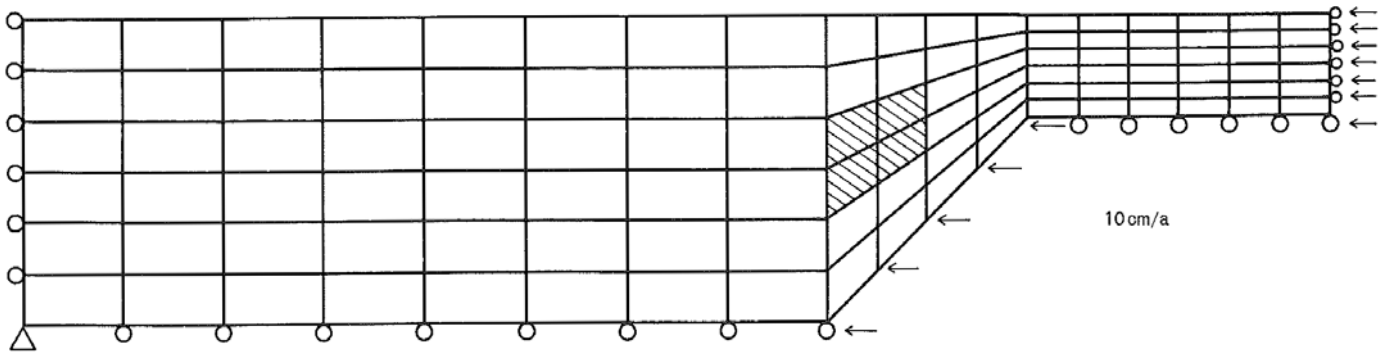


図 13-8
MODEL 9-3 の境界条件および要素分割図。 斜線部がダイアビル

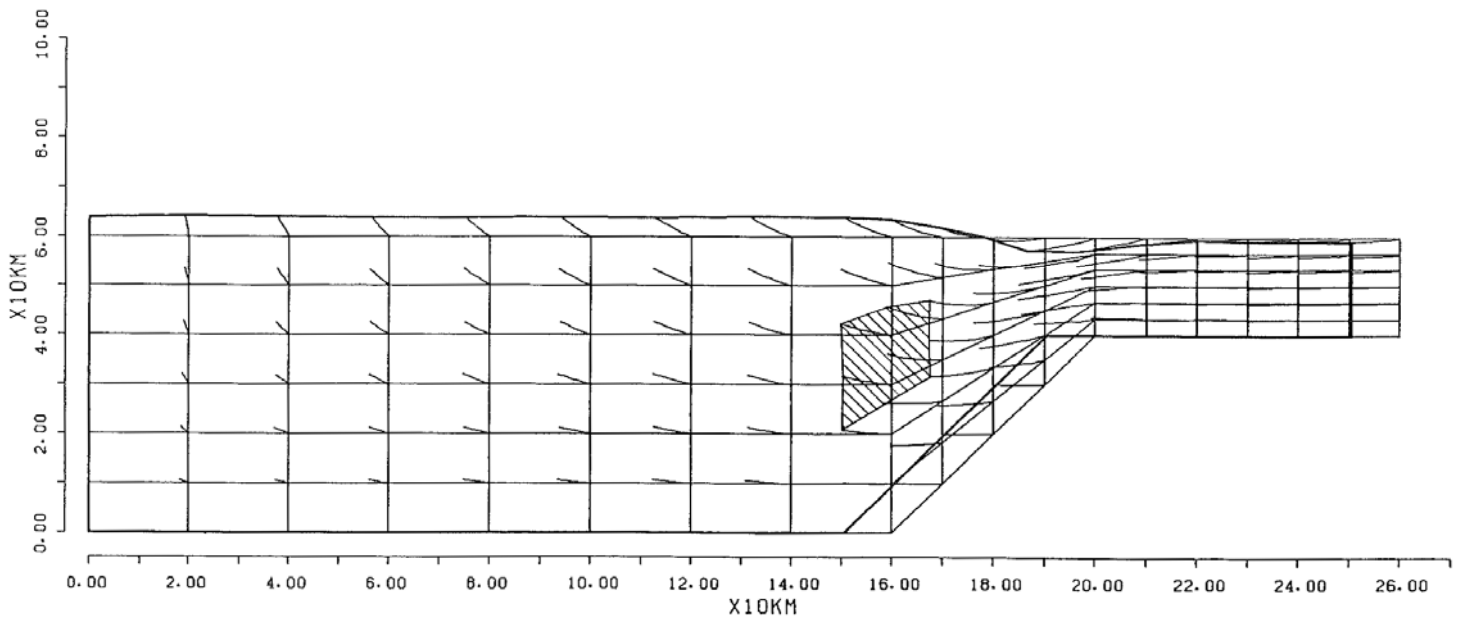


図 13-9
MODEL 9-3 の結果。 他は図 13-4 の説明と同じ

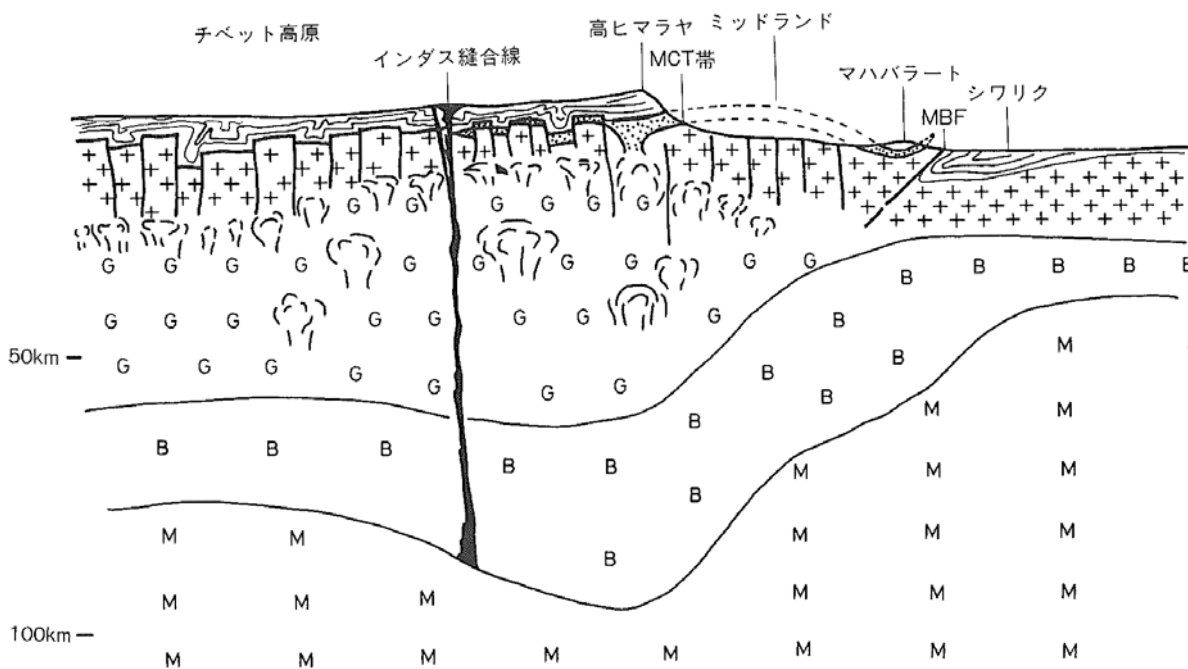


図 13-10
ネパールヒマラヤの断面概
念図(林, 1980)
砂目—ヒマラヤ片麻岩
+—先カンブリアないし古
生界基盤(ミッドランド変
堆積物)
G—花崗岩層
B—玄武岩層
M—上部マントル(リソス
フェア下部)
きのこ印—ダイアビル
MBF—主境界断層

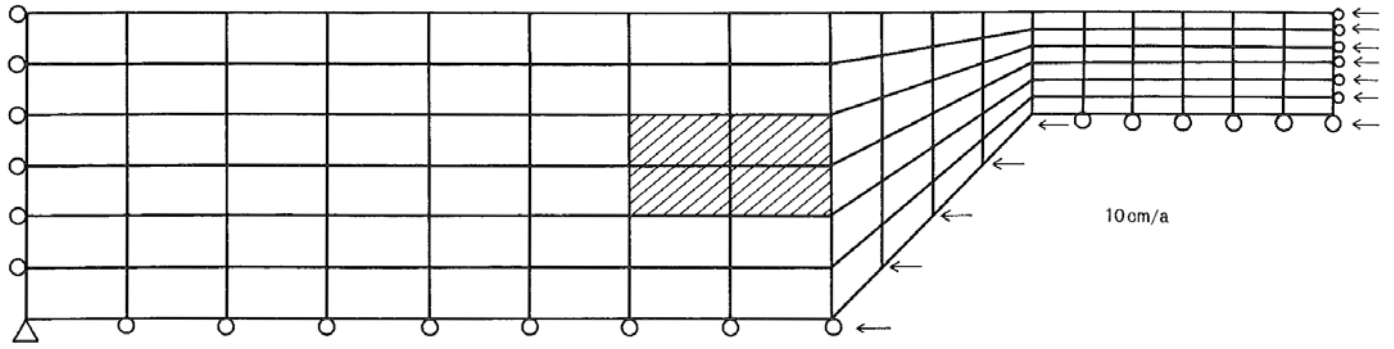


図 13-11
MODEL 9-5 の境界条件および要素分割図。斜線部がダイアビル

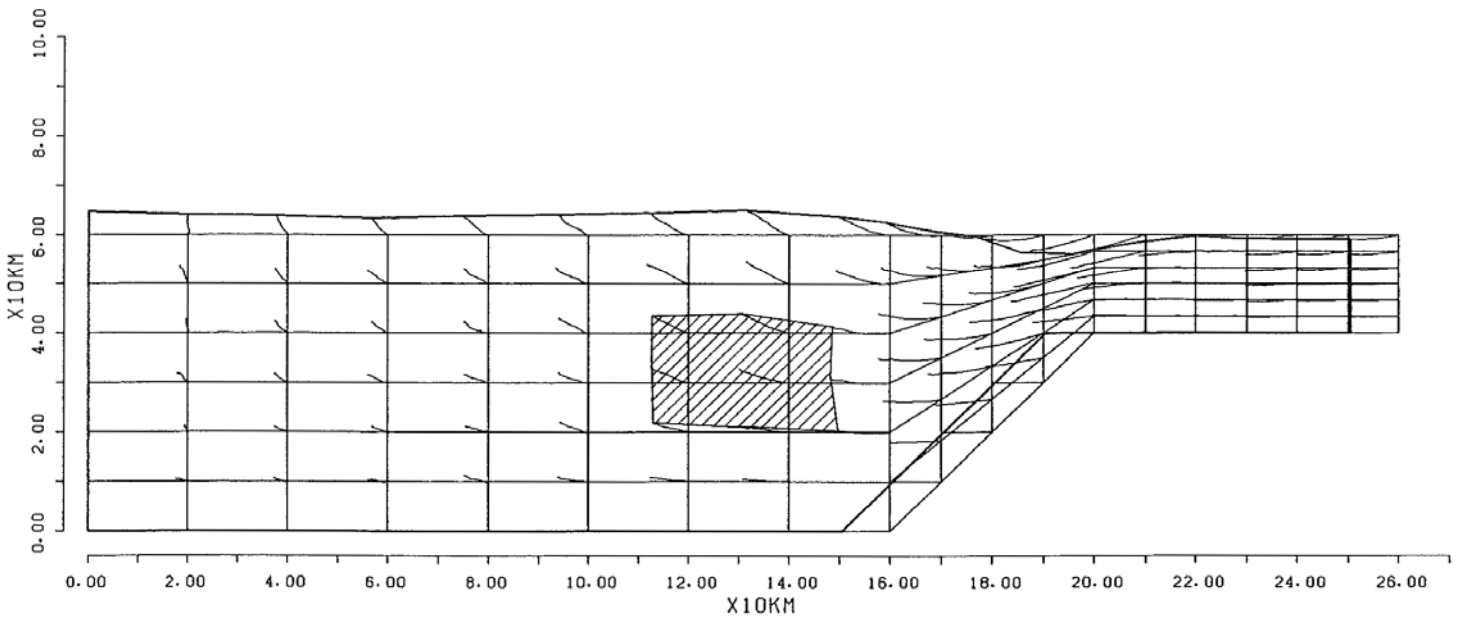


図 13-12
MODEL 9-5 の結果。他は図 13-4 の説明と同じ

2—MODEL 9-3

境界条件と結果は図 13-8,9 に示すとおりで、両地殻衝突部にダイアビルを仮定する。ダイアビルの密度を 2760 kg/m^3 、粘性係数を 10^{20} Pa s (10^{21} poises) とする。この場合はダイアビルを考えない場合よりも前縁凹地の傾斜はわずかに急となり、ダイアビル直上地表面もわずかに上昇しているが、とくに上昇の傾向は認められない。内部流動のパターンは MODEL 9-1 とほぼ同様である。

ここでヒマラヤの断面概念図(林, 1980)→図 13-10 をながめてみよう。ダイアビルはよりアジア寄りに位置している、すなわちダイアビルの発生はよりアジア側に期待される。このことをつぎのモデルで加味してみる。

3—MODEL 9-5

境界条件と結果を図 13-11,12 に示す。このモデルでは $40 \times 20 \text{ km}$ のより大きなダイアビルを考えている。ダイアビル直上をもっとも上昇し約 5000 m で、他のアジア側地殻表面との比高は約 1000 m となっている。前縁凹地の傾斜および内部の流動パターンは MODEL 9-1 とほぼ同様である。これら3つのシミュレーションの結果→図 13-4,9,12 からダイアビルの浮力によるヒマラヤ山脈形成は期待できそうもない。しかし、ダイアビルの有無にかかわらず、衝突後約 1 Ma (百万年) の後(前述の議論からの推定値、実際のシミュレーションでは 0.1 Ma) には 4000 m のチベット高原が出現する。また 3000 m の前縁凹地が生ずることはシワリク盆地の発生原因を示唆するものである。ただし、その形成時期がきわめて早い、という問題はあるが。

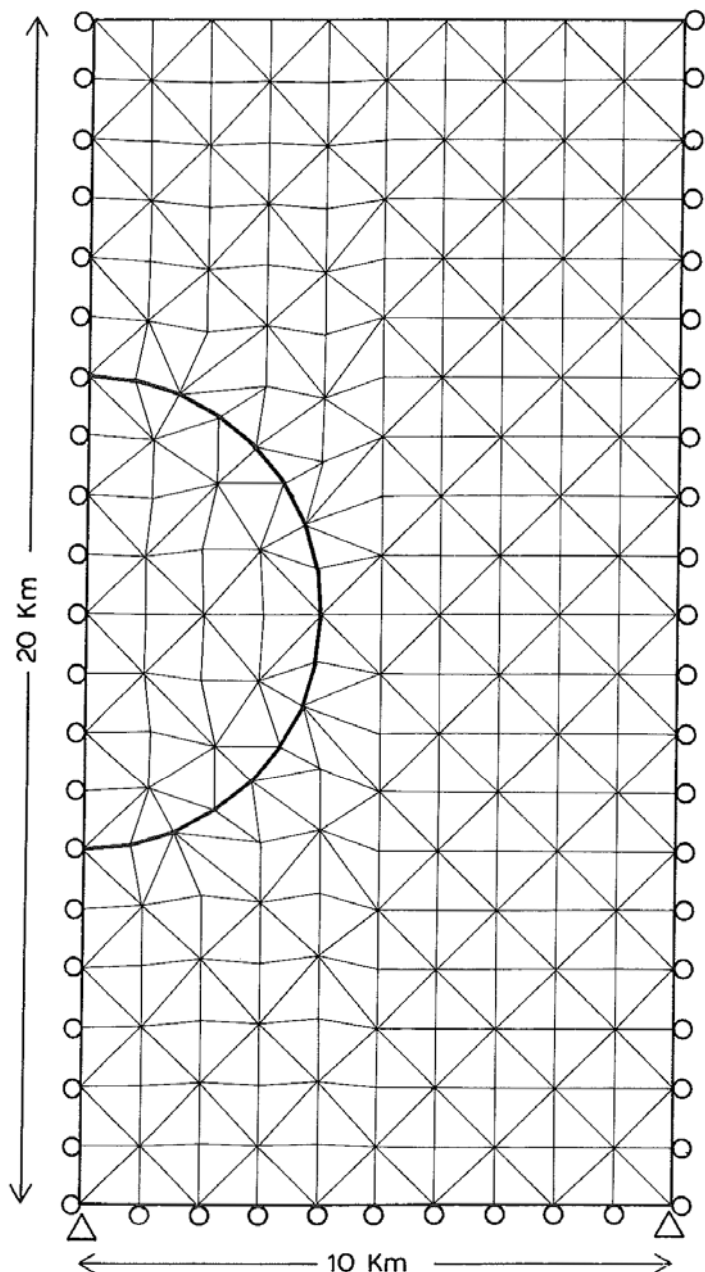


図 13-13
ダイアピルモデルの境界条件および要素分割図

2. ヒマラヤ片麻岩ナップの形成

ネパールヒマラヤの模式断面図→図13-10に見られるように、ヒマラヤ中軸部(root zone)から MBF(Main Boundary Fault)にかけての広大な領域(ミッドランド)に片麻岩～片麻岩の分布が認められる。いわゆるヒマラヤ片麻岩帯～MCT 帯(Main Central Thrust zone)とよばれるナップである。一般に厚さは平均5 km で南へののびは100 km におよぶ。概観すると、非常に薄い幅広く分布する層状の岩層である。岩相はザクロ石黒雲母片麻岩、石灰一珪質片麻岩、眼球片麻岩およびミグマタイト質片麻岩などから成るが、ザクロ石黒雲母片麻岩が卓越する。このザクロ石黒雲母片麻岩は縞状片麻岩であり、片麻状構造がよく発達している。この片麻状構造が原層理面を示しているのかどうかは疑問のあるところであるが、ともかく、その片理は乱されてはおらず、きわめて一定している。したがって、ある断層面(MCT 帯)に沿って乱されることなく南へ100 km ばかり移動してきたと考えることはうなずける説明であろう。

しかしながら、いかにしてこの断層面が生じ、いかにしてこの上面を滑ったか、という力学的な説明はむずかしい。これに対して、ダイアピルによる説明は力学的に明解である。一般にダイアピルは初期形状に無関係に上昇し、その後期、十分に地表面に近づいたあとには水平方向へ広がる傾向を示す。すなわち、現在ナップとして分布している片麻岩は、地下10 km ばかりの深部に存在し、ダイアピルとして上昇し、水平方向へ広がり、上昇し削剝されて、とくにネパール中央部では完全に侵食されて、現在の地質構造を呈するに至った、と考えるわけである。このようなダイアピルの上昇変形について、つぎのモデルでシミュレートしてみることにする。

1—ダイアピルモデル

このモデルの目的はいままでモデルとは異なって、ダイアピル自身の変形を追跡することである。このため直径8 km の円形ダイアピル、その重心を地下10 km におく、時間の経過につれての変形に焦点を絞る。境界条件は図13-13に示す。この領域は231 節点400 要素に分割される。このモデルでは、先の衝突モデルとは異なって三

角形有限要素を用いている。ダイアピルおよび地殻の密度と粘性係数は MODEL 9-3, 5 と同様である。結果は図 13-14 に示すとおりで、初期の上昇移動および後期の水平移動が 30 ~ 40 Ma 前後を境としてそれぞれ卓越しているのがみられよう。

ここでダイアピルの aspect ratio(縦横比, Ra)を計算してみる。これはダイアピルの最大幅と最大厚さとの比で、これが大きいほど物体は水平方向に細長い。Ra を時間に関してプロットすると図 13-15 のようになる。実線はこのモデルから計算された値である。最初 1 であった Ra が 100 Ma 後には 6.67 となっている。実際のナップの Ra は、最大幅 100 km, 最大厚さ 5 km とすると 20 であるから、両者はかなり食い違っている。図に示した破線 A は外挿線で 200 Ma 後には約 8.5 になることを示している。しかし、図の 90 Ma でのダイアピルの形状、すなわち両端下部の引きずりは、おそらく境界の存在に影響されたものと考えられるので、この影響のまだ見られない 80 Ma までの値をつかって外挿線を引くと破線 B となる。これによれば 200 Ma 後には Ra は約 11 になることが示される。いずれの外挿値も実際の Ra=20 からはほど遠く、さらにこれらの外挿線の形から、たとえ 100 億年たとうとも Ra=20 には達しそうもない。このシミュレーションの結果からダイアピルの水平方向への伸びからだけでは、ヒマラヤ片麻岩のナップの説明にはなりそうにもない。

ここですこし異なった観点からヒマラヤ片麻岩ナップの形成を考えてみる。先に行った衝突モデル(MODEL 9-1, 3, 5)において、もしインドプレートが停止したとしたら何が起こるのであろうか？ おそらく地殻の流下にとともなう南方へ向かう運動が生じるのではあるまいか？

このことをつぎのモデルでシミュレートしてみる。

2—MODEL 13-1

ダイアピルのない場合の粘性流動による地表面の平坦化を、MODEL 9-1 からの続きとしてシミュレートする。図 13-16 に示されるように粘性係数 10^{21} Pa s の場合には、平坦化はかなり速く進み、100 万年後には前縁凹地は完全に消滅し、ほぼ水平になっている。内部流動は各節点の軌跡により示されている。北端から約 150 ~ 160 km 付近で流動形式が変わっている。アジア側では南方下向き

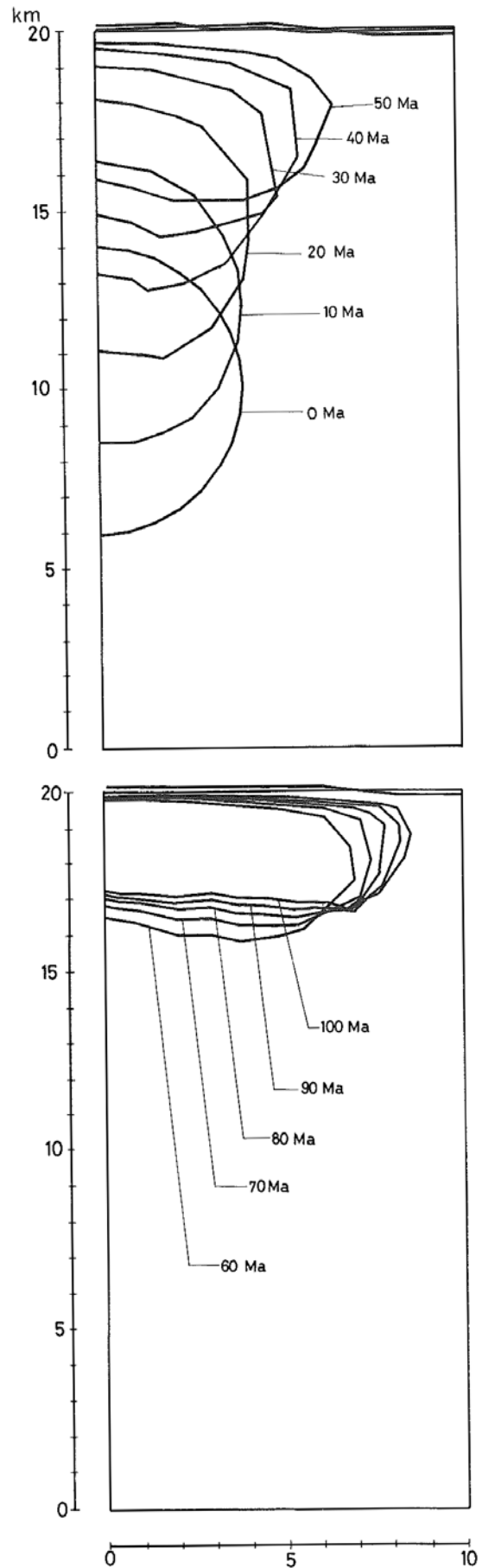


図 13-14
ダイアピルモデルの結果
それぞれ 10 Ma ごとの変形形状を示す

図 13-15
Ra—時間曲線(本文参照)

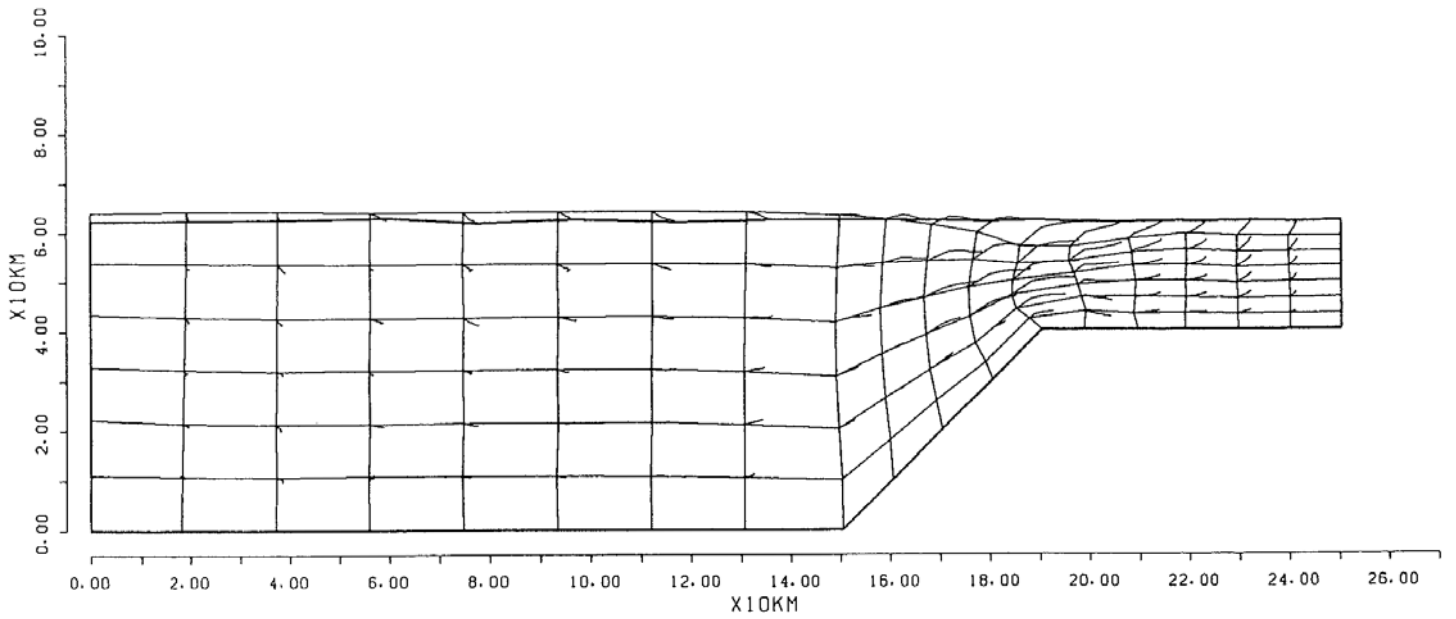
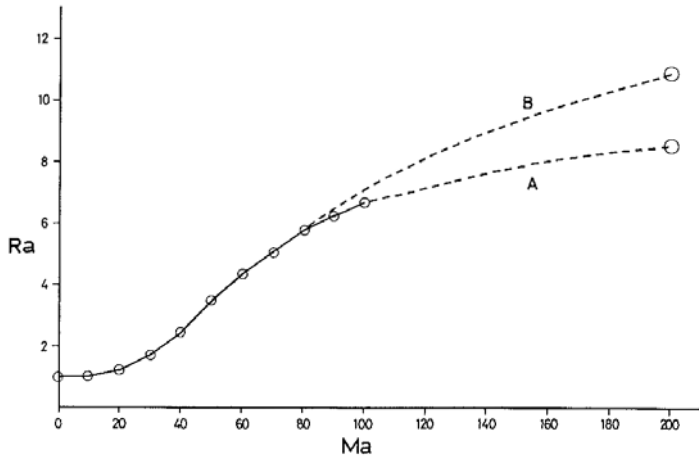


図 13-16
MODEL 13-1 の結果。 実線は初期形状(MODEL 9-1 の 10 万年後の形状)および節点の軌跡, 太線はインドプレート停止後 100 万年時の変形形状

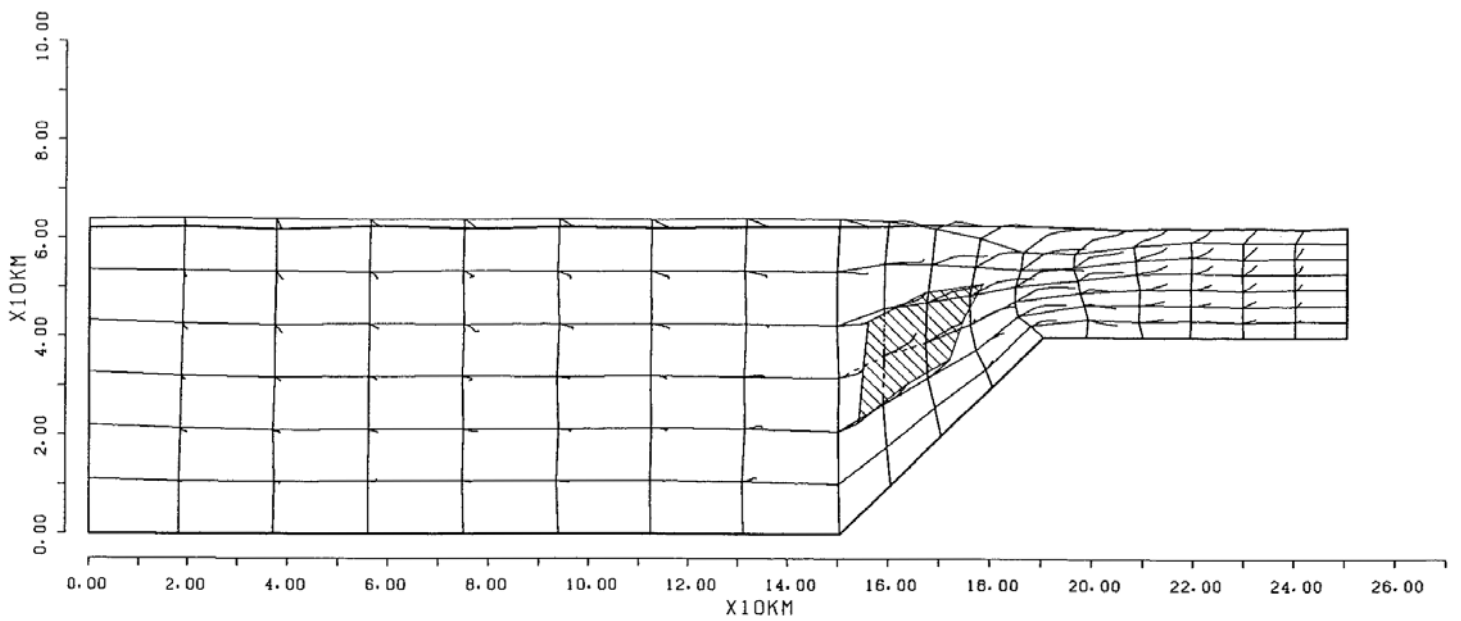


図 13-17
MODEL 10-3 の結果。 実線は初期形状(MODEL 9-3 の 10 万年後の形状)および節点の軌跡, 他は図 13-16 の説明と同じ

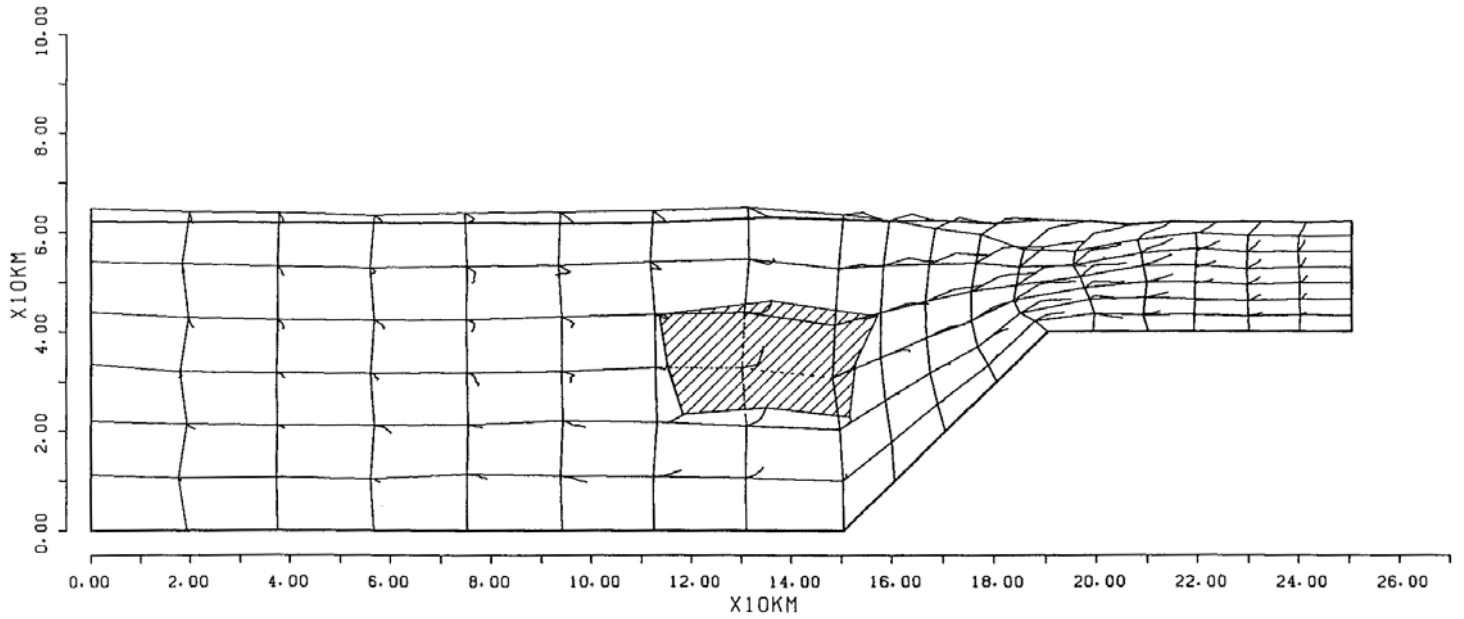


図 13-18
MODEL 11-1 の結果。 実線は初期形状(MODEL 9-5 の 10 万年後の形状)および節点の軌跡, 他は図 13-16 の説明と同じ

の流動, またインド側では予想したとおり南方上向きの流動があきらかである。

3—MODEL 10-3

MODEL 9-3 からの続きである。 図 13-17 に示すように, ダイアビル上昇による隆起は地殻の流動によって打ち消され, 100 万年後にはダイアビル直上部がわずかに 500 m 程度隆起しているのみで, 準平原化する傾向にある。 MODEL 13-1 と同様の傾向の内部流動が生じているが, ダイアビル周辺ではとくに上向きの運動がいちじるしい。

4—MODEL 11-1

MODEL 9-5 からの続きである。 図 13-18 に示されるように, ダイアビル直上およびインド側地表面はアジア側にくらべて 1000 ~ 2000 m ほど, ゆるやかに隆起している。 前二者と同傾向の内部流動が生じているが, ダイアビル周辺の運動はより上方へ向き, また複雑化している。

これら 3 つのモデルの結果, 両プレート停止後の内部流動から, ヒマラヤ片麻岩ナップが南方上向きの流動によって形成されたと考えることは自然であろう。