

# 構造地質学ノート

## ② グラルス断層運動とスイス・アルプスの形成

星野一男 (燃料部)

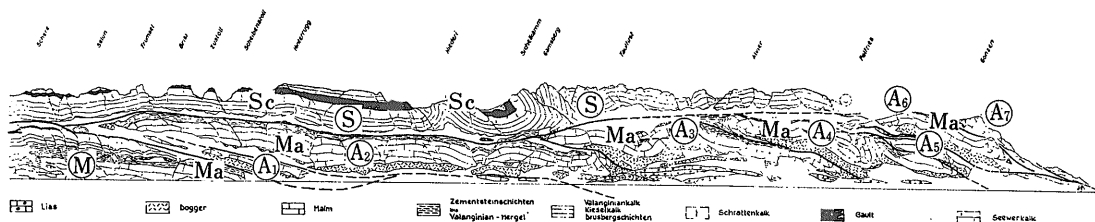
### 1. 押し被せ構造の力学モデル

前回にアルプスの 2~3,000m に達する裸岩の絶壁は幾重にも繰返される ほとんど水平に近い断層によって隆起している事を述べた。氷河によって作られたU字谷によってその構造は日本では想像できない程完全に

直接展望できる。カレンダーなどによく使われる美しい山岳写真の実態はほとんどすべて ナッペ構造なのである。第1 2図はスイス・アルプスのナッペ群がモラッセ上に衝上する付近の ナッペ群最北部における見事なナッペ群重畳の例を示している。美麗にして明瞭な横臥褶曲が見えるのが Sichelkamm (2,141m) である。山頂直下の褶曲する白い帯は Schratzen 石灰岩と呼ばれる白亜紀下部の地層であり 慣れれば その特徴はこの写真のように 10km 離れた所から遠望しても見誤まることのない。Sichelkamm の頂上から約6~700m下る所までが Säntis あるいは Churfürsten ナッペと呼ばれており 主として中・下部白亜系を含み 最も上位のナッペである。その下部 山腹の中位から湖水面付近までが Axen ナッペで主として上・中部ジュラ系より成る。この主体は Quintner 石灰岩と呼ばれる Malm 期石灰岩で 輝くような白色が特長であり 後述するようにスイス・アルプス全体を通じて非常に目のつきやすい石灰岩である。このナッペの面はやや東に傾



第2図 Walen 湖を隔てて Sichelkamm の横臥褶曲を見る。第1図中央部に当る。



第1図 スイス北東部。Walen 湖北岸 churfürsten の重畳するナッペ構造。M, Mürtchen ナッペ; A1~A7, Axen ナッペ; S, Säntis ナッペ, Si, シッケルカム (Sichelkamm, 2,141m); Ma, Malm 石灰岩; Sc, Schratzen 石灰岩。



(a) 第1図左端。

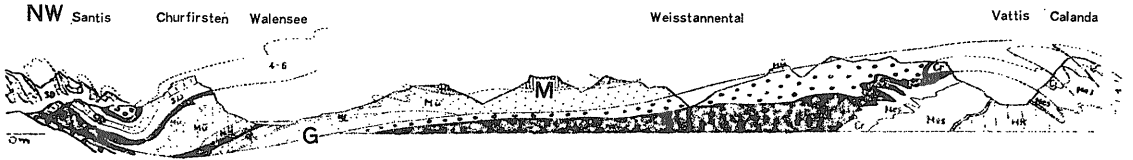


(b) 第1図中部。

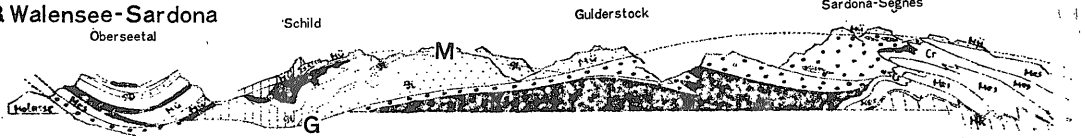
第3図 第1図部分の写真。

9. Säntis-Calanda

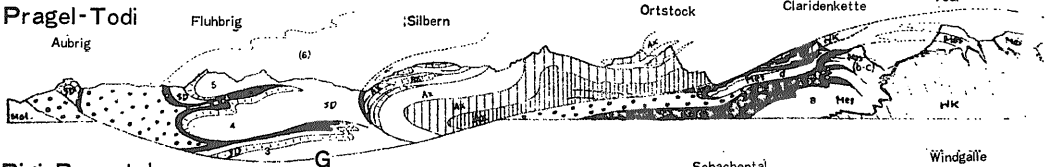
SE



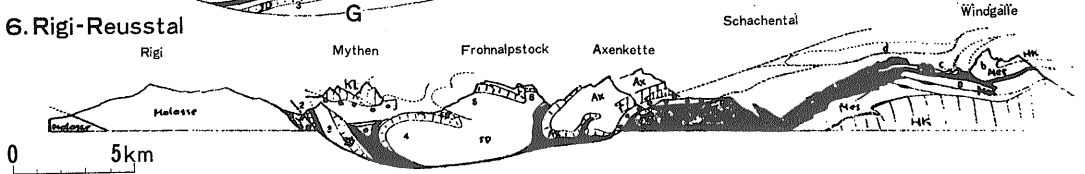
8. Walensee-Sardona



7. Prugel-Todi



6. Rigi-Reusstal



第4図 スイス東部におけるヘルベチア帯の構造断面図 下方ほど西側である。 G, グラルス断層。 M, Mürtschen 断層。

いており 写真の左方で 更に下位の Mürtschen ナップが現われる。 Mürtschen ナップは下部白亜系と上部ジュラ系よりなり 湖水面付近では再び Quintner 石灰岩が見えている。 Mürtschen ナップは Glarus ナップの上位にあり 写真では見えないが 湖水面下では Glarus ナップ部に移ると考えられている。

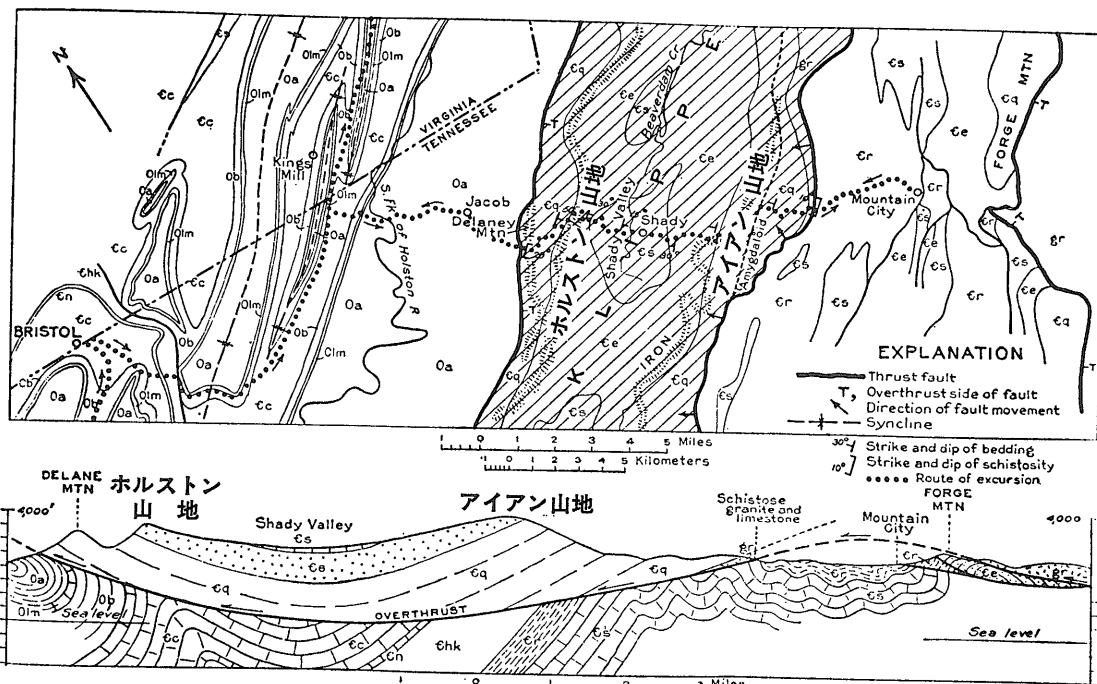
このような水平に近い運動はやはり断面図によらないと分り難いであろう。 第4図は Churfirsten を通って断層の傾斜方向に 南北にきた構造断面図である。 Glarus ナップは図の右端から左端まで一杯に拡っている。 その全長はこの図だけで見積っても 40km 近くある。 右手 すなわち南東ではハーシニア基盤岩・中生層・古第三紀層の上に重り 除々に高度を低めながら 左手北西端ではモラッセ (新第三紀) 上に衝き上げて終っている。 その上部に Mürtschen, Säntis のナップ構造が重なる。

Glarus, Mürtschen, Säntis のようなナップ構造の重なりが スイス・アルプス山地北側 観光客にもよく知られている モンブラン (4,807m) ユングフラフ (4,158m) アイガー (3,970m) ピラトス (2,121m) などの名山を含むヘルベチア帯の基本的地質構造である。 このような大規模な水平断層は 推し被せ断層あるいは

衝上断層 (overthrust—英 Überschiebung—独) と特別の術語で呼ばれている。 ナップ (nappe—英 Decke—独) は推し被せ断層によって移動した地塊 推し被せ断層によって区分される構造单元 あるいは推し被せ断層により作られた構造そのものを指し nappe structure, Deckenstruktur の組合せで使われることが多い。

押し被せ断層はスイス・アルプスのみならず 世界で造山帯と認識されている多くの所で報告されている。 北米のカナディアン・ロッキーの Lewis overthrust, Wyoming の Bannock overthrust, Nevada の Muddy および Robert Mountain overthrust, アメリカ東部のアパラチア帯の Pine Mountain および Cumberland overthrust などはいずれも 10~60km の水平変位を以って知られている著名な推し被せ断層である。 第5図は Cumberland overthrust 東方の推し被せ断層の例である。

しかし その雄大さにおいても 何人にも疑問を抱かせない明瞭さにおいても スイスのグラルス (Glarus) overthrust の右に出るものはないだろう。 前号にこの断層の発見がアルプス構造地質学と言ったものを生み出すきっかけとなったエピソードを書いたのだが その後も ナップ構造をめぐる問題は構造地質の発展過程において重要な軸となっており グラルス断層はそのモデル



第5図 北米アパラチア山地 Cumberland 断層東方の押し被せ断層

として折に触れて話題として登場することになる。

それではグラルスのような大きなナッペを形成した営力は何だったのだろうか。第2話はこの問題をめぐる話題を訪ねてみたい。

ナッペの機構についての議論は 20世紀初頭に入って SMOLUCHOWSKI (1909), OLDHAM (1921), LAWSON (1922) などによって行なわれたが 初期のモデルは単純なものであった。ナッペの特徴は水平に運動する断層であったから そのモデルは第6図のような幅長さ高さがそれぞれ  $a$   $b$   $c$  の平板状のナッペ岩盤が水平に基盤上に横たわっている状態から出発した。

この岩盤が横圧力  $P$  を受けたときに摩擦に打勝って滑動する力学的条件は 一応次のように求められる。

岩盤の重さによる垂直荷重 (全圧力)  $W$  は  $\rho$  を岩盤の平均密度  $g$  を重力の加速度として

$$W = abcpg \text{ (dyne)}$$

岩盤と基盤の摩擦係数を  $\mu$  とすると 滑動し始める時の横圧力  $P$  は

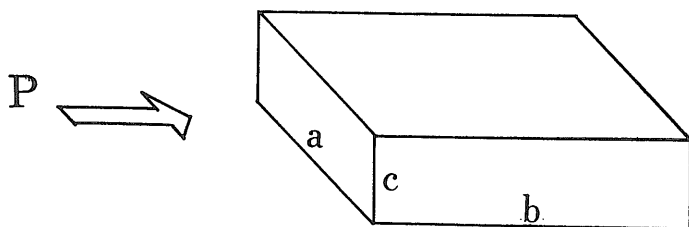
$$P \geq \mu W$$

ではなくてはならない。  $P$  は  $a$   $c$  面に働く全圧力であり 単位面積当たりの横圧力の強さ (応力)  $p$  は

$$p = P/ac = \mu pgb \text{ (dyne/cm}^2\text{)} \tag{1}$$

である。

この頃はまだ構造地質学の揺籃時代であり 岩石物性についての実際的知識は充分ではなかった。それでも数値を推定して(1)式を計算してみると非常に不自然な結果がでて来た。例えば SMOLUCHOWSKI は  $\mu$  として鉄と鉄の間の摩擦係数 0.15 を適用した。これに  $\rho = 2.5 \text{ gr/cm}^3$  を使って試算してみると  $b$  が 50km のときに  $p$  は  $1,875 \text{ kg/cm}^2$  となる。当時はまだ幼稚な材料試験機による常温常圧状態での強度実験が行なわれ



第6図 幅  $a$  長さ  $b$  高さ  $c$  のナッペ岩盤

ていた程度であり 花崗岩の破壊強度が  $600\sim 800\text{ kg/cm}^2$  である程度の知識しかなかったが これでは岩盤が動き出す前に岩盤が粉碎してしまうことになる。岩盤が滑動を始めるにはac面に  $1,875\text{ kg/cm}^2$  以上の応力が働かねばならないが 岩盤の強度はおそらく  $600\sim 800\text{ kg/cm}^2$  程度なので 破壊してしまっているという訳である。

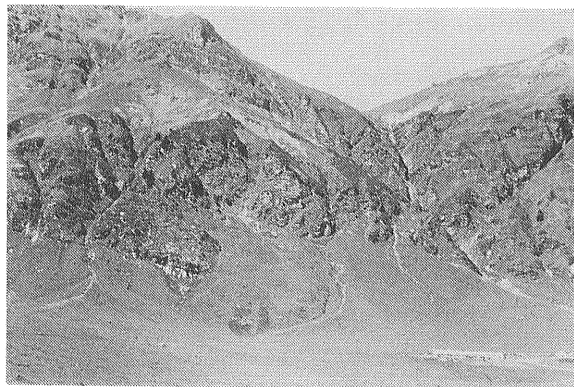
これはマナ板の上に置かれたトーフを考えればよい。マナ板の表面がツルツルでないかぎり 水平に置かれたトーフを動かすには 余程の力を加えなければならないが脆弱なトーフは加えられた力で崩れてしまう。トーフが大きければ大きい程 その可能性は大きい。

若し  $600\sim 800\text{ kg/cm}^2$  の強度に達しない前に滑動を始めるもの値を上と同じ物性値で計算してみると  $16.0\sim 21.3\text{ km}$  である。今日目で見ると摩擦係数  $0.15$  というのはどうしても低すぎる。ここでは後章で用いられる  $0.577$  をまず適用すべきであろう。その代りに岩盤の強度はもう少し大きく考えてよいかも知れない。グラルス・ナッペの岩盤を構成するベルカーノ(二畳系火山質礫岩 前号参照)は非常に堅硬で常圧下でも  $1,000\text{ kg/cm}^2$  の強度を持ち  $500\text{ kg/cm}^2$  の封圧下で  $4,500\text{ kg/cm}^2$  もの強度を持っている。また下盤であるフリッシュェの砂岩 泥岩は常圧下で平均  $2,000\text{ kg/cm}^2$   $500\text{ kg/cm}^2$  の封圧下で  $5,500\text{ kg/cm}^2$  の強度を持っている。新しい摩擦係数 強度値で計算してみると  $1,000$   $2,000\text{ kg/cm}^2$  からの強度値に対しては  $7\sim 14\text{ km}$  の長さが滑動可能な限界であるが  $4,000$  から  $5,000\text{ kg/cm}^2$  の強度値を取ると  $28$  から  $35\text{ km}$  の長さが可能となる。但し

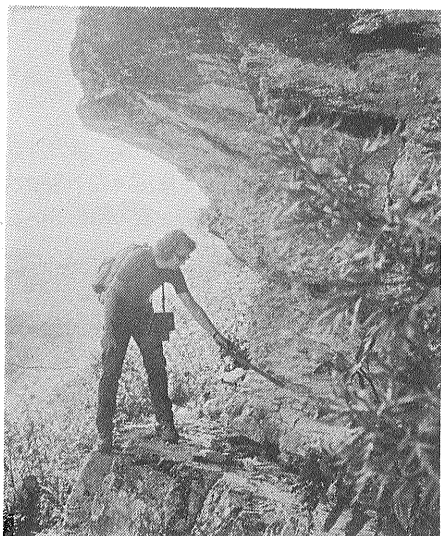
この場合には単位面積当り  $4,000$  から  $5,000\text{ kg/cm}^2$  (高さそれぞれ  $16$  から  $20\text{ km}$  の底面応力に相当する) もの大きな水平応力がどのような地質条件下で発生し得るかという問題が生ずる。

いずれにしても 我々の身近に普通に見られる単純なモデルでは水平滑動は容易には起りそうもない。Smoluchowski やその他の人々は匙を投げ ナッペ構造は力学的には不可能であると考えた。この限りでは 現在地上で体験される自然過程に合致しない事柄は 認めようとしなかった18世紀の人々は正しかったのかも知れない。明らかに眼前に展開されるグラルス断層  $40\text{ km}$  に及ぶ水平な大逆転を見た当時の人々の困惑ぶりは無理のない事であった。いまや奇蹟を考え出さない限り 水平断層の滑動の謎は解けそうもない。

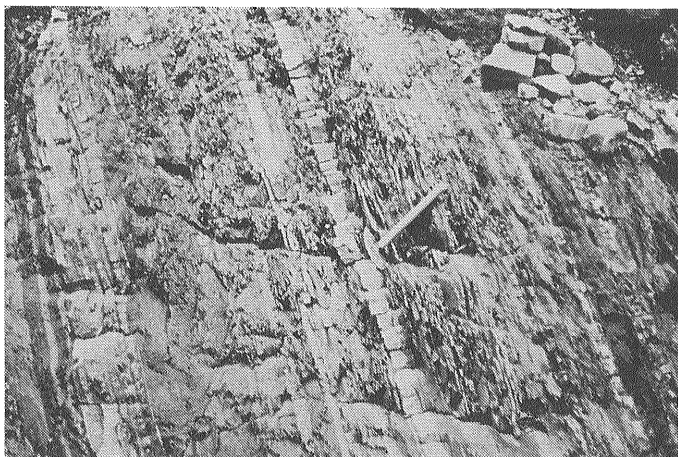
戦争と戦後の長い空白の後 新しい潮流に乗って この不思議に再び挑戦した人がいた。フッパート (M. King HUBBERT) という人であった。



第7図 Weistannental におけるグラルス・ナッペ。左方の全部と右方の大部分はベルカーノ(二畳系火山質礫岩)。右手の頂上近くに下部ジュラ系 三畳系が分布する。



第8図 第7図露頭におけるグラルス推し被せ断層の断層面。上方 ベルカーノ 下方フリッシュェ



第9図 フリッシュェの露頭 (Einsiedeln)。始新統であるが日本の真日本権谷・寺泊層によく似ている。

## 2. 水平滑動の謎

構造地質学は2つの面を持っている。 層位学・岩石学を利用して岩層の対比・追跡を行ない地質構造の geometry を明らかにすることと この地質構造を作った原因・機構を明らかにすることである。 私がこの“ノート”で書きたいと思っているのは主に後者である。 かつて私は後者を解析構造地質学 (dynamic structural geology) と呼んだ事があるので 本篇でも暫らくこの名前そのまま使いたい。 その時 解析構造地質学は戦後に始まり 1960年までが第1期であると書いた。 いわば誕生時代であった (地質ニュース117 118号)。

フッパートはこの時代の輝ける星であり 最後の人でもあった。 フッパート自らの語る所によれば 彼が岩石変形 (rock deformation) の機構に興味を持ち始めたのは1920年頃でありカナダ・アメリカの国境に近いスベリオル湖の北岸で楯状地を構成する先カンブリア系の複雑な褶曲を見たときであった。 それから いろいろの本や論文を読んだが彼の疑問の解決に役立ちそうなものはなかった。 この時 彼は弾性力学や粘性体力学 (今日で言う岩石力学) を地質学の中に持ち込まない限り問題の解決はないと悟る。 幸運にも そのあと 彼はドイツのゲッティンゲン大学から アメリカに移住したナダイ教授 (A. NADAI) と相識の機会を得た。 1927年に刊行されたナダイ教授の著書 *der bildsame Zustand der Werkstoffe* が大好評で迎えられ 英訳されて塑性論 (plasticity) の書名でアメリカで出版された直後であった。 これが現在 *Theory of flow and fracture of solids (I, II)* として 流布している大著の初版であったことは御存知の方も多いだろう。 フッパートに取ってこの機会は砂漠でオアシスにめぐりあったようなものであった。

NADAI教授との交流から生れたのが 地質構造研究に適用すべきスケール・モデル論 (*Theory of scale models as applied to the study of geologic structures 1937*), や一般的地質構造の力学的基礎 (*Mechanical basis for certain familiar geologic structures 1951*), などの仕事であった。 フッパートはコロンビア大学から Shell Development Company (development) の語にかかわらず 非常に高度なしかも基礎部門を含む研究所である。 小著最近のアメリカ構造地質学界。 (2) 1966 地質ニュース 140号参照)に移り ガルフ湾岸地域などの沢山の現場のボーリング・データに接して地下水の力学にも興味を持つようになった ダーシーの法則と地下水流の実際的公式 (*Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids 1956*, Willis との共著である水力破壊の力学 (*Mechanics of hydraulic fracturing 1957*) などはその代表論文と言えよう。 前者の論文で導入した水流方程式は今日 フッパートの公式と呼ばれて居り 後者の論文は最近 地震予知 石油開発 地熱開発で突然のように問題にされている地層水力破壊テーマのテキスト・ペーパーとして廻りつつある。 彼は これ等の研究を通じて ガルフ湾岸堆積盆地の深部層では 通常の静水圧よりも高い圧力を持つ “異常高圧水” がむしろ普通であるという 非常に貴重な経験を体得する。

この体験がナッペの移動の難問をめぐって多くの人が躓き越

えることのできなかった障壁を飛越えるキッカケとなった。 再び フッパートの言葉を聴こう。

1955年の夏にスイスの雄大なグラルス (Glarus) 推し被せ断層を始めて現地で見るとき私の頭に異常高圧のことが浮んだ。 厚さ数キロの岩層といえども地下では地層水に満されていた筈である。 異常高圧現象を想定することによって ナッペの不可思議に答を出すことができるのではないだろうかと私は思えた と彼は述べている。

フッパートがその解答を世に問うたのはそれから4年後であった。 HUBBERT and RUBY 推し被せ断層運動の生成機構における地層水の役割 (Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting 1959) は戦後におけるナッペ研究の出発点となった。 これはフッパートにとっては長い研究生生活の最後を飾る論文となった。 翌年 1960年に刊行された創成期の悼尾を飾る有名な論文集 岩石変形論 (Rock Deformation) において彼は序論を誌す役割をつとめている。

暫らく 1959年の論文を辿ってみよう。 フッパートはまず 前章と同じ水平移動のモデルを 戦後に発達した岩石力学 (rock mechanics) の知識によって再検討してみた。 計算モデルは第10図のようであり ナッペの伸長方向を  $x$  軸に 厚さを  $z$  軸にとった。 この考え方の新しい所は テルツアギによって唱えられていた上載荷重 (overburden pressure) の考えを岩盤にも適用した事 破壊条件式としてハンディン (Handin) らによる 1957年の先駆的 3軸高圧実験の結果を採り入れて モール条件式を使った事である。 すなわち ナッペの厚さを  $z_1$  とすれば その底面に働く垂直応力  $\sigma_{zz_1}$  は  $\rho g z_1$  であり 基盤との摩擦係数を  $\mu_1$  とすると 底面における剪断応力  $\tau_{zx}$  は

$$\tau_{zx} = \mu_1 \sigma_{zz_1} = \mu \rho g z_1 \quad (2)$$

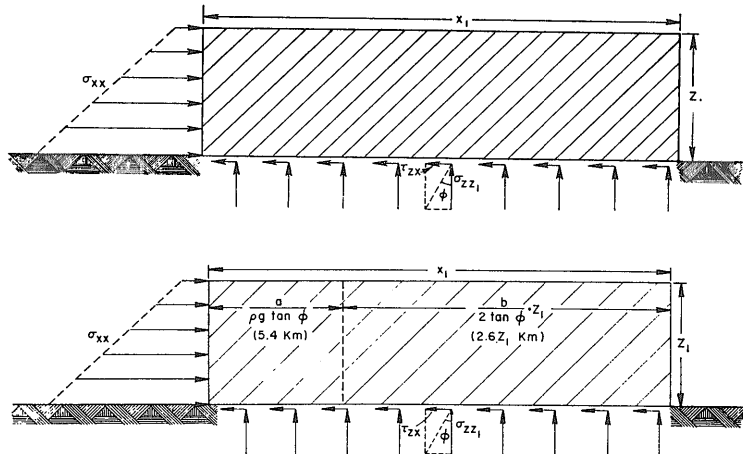
ただし  $\rho$   $g$  はそれぞれナッペの平均密度 重力加速度である。 一方 ナッペに作用する横圧  $\sigma_{xx}$  は破壊の瞬間には モールの破壊条件式によると次の関係がある。

$$\sigma_{xx} = a + b \sigma_{zz} \quad (3)$$

ただし  $a$   $b$  は  $\tau_0$   $\mu_2$  をナッペ内部の粘着力および摩擦係数として

$$b = \frac{\sqrt{1 + \mu_2 + \mu_2}}{\sqrt{1 + \mu_2 - \mu_2}}$$

$$a = 2\tau_0 \sqrt{b}$$



第10図 水平移動のモデル。 HUBBERT and RUBEY (1959) より

で表わされる物質特有の常数である。

(俊敏な読者はお気づきであろうが ここにはまやかしがある あとで検討することにしよう)

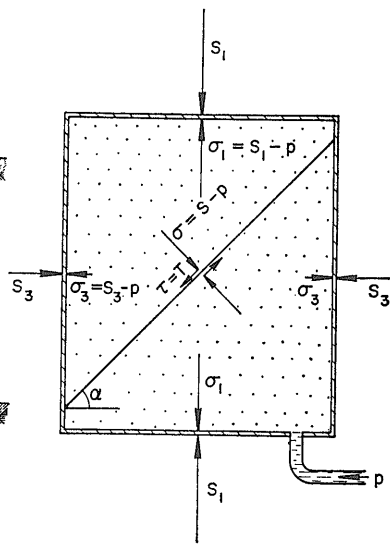
ここで この岩体を図上で左に押す力と右に押す力が釣り合っているの

$$\int_0^{z_1} \sigma_{zx} dx - \int_0^{z_1} \tau_{zx} dx = 0 \tag{4}$$

上の  $\sigma_{zx}$ ,  $\tau_{zx}$  を上式に代入してこれを解くと次式のナツペ滑動の条件式が得られる。

$$x_1 = \frac{a}{\rho g \mu_1} + \frac{b}{2\mu_1} \cdot Z_1 \tag{5}$$

この時 フッパートが使用した物性値は粘着力  $\tau_0 = 2 \times 10^6$  dyne/cm<sup>2</sup> (200kg/cm<sup>2</sup>) であり 摩擦係数は  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  は同値であるとして  $\mu_1 = \mu_2 = 0.577$  (摩擦角30°に相



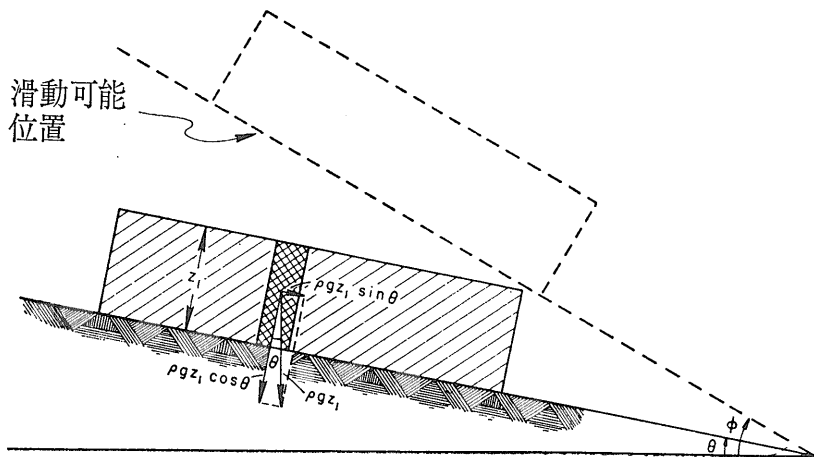
第12図 含水岩石における全応力(s) 有効応力( $\sigma$ ) および間隙水圧(p)の関係。 HUBBERT and RUBEY (1959) より

当する)を取った。 これで(5)式を計算すると

$$x_1 = 5.4 + 2.6z_1 \text{ (km)}$$

となる。 すなわちナツペの延長可能距離( $x_1$ )は厚さによって決まることになり 厚さが1kmのときには8km 厚さ5km に対しては18.4kmの延長距離しか持つことができない結果を得る。 これでは延長30~50km に及ぶ自然のナツペをととも説明することができない。

フッパートは次に水平の面を斜面にしてみた。 1950年の始めから De SITTER, Van BEMMELLEN などオランダの学者によって地球の重力による営力が地表近くの構造形成に重要な役割を持っている事が説かれるように



第11図 傾斜面のモデル。 HUBBERT and RUBEY (1959) より

第13図 本文 (9) 式の計算結果

$z_1$ (km)	$\lambda_1$						
	0	0.465	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	8.0	13.4	14.2	17.3	22.5	32.9	64.0
2	10.6	16.7	17.6	21.2	27.1	39.0	74.4
3	13.2	20.1	21.1	25.1	31.8	45.1	84.8
4	15.8	23.5	24.6	29.0	36.4	51.2	95.2
5	18.4	26.8	28.0	32.9	41.0	57.3	106
6	21.0	30.2	31.5	36.8	45.6	63.4	116
7	23.6	33.6	34.9	40.7	50.3	69.5	121
8	26.6	36.9	38.4	44.6	54.9	75.6	137

なった。水平面に対して  $\theta^\circ$  傾いている斜面では重力による重さのために 垂直応力  $\sigma$  剪断応力  $\tau$  はそれぞれ  $\rho g z \cos \theta, \rho g z \sin \theta$  となる。双方の応力が働く面は共通で面積は等しいので釣合は 応力値だけを考えればよい。斜面が  $\phi$  傾いたときに滑動が始まるとすればその時には  $\sigma, \tau$  は  $\rho g z_1 \cos \phi, \rho g z_1 \sin \phi$  となり

$$\mu_1 = \tau / \sigma = \tan \phi \quad (6)$$

摩擦係数  $\mu_1$  の値を上と同じに採ると  $\phi = 30^\circ$  となる。したがって単なる重力応力だけではナッペの如き小さい傾斜面での滑動を説明する事はできないと言うのがフッパートとの考えで ここで彼の切札 異常高压が登場する。

以上の過程から通常の力学モデルでは周辺の力学条件が多少変わったところでどうしようもないらしいことはお察し頂けよう。問題は摩擦である。何とか摩擦係数が低くなる機構が必要である。

どんな岩石でも孔隙を持っている。普通 深部にある岩石の孔隙は水で充満されていると見てよい。第12図はこのように孔隙水(地層水)を考慮したときの応力状態を説明したフッパートの図である。岩石塊の境界に加えられた垂直応力  $S_1, S_3$  は この場合全応力(total stress)と呼ばれる。これに釣り合う内部の応力は岩石を構成する鉱物粒子の結合構造が保持している応力  $\sigma_1, \sigma_3$  と孔隙水の圧力  $p$  である。従って

$$\begin{aligned} S &= \sigma + p \\ \text{または} \quad \sigma &= S - p \end{aligned} \quad (7)$$

$p$  を孔隙水圧 (interstitial fluid pressure)  $\sigma$  を有効応力 (effective stress) と言う。

そこで第6図のモデルでナッペの岩体が水で満されて

第14図 本文(8)式における見かけの摩擦角( $\theta$ )

$\lambda_1$	$1-\lambda_1$	$\frac{\tan \theta =}{(1-\lambda_1) \tan \phi}$	$\theta$ (degrees)
0.0	1.0	0.057	30.0
0.2	0.8	0.462	24.7
0.4	0.6	0.346	19.1
0.6	0.4	0.231	13.0
0.8	0.2	0.115	6.6
0.9	0.1	0.08	3.3
0.91	0.09	0.0519	3.0
0.92	0.08	0.0462	2.6
0.93	0.07	0.0404	2.3
0.94	0.06	0.0346	2.0
0.95	0.05	0.0288	1.6

HUBBERT and RUBEY (1959) より

いたとしよう。孔隙水圧  $p$  が加って 周辺には有効応力  $\sigma$  と  $p$  の和に相当する全応力  $S_{zx}, S_{zx}$  が作用する。

この時の平衡条件は(4)の代わりに

$$\int_0^{z_1} S_{zx} dz - \int_0^{z_1} \tau_{zx} dx = 0 \quad (8)$$

となる。(7)式の条件のもとに(8)式を解くと

$$x_1 = \frac{1}{1-\lambda_1} \left\{ \frac{a}{\rho_0 g \mu_1} + \frac{b+(1-b)\lambda_1}{2\mu_1} z_1 \right\} \quad (9)$$

が得られる。ここで  $\rho_b$  は含水状態での平均密度であり  $\lambda$  は  $p = \lambda S$  すなわち全応力に対する孔隙水圧の比である。 $\lambda_1$  は  $z = z_1$  における値である。孔隙がすべて連続している通常の時には孔隙水圧は静水圧に等しい。この時の  $\lambda$  は地層平均密度と水の密度との比であり前者を 2.15 とすれば 0.465 である。孔隙が部分的に密閉されたりすると孔隙水圧は静水圧よりも大きくなる時があり  $\lambda$  は 0.465 よりも大きくなる。これが異常高压と言われる現象である。孔隙が乾燥していれば孔隙水圧は零であり  $\lambda = 0$  である。(9)式で  $\lambda_1 = 0$  とおけば(5)式となる。第13図がいろいろな  $z_1, \lambda_1$  に対するナッペの限界最大延長距離である。厚さ 1km の時には静水圧状態で 13.4  $\lambda$  が 0.8 で 32.9km と(5)式の場合よりもはるかに大きな数字がでていいる。2km の厚さの時には 0.8 6km の厚さに対しては 0.6~0.7 で約 40km の長さが可能である事が示される。

この効果は孔隙水圧が大きくなることにより見かけ上垂直応力(主応力)が小さくなることに因るものだがこれは摩擦係数に対しても同様である。第10図に戻って含水の場合を考えると  $\tau$  は変わらないが  $\sigma = S - p$  ので

$\theta$ (degrees)	$\lambda_1$							
	0	0.465	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
0	21.0	30.2	31.5	36.8	45.6	63.4	116	222
0.5	21.3	31.0	32.5	38.2	48.1	68.8	137	320
1.0	21.6	31.8	33.4	39.7	50.6	74.4	163	
2.0	22.3	33.9	35.8	43.3	57.2	91.1		
3.0	23.0	36.2	38.4	47.5	65.3	116		
4.0	23.9	39.0	41.6	52.8	76.7			
5.0	24.7	41.9	45.0	59.0				
6.0	25.7	45.7	49.5	67.5				
7.0	26.7	50.2	54.9					
8.0	27.8	55.5						
9.0	28.9							
10.0	30.3							

第15図  
(9) (10) 式総合による計算  
結果. HUBBERT and  
RUBEY (1959) より

$$\mu_1 = \tau / (1 - \lambda) S$$

従って  $\tau = \mu_1 (1 - \lambda) S$  (10)

ここで  $\lambda=0$  とすれば(6)式と同じになる。これは  $S$   $\mu$  が変わらなくとも  $\lambda$  の増大によって小さな  $\tau$  でも滑動が起り得ることを示すもので見かけ上摩擦係数が減少したとも言える。どのくらい減少するかの一例が第14図である。最左欄の  $\lambda$  に応じて最右欄の  $\theta$  (見かけの摩擦角) が変わる。これは  $\mu_1=0.577$  ( $\phi=30^\circ$ ) とした例である。完全乾燥岩体では  $30^\circ$  の (見かけの) 摩擦角が静水圧状態でもほぼ  $20^\circ$  に減少し  $\lambda$  が 0.8 に増加すると  $6.6^\circ$  にまで小さくなる。

Fig. 15 は以上の(9) (10)式を総合したもので 傾斜  $\theta^\circ$  の斜面上を  $S_{xx}$  の横圧を加えられた岩体が滑動する場合の結果である。計算結果は厚さが 6km の場合である。これを見ると 静水圧下ですら  $\theta$  が  $7^\circ$  で 50km の長さが達成可能である。  $\theta$  が僅か  $3^\circ$  であっても  $\lambda$  が 0.5~0.6 で 40km 0.6~0.7 に上げれば 50~60km に達することになる。これはほぼゴラルス断層の長さに匹敵する。

奇蹟は完成されたかに見えた。

### 3. アルプスのジェット・コースター

フッパートの論文は卓抜したアイデアによって書かれた革命的なものであるが この種の研究の多くがそうであるように理論面・組立て方に攻撃を受け易い不完全不正確さがあるのは止むを得ない。その一つは(3)式の使い方に象徴されるようにナッペ岩体内部に限定すべき

事柄を岩体と基盤間の事柄と混同していることである。(3)式は岩体内部の破壊条件を指示する式であって 岩体底面に沿った変位条件に使うのには多くの問題がある。簡単に境界および内部の摩擦係数  $\mu_1, \mu_2$  を等しいとしている事も粗雑さが感じられる。第2は果して注文通り異常高压が発生したのだろうかという疑問 ガルフ湾岸の油田地帯は異常高压でよく知られているが いろいろな造山帯ののナッペの場所がすべて異常高压の場であったとすれば 発生原因はこれら造山運動に共通する過程の中に求めなければならないがこれは何だろうか。

彼の論文が発表されて以来 多くの討論がなされたが MOOR (1961), Hsu (1969), FOORSTALL (1972) は前者の問題に LAUBSCHER (1960), NUN and BYERLEE (1971) は後者の問題に関連した疑問・討論を呈出している。しかし 彼の論文がこの時期の構造地質学界に一時期を画した事はまちがいない。もう一度 フッパートの経歴を見てみよう。これは正しくこの時期の構造地質学の1面の足どりそのままではないか。彼がスケール・モデル論や地質構造の力学的基礎を発表した頃 HAFNER (1951) や SANFORD (1959) の地層変形解析の研究がなされている。これらは弾性平衡式やクーロン・ナビエの破壊条件式にもとずいて2次元の応力解析を試みた最初の仕事であった。地質学に初めて力学が導入されたのである。これらが理論面での導入であるとなれば実験面での導入も正にこの頃であった。初めて圧力と



変形形態の関係を明らかにした PATERSON (1958)の大理石の実験 岩石についての最初の系統的3軸高圧実験を行った HANDIN 他 (1957 1958 1963)の研究が発表された時期である。ここまで材料が揃ったら 次のステップは当然野外への適用である。フッバートがそれを試みた人であった。フッバートらの1959年の論文は理論面と実験面の両面から具体的構造変形を扱った最初のものである。

前号で私はアルプス構造地質学の古典時代の終了は1924年であると書いた。それは“構造地質学”の揺籃期であると言ってよいであろう。次の約40年を私は創成期としたい。HILL (1940) BILLING (1942) De SITTER (1956)などによって教科書が編纂され 構造地質学の名が定着した。しかし 記述の多くは地質構造の形態的分類や各地域構造の比較記載であり 構造形成の要因・機構を 理論的に追求する段階には至っていなかった。この間にあってオランダの Delft 大学の教授であった UMGLOVE の地球の脈動 (The Pulse of the Earth, 1947) は造山帯 島弧 大陸縁辺構造などの大構造の形成を系統的に考察 整理したむしろ異色の教科書であった。まさに フッバートが“これらの複雑な褶曲などの生成に関心をもったとき 彼の疑問の解決に役立ちそうなものはなかった”時代だったのである。

彼等自身が役立ちそうなものを作り出さなければならなかった。創成期の後半を彩るものはこの人々の先駆的な仕事である。フッバートの論文に象徴されるように その多くは未完である。正統的な地質学者 地球

物理学者のいずれにも満足を与えることはなかった。

しかしその未完の故に多くの批判 関心呼び起し 多くの追随者を生み出す事ができたのである。

ともあれ 解析的構造地質学の誕生は次に続く時代の性格を一変させた。1960年以降 構造地質学は明らかに新しい局面を迎えたかのように見える。

(本章未完)

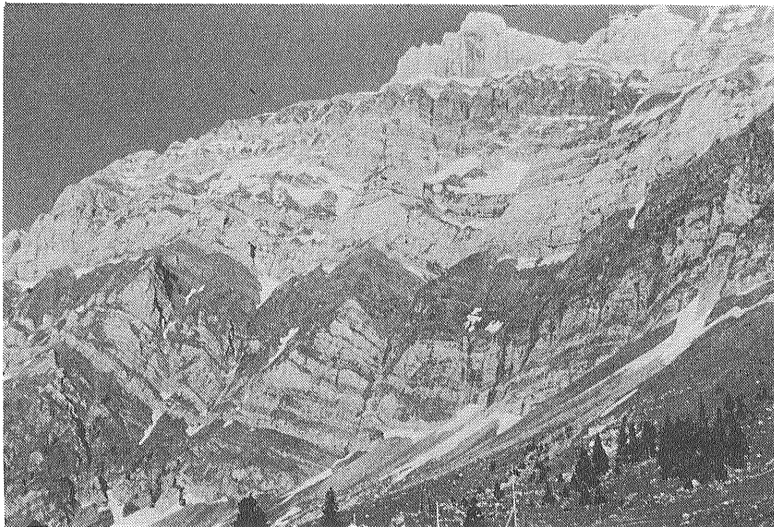
引用文献については下記を参考にして下さい。

Hubbert, M. King and Rubey, William W., 1959; Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting, I Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting, Bull. Geol. Soc Amer., Vol. 70, p. 115-166.

星野一男 1966; 岩石変形の基礎理論と地質構造要素 地質学雑誌 72巻 105-116頁



第16図 Walen 湖南方における Axen ナッベの遠望(雪を被った地層)



第17図 Walen 湖北東、Santis における Santis ナッベを構成する白亜系石灰岩