

構造地質学ノート(3)

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)



バイエルのノイシュバンシュタイン (Nenshwanstein) 城

4 ヘルベチア帯の構造

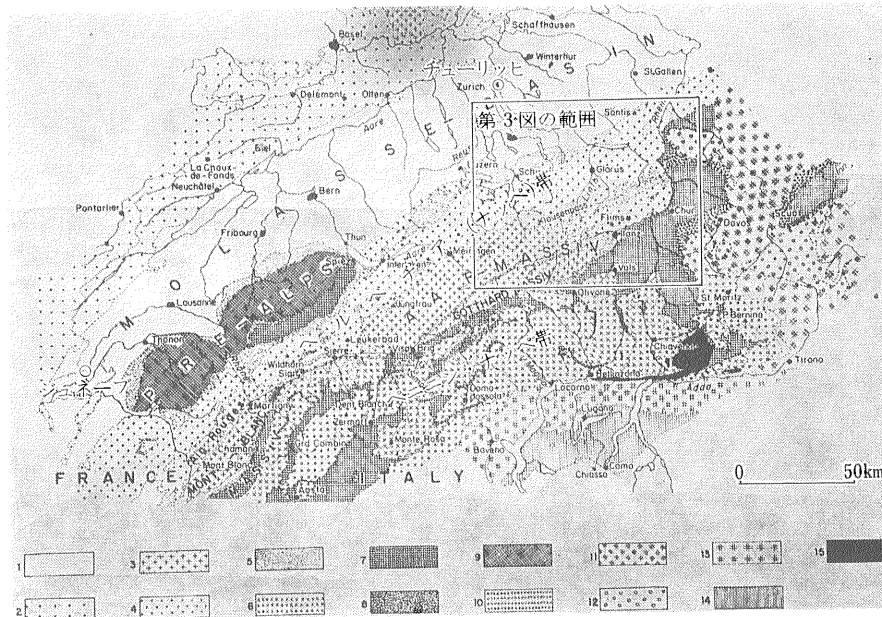
前号ではフッバート (M. King HUBERT) の仕事を中心に 1950—60年ごろ 岩石力学 (rock mechanics) の初期の成果をもとにグラルス・ナッペの研究が行なわれスイス・アルプスが再び構造地質学の舞台上った1つのエピソードを書いた。一般にスイス・アルプスと呼ばれている地域は 構造地質学的にヘルベチア帯 ペンニン帯 南アルプス帯に区分される (第1図)。

ヘルベチア帯とペンニン帯は共に幾つものナッペ群から構成されているが 後者はより複雑で しかもナッペ構造形成後に広域変成作用を受けているために 原初の構造形成プロセスを辿ることは 容易なことではない。これに対して 前者ではエッシャー以来のアルパイン・ジオロジスト達の活躍によって ナッペ構造が具体的に

解明されている。

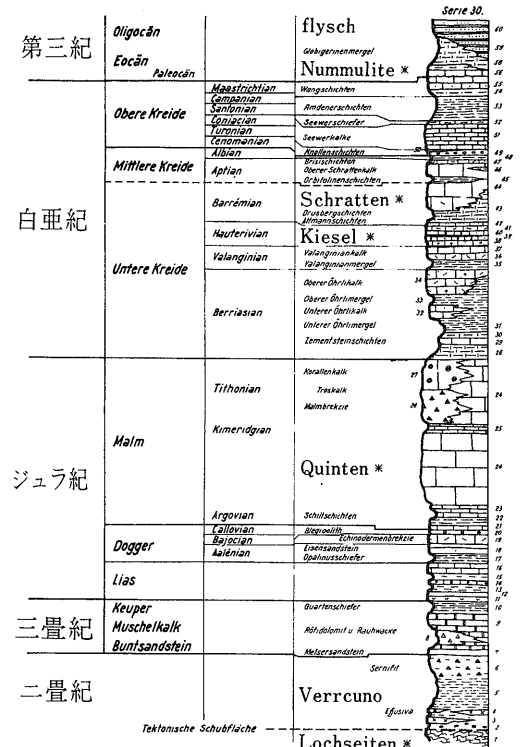
フッバートら ナッペの機構を力学的に解明しようとした人々は当然のことながら 問題を単純化して 1枚の平板をそのモデルと考えたのだが ここでしばらく方向を変えて 実際の押し被せ断層はどんな形態をしているか その断層面はどのような性質をしているかを少し詳しく見てみよう。ヘルベチア帯でも 特にスイス東部の部分 グラルス断層の周辺は前々号 (地質ニュース 271号) で詳しく書いたように 押し被せ断層構造が初めて発見されて 以来 最もよく研究されているところである。

ところでスイス・アルプスと聞けば誰でもナッペ構造を連想し 重畳なる山脈がすべて食べ方の下手な人のスパゲッティのように絡み合っていると考えているのではないだろうか。スイスの構造は岩石が変形する時の典型として どんな教科書にも必ず引用されているのだが 日本ではその実態が誤り伝えられているのではないかと思う。これは教科書の側にも大いに責任がある。およそ“例示”というものはわかりやすいものが選択され



第1図 アルプスの地質構造図 ヘルベチア帯 (ハーンミア: 基盤—3 ヘルベチア・ナッペ—4 ウルトラヘルベチア層—5) ペンニン帯 (結晶質岩部—6 中生・古第三紀層—7 先アルプス・ナッペ—8 先アルプス—9) 南アルプス・オーストリアアルプス帯 (下部オーストリア・ナッペ—10 オーストリア帯結晶質岩—11 中・上部オーストリア・ナッペ—12 南アルプス帯結晶質岩—13 南アルプス帯中生代層—14) モラッセ盆地—1 ユラ山地—2 後期貫入岩類—15 右上四角は第3図の範囲 RUTTEN (1969) による

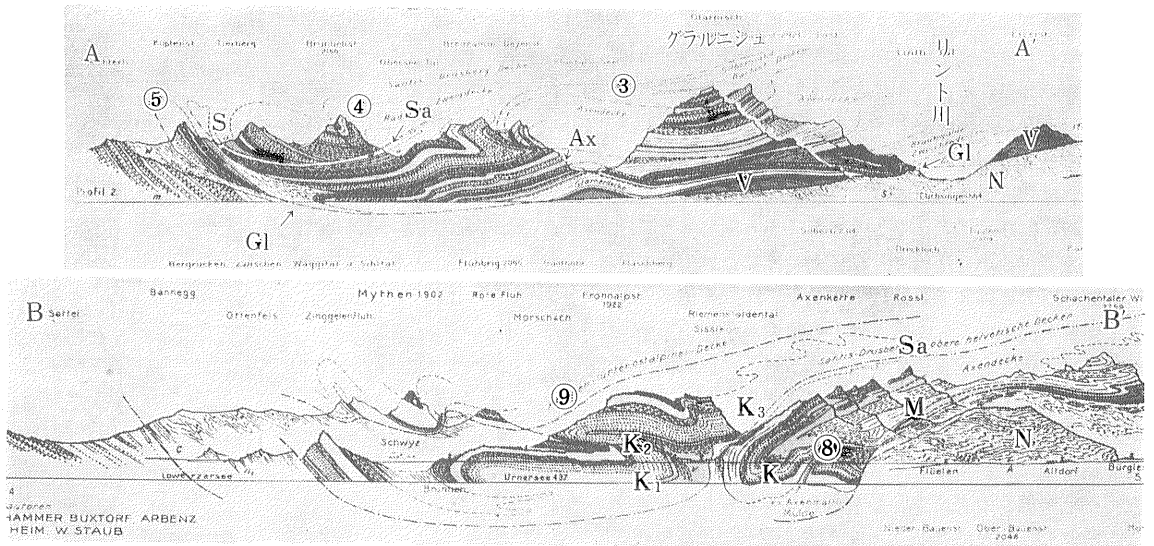
るのが普通であるが わかりやすさが重視されすぎて例示されたものも頻度というか 全体の中でどの部分を代表するものなのかがつい見逃されてしまうことが屢々である。 一方 これは読者の方も 記載だけで理解しようとしたり 書物を通してのみ勉強するときには十分に注意しなければならないことであろう。 ここで最も落ち込み易い陥井は“大きさ”である。 人間にとっては砂粒と呼ぶべき小さな粒も 蟻にとっては自分の体よりも大きい巨大な物体である。 トリック映画では屢々巨大な怪獣が活躍する。 我々はその舞台裏を知っているから 富士山を一跨ぎにするような“ゴリラ”がでてきても そのために現実の ゴリラ像が変化することはない。 しかし 若し 我々の周囲に真実のゴリラが存在せず 実際に見物することも出来ない状態で 映画をみたら その偽りのゴリラ像が実像として定着してしまうであろう。 人々はゴリラとは人間が造ったどんな建造物よりも大きく したがって 巨大な破壊力を持っている怪獣であるとする。 そのあげくある人々は生き物がこんなに大きくなれる筈がない したがってゴリラ以外の話も信用できないと主張する。 ここで冷静に洞察して ゴリラとその他のシーンは別々のスケールで撮影（記録）されているのだという第三の解釈を見出すこと



第2図 ヘルベチア帯東部の層序 *印は特徴ある石灰岩 (本文参照)



第3図 ヘルベチア帯東部の地質構造図 (スイス地質委員会編 50万分の1 スイス地質構造図 1972 による) AM アール地塊: GM ゴタルド地塊: P AT オートクトナス第三系: PA オートクトナス中生界: UG S フリッジェ: WV グラルス・ナック: Ax アキセ: ナック: Sä サンテイス・ナック: G グラルス連峰: H ハウスシュトゥック: S Schwanden: C Chur 数字は本文記述参照



第4図 ヘルベチア帯東部地質断面図 (Heim 1921による) 断面位置は第3図を参照 A アール地塊: V ベルカーノ (二畳系): L 下 Schratzen 石灰岩 (下部白亜系): Gl グラルス押し被せ断層: Ax アキセン押し被せ断層: Sa サンティス押し被せ断層

は簡単な様だが コロンブスの卵と同じくむずかしいことに違いない。

アルプスの説明で今まで欠けていたのはこの“第三の解釈”であったと筆者は痛感している。筆者は本稿で教科書的な正確で完璧な話をしようとは思わない。この類の説明はそれこそ教科書を見て頂けばよいのであって教科書を読む傍ら教科書に騙されないための“舞台の中の話”をしたいと思うのである。本書では図面写真などの縮尺とその地理的位置を執拗な程付記してある。願わくばこれを見落さぬよう万全のご注意をして頂きたい。

ヘルベチア帯は押し被せ断層構造が最大の特徴であるためにヘルベチア・ナッペ帯とも呼ばれ数コの押し被せ断層より構成されているが最大の押し被せ断層運動は新第三紀の初期に起こったと考えられている。この運動の前の地質分布は大よそ次のように考えればよいであろう。

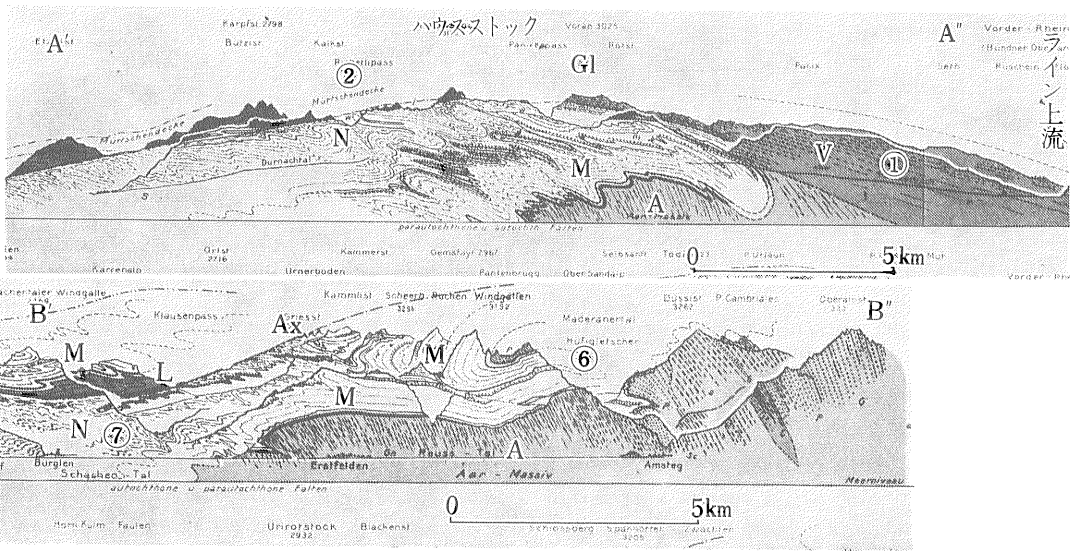
ヘルベチア帯の南限はアール山塊とゴタルド山塊である。両山塊はハーシニアン造山運動(古生代後期)の結果成立した基盤岩より構成されている。この基盤岩上に二畳系から白亜系までの地層が重なった。二畳系の主役はベルカーノ(Verrucano)と呼ばれる非常に特徴的な火山質堆積岩であり厚さは1000mに達している(地質ニュース 271号 14 15図参照)。三畳系は非常に薄く石英質砂岩 ドロマイト 赤色粘土層の順に堆積した。下部ジュラ系(Lias)は約500mで砂

岩 頁岩 石灰岩である。中部ジュラ系(Dogger)は頁岩 鉄斑状砂岩 クリノイド石灰岩である。上部ジュラ系(Malm)は300乃至450mの厚さであり主体は細粒のQuinten石灰岩である。下部白亜系に至るとアール・ゴタルド両地塊南方では厚い堆積が行なわれるようになる。両地塊の北部では100mに過ぎないが南方ではおそらく1500mに達する厚さを持っていたと思われる。海緑石層 頁岩 石灰岩の順に堆積を繰返す。Kiesel Schratzenなどの石灰岩層はそれぞれ特徴があり急峻な懸崖を構成する。中部白亜系は10—80mの海緑石層であり地元では地質年代を採ってGaultとあだ名で呼ばれている。上部白亜系は石灰岩 頁岩であるが徐々にフリツシェ相に移過する。

新第三紀の初期の押し被せ運動は実質的に現在見られるヘルベチア帯構造を作り上げたものでmain overthrustingと呼ばれている。そのうちでも最大にして最初のものはグラルス断層なのでやはりここから話を始めるのがよいであろう。

スイスに入ったライン川は緑の牧草に溢れた谷間を縫って流れ上流へ更には遡るとクールの町から東西に向きを転ずる(第3図)。溪流はいよいよ激しくなりアール地塊とゴタルド地塊の境界に入っていくのである。

ここはライン川の源流であると同時にヘルベチア構造の源でもある。第4図A断面で見るとこの谷からベルカーノ層が3000m級の山頂を越えて30~40kmもの距離を北方に流れ下って進んでいる。この断面図



部ジュラ系 (Lias) : M 上部ジュラ系 (Malm) : K 白亜系 : N 第三系 (オートクトン) : K Kiesel 石灰岩 (下部白亜系) :

ではベルカーノはグラルニシュ (2920m) の下に潜っているが その東側 すなわちリント渓谷の西側の Schwanden では地表に露出し 始新統のフリッシュ層を切るグラルス断層の断層面が観察される (その1 地質ニュース 271号参照). 断層の上部ではベルカーノ層の上に三畳系からジュラ系 白亜系 および古第三系までが第2図の一般層序のまま重量しているの で グラルス断層はおよそ2000m以上の岩層を載せて少なくとも 30km 滑動したことになる.

第5図はライン上流のほとりのベルカーノの写真である (第4図Aの①の場所). 凝灰質砂岩であるが岩石は破碎されている. この理由はあとで述べる.

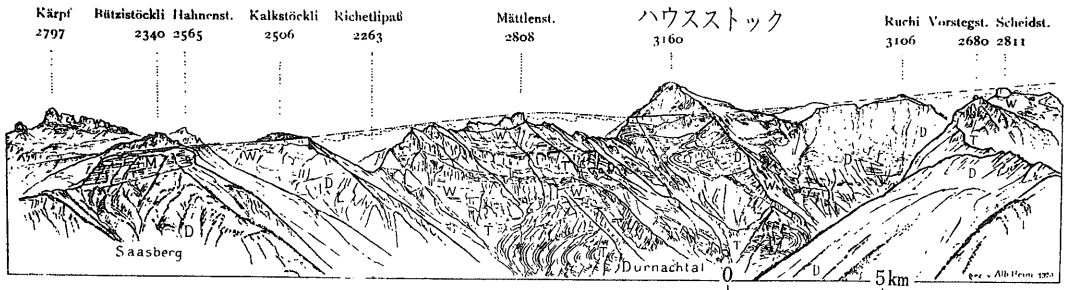
さて グラルス断層の下盤は上盤と同じように基盤岩 (アール地塊) から三畳系—古第三系のすべての地層である. 第4図Aで示されるようにライン上流地域からアール地塊(A) 中生層 (大部分は上部ジュラ系 Malm である. 図ではM) フリッシュが北方へ次々と出現する. 第6図は②における main thrusting グラルス断層をハイムがスケッチしたものである. この部分の下盤はほとんどが古第三系フリッシュである.

以上に見た押し被せ断層のパターンは第19図のEもしくはFの段階に対応すると理解しやすい. Vは基盤岩およびベルカーノ Lは二畳系およびジュラ系中・下部 Mは Malm (ジュラ系上部) Kを白亜系中・下部 Nを白亜系上部および古第三系とおおよそ このように考えればよいであろう.

ベルカーノはラインの流れが尽きると共に消滅する. グラルス断層もそれと共に勢が弱くなり リント川から 30km 西のロイス川付近ではグラルスより 1 時期あとのアキセン (Axen) 押し被せ断層が main thrusting を代表することになる. 第4図Bの断面図で Ax がアキセン断層面である. アキセン・ナッペの基底は下部ジュラ系 (Lias) であり 主体は Malm と下部白亜系である. アキセン・ナッペの先端はウイリアム・テルの伝説で名高いウーリ湖の岸辺で深く沈降する. この上に重なるのが main thrusting の最後のサンティス (Säntis) 押し被せ断層である (第4図の Sa).



第5図 ライン源流のベルカーノ (二畳系) 場所は第3図 第4図 Aの①



第6図 ヘルベチア帯押し被せ構造の主断層の1例 リント川上流におけるグラルス断層 断層上盤はベルカーノ 下盤は主として古第三系フリッシュ 場所は第3図 第4図Aの② ハイム原図

autochthon と nappe

以上がヘルベチア帯の骨格を作る主要な押し被せ断層である。現在 ヘルベチア帯は幅約50km 長さ約200～300kmのゾーンであるが 押し被せ断層によって運ばれた中生層は現在のヘルベチア帯の南方の地向斜に堆積したものであって おそらく数10kmの距離を移動して現在の場所に落ちていたと推定されている。一方現在のヘルベチア帯の位置に堆積した堆積岩はほぼ 原位置のままに以上の断層の下に押し閉じ込められた。前者の岩層をナッペ (nappe) と呼ぶのに対し 後者の岩層をオートクトン (autochthon) と呼ぶ。オートクトンはいろいろな訳語があるが ここでは固定層と言うことにしよう。現在の地図上で見ればアール ゴタルド両地塊を境として北側にあるものがオートクトンであり 南側にあったものがナッペである。勿論 例外とか このように割り切ることでできないものもある。アール地塊の北縁には main thrusting の前駆的活動の結果と思われる押し被せ構造が局部的にあり たとえばロイス川東部では アキセン断層の下位に基盤岩をも巻き込んだ構造がある (第4図⑥)。しかし 主として Malm および始新統よりなるこれらのナッペの移動距離は それ程大きくはないとされ 地層自体はオートクトンとされることが多い。

flysch と molasse

すでに述べたように上部ジュラ系から下部白亜系の堆積物の大部分は 非礫性の石灰岩であるが 第三紀に移ると細粒の海成砕屑物が主体となってくる。これがフリッシュ (flysch) と呼ばれる地層である。砂岩 頁岩のみごとな互層をなすことが多い(地質ニュース 273号 第9図参照)。フリッシュに代表される岩相は始新統から漸新世前期まで続くが 一部では白亜紀後期から出現する。フリッシュは無論ナッペのメンバーとして現在の高山の山頂付近に分布するものもあるが 圧倒的の大部分はオートクトンとして 押し被せ断層の下盤に分

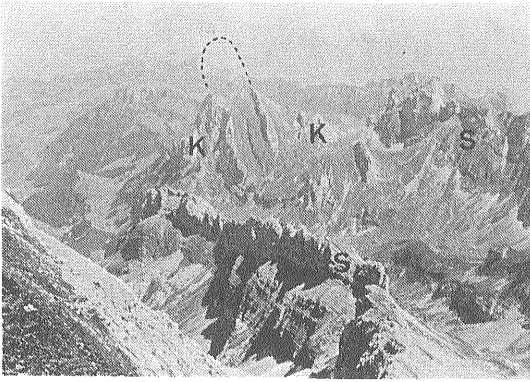
布している。一方 ヘルベチア帯の北部には非常に大きな礫を含む粗粒堆積物が分布する。これがモラッセ (molasse) である。モラッセは地質時代としては中期漸新世から鮮新世までの時代を含んでいる。礫にはナッペの構成岩石から由来するものを含むことから モラッセはヘルベチアのナッペによって形成された山地から転落した砕屑物により作られたものと考えられているのである。モラッセには2つの輪廻がある。すなわち 漸新統に海成から陸成に移る変化があり 中新統で再び海成に転じ また陸成層に変わる。main thrusting が新第三系の初期に始まると考えられている根拠の1つに モラッセの中新世における海成層化がある。また 地向斜の終息と造山運動の始まりは 漸新世初期ごろであったことが フリッシュとモラッセの時代的变化から自然と判断されることである。

次に構造形態の変化をみてみよう

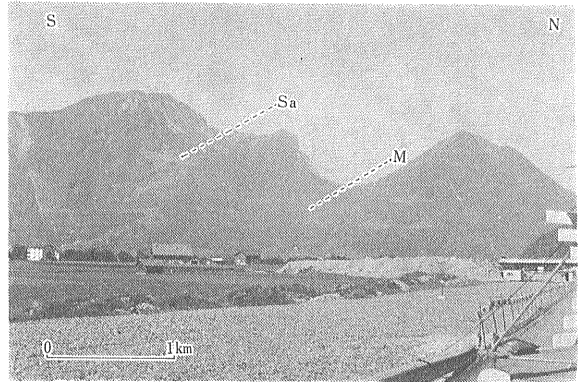
ナッペの底面がおそらく読者が予想されている以上に平面的であることは このシリーズで今まで繰り返し説明した事であるが 第4図を見て頂けば更にはっきりするであろう。第6図では数キロの距離にわたって断層面が明瞭に示されており 草木1つないアルプスの山岳地帯でのスケッチとして写真以上の説得力があるであろう。第一章で示したグラルス断層の写真(地質ニュース 271号 第16図)はこの場所から10km 南東の山岳写真である。両図を再び共に見て頂けばアルプスの押し被せ断層の主要面の特徴を正確に判断して頂けると思う。

recumbent fold

グラルス・ナッペを更に北方に追って行くとどうなるか。断層面は降下し やがてアキセン サンティスなどのナッペの下に潜ってしまう。しかし アキセン サンティスは更に北方に伸び その末端は背斜が横転しあるいは転倒するようにして その底面は押し被せ断層



第7図 サンティス ナッペの構造の1例 第3図 第4図の④
S Schratzen 石灰岩; K Kiesel 石灰岩 背斜両翼の
Schratzen 石灰岩層の距離は約7~8km



第8図 ヘルベチア帯最北縁 第3図 第4図の⑤ Sa サンティス
押し被せ断層; M モラッセ(北側)に衝上する断層

面を形成する。これは第19図のFからGの段階である。このような褶曲に対して 横臥褶曲 (recumbent folb) という術語が作られた。この言葉を使うと ヘルベチック帯の末端 (北縁) は 横臥褶曲が発展して押し被せ断層となっていると表現できる。

それではグラルス断層はどうかという疑問が生ずる。第19図のようなプロセスを認めれば これも非常に大きな横臥褶曲が引きちぎれてできたものと言える。

あるいは後に述べるようなより小規模のスケール (数十メートル単位) の褶曲構造はどうか。横臥褶曲を単に形態のみを表現する言語であるとするれば これらもその言葉で呼ぶべきであろう。だが 押し被せ断層 (overthrust) やナッペという言葉が 形態以外の構造地質の意味づけをはっきりさせた場合にのみ使われている慎重さがこの場合も必要であろう。

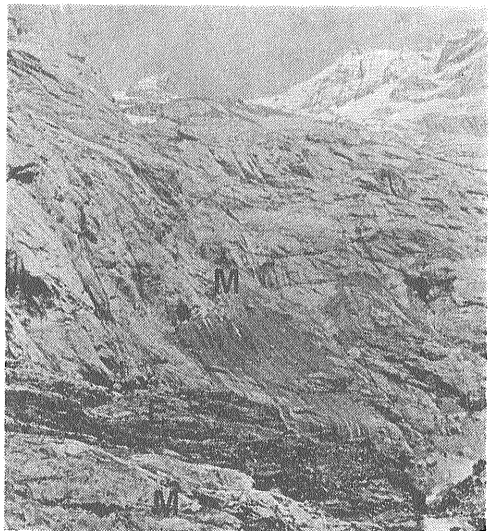
したがって アキセンやサンティス・ナッペの構造はグラルスよりやや複雑となる。その1例を第7図に示そう。下部ジュラ系が直立に近い背斜を形成している構造的位置は第4図Aの④に相当し サンティス・ナッペでも最も激しい構造のところである。

第8図はヘルベチア帯最北縁部である。これは第4図断面図と左右の向きが逆で右が北側になっている。北側の山がモラッセであり 南側の山がサンティス・ナッペの白亜系石灰岩である。これまで北傾斜であった断層面がここでは南傾斜になっている点に注意されたい。

ハウスシュトック (3156m) などの頂上付近から北側に流れ下るように滑ってきたナッペがここでモラッセに当たりせき止められたのである。断層面自体がモラッセ上に乗上げた形になり 見かけ上向斜構造を作っている。ハイムはこのヘルベチア帯最北縁の断層 (M) をグラルス断層の延長と考えていた。モラッセとサン

ティス ナッペの間はフリッシュェや中生層が複雑にからみ合っている構造帯である。

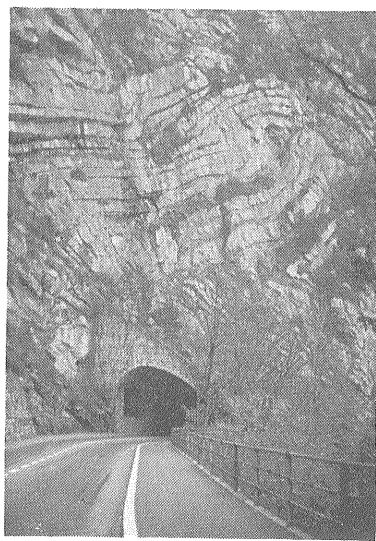
第7図に見るようにナッペの褶曲は一見激しいようであるが形態は非常に簡単でわかり易い。もう少し近づいて見てみよう。第12図はロイス川下流ウーリ湖東岸のサンティス・ナッペを見たものである。第4図Bの⑨に当るので断面図と比較すればわかる通り ここでもごとな横臥褶曲がみえる。Schratzen Kiesel 石灰岩層は湖水面近くで横臥脊斜をしている (S_1 K_1) が南方で湾曲し 山の中腹 (K_2 K_3) や山頂 (S_3) に出現する。写真は断面図とやや異なった方向から撮っているのでこの部分は直接分り難いが K_2 K_3 の間では脊斜軸がほぼ水平に通っている。すなわち K_2 は逆転しているのである。Schratzen や Kiesel のような石灰岩層は



第9図 ロイス流域 Maderanertal (第3図 第4図⑥) における始新統 Nummulite 石灰岩(E)と Malm 石灰岩(M)の横臥褶曲



第10図
ロイス流域
Alt Dorf 西南方
(第3 4図⑦)
におけるオートク
トナス フリッシ
エの褶曲 左下隅
に人家の屋根が見
える



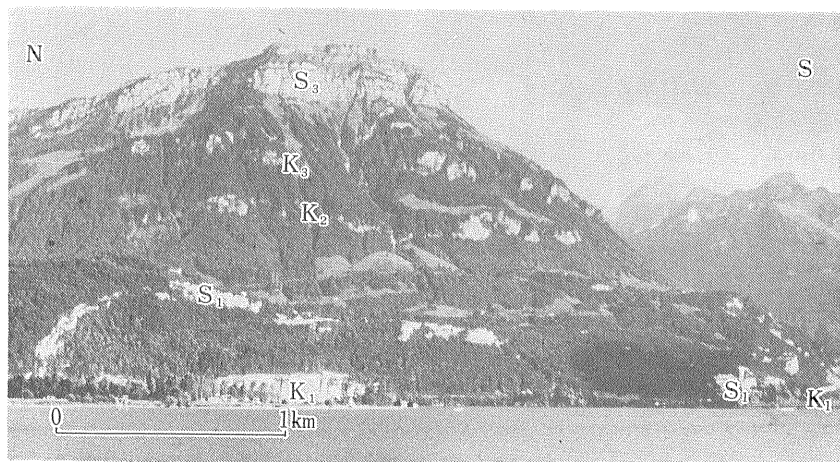
第11図
ロイス流域アキセ
ン街道沿い(第3
4図⑧)における
下部白亜系(おそ
らく Kiesel 石灰
岩)の褶曲 ここ
はアキセン・ナッ
ペの部分的騒乱部
にあたる

それぞれ非常に特徴があつて 1~2年見ていれば普通の人でも見誤ることはない。この写真で石灰岩層が湾曲している所へ行っても近づけばほぼ直線にみえるので(たとえば第13図のように) 褶曲の頂部だとは誰も気がつかない位である。

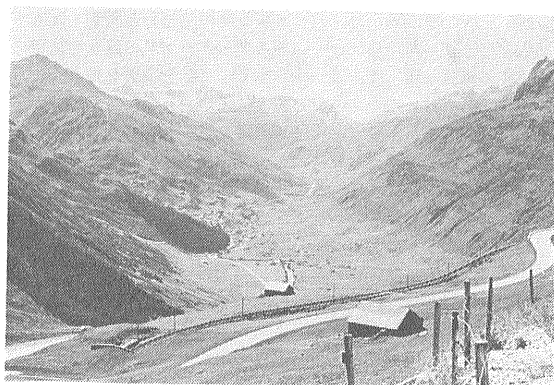
それではオートクトンの構造形態はどうであろうか。第9図は アール地塊直上で Malm 石灰岩がフリッシュと共に褶曲している例である。フリッシュは厚さほぼ30~40mの薄層であるが massive なジュラの石灰岩中に層理面も保存されたまま褶曲している。

しかし 局部的にはかなり 激しい変形を行なう。第10図は フリツシェの互層が作っている褶曲構造の例である。左下の民家の屋根により 大よそのスケール

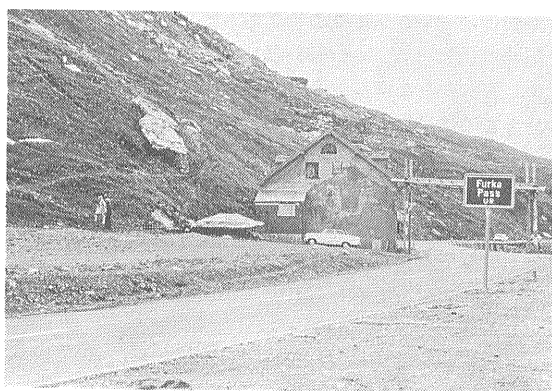
は見当がつけられるであろうが 単層の厚さは2~3m程度である。また第11図はユーリ湖畔のアキセン街道(地質ニュース 215号参照)に見える下部白亜系(おそらく Kiesel 石灰岩)の褶曲である。ここは第4図B断面の⑧に相当し アキセン ナッペ中の副次的複脊斜部であるためにナッペ岩層中では 例外的に複雑なところとなっている。しかし Holms の有名な教科書 Principles of Physical Geology にこの現場がスイス・アルプスの横臥褶曲の例として掲げられたために アルプス全域がこのようであるという誤った理解を広げることになってしまった。新版ではこの写真は削除されている。



第12図
アキセン街道ウリ湖畔(第3 4図⑨)におけるサンテイス・ナッペの遠望 S Schratzen 石灰岩:K Kiesel 石灰岩 第4図B断面図参照 S₁ K₁ は横臥脊斜の上翼 また K₂ K₃ 間に横臥脊斜軸が通る



第13図 ライン源流 Oberalp 峠(第3図⑩)より西南西を見る 凹地帯はゴタルド(左) アール(右)両地塊間の構造帯でベルカーノおよびジュラ系が帯状に狭在する第3図のUF)



第14図 フルカ峠(第3図⑪) ゴタルド アール地塊間構造帯(UF)中にあり ここに見える露岩は中部ジュラ系(Dogger)とされている片理の発達した黒色砂岩

5 アルプスのジェット・コースター

ヘルベチア帯の構造を概観した所で 再びフッパートのモデルに戻ってみよう。おそらく 読者は彼のあまりに幾何学的なモデルには何となくそぐわない点をいくつか感じられたに違いない。グラルス・ナッペの主体をなすベルカーノはわが国の中・古生層の輝緑凝灰岩や熔結凝灰岩のように堅硬な岩石である。断層直下のフリシッェもわが国の裏日本含油新第三系に比較してよく似ているばかりか より強固で更に圧密を受けている砂岩 泥岩である。この両岩体がたとえ地層水の異常高圧帯があったからと言って30kmや50kmの距離を2~3000mもの厚い岩体の荷重を担って滑動できるであろうか。

我々はもう少し実際の断層の形態や様子を考察する必要があるであろう。まず 第1はアール地塊を越えてからの傾斜角が意外に大きい事である。第4図で大まかに見積ってもグラルスやアキセン断層の傾斜角は10~20°に達している。このような角度で15~20km滑降して 4~5kmの高度を降下した岩体はモラッセに打当ててやっと滑走を止めるのである。読者諸兄は何度かはジェット・コースターを楽しまれた思い出をお持ちであろう。ジェット・コースターは始めかなりの高さまで持ち上げられるが 後は自らの重さだけで激しく降下した凹凸を乗り越えながら最初の高度のエネルギーを使い果たしたところで停車することになっている。

ヘルベチアのナッペ群—これは正にジェット・コースターそのものではないか。

ジェット・コースターが遠くまで滑走するためには車輪とレールの摩擦ができるだけ少ないこと 最初の高度ができるだけ高いことが必要だ。

ここで 私達は断層面の様子を思い出してみよう。このシリーズの最初にグラルス断層面には必ずと言ってよい程 Lochseiten 石灰岩という流理構造のある岩層が1~5m程度見出されることを書いた。本号の第6図の部分にも Lochseiten 石灰岩が断層の直下に分布しているのである。Lochseiten 石灰岩 ナッペの謎はここに潜んでいるのではないだろうか。

Lochseiten 石灰岩はグラルス断層に沿ってしか発見されないので正確な層序的地位は確認されていない。しかし外観と分布から上部ジュラ系 Malm あるいは中部ジュラ系 Dogger の石灰岩が混入したものであると考えられている。ヘルベチア帯ナッペのベルカーノはライン源流の渓谷から移動したと考えられていることはすでに述べたが アール地塊とゴタルド地塊にはさまれた幅僅か数kmの地帯に Malm や Dogger の石灰岩がベルカーノと共に見出されるのである(第13 14図)。ロイス川やスイスで最上のワインの産地であるロワーヌ川の上流であるこの渓谷は 現在ヘルベチアのナッペを構成している岩層がかつて“居住”していた故郷のようなものであろう。その頃アール ゴタルド地塊がどの位南方にまで離れていたかを見積ることは難かしいが 現在の渓谷に残っているこれらの石灰岩は 2枚の板で絞られて残った滓のように きびしく圧迫された形跡を示して板状の千枚岩状のものになってしまっている。いずれにしても ナッペ形成の初期に ゴタルド・アール両山塊から“搾り出され”ジェット・コースターのようにして その後オートクトンと呼ばれるようになった岩層上をベルカーノが滑り降るときに 何かのキッカケで上位にあったジュラ系石灰岩がベルカーノの下に潜り込み Lochseiten 石灰岩と呼ばれるものになった可能性

が強い。 ジュラ系のなかでも すでに述べたように Malm(統)はほとんどが石灰岩であり もっともLochseiten 石灰岩となり得る機会が多い。

ところで Malm (統) 石灰岩はスイスのみならず 中部ヨーロッパ全域に広く分布している。 フランスとの国境である ジュラ山地はジュラ系の標式地でもあり Malm 石灰岩はジュラ山地の主体となっている。 第15図はジュラ山地の Malm 石灰岩である。 極細粒で緻密 淡い灰紅色の美しい石灰岩である。

さらにスイス・オーストリアの北部には上部ジュラ系がほとんど水平に近い傾斜で広く分布しており ミュンヘンの北方ドナウ川を越えたフランク・ユラ丘陵でも約400mの厚さの Malm 石灰岩層が丘陵を構成している。

Solnhofen という一小邑周辺ではその中部の よく整層した石灰岩が建築材料として切り出されている(第16図)。 この石切場は Solnhofen という名前なのでこれは Solnhofen 石灰岩と呼ばれている。 Solnhofen 石灰岩は白色に近い淡紅色の緻密な細粒石灰岩で地元では Marmor (大理石) と言われる位微細均質なので 高圧実験では古くから一種の標準試料のように使われている有名な石灰岩である。

Solnhofen 石灰岩は上述のようにヨーロッパで広く用いられている用材である。 写真に見るように層状に割れ易いので 床 壁などに昔から使われている他 緻密な岩質 完全に近い平滑性を利用して石版印刷の原版として利用されている。 また この石灰岩からは多くの重要な化石 始祖鳥 昆虫 魚類などが発見されている事でも著名である。

ミュンヘンの南方 オーストリアとの国境付近には観光写真カレンダーで有名なノイシュバンシュタイン城がある(カット写真)。 約100年前 時のバイエルン王ルードウィッヒ二世によって築城されたこの城はワグナーを崇敬する王の趣好にした

がい Solnhofen などバイエルン産の美しい石灰岩・大理石を存分に使っていて オーストリア・アルプスの雄大な岩壁に映える華麗な離宮である。 しかし これを浪費と嫌う王国の人々に疎まれ 王を発狂者とする陰謀にまきこまれて退位を余儀なくされたばかりでなく 王はある日 王都ミュンヘン近傍のシュタンベルク湖で死体となって発見されるのである。

ノイシュバンシュタイン城とルードウィッヒ王の物語りは 王が最も好んだと言われるワグナーの名作ローエングリンのストーリーと奇妙な一致をしているのだが 私は数年前たまたまこの城を訪れたとき更に奇妙なことに気が付いて身震いしたのである。 シュバンシュタイン (schwanstein) の意味は“白鳥の石”である。 肌理細やかな人肌のような Solnhofen 石灰岩に王はすでに自分の悲運を予感し 白鳥の騎士たる祈りを込めてノイシュバンシュタインの名をえらんだのであろうか。 この石灰岩の色はそれ程に美麗である。

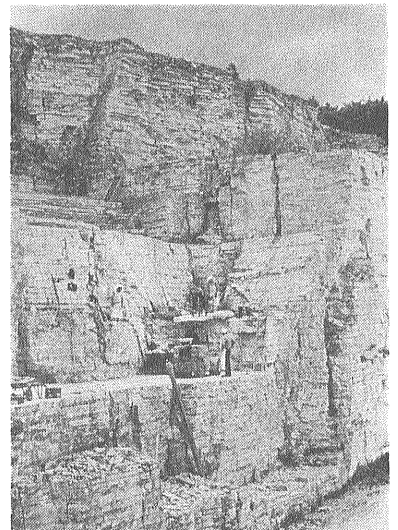
Solnhofen 石灰岩に代表されるようにアルプス以北の Malm 石灰岩は白色に近いが ヘルベチア帯の Malm 石灰岩は黒色である。 地理的にその中間に位置するジュラ山地の Malm 石灰岩の色調は灰色じみている。 これはヘルベチア帯に近づく程泥質成分が大きくなるためではないだろうか。 Malm 石灰岩の物性を研究するために筆者がチューリッヒ大学の高圧実験室で行なった実験の結果を ここに紹介させて頂こう。

第17図はヘルベチア帯のいろいろな岩石についての強度である。 横軸に封圧 たて軸に強度を示してある。

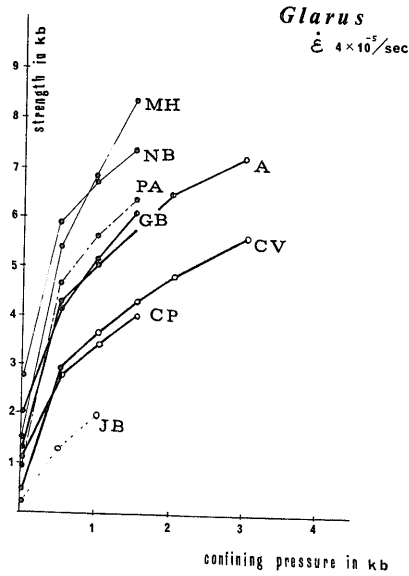
実験の結果求められた応力-歪曲線から 封圧 500 1000 1500 2000 3000 bars における強度を求め 封圧と強度の関係として図示した。 ここに挙げたのは Malm 石灰岩 (A CV CP) のほか 下部白亜系 Schratzen 石灰岩 (GB 第3図⑰) ベルカーノ (PA 第3図⑱) 古第三系フリッシュェの泥岩 (NB 第3図⑳) お



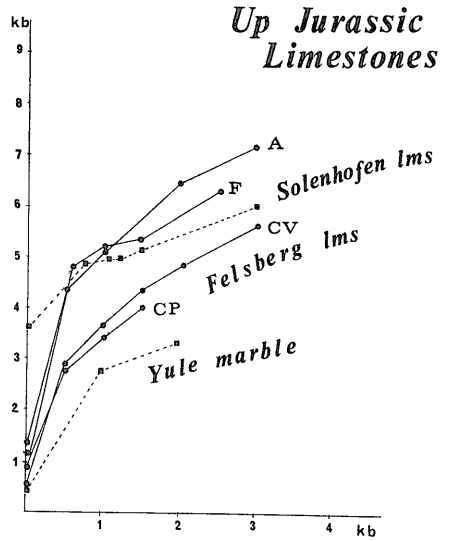
第15図 ジュラ山地における Malm 石灰岩



第16図 南独バイエルン Solnhofen における Malm 統 Solnhofen 石灰岩石切場



第17図
グラルス近傍の各種岩石の封圧
(confining pressure) 対強度
(strength) 関係



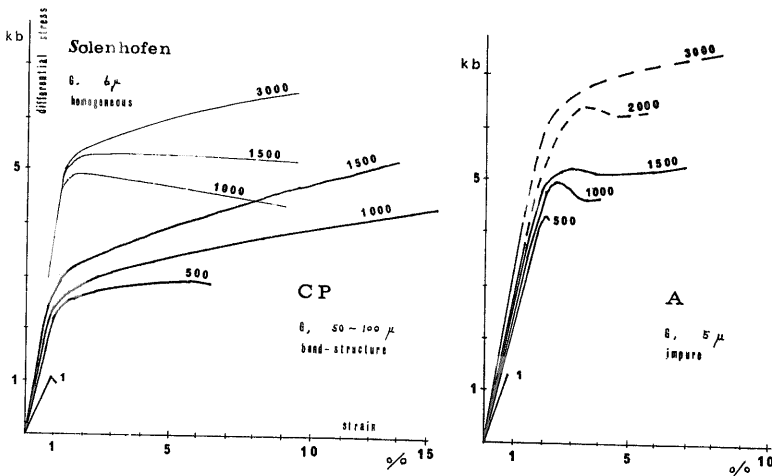
第18図
上部ジュラ系 Malm
石灰岩の封圧対強度

および砂岩 (MH) モラッセ砂岩 (JB 第3図⑩) である。フリッシュおよびベルカーノは予想通り最も強度が大きい。これに対してモラッセ砂岩は小さい強度である。NB および MH の強度は我が国の北九州西彼杵・杵島層群の砂岩 泥岩および女川 別所層など裏日本の硬質頁岩のそれにほぼ等しい。また JB は北九州佐世保層群上部あるいは新潟椎谷層の砂岩にほぼ等しい強度を持っている。以上の堆積岩の関係をみるとヘルベチア帯の第三系岩石は通常あるいは軽度の褶曲をなしている日本の同時代の岩石と ほぼ等しい強度 言い換えれば固結度しか持たないのであって スイス・アルプスのナッペ運動と言うものを地球上で我々が見聞し得る最も激しい地質構造であるという観念を抱いている方には意外かも知れないが 今までの説明をよく話んで下さった

方には これは当然の事と理解して頂けるであろう。

ところで同図によると石灰岩はフリッシュ ベルカーノグループとモラッセとの中間値を取っているが よく見ると同じ Malm グループでも A は Schratzen 石灰岩とほぼ同様の強度を持っている一方 CP CV はこれよりも約30%低い値を示していてかなり差があるようである。

この様子をはっきりさせるために Malm 石灰岩だけで比較してみた (第18図)。この図には A C のほかに F という Malm 石灰岩が入れている。A C F はともにヘルベチア帯の Malm 石灰岩であり A はオーストリア西部の Canisfluh C はスイス Chur 西方の Felsberg (第3図⑬) F はスイス Muotathal (第3図



第19図
Solenhofen Felsberg (CP)
および Canisfluh 石灰岩の応力-歪曲線

⑯より採取したものである。A Fは典型的なヘルベチア帯のMalm石灰岩で黒色であるがCは灰色の地の中に3~0.5mmの細かな黒色の縞模様が入っている特異なMalm石灰岩である。これはおそらく泥質物質がパッチになって入っているものである。縞模様は平行および直交して作成した実験試料がそれぞれCPおよびCVである。Yule marbleは北米アラバマ山地の試料で高圧実験によく使われるものであり比較のために掲げた。第18図を見るとCすなわちFelsberg石灰岩はやはりMalm石灰岩のうちで最も強度が小さいことがわかる。Felsberg石灰岩でもCPすなわち縞模様に平行な試料が強度的に弱い。

第19図見るとCPは単に強度が小さいだけでなく最も展延性(ductility)が大きいことすなわち流動的であることがわかる。この原因はFelsberg石灰岩がより粗粒であることとその縞状構造によるものであると考えられる。Solenhofen Canisfluh石灰岩は平均粒径が5 μ (0.005mm)なのにFelsberg石灰岩の粒径は50~100 μ であり10~20倍である。

これでMalm石灰岩がFelsberg石灰岩のように粗粒且縞状構造になると最も流動性が大きくなることが推定できる。Felsberg石灰岩の産地は第3図で示されるようにライン源流に近くゴタルド・アール両山塊の接触部に近い。またベルカーノの分布地域にも近い。ベルカーノの下部にうまい工合にFelsberg石灰岩が潜り込めた所ではFelsberg石灰岩の流動性に助けられて他に類を見ない長大な滑動が可能になったのではないかというのが筆者の得た解答である。

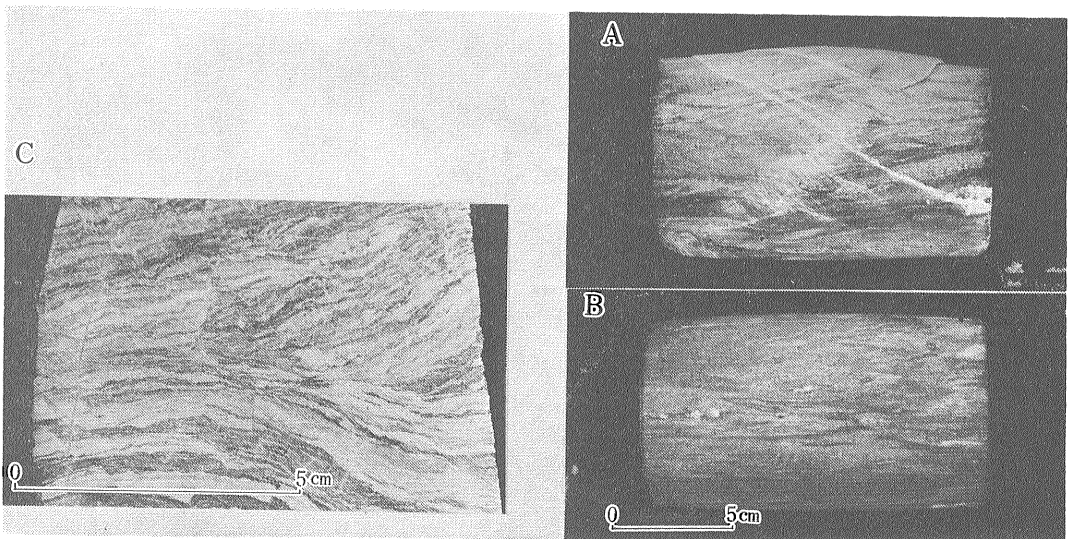
一般に石灰岩は温度が上がると容易に ductility が増大する。第20図AはFelsberg石灰岩を温度20℃封圧500barsで変形させたものであるが剪断割れ目によって破壊している。同条件で温度を100℃に上げると最早割れ目による破壊は起らず非常に ductile になる(同図B)。同図Cはグラルス断層から採取したLochseiten石灰岩である。ABのような変形が地質の時間のクリープ条件下で行なわれればCのような状態になるとは見られないだろうか。

6 押し被せ構造はどこにでもでき得るか

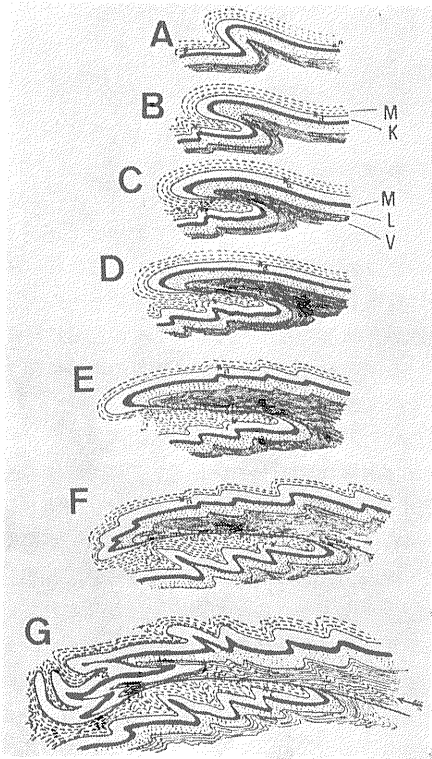
随分と駆け足であり時には廻り道もしたがこのノートがスイス・アルプスというもの押し被せ構造と言われているものについての勉強の材料になり得れば幸である。第21図はすでに1921年という昔にハイムのGeologie der Schweizに掲げられた押し被せ断層と横臥褶曲の発展についての説明図であるが本文を読まれた読者はこの図が存外リアリスティックであることを認識して下さるであろう。図の説明に付した符牒NKMLVをほぼそれぞれフリッシュェ白亜系ジュラ系三疊系(十下部ジュラ系)ベルカーノにあてはまる事によって第4図をはじめとしてその他の図および本文の説明などがかなり読み易くなる筈である。

最後に読者に一問を呈してノートの第2篇のむすびとしたい。スイス・アルプスで見たような長大な押し被せ断層は世界の他のどんな地域でも可能であったらうか。

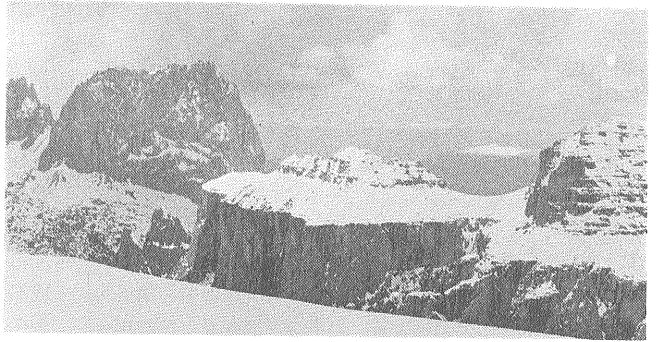
拙文を読み終へた方は良い答を出して下さるに違いないがヒントの一部として最後の付図の説明をしておく。これはオーストリア領チロルの南部にあり



第20図 A BはFelsberg石灰岩を500barsの封圧下で変形させたもの A 温度20℃ B 100℃ Cはリント流域 Schwanden で採取したLochseiten石灰岩



第21図
押し被せ断層と横臥褶曲の発展モデル
(HEIM 1921 による)



第22図 ドロミテ (南チロル) Piz Boe (3151m) より見たドロマイト層

高嶺を形成する。ここに見える山々は3000mクラスの高峰である。ドロミテ地方に普遍的に存在する Mg-rich のこれらの岩石がドロマイトという岩石名の起源になった訳であるが 面白い事にドロマイトは物性的に石灰岩と反対の性質を持っており 非常に脆質 (brittle) である。そしてドロミテの風景もスイスと対照的にむしろ北米内陸部のインディアン映画的で 雄大な水平岩層が 太古以来の侵蝕によってのみ削られて残っているのである。つまり ドロミテはアルプスの一部でありスイス国境から 50~70km 離れているだけなのに ここには押し被せ構造は存在しないのである。

現在はイタリア領で ドロミテ (Dolomiti) とも南チロルとも呼ばれている地域の一風景である。この地域では三疊系が非常に優勢で しかもその大部分はドロマイトである。ドロマイトは所によっては1000~1500mにも達する厚さを持っており これが図のように屹立して

あとがき

下記にすでに掲載した図・写真などは重複を避けるために割愛した。適宜御参照下さい。

星野一男 スイスの自然と人々 (1~3) : 地質ニュース 214 215 217号

星野一男 構造地質学ノート (1 2) : 地質ニュース 271 273号

新刊紹介

CHEMICAL PETROLOGY

(with application to the Terrestrial Planets and Meteorites)

著者は NASA のスタッフとニューヨーク市立大学地質学教室の教授として活躍している。内容の主体は岩石や関連する流体の物理化学であって その対象は鉱物学に及んでいる。鉱物の相平衡 岩石の分類 地球外物質としての隕石や惑星についても章を設けてある。特に印象的なことは 岩石変成論であって 最近の相平衡実験結果などを多くとりあげ 化学平衡論を展開して

いる。マグマ生成論についても マグマの物理化学成因 結晶分化作用などを 高温高压実験から論じている。地球外物質 とくに隕石では その分類 物理化学 鉱物学の立場からうまくまとめている したがってあらゆる岩石 隕石 火山現象および火山噴出物 あるいは惑星の物理化学に興味ある者にとっては 便利かつ有用な座右の書である。

書名 Chemical Petrology
(with Applications to the Terrestrial planets and Meteorites)
著者 R. F. MULLER & S. K. SAXENA
出版社 Springer-Verlag ; New York, Heidelberg, Berlin, 1977
サイズ等 270×195mm 394頁
定価 11,520円 全国洋書販売店