スイス東部, グラルス水平衝上断層における断層滑剤層の起源

星 野 一 男* BRIEGEL, Ueli*

Origin of the Lubricant Limestone in Glarus Overthrust, Swiss Alps

Kazuo HOSHINO* and Ueli BRIEGEL**

I. ま え が き

多数のナップ構造と横臥褶曲の発達によって隆起したスイス・アルプスは、世界で最も古くから、最も詳細に研究されている造山帯であり、中でも東部のグラルス (Glarus) 州一帯はグラルス衝上断層などの長大な水平衝上断層の発達によって幾重にも重なるナップ構造が形成された地域として著名である (星野, 1979, 1994; Trumphy, 1980; Hsu and Briegel, 1991: 図 1)。

19 世紀半ばになされた Arnold Escher によるグラルス衝上断層の発見以来、複雑なスイスのナップ構造の実態は、スイス国立工科大学 (ETH) 地質学教室において Arnold Escher の後を継いだ Albert Heim 等によって既に今世紀初頭までに明らかにされ (Heim, 1919-1922 など)、引き続いて衝上断層の生成機構に関する理論的、実験的研究が行われるようになった。

最近、わが国においてはサブダクションに伴って形成された付加体堆積物の研究が盛んとなり、その内部に形成される衝上断層・ナップ構造に関連して高圧剪断変形、脆性-延性転移相などの問題が新たに論議されるようになった。スイスにおいてもヘルベチア帯について新たな研究が行われており、ETH では高圧物性の研究が続けられている。

今回、グラルス衝上断層に関して、断層破砕部を構成する特異な延性石灰岩、Lochseitenkalk の源岩について、実験データならびに野外踏査を通じて行った検討の結果を報告したい。

II. グラルス衝上断層の地質構造と断層運動

グラルス衝上断層の発見は Escher 父子の 2 代にわたる業績である。父、Hans Conrad Escher von der Linth (1767-1823) は著名な土木技師でありながら郷土の自然を非常に愛し、各地を旅行して自然科学者の眼をもって描写した山岳画集『スイスの風景とパノラマ』を残している (Solar und Hoesli, 1974)。そのうちの 1 ページには Segnas 峠における「グラルス衝上断層」が精緻に描写されている (口絵 2-1)。その子、Arnold Escher von der Linth (1807-1872) は東部スイス一帯の山岳を隈なく調査し、大規模に発達する地層逆転構造を発見してアルプスの基本構造としての押し被せ構造の意義を初めて明確に示した (Staub, 1954 など)。彼の業績を讃えるためにグラルス州地学協会が Schwanden 東の小邑、Lochsite の断層露頭に掲げたプレートによれば、Escher の歴史的発見は 1840 年のことである (星野, 1977a)。それ以来、スイス・アルプスのナップ、スラスト構造は Heim 等によって詳細に調査され、グラルス衝上断層は 2000 m から 3000 m ク

* (財) エンジニアリング振興協会

** スイス国立工科大学

* Engineering Advancement Association of Japan

** Geologisches Institut, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich

図 1 グラルス地域の地質構造。

星野 (1979) に追加。Glarus overthrust, Lochseitenkalk, Siltkalk の分布は Oberholzer (1920), Schweizerischen Geologischen Kommission (1950, 1959), Schmid (1975) による。

Fig. 1 Outline of Geological Structure with locations of the related places.

ラスの高い山の巔きをほぼ水平に切断する大水平断層であることが明らかにされた (Heim, 1878; Oberholzer, 1920 など)。

グラルス衝上断層はその規模においておそらくスイス第一であるばかりでなく、構造的にも非常にユニークである。すなわち、このような広い面積に発達しているのに断層面の性質はどこでもよく似ていて、上盤 (ナップ) の二畳紀の火山岩 (Verrucano) と下盤の堆積岩のあいだの断層帯にはどこでも特異な石灰岩, Lochseitenkalk (Heim, 1919-1922) が挟まれているのである。このような状況が明らかになると、グラルス断層はスラスト, ナップ構造の研究モデルとして多くの構造地質学, 岩石力学の研究者の興味を集めてきた。このような重い岩盤が 2000-3000 m もの高度に衝上し, 40 km もの長い距離を顕著な内部変

形もなしに水平に移動する力学機構はどのように考えたらよいか。Hubbert and Rubey (1959) は断層面を一つの平板とした最も簡単な摩擦モデルで計算して、地層内部の間隙圧 (pore pressure) が上昇する状況であればこのような滑動は可能であるとした。これにたいして Hsu (1969a, b) は断層破碎部, 断層運動に関する岩石物性要素などを重視する必要を唱えた。

大きな荷重の下に長い距離をスムーズに移動するためには断層面の摩擦係数が小さいことが絶対の必要条件である。この為には断層運動に直接関与する岩石・地層は流動性の高いこと, 岩石力学的に延性の大きいことが要求される。スイス・アルプスにおいて大きなスラストの発達する所は、後期ジュラ紀の Malm 石灰岩などの流動性の大きな延性岩石が分布する所が多いことはこの考え方

図 2 標式地 Lochseite における Lochseitenkalk.

Fig. 2 Lochseitenkalk at Lochseite site.

を裏付けるものである。一般に岩石は常圧では脆性 (brittle) であるが、圧力が大きくなると脆性は小さくなり延性 (ductile) が大きくなる傾向にある。温度も延性を大きくする要因である。また、歪み速度 (この場合には断層運動の速度) も脆性-延性の転移に影響を与えるであろう。このような岩石自体の物性の他に、Hubbert 等が注目した間隙圧等の外的要因も摩擦を左右する重要な条件である。

Heim (1919-1922) が詳細なケッチを行った Lochseite の露頭では断層破碎帯としての Lochseitenkalk をよく観察することができる。ここでは Lochseitenkalk は薄い黒色頁岩層と互層する片岩状石灰岩であり、全体に微細な流動構造をしていることが見受けられる (図 2)。このようなことから、Lochseitenkalk は本来非常に流動性の高い ductile な岩層であったものが何らかの原因で衝上断層面に巻き込まれ、断層はそのような流動しやすい岩層を得たことによって一層滑りやすくなって飛躍的に変位が進行し、ついに現在のように広い範囲に広がって分布するようになったと考えることができる (星野, 1973)。

III. ヘルベチア帯岩石の高圧高温下変形挙動

このような推論を裏付けるデータとするために、スイス東部の主要な岩石について三軸高圧変形試験機による変形実験を行った。

ETH において実験を行った試料はモラッセ 4, 第三紀 (フリッシェ) 層 8, 石灰岩 5, 二疊紀火山岩 (Verrucano) 1 である。それぞれ封圧 1, 500, 1000, 1500 kg/cm² の封圧下で変形実験を行い、応力-歪曲線を求めた。上部ジュラ系の Malm 石灰岩 3 種についてはさらに 2000, 3000 および 4000 kg/cm² の実験を追加している。歪み速度は 4×10^{-5} /sec。ただし、フリッシェ試料の 1 種 (MH) について 10^{-7} , 10^{-8} 台の超緩速実験を行った。その後、Felsberg (図 1 の右下) で採取した Malm 石灰岩 (表 1 の CP, CV) について、1000 kg/cm² の封圧下で試料中の間隙圧を 500 および 800 kg/cm² に高めた pore pressure 実験を行った。

これらの実験結果については星野 (1977b, c, 1979, 1994) 等に概要を報告した。今回、以上の実験資料の細目 (応力-歪線, モール包絡線等) についてまとめつつあるが、かなりの量になるので本報告においては割愛せざるを得ない。主要な試料について最終的に求めた強度, 延性度, 剪断強度, および摩擦角を表 1 に示す。

ここでは、諸物性のうち流動性について考察したい。岩石力学において流動性の指標として用いられている延性度 (ductility) について比較すると石灰岩はフリッシェおよび火山岩に比較して延性度が大きい。たとえば、封圧 500 kg/cm² の数値をとると、石灰岩 5 種の平均は 3.07% であり、これはフリッシェ 6 種の平均値 2.47% よりも約 24 % 大きい。石灰岩のなかでも Felsberg 石灰岩 (CP, CV) はとりわけ延性度が大きい。しかも、1000 あるいは 1500 kg/cm² を超えると歪み硬化が始まり明確に延性流動状態となる。Felsberg 石灰岩の強度は石灰岩のなかで最も小さい。さらにモール包絡線特性をみると、剪断強度ならびに摩擦角が他の岩種に比較してかなり小さい。このように、実験した試料のなかで相対的に最も強度が小さく流動性の大きな岩石として Felsberg 石灰岩が浮かび上がってきた。

さらに興味深いことは Felsberg 石灰岩の岩質は Lochseitenkalk とよく似ていることである。スイス東部の Malm 系はほとんど石灰岩であり、グラルス地域ではその主要部分は Quintenkalk よ

表 1 高压高温実験結果.

Table 1 Summary of the experimental results.

構造区分		試料記号	強 度 (kgf/cm ²)							延 性 度 (%)					剪断強度		摩擦角, 度	
			封 圧 (kgf/cm ²)							封 圧 (kgf/cm ²)					封 圧		(kgf/cm ²)	
			1	500	1000	1500	2000	2500	3000	1	500	1000	1500	2000	1	1000	1	1000
モラッセ		JB	204	1300	2150					1.74	2.00	2.11			115	215	41	27
		JD	537	2685	3365	4530				1.70	3.78	3.97			85	540	60	29
		JE	387	3320	4150					0.63	3.95	5.29			35	1003	69	21
フリッシュェ		KA	1332	3825	4690	5100				0.98	1.75	2.39	2.97		180	1265	64	21
		KB	972	5060		6900				0.48	1.90	—	2.44		80		73	
		LA	1767	4910	6970	7770				0.71	1.82	2.67	3.31		240	1065	61	35
		MH	1386	5265	6530	8020				1.50	2.86	3.43	3.87		110	1035	65	37
		NB	2816	5800	6530	8030				0.48	3.47	3.94	4.65		330	1015	67	38
		O	1720	3990	4130	5490				1.32	3.03	3.18	4.46		190	1095	60	27
石灰岩	uK	GB	1910	3900	4650	5790				1.28	2.98	5.04	6.67		360	815	51	30
	マルム紀	CP	1058	2770	3145	3690				1.00	4.44	f	f		170	895	58	18
		CV	450	2540	3360	4090	4960	5800	7800	0.52	3.67	12.7	f		90	410	52	31
		A	1220	4170	4800	4960	6060	6630	6940	0.89	2.11	2.58	3.15	3.39	95	1175	70	25
		F	820	4640	5005	5270	5700	5920	6080	0.50	2.16	2.35	2.70		125	1920	63	12
火山岩		PA	990	4440	5330	6010				1.61	2.74	2.84	3.94		135	665	64	40

uK: 前期ジュラ紀 f: 延性流動

剪断強度の単位は kgf/cm²

り成る。Quintenalk は均質微細粒の方解石よりなり、小試料では黒色を呈するが大きな露頭、崖などでは明るい massive な外見と滑らかな岩肌が特徴である。これにたいして Felsberg 石灰岩は Malm 系の最下位層であって層位的に Quintenalk の下位にあり、20 万分の 1 地質図では Schiltschichten (シルト層) と名付けられている (Schweizerischen Geologischen Kommission, 1950, 1959; 星野, 1994: 表 1 参照)。露頭で見る Felsberg 石灰岩層は数 mm 幅の泥岩と石灰岩が互層して細かな縞状を呈する (図 3)。Lochseitenkalk も上に述べたように数 mm 幅の頁岩質パッチを含んでおり、このような縞状構造は両石灰岩に共通する特徴である。

このように Felsberg 石灰岩が Lochseitenkalk と結びつく可能性が出てきたので、帰国後に地質調査所高压実験室において、CP について封圧 500 kg/cm² で温度 100, 150 および 200 度状態の高压高温実験を行った。500 kg/cm² の封圧下で、常

図 3 Felsberg における Siltkalk.

Fig. 3 Siltkalk at Felsberg.

温では脆性破壊して剪断割れ目を生ずるが 100 度に上昇した状態では延性変形を行い、Lochseitenkalk とよく似た流動縞状構造を示すことが判明した (星野, 1977b, c, 1979)。

IV. 断層滑削層, Lochseitenkalk の起源

高圧変形実験の結果として, グラルス衝上断層の断層滑削層と目される Lochseitenkalk は Felsberg に産する Malm 系の Schiltschichten から由来する可能性が高まったので, この仮説を検証するために, 今回, CP, CV 試料採取地の Felsberg と Lochseitenkalk 標式地 Schwanden, および Lochseitenkalk が山頂一面に分布する Flimserstein など3カ所において周辺の野外踏査を実施した (図1)。Felsberg はライン上流の Chur の対岸にある村落である。一方 Schwanden はグラルスからリント溪谷を約5km 遡った所にあり, Lochseite は Schwanden から東に支流のゼルフ溪谷に沿って2km 程進んだ小村落である。ゼルフ溪谷をさらに遡ると Elm に達する。Elm から東北に溪谷を登ると segnas 峠を越えて Flims に出ることができる。Escher 父子が今にも現れそうなこの古い街道を歩くと, グラルス衝上断層がこの地域の山稜をすべてナイフで薙いだように切断している情景をまのあたりに見ることができる (口絵2-2)。

踏査基本図としては Oberholzer (1920) の五万分の一地質図を使用した。同図によれば Felsberg 背後の大きな露頭崖を構成する厚い地層は Quintenkalk である。地層はケスタを成しこの付近では北東-南西の走向で南東に傾斜している。Quintenalk はマッシブな石灰岩層であるがその下位は泥岩の薄い層が石灰岩層と互層し片岩状を呈する (図3)。この部分は同地質図では Siltkalk (シルト石灰岩) と塗られている。これは, 上に述べたスイス地質委員会 (SGK) の総合地質図 (Schweizerischen Geologischen Kommission, 1959) で Schiltschichten (シルト層) と誌されている同一の地層である。CP, CV はこの泥岩・石灰岩互層の露頭から採取された。CP は層理面に平行に, CV は直交して整形された試料である。

Oberholzer (1920) によると, Siltkalk は $S70^{\circ}W$ 方向にはほぼ10km 追跡されるが Trin で Flims から流れ下る地滑り堆積物に覆われて見えなくな

る (図1)。そのために, 現在 Siltkalk はわずかに Felsberg と Trin のあいだに見られるのみであるが, あたかもその身代わりのように Trin の北方に Lochseitenkalk がグラルスの断層面と相伴って広い範囲に出現する。図1に示されるように, Flims の北からグラルスまでグラルス衝上断層は Flimserstein (2694 m), Fil de Cassons (2634 m), Trinserhorn (3028 m), Segnas (3099 m), Sardona (3013 m), Tschingelhoren (2846 m),

図4 Flimserstein の北端, Fil de Cassons の台地面を占める Lochseitenkalk の露頭 (手前) と Tschingelhoren の遠望。
山頂からやや下がった所にグラルス衝上断層が水平に走っている。

Fig. 4 Lochseitenkalk at Fil de Cassons with a prospect of Glarus overthrust cutting Tschingelhorn horizontally.

図5 Fil de Cassons 台地面の Lochseitenkalk.

Fig. 5 Lochseitenkalk at Fil de Cassons.

図 6 グラルス衝上断層の推定断面. (Heim, 1878; Schmid, 1975 等より作成)

Fig. 6 Presumed cross section of Glarus overthrust. (mainly after Heim, 1878 and Schmid, 1975)

Vorab (3028 m), Foostock (2373 m) などの頂上近い高度をほぼ水平に切って発達する。その下部には数米の Lochseitenkalk が断層帯として伴われる。Trin から北西から約 8 km, Flims の直ぐ北に広がる台地 Flimserstein では台地一面に Lochseitenkalk がテーブルクロスのように広がり、断層帯としての状況をよく観察することができる。図 4, 5 にその状況を示す。Lochseitenkalk は幾分硬化しているが Lochseite, あるいは Felsberg における泥岩・石灰岩互層と似た外見を示すことが認められる。また、Flimserstein の北端 Fil de Cassons からは、周辺の山稜を切る断層面を 360 度の範囲に一望することもできる (口絵 2-3)。

Heim (1878), Oberholzer (1920), Schmid (1975) 等によれば、Chur から Flims 付近のライン渓谷沿いはヘルベチア帯の南限に当たり、グラルス断層は Flims の南、あるいはライン南岸から発して Flimserstein, Trinserhorn, Sardona などをはほぼ 2000 から 2500 m の高度で衝上していったと考えられている。このときライン南岸にあった Verrucino が断層の上盤として北に移動していったのである。この大きな衝上運動のときにライン北岸にあった Malm 系石灰岩などの流動性の大きな地層が衝上運動と連動してナップ形成に関与したが、特に最も流動性の大きい Siltkalk は断層面に巻き込まれ、断層滑剤層としてグラルス衝上断層下の断層面に広がっていったと考えることができる (図 6)。

謝 辞

研究費の一部は東京地学協会平成 11 年度助成金によって賄われた。本研究の実験的結論は早い時期になされて

いたが現地調査迄にかなりの期間が経過してしまった。この機会を与えて下さった協会の方々に深く感謝します。

スイス国立工科大学 (ETH) 大村 纂教授には現地調査、文献調査などについて格別の便宜を図っていただいた。また、粗稿について有益な助言を頂いた。西 琢郎博士 (清水建設)、久保紀子さん (地質調査所) には図面整理に協力していただいた。この方々に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- Heim, A. (1878): *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Todi-Windgallen-Gruppe, Textband und Atlas*. Benno Schwabe, Basel, 346p.; 246p.; 17tf.
- Heim, A. (1919-1922): *Geologie der Schweiz, 2 Bande*. Tauchnitz, Leipzig, 704p.; 476p.
- 星野一男 (1973): アルプス造山運動における流動性岩の役割について。日本地質学会第 80 年学術大会講演要旨集, 302.
- 星野一男 (1977a): アルプス構造地質学の誕生。地質ニュース, **271**, 1-10.
- 星野一男 (1977b): グラルス断層運動とスイス・アルプスの形成 (1)。地質ニュース, **273**, 44-52.
- 星野一男 (1977c): グラルス断層運動とスイス・アルプスの形成 (2)。地質ニュース, **279**, 40-51.
- 星野一男 (1979): スイス・アルプスのナップ構造。植村 武・水谷伸治郎編: 地質構造の形成 (岩波講座地球科学 9)。岩波書店, 70-82.
- 星野一男 (1994): 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る。構造地質, **40**, 5-19.
- Hsu, K.J. (1969a): Statics and kinetics of the Glarus overthrust. *Eclogae Geol. Helvetia*, **62**, 143-154.
- Hsu, K.J. (1969b): Role of cohesive strength in the mechanics of overthrust faulting and of landsliding. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 927-952.
- Hsu, K.J. and Briegel, U. (1991): *Geologie der Schweiz*. Birkhauser Verlag, Basel, Boston,

- Barlin, 219p.
- Hubbert, M.K. and Rubey, W.W. (1959): Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **70**, 115-166.
- Oberholzer, J. (1920): *Geologische Karte der Alpen zwischen Linthgebiet und Rhein, 1:50,000, Spez.-Karte 63*. Schweizerischen Geologischen Kommission.
- Schmid, S.M. (1975): The Glarus overthrust: Field evidence and mechanical model. *Eclogae Geol. Helvetia*, **68**, 247-280.
- Schweizerischen Geologischen Kommission (1950): *Gelogische Generalkarte der Schweiz, Blatt 3: Zurich-Glarus, 1:200,000*. Kummerly & Frey, Bern.
- Schweizerischen Geologischen Kommission (1959): *Gelogische Generalkarte der Schweiz, Blatt 4: St.Gallen-Chur, 1:200,000*. Kummerly & Frey, Bern.
- Solar, G. und Hoesli, J. (1974): *Hans Conrad Escher von Linth, Ansichten und Panoramen der Schweiz, die Ansichten 1780-1822*. Atlantis Verlag Zurich, 365p.
- Staub, R. (1954): *Der Bau der Glarneralpen*. Verlag Tschudi & Co., Glarus, 187p.
- Trumpy, R. (1980): *An outline of the geology of Switzerland, a guide-book in 26th IGC in Paris*. 102p.