

スラスト・ナップ研究史の一断面： グラルス衝上断層をめぐって

Glarus overthrust; some episodes on rock mechanical studies

星野一男*
Kazuo Hoshino*

Abstract: The Glarus overthrust in eastern Switzerland is a monument for the studies of Alpine geology. Moreover, it was a good model of large sub-horizontal thrusting and nappe structure for the researchers such as King Hubbert and Ken Hsü during 1950s and 1960s, when 'rock mechanics' was introduced in structural geology for the first time. Hubbert and Rubey (1959) discovered the indispensable existence of the fluid pressure in the movement of the large overthrust faults. Hsü (1969) discussed the important role of cohesive strength. The author made the laboratory work on the rock-deformation at high pressure and temperature on 18 kinds of rocks collected from various places in Glarner Alps at ETH during 1970 to 72. He concluded that the ductile behavior of the Mesozoic limestones that was proved through the laboratory work is most essential for the thrusting of the Glarus overthrust, and Lochseitenkalk is possibly derived from the Felsbergkalk, banded limestone with stripe of black (muddy) and white (limy), collected from Felsberg near Chur, which is most ductile and weakest on the stress-strain curve among the Mesozoic limestones.

まえがき

昨1992年に京都で行われたIGCは始めてアジアで挙行された国際地質学会として多くの成果を残した。その中でも地質調査所によって作成刊行された百万分の一地質図(日本地質アトラス, 第2版)は長く我が国の構造地質学史に残る画期的な出版物ではなかったかと私は思っている。この地質図で始めて古期堆積岩は通常

の堆積層とテクトニックな岩体に分類されたのである。後者として、中・古生層の大部分は付加体堆積物と色づけされた。この解釈に基づく地質図は既に1990年に二百万分の一編集地質図として出版されていたが、IGCの機会に地質調査所による公式の日本地質図として世界に頒布された。

付加体堆積岩体は地殻の収束境界において作られ、その内部では異質岩石が混在し地層は複

1993年12月22日受付。1994年2月21日受理。

*清水建設(株) 東京都港区芝浦1-2-3

Shimizu Corporation, Shibaura 1-2-3, Minato, Tokyo 105-07

雑な逆転構造を呈することが特徴である。その逆転構造が大規模な場合にはヨーロッパやアメリカの山岳地帯におけるナップ構造と類似した形態となり大きな衝上断層が発達する様になる。

古い話であるが、1970年から72年にかけて、私は北米のフランシスカン・メランジェの研究者として著名な Hsu 教授から誘われてスイス、チューリッヒの ETH (連邦工科大学、後章参照) でアルプスの水平衝上断層の実験的研究を行った。その頃の日本の構造地質学界はスラストとかナップとかは何処の国の言葉か知らないが日本には無縁のものときめつけている人が多数であった。

その後かなりの年月が移って、とりわけこの様な傾向の著しかった地質調査所から最近になって突然の様に発行された新しい地質図を見た時には、ベルリンの壁の崩壊、ソ連邦の消滅を耳にした時と同じ様な驚きを禁じ得なかった。

最近、再びスイスの衝上断層に関しての照会をしばしば受ける様になり、1992年12月に出席した構造地質研究会ではシンポジウム・テーマとしてスラスト・ナップのテクトニクスが採用され、会場では日本各地の付加体のスラスト・ナップ構造の研究報告が行われた。私もこの機会に長い間冬眠していた古い記録・資料を再び取り出してスイス・アルプスのナップ構造の研究史について話したが、本編ではチューリッヒ滞在及びその前後に体験したことを中心にしてその頃の裏面史の様なものを書いてみたいと思う。

グラルス衝上断層の発見

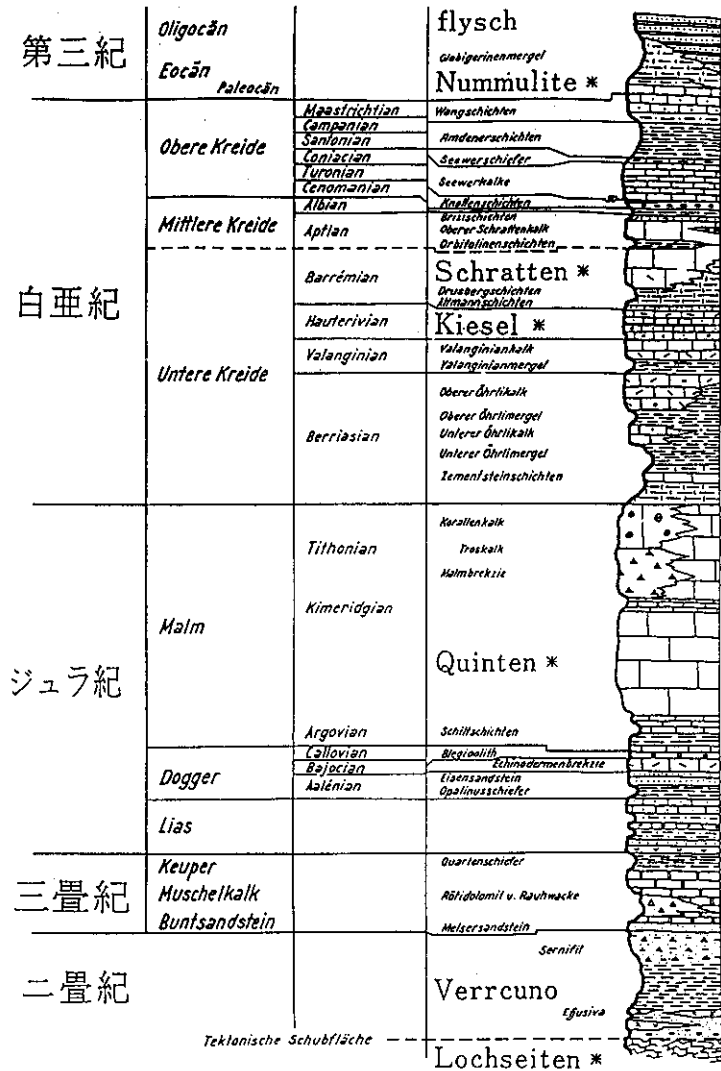
アルプス、ヒマラヤ、ロッキー、アンデス等世界の名だたる高い山岳・山脈は地向斜から褶曲・隆起作用による造山運動によって形成されたというのが第2次大戦当時迄の考え方であった。このような褶曲山脈の構造形態はその頃までにはこれ等有名な諸造山帯については殆ど明らかにされていた。

そのプロトタイプとなったのはスイス・アルプスである。高峻なスイスの山岳には活発な第四紀氷河運動によって深く削られたU字谷が発達しており、そこでは中生代の厚い石灰岩層の連続露頭が広い範囲で見ることが出来る。19世紀に入って聳え立つアルプスの高峰に登山家が挑戦する様になると当時の地質学ではどうしても理解の出来ない不思議な現象が山腹の至る所で観察される事が判ってきた。低い所から高い所へ登って行くと同じ地層が繰り返して現れるし、ある場所では新旧の地層が逆転しているのである。

その現象が最もわかりやすく観察されるのはチューリッヒの南東に約50キロ離れたリント渓谷の州都グラルス(Glarus)付近である。Arnold Escher (1807-72)はこの壮大なU字谷に沿って含 Nummulite 石灰岩(始新世)の上に赤色(或いは灰緑色)の Verrucano 火山質礫岩層が衝上している事を発見した。Verrucano はヨーロッパの平原部では三畳系の下部に見いだされ二疊紀に属することが確認されていた(第1表層序表参照)。確認されている限りでも20-30キロの長さで発達するこの大衝上断層はその地名をとってグラルス衝上断層と呼ばれる様になる(第1, 2図)。この様な長大な水平衝上断層(或いは、押し被せ断層, overthrust faults)による逆転構造はスイス・アルプス全体で普遍的な地質構造であることが確かめられ、グラルス衝上断層を含むヘルベチア帯は世界のスラスト・ナップ構造のモデルと見做される様になった。

ある意味では構造地質学という学問体系を生むキッカケともなったこの偉大な発見を記念して、断層が道路際で最も良く観察される Schwanden の露頭の場所に記念の銅板が植え込まれている。グラルス衝上断層の発見をめぐっては面白いエピソードが多々あるが詳細は既にかいたので省略する(星野, 1972a, 1973a, 1977a, b)。最近ではスイスを訪れるれる日本の地質専門家でこの僻地まで足を延ばす人が多いそうである。グラルス衝上断層はリント渓谷を遡るとあらゆる場所で見られるがかなり高い所にまで登らなくてはならない。最近の地質学雑誌には

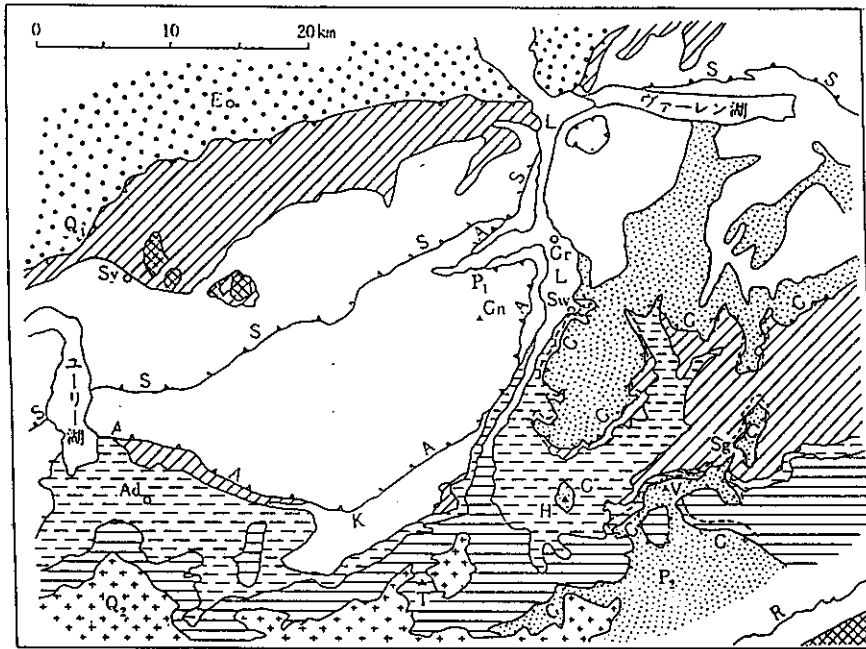
第1表 ヘルベチア帯層序表



高木氏による記念銅板とグラルス衝上断層の非常に美しい写真が掲載されている(高木, 1992)。

Heim (1921)は増大する横圧力によって地層が褶曲し、その地層が挽き千切られ若い岩体の上に押し被さって衝上する横臥褶曲の発展過程を第3図の様に描いた。スイス・アルプスの高峻な地形、ヨーロッパの屋根と言われ、現在も氷河に覆われている3000-4000米クラスの山脈は基本的には横臥褶曲運動による地層の積み重

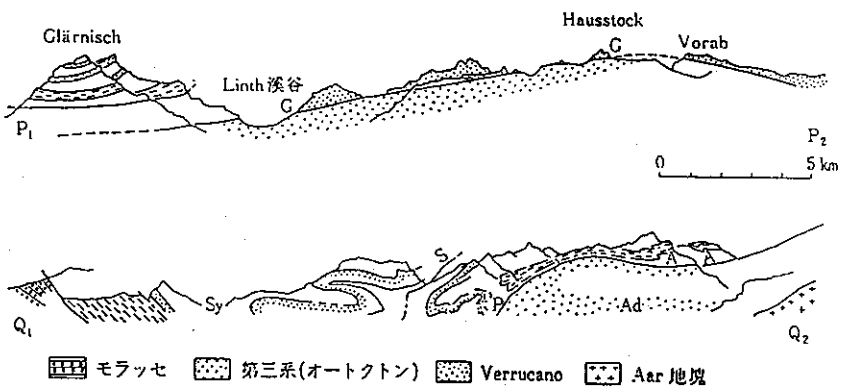
ねによって高められた事がEscher, Heim等のスイスの地質学者の登山調査と研究によってはっきりしてきたのである。Escherは1955年にチューリッヒに創立された連邦工科大学(Eidgenössische Technische Hochschule Zurich: ETH)の地質学教室の初代教授となり、その名誉あるポストはHeimによって引き継がれた。以来、ETHはアルプス地質学の中心となっている。



●●● モラッセ ▨ 第三系(オートクトン) ▩ 中生界(オートクトン) ●●● 基盤地塊
 ▨ 南(およびワルトラ)ヘルヴェチア第三系 ▨ Verrucano ▨ ペニン岩体
 衝上断層: — ヘルヴェチア S Sántis-Drusberg A Axen C Glarus(破線は Lochseiten 石灰岩)

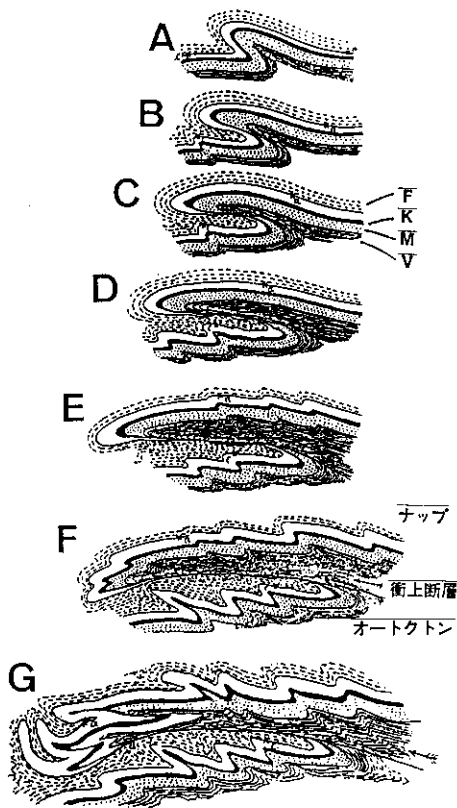
Ad: Altdorf, E: Einsiedeln, Gn: Glärnisch(2914 m), Gr: Glarus, H: Hausstock (3158 m), K: Klausen 峠, L: Linth 溪谷, Sg: Segnes 峠, Sw: Schwanden, Sy: Schwyz, T: Tödi(3620 m), V: Vorab(3028 m), P₁P₂, Q₁Q₂ は第 2 図に対応。

第 1 図 ヘルベチア帯東部構造図



▨ モラッセ ●●● 第三系(オートクトン) ▨ Verrucano ●●● Aar 地塊
 ▨ 南ヘルヴェチア第三系 ▨ Kiesel 石灰岩(下部白亜系) ▨ Quintner 石灰岩(上部ジュラ系)
 A: Axen 衝上断層, G: Glarus 衝上断層, S: Sántis-Drusberg 衝上断層

第 2 図 ヘルベチア帯構造断面図



第3図 横臥褶曲の発展過程(Heim, 1921原図)

造山帯の古典的構造像は地向斜から反転した地層がスラスト・ナップ運動を基本として更に隆起して山脈を形成するというものであった。Escher, Heim等によって確立されたアルプス構造地質学(*Alpine Geology*)は正にそのモデルであった。この様な造山帯の基本的な構造形態についての考え方はそのまま世界各地に適用され今世紀に入っても第2次世界大戦が終了する迄は殆ど変わらなかった。

一方、この様な大規模なナップ構造を造った原因、力学的過程に関する研究は非常に僅かであった。20世紀初頭、平板が摩擦に抵抗して水平に移動するという簡単なモデルについて研究されたが、岩石物性についての実際の知識が不十分な当時は充分説得力のある結果を導く事は出来なかった。単純なモデルについての試算では強固で重量のある岩層から構成されている

長大なナップ岩盤の衝上断層運動は通常の摩擦モデルでは説明が難しいというのが当時の考えであった。

1950年代の解析的アプローチ

1945年にはほぼ三分の一世紀にわたった世界大戦時代が終了した後、地質学の分野では多くの新しい潮流がおこったが、構造地質学の領域で顕著であったのは石油産業・高圧産業の発達に伴う岩石力学(*rock mechanics*)の新しい成果を取り入れた岩石変形学の発展であった。

King Hubbertはその先駆者であり、グラルス衝上断層に一目惚れした一人である。1959年に発表された“衝上断層の生成機構に於ける地層水圧の役割(Hubbert and Rubey, 1959)”は戦後に於けるナップ研究の出発点となった。彼が地層変形を終生のテーマと考える様になったのは大学時代、1920年代であったらしい。その後、ドイツからアメリカに移住したNadaiと相識る機会を得たことから*rock mechanics*に興味をもつようになった。戦後ニューヨークのコロンビア大学から西部のシェル石油会社の研究所に移り、そこで油田地帯の地層圧密と地層水について多くの貴重な経験を体得する。かくして*rock mechanist*となったHubbertがヨーロッパに旅行してアルプスを見る機会を得た事はそれまでの地質構造の記載を主とした構造地質学に岩石力学の新しい血が導入されるきっかけとなった。

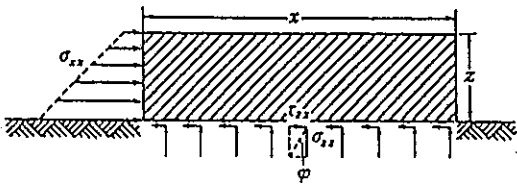
Hubbertとグラルス衝上断層との出会いは非常に啓示的でドラマチックなものであったらしい。1959年の論文の中で、彼はその一瞬を実に生々しい言葉で語っている。

“1955年の夏にスイスの雄大なグラルス断層を始めて現地で見ただけの頭に異常高圧の事が浮かんだ。厚さ数キロの岩層といえども地下では地層水に満た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、ナップの不可思議に答えを出すことが出来るのではないだろうかと思えた。”

Hubbertの解析結果は拙著(星野, 1977b)に

詳しく紹介したが簡単にさらしをしておこう。

彼はナップ構造に於いて衝上断層が動き得る力学・物性条件を岩石変形と地層水圧の理論を応用して解析した。第4図の様に厚さ z 、長さ x のナップが横圧力を受けたとする。この時、ナップの長さや厚さが大きく、重量が大きいと摩擦の為にナップは滑ることが出来ない。ある条件の下にナップが滑動を始める長さや厚さを計算した結果が第2、3表である。第2表の縦軸はナップの厚さ(z)を、横軸(λ)は岩層にかかる全圧力と間隙水圧の比を示している。表の中の数字はそれぞれの厚さ、比率、条件の下に可能なナップの滑動距離(長さ)をkmで示している。この数字を出した計算の考え方はナップの滑動はCoulomb-Navierの破壊条件が満足された時に始動する事を基本条件にしている。計算に使用した物性は粘着力(剪断応力) $\tau_0=200\text{kg/cm}^2$ 、ナップ内部及び断層面の摩擦係数 $\mu_1=\mu_2=0.577$ である。



第4図 衝上断層の計算モデル(Hubbert and Rubey, 1959)

今、岩層の平均密度を2.15とするとその全圧力は岩層の重さに等しい。ここで、間隙が全て水で満たされ間隙水圧が静水圧に等しいとすると、この時の λ は $1.0/2.15=0.465$ である。又、間隙水が全く失われ岩層が乾燥している時には間隙水圧は零なので λ も0である。この2つのケースに於いて第2表を見てみると静水圧状態でのナップの滑動可能距離は厚さが3キロの時に約20キロ、6キロの時に約30キロに過ぎない。岩層が乾燥している時の滑動可能距離は更に少なく、厚さが3キロ、6キロでそれぞれ約13、21キロである。いずれにしてもグラルス断層の様に厚さ数キロの重い岩層が数十キロの長さにならなくて水平に移動している衝上運動を説明する事は難しい。この様に2次元的な力学解析によっても通常の摩擦モデルではナップの機構を物理的に説明するのが難しい事ははっきりしてきた。何とか摩擦係数が低くなる機構を考え出さなければならない。ここでHubbertが切り札として持ち出したのが異常高圧である。

異常高圧は油田地帯の深部の堆積層中にしばしば観察される現象である。その原因は色々あるが、上部にタイトな貞岩等があって圧密水流が阻害されたり、異常堆積の場で周辺の浸透性の小さな岩層に囲まれたりして静水圧を上回る異常に高圧な間隙水圧が発生する時等に見られる。第2表で λ の値が0.5以上が異常高圧のケースである。異常高圧モデルの計算の考え方は直接文献に譲ることとしてその結果だけを見てみ

第2表 モデル計算結果(1)(Hubbert and Rubey, 1959)

z (km)	λ						
	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

第3表 モデル計算結果(2)(Hubbert and Rubey, 1959)

θ (degrees)	λ								
	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								

厚さ 6km の場合

ると、間隙水圧比が0.7(静水圧のほぼ1.5倍)から0.8程度に高まると厚さが2ないし5キロで長さ40から50キロのナップが滑動可能となる。

この様に長大なナップの形成に於いては間隙水圧の上昇が非常に重要な要素となる事が予想される。ナップが水平ではなく傾いている時には第3表の様に更に滑動し易くなる。同表はナップの厚さが6キロの場合の計算結果であるが、僅か2, 3度の傾斜で40ないし50キロのナップの滑動を可能とする λ 値は0.6から0.5(静水圧のほぼ1.1倍)に迄減少する。

Hubbertの研究によってグラルスの様な大規模な水平衝上断層運動といえども理論的には可能であることが示された。間隙水圧の増加による摩擦係数の減少が解答の鍵であったが、他の要素でも摩擦係数の減少を齎らすものであれば同じ効果を期待できる訳である。次の課題は何が断層帯の内部で摩擦係数を減少させかということである。

1960年代：実験構造地質学の始まり

1950年代から60年代に入ると新しい潮流はさらに広く世界に広がっていった。幸運にも私はその頃のある時期をニューヨークのコロンビア大学やチューリッヒのETHで過ごして、当時の先端を行く研究者が新しい話題に興奮する雰

囲気を直接に体験することが出来た。Hubbert等がスイスやアメリカで造山帯におけるナップ構造の力学解析を行っていた頃、一方では、シェル石油会社研究所のHandinやカリホルニア大学のHeard等を中心に高温高压下の岩石変形実験が行われる迄になってきていた。それまでの高温高压実験では静水圧的高圧環境下で鉱物の相変化を測定するための小容器しか無かったが、大戦中にアメリカで発展した高圧機器産業は内径の大きな円筒形耐圧容器を実現させ、非静水圧的な所謂三軸変形実験を可能にしたのである。

私がコロンビア大学地質学部のRock Deformation LaboratoryでHandin, Donath等にその実験技術を学んだのは1963年末から64年末である。この頃アメリカではRock Mechanicsの国際的なシンポジウムが毎年の様に開かれ、地質だけでなく地球物理、鉱山、土木、等の広い分野の研究者を集めていた。この頃の雑報を地質ニュースに書いたことがある(星野, 1966a)。1960年にはGriggsとHandinが編集した“Rock Deformation”がアメリカ地質学会メモワールの79号として発行されている。この論文集の序言をKing Hubbertが書いている。Hubbertが衝上断層モデルの計算に使用した粘着力(剪断応力)と摩擦係数の物性値(前出)はHandin等が行った高压下の三軸岩石変形実験値を採用して

いる。

コロンビア大学での私の1年は岩石変形実験技術の習得で手一杯で“研究”の暇は全く無かったが、自国にその技術を根付かせたい一心で技術の習得に全力を傾けた結果はこの分野で外国に多くの友人・知己を得ることとなりそれからの私の研究コースを半ば決定づけることになった。帰国して間もなく私は当時の地質調査所としては破格の多額の予算を頂いて念願の三軸変形実験機の国産第1号を作る事が出来た(星野, 1966b)。この新しい実験室は地下のトイレを改造した地下室であったので、Hoshinoはlaboratoryで実験をしているのではなくlavatoryで石を壊しているという噂が早速アメリカに広まったそうである。

ETH地質教室の新企画

ともあれ、地質調査所(河田町)のrock deformation lavatoryで日本のサンプルの実験を続けている頃に、私はコロンビア大学時代のアメリカの友人から手紙を貰った。ETHにいるKen Hsüという中国生まれのアメリカ人教授が岩石変形実験の為のパートナーを求めている。君に興味があるかという内容であった。間もなくHsü教授自身からの手紙を受け取った。彼の話は私には非常にタイムリーで多分に魅力的であった。迂闊な事に私はそれまで、Hsü教授についてほとんど無知であったがsedimentary tectonicsの研究を通じてアメリカでもヨーロッパでも著名な教授であった。

Ken Jingsha Hsüは中国の南京大学で学んだ後1940年代の後半にアメリカに渡り、オハイオ大学とUCLAで大学院生活を送った。そこでスイスのultra-helvetic flysch等についての研究で目ざましい成果を挙げて注目され、1967年にチューリッヒのETHに移った。その前後に、カリフォルニアのFranciscan層の研究を行い、それがメランジェであることを始めて明らかにしている。

ETHに落ち着いてからgravity tectonicsの観点からHubbertの研究に興味を抱き、同様にグ

ラルス衝上断層に引きつけられたらしい。HsüはHubbertの論文の中でHubbertが述べている間隙水圧効果や滑動中の衝上断層面での粘着力(剪断応力)の減少に疑問を持った。彼は断層帯の流動的物性にもっと注目すべきではないかと考えた(Hsü, 1969)。この年のアメリカ地質学会誌上では、この論文の後に、Hsü論文に対するHubbertの批評とHsüの反論が引き続き掲載されていて大変面白い。戦後の構造地質学の歩みが1950年代から60年代に進むにつれてその奥行きを深めていった経過が良く判るのである。アメリカで長い研究生活を送ったHsüが、この時に、衝上断層の力学的課題を解決する為に当時の新しい部門、岩石変形の実験手法をスイスに輸入してみたいと考えた事は至って自然の成り行きであったと言える。

時あたかもスイスではETHの地質学教室の建物内部を改築する一方旧態勢の大学を新しく組織換えして新しい機構で出発しようとしていた。

Hsüの招聘もその一環であったという話を私は後で聞いた。Hsüはこの際ETHにアメリカの大学に有る様なrock mechanics laboratoryを作る事、そして必要なrock deformation実験設備を備える事を考えた。彼は早速アメリカの友人にその企画を相談し、その人選を依頼し、その網に私が引掛掛かったということらしい。

Hsü教授から最初の手紙を受け取ってから実際にETHに赴任するまで一年余りの期間があった。私には構造地質学者としてスイスに滞在しアルプスを直接見聞できるチャンスは非常に魅力であった。文通を重ねた後に、私が妻と未だ学齢前の子供二人と共にチューリッヒ空港で初対面のHsü教授に迎えられたのは1970年6月であった。

この頃のETHの地質教室の主なスタッフはHsü教授の他に、

Prof. Augusto Gansser; 教室主任、ヒマラヤ研究で名高い。京都IGCに来日した。

Prof. Rudolf Trümpy; Gansserの後を追って教室主任となった。アルプスの第一人者。

Prof. Hans Bolli; 著名な有孔虫学者。

等であった。Gansserを始めとして、いずれも Escher, Heim 以来のアルプス地質学の伝統に相応しい風格を持った Alpine geologists であった。

始めて、ETHに出勤した日、Hsu教授は最初に実験室(と予定されていた)を見せた。部屋はまだ造り付けの最中でがらみだの室内には何もない。つぎに機械職人を紹介された。Ghilardiはヨーロッパの力学実験機器メーカーとして有名なアムスラーに居たことのある機械工ではあったが、器用な何でもこなす割には高压容器の経験は殆ど無いらしかった。

事前の往復書簡である程度は予想はしていたが初日の実情は衝撃的であった。これは大変なことになるようだ。何もない。誰も知らない。文字どおり零からの出発である。最初の半年はまったくの手探り状態であった。幸いなことに教室の先生方も学生もフレンドリーで協力的であり、陽気で努力家の Ghilardi の頑張りや Hsu 教授の手配りのお蔭で徐々に体裁が出来上がって来た。最初のうちは、Hsu 教授と一緒にグラルスの研究をした Siegenthaler が Ghilardi と一緒に私を手伝ってくれたが、彼は計算屋で間もなくアメリカに行ってしまう、やがて大学院生の Briegel と Schmid の二人が助手として私のチームに入るようになった。Briegel は地質家にしては珍しく諸事器用な人で、機械にも強く laboratory work に向いていた。Ghilardi と Briegel が熱心に走り回って色々のニュースを集めてくれたり、メーカーとの通訳をしてくれた。しかし、ヨーロッパはヨーロッパであって、日本でもアメリカでもない。日本では予想も出来なかった様々なエピソード、事件があったが、私には力強い応援団がいた。ドイツのアーヘンにはコロンビア時代の留学仲間が教授となっていてヨーロッパの高压メーカーの様子を色々教えてくれた。アメリカからは Handin が秘蔵の青写真を送って助けてくれた。若し古い友人の応援が無かったらとてもこのような孤立した環境では動き様がなかったであろう。

それでも滞在2年目に近づいた頃には部屋の扉に rock mechanics laboratory の看板を掲げ、

どうにかプレス50トン、側圧5000キロ、容器内径30ミリの一台の高压試験機を組立の事が出来た。

実験的アプローチ

結局私はこの教室に1972年8月末までたっぷり2年と2ヶ月滞在したことになる。アルプスやヒマラヤを知り尽くした造山帯の権威の身近で過ごしたETH時代は予想以上に私にとって実りある時期であった。何よりも身近かに溢れる様な自然があった。山も露頭も1、2日で行ける距離にあった。実験室整備の傍ら、私は殆ど毎週末毎にチューリッヒ近傍のアルプスに出掛けた。私の家はチューリッヒ湖北岸のモレーンの丘の上に建っていて三階の窓からはグラルス等ヘルベチア帯のナップを構成する氷雪の山波が手の届く距離に見えた。車で小一時間も走ればチューリッヒ湖を回ってグラルスなりアルトドルフなりにでて雄大なナップ構造を堪能することが出来る。春、夏、クリスマスの長期休暇には一週間から10日単位でスイス周辺の国々を廻った。その上、著名な研究者がアメリカからも日本からも絶えず教室に来訪した。チューリッヒで私は再び Handin 教授に会うことが出来た。

アルプスを廻りながら私は、まづ、自分自身の目で納得出来るものだけを心に止めた。段々とヘルベチア帯のイメージが私の中に固まってきた。山壁を登り、露頭を調べる程 Heim 以来の文献記載に対する信頼感は強固になっていった。

ナップ構造に関してそれまで私が漠然と理解していたことは横臥褶曲運動を受けた地域ではあらゆる地層が全般的に全ての場所で激しい断層・褶曲運動をしているということであった。だが、これは完全な誤りである事がすぐ判った。断層運動による騒乱は近傍の狭い範囲のみである。長大な衝上断層といえども断層の上盤(ナップ)の岩層も下盤(オートクトン)の岩層も殆ど変形をしていない。厚いマッシブな岩体は元の層理面の儘にただ滑っているのみである。断

層・褶曲帯というところが国では無数の中規模・小規模な断層・褶曲が発達する光景を連想するがナップ山脈の外観・横顔は単純な傾動山脈と見間違える程むしろ非常に穏やかである。日本的な褶曲が発達するのは横臥褶曲の複背斜先端部とか、ナップ群の境界部分とかの一部分であるのである。日本で唯文献だけを読んでいると此処が一番騙される所なので地質ニュースでは図と写真でしつこく説明したところである(星野, 1977b)。

その様な褶曲部分にあっても背斜部, 向斜部の地層には流動現象は殆ど見られず brittle 変形である。その代わり, グラルス衝上断層に見られる様に, 岩体の大移動の滑り面である衝上断層断層面には必ず流動の軌跡の残る粘性岩石, Lochseiten Kalk が挟まれているのである。

これらのことはヘルベチア帯の構造形成に明らかに物性の要素が強い事を暗示している。

Hsü 教授もこの事に気がついていて、ヘルベチア帯フリッシュェを詳しく調べた彼は褶曲の構造・形態が堆積機構と堆積岩の物性に密接に関係していることに興味を持った(例えば, Hsü, 1969)。Hubbert が数学的幾何学的モデルを描き解析的計算を行ったのに対して, Hsü の受け取り方はフィールド観察から直観的に取り上げる問題を実験で確かめる物性を基に解釈する手法である。

グラルスはスイス・アルプスのテクトニクスに挑戦する研究者を引きつける大きな魅力があるらしい。グラルス衝上断層は正にアルプス構造地質学が抱える問題のすべてを持っており, しかも, 100km にもわたって3000-4000m クラスの高山が連なるグラルス・アルプスの頂部をナイフで切り取ったかの様にシンプルでスラリと長く延びた形態は如何にも取っつき易そうな外観をしているからである。私たちもグラルス衝上断層を含むアルプス東部のヘルベチア・ナップ群の中の岩石を主体に変形実験を行う事を決めた。

サンプリングを始めたのは実験室と機器の目鼻が漸く立ってきた1971年のあたりからであった。チューリッヒ, ルツエンからオーストリア

のオールベルク峠迄, 北はチューリッヒ湖北岸のモラッセから南のライン河上流とフルカ・グリムゼル峠迄, 休日の都度隈なく巡回した。この地域から採集した岩石から実験用に選んだのは第4表に掲げた18種の代表的岩石である。その内訳はモラッセ4, 第三紀層8, 中生代石灰岩5, 二疊紀(ベルカーノ)1となる。第5図がその分布図である。これ等各試料の層序的位置は第1表をご覧頂きたい。

実験が出来る様になったのは1972年になってからであった。直径12mm, 高さ24mm に試料サイズを定めて, 高压容器セットするための試料整形や基本物性の測定等の準備を進めていた。

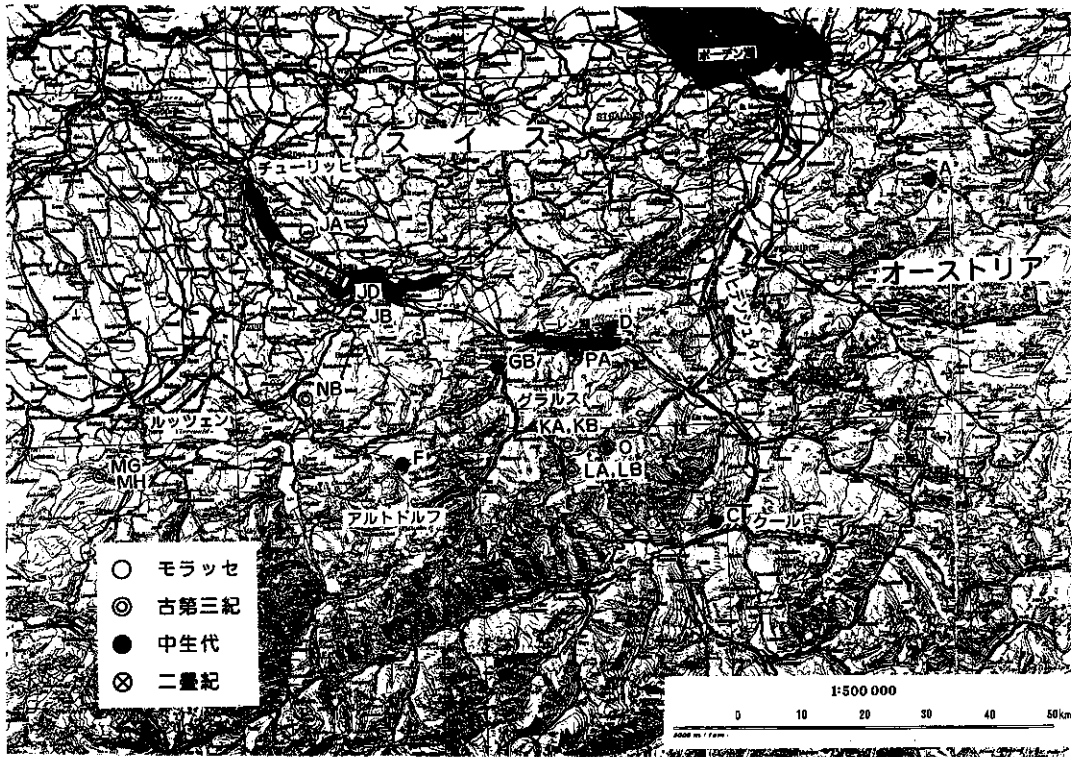
しかし, この頃欧米の地質学界は革命の前夜ともいべき状態であった。

押し寄せるプレート

今にして振り返ると私が日本を離れスイスに移った正にその頃が学界の転換期であった。グラルス衝上断層をめぐる Hubbert の解析的研究も Hsü の実験的アプローチも, 当時, 構造地質学の根幹的課題の一つと考えられていた造山運動のメカニズムを解明することを目的に行われたものである。ところが, 私達が高压実験室を肅々と作っている足元では地球科学界を揺るがす新しい潮流が流れ始めていた。その前兆は日本を出発する前からあったが, ご存知の様に日本ではその匂いは, まだ, 非常に微かであった。しかし, なんとと言ってもスイスは震源地に非常に近かった。

私がスイスに着いた1970年にはプレートという言葉が既に当たり前の言葉の様に教室で話されていた。アメリカやイギリスから人が来る度にその新しいニュースが齎らされた。

1968年からご承知の JOIDES 計画が始まったのだが, Hsü は早速巻き込まれてその年の暮れの南大西洋調査に参加している。1970年にも私の到着直後の8月からグローマー・チャレンジャーに乗船して地中海の調査に出掛けてしまい10月迄帰らなかった。横道にそれるがこの時



第5図 高圧変形実験用サンプル採取地図

の調査紀行が後の“The Mediterranean Was A Desert : A Voyage Of The Glomer Challenger, 1987”となった。Princeton 大学出版社による200頁のこの本は科学紀行文としても名著の評判が高い。その上、Franciscan melangeの権威である彼には頻繁に外国(アメリカ等)から誘いがかかった(例えば, Hsü, 1971参照)。それやこれやで彼とゆっくり話す時間は殆ど無かった程に絶えず外国に出ていた。1972年夏, 地質調査所の最終的な滞在期限が切れて, 私が帰国せざるを得なくなった時にも Hsü は長期の外国旅行中で会う事は出来なかった程であった。

周辺の推移は非常に気になる事であったが, 私はとにかく実験室の完成と実験の終了に全精力を注いだ。一応, 帰国前に第4表の試料18種の3軸試験を何とか恰好のつく形にこぎ着けた。それでも予定リストを完了することは出来ず, 残った実験は Briegel に頼み, 本当に後ろ

髪を引かれる思いで思い出の多い ETH とスイスを後にして, 1972年8月末に2年2カ月振りに地質調査所に帰ったわけであった。私の帰国後は Briegel が実験室担当の助手として laboratory を維持する事になっていた。Briegel は pore-pressure test を含む残りの実験を Ghilardi とこなし, データをその年の内に日本に送ってくれた。

しかし, 最初から目論んでいた設備である高温装置はとうとう滞在中にデザインすら間に合わせる事は出来なかった。

実験済データの整理, 計算は日本で行った。予想していた通り, 石灰岩もベルカーノもフリッシュもはるかに強度が大きく, brittle (脆性)であった。この中で最も流動性の高い即ち ductile (延性)な地層はどれなのか。中生代石灰岩の中では Malm 石灰岩(ジュラ紀)が比較的 ductile である。

第4表 高压変形実験用サンプル一覧表

分類	記号	岩 質	孔隙率(%)	備 考	
モ ラ ツ セ	JA	細粒砂岩	7.8	上部淡水層 上部海成層	
	JD		6.2		
	JB	中粒砂岩 粗粒砂岩	13.7	下部淡水層	
	JE		6.8		
古 第 三 紀	KA	黒色細粒砂岩 黒色泥岩	1.3	North Helvetic Flysch	
	KB		0.8		
	LA	粗粒砂岩 細粒砂岩	0.6		
	LB		0.7		
	MH	粗粒砂岩 細粒砂岩	1.6	Ultrahelvetic Flysch	
	MG		0.6		
NB	石灰質頁岩	0.7			
O	石 灰 岩	(7.7)	Nummuliteを含む		
中 生 代	GB	黒色石灰岩	0.6	Schratten	
	A	黒色石灰岩	0.3	Quinten, Malm	Au, Austria
	CP	縞状石灰岩	0.6		Felsberg
	CV				Walensstadt
	D	黒色石灰岩	0.5		Muotathal
	F	黒色石灰岩	0.5		
二疊紀	PA	赤色火山質礫岩	1.9~1.4	Verrucuno	

これは注目すべきことである。何故ならば、グラルス・ナップの中では、Malm 石灰岩は常にグラルス衝上断層に近い所で見ついている。私は実験した4種のMalm 石灰岩の中でヘルベチア帯の南縁に近いChurの近傍のFelsbergから採取したものに注目した。このFelsberg 石灰岩(試料記号C)は通常のヘルベチア帯Malm 石灰岩がおそらく泥質物質を含むために黒色を呈しているのに対して、灰色の地の中に3.0-0.5mm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。外観もグラルス衝上断層の断層帯に必ず見られるLochseitenKalkに良く似ている。試料は総て層理面に垂直な方向が長軸になるように整形され

ているが、Felsberg 石灰岩は層理面に垂直な方向の試料(CV)の他に平行な試料(CP)も作成した。高压変形実験の結果では、Felsberg 石灰岩は4種のMalm 石灰岩の中で最も強度が小さく、最も ductility (延性度)が大きかった。Felsberg 石灰岩の2種を比較すると、CPはCVよりも強度が小さく、ductilityは大きい。念の為に中部ヨーロッパと比較して見る。スイス北部からドイツ南部にかけて広範囲に分布するSolenhofen 石灰岩は始祖鳥の化石を産出した事でも有名なMalm 石灰岩でありしばしば高压変形実験の材料に使われる。これと比較してみると、Solenhofen 石灰岩はFelsberg 石灰岩を除くスイスのMalm 石灰岩のいずれよりも強度が小

さく、ductilityは大きい、Felsberg石灰岩に対してはむしろ大きな強度と小さなductilityを持っている。要するに、Felsberg石灰岩はスイス・アルプス近在で最も流動性の高い岩石であることがはっきりしたわけである。しかも、実験室で高封圧下変形したFelsberg石灰岩(CP)の縞模様はSchwandenの断層露頭で見るLochseitenKalkの変形模様にとっくりである。これ等の結果は曾って地質ニュースに掲載した(星野一男, 1977b)ので省略する。ここではFelsberg石灰岩(CP)とSolenhofen石灰岩及びMalm石灰岩との比較を再録するに止める(第6図)。第6図右に示すCanisfluh(試料記号A)はオーストリア東部のAu近傍(第5図)の採石場Canisfluhで採取したヘルベチア帯の標準的な黒色Malm石灰岩である。点線は200MPa以上の封圧を示す。

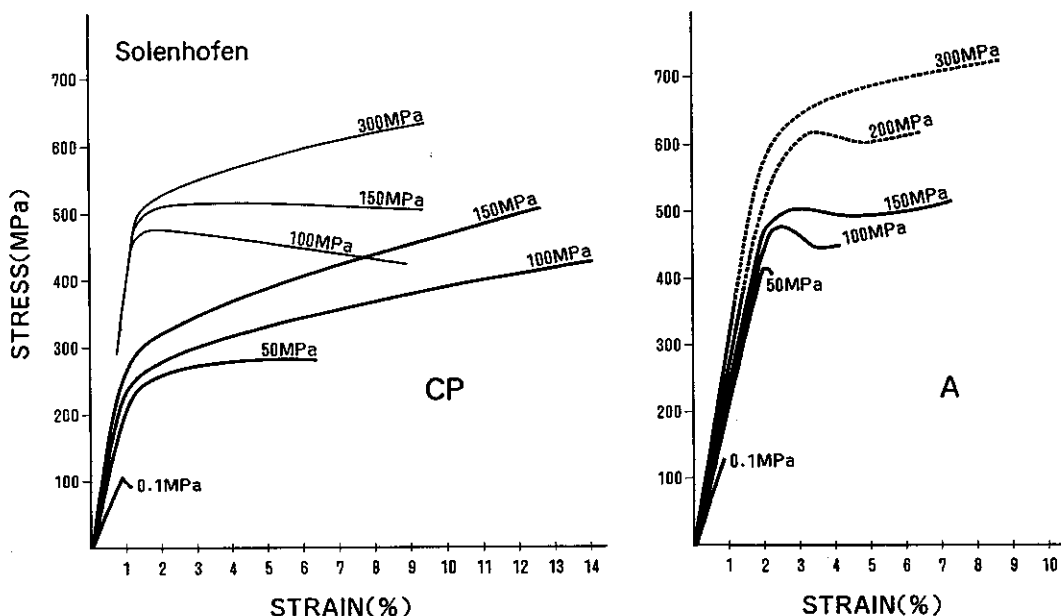
この様な事が分かって来たので(CP)試料について更にpore-pressure testを行っていたが、日本で新たに200度までの高温実験を追加した。その結果、孔隙水圧の増加や温度の上昇に対して明らかにductilityの増加があることが分

かったのである。

この様な実験の結果によってLochseitenKalkの起源はFelsberg付近の縞模様石灰岩であることを証明することが出来たと思った。長大な水平衝上断層が発達し、成長する為には粘延性に富んだ地層が断層面に介在する事が不可欠の条件である。スイス・アルプスにこの様な水平衝上断層が生まれ、ナップ構造が作られたのはMalm石灰岩の様なductileな地層に恵まれていたからである。そこで、グラルス衝上断層が第一の長大断層となり得たのもFelsberg石灰岩の様な非常にductileな地層が其処に存在したからである。Hubbert, Hsüの議論はこの様な実験成果を取り入れる事によって一層分かり易くなる。

これが日本に帰った私の結論であった。その中間的報告は帰国直後の1972年9月の札幌の地震学会と翌年4月の仙台の地質学会で行った(星野, 1972b, 1973b)。

しかし、この頃すでにヨーロッパの構造地質学界は益々燃え広がるプレート熱に既存のテーマは吸収された様になり、一方日本ではアン



第6図 Malm石灰岩の応力-歪曲線：Solenhofen, Felsberg (CP), Canisfluh (A).

チ・プレート派に黙殺されて、造山構造とか、ナップの変形とかを口にする研究者は日に日に少なくなるばかりであった。Hsüとの連絡も歳毎に間遠になった。私達の考えはその後、地質ニュースや岩波地球科学講座のスイスの紹介の中で書いたが(星野, 1977a,b; 1979), さらに研究を進展させる機会は無かった。

ヨーロッパでもアメリカでも研究者の関心は陸地の造山帯から海洋の変動帯に移っていたのである。

あとがき

海底の変動帯, 付加体が陸上の多くの場所で観察される国は日本が一番であろう。日本の造山構造は付加体を抜きには語れない事がはっきりして来た。振り返れば明治の時期にアルプス造山モデルを直輸入してからここに辿り着くまで百年余りの歳月がかかっている。現在、日本の研究者は身近に数多の、溢れる様な多数のフィールド、露頭をもっていることで、かつてのスイスの研究者が味わったと同じ忙しさとある種の責任感を味わっているのではないだろうか。

1992年の京都IGCの時に中部地方美濃帯の巡検(B21)に参加して、付加体の層序と構造を色々見ることが出来た。スラスト構造の直接の現場は見る事が出来なかったが、付加体の形成機構の解明に物性研究の重要性を改めて痛感した。同様な印象は同年12月の構造地質研究会(早稲田大学)で日本各地のナップ構造の話聞きながら感じた事である。我が国の様に露頭状況の極端に悪い所では推論を裏付ける証拠としての物性データの重要性は非常に大きいのではないかと思う。地層水に注目する小川・芦さんのような扱い方を益々発展させて頂きたいと思った次第である。

文 献

- Heim, A., 1921, 1922, *Geologie der Schweiz (II) Die Schweizer Alpen*, Tauchnitz, Leipzig.
- 星野一男, 1966a, 最近のアメリカ構造地質学界(Ⅰ), 地質ニュース, no.139, 47-53, (Ⅱ)同, no.140, 29-35.
- 星野一男, 1966b, 動き始めた高圧岩石変形試験機, 地質ニュース, no.144, 30-31.
- 星野一男, 1972a, グラルス・ナップの発見をめぐって, 構造地質研究会誌, no.13, 23-25.
- 星野一男, 1972b, 水平衝上断層の起こる場所と地層物性の関連について(講演), 地震学会秋期大会, 札幌.
- 星野一男, 1973a, グラルス・ナップの発見をめぐって(Ⅱ), 構造地質研究会誌, no.14, 20-21.
- 星野一男, 1973b, アルプス造山運動に於ける流動性岩の役割について, 日本地質学会80年大会講演要旨集, 302.
- 星野一男, 1977a, 構造地質学ノート(Ⅰ)アルプス地質学の誕生, 地質ニュース, no.271, 1-10.
- 星野一男, 1977b, 構造地質学ノート(Ⅱ, Ⅲ) グラルス断層運動とスイス・アルプスの形成, 地質ニュース, no.273, 44-52; no.279, 40-51.
- 星野一男, 1979, スイス・アルプスのナップ構造, 岩波地球科学講座 第9巻(地質構造の形成), 70-82頁.
- Hsü, K. J., 1960, Paleocurrent structures and paleogeography of the Ultrahelvetic flysch basins, Switzerland, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **71**, 577-610.
- Hsü, K. J., 1968, Principles of melange and their bearing on the Franciscan-Knoxville paradox, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **79**, 1063-1074.
- Hsü, K. J., 1969, Role of cohesive strength in the mechanics of overthrust faulting and of landsliding, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 927-952.
- Hsü, K. J., 1971, Franciscan melanges as a model for eugeosynclinal sedimentation and

- underthrusting tectonics, *Jour. Geoph. Res.*, **76**, 1162-1170.
- Hubbert, M. K. and Rubey, W. W., 1959, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **70**, 115-166.
- 高木秀雄, 1992, スイス・アルプス東部の Helvetic Nappes, 地質雑, **98**, no.5, 口絵.