

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

斷層泥與斷層角礫岩的發育及其在斷層演化中的意義(一)

Development of Fault Gouge and Fault Breccia in Fault Evolution (I)

計畫編號：NSC 90-2116-M-034-002

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：羅偉 中國文化大學地質學系
共同主持人：吳樂群 中國文化大學地質學系
共同主持人：王玉瑞 台北科技大學材資系

中文摘要

斷層泥、斷層角礫岩與各種磨碎岩(cataclasites)，乃至於糜嶺岩(mylonite)均是斷層帶中常見的物質，一般均認為磨碎岩是斷層作用在接近地表時的脆性變形之產物，其成份與斷層上下盤的圍岩相似，而糜嶺岩則是塑性變形過程的產物。就同一斷層而言，同樣的初始材料(原岩)，常可形成一系列連續變化的斷層岩，也為斷層活動的過程提供了主要的證據。由於斷層穿過了整個脆性的碎裂地層，甚至以韌性剪切帶的方式穿過了地殼深部塑性的部份，因此在其變形過程中包含著一系列變形機制，也產生了各式各樣的斷層岩石。這些岩石雖然在斷層帶中極為常見，但對其生成及其在斷層演化上的重要性，卻知道得不多。而且許多這樣的岩石可能經受多期的斷層作用，且經常是在不同的條件之下。研究較深層次的斷層岩時，必須透過對抬升暴露出來的古老斷層之觀察。如果斷層運動持續於整個過程中，斷層帶中將會暴露出形成於不同條件的各種岩石。但後期的構造和岩石可能會抹掉早期的構造和岩石，而地震快速的滑動與剪切中所形成的岩石在地質上可能是短暫的。所以在構造地質學上要重建斷層帶的變形機制和構造歷史常常是非常困難而關鍵的。

本研究計劃針對此一構造地質學上的困難與問題，利用斷層泥和斷層角礫岩在斷層作用發生時可能產生的礦物作用(反應)及微組構(microfabrics)變化，提供斷層作用時的化學與物理變化資訊，以探討斷層帶的變形機制和構造歷史。

關鍵詞：斷層泥、斷層角礫岩、微組構

Abstract

Fault gouge, breccia, and various cataclasites are common materials in natural fault exposures, but our understanding for the genesis of the faulted rocks in fault evolution is limited. Commonly it is thought that faulting in near surface conditions often produces fault breccia, microbreccia and gouge. These are initially incohesive materials but may later become coherent by precipitation of minerals by circulating solutions. It is regarded all these faulted rocks as the result of brittle deformation process.

Vrolijk, P. and van der Pluijm, B. A.(1999) presented some evidences that clays in the gouge participate in mineral reactions and microfabrics changes during faulting. Rather than thinking of clay reactions as a consequence of mechanical processes or fault localization following diagenetically altered horizons. If mineral reactions intimately interact with mechanical processes in faults, then we can get more valuable information from the study in syn- deformational mineral reaction and associated fabric changes.

Although the occurrence of some faults in Taiwan have been studied for a long time, but a detailed study of the faulted rocks in these fault zones is still rare. In this project, we study the development of fault gouge and fault breccia in fault evolution. We try to identify and explore the consequences of the reactions and processes based on mineralogic, X-ray Diffraction Analysis, microstructural and textural analysis. It is hoped that this study may shed some light on

deformation history and fault evolution of Taiwan.

Keywords: *Fault gouge, fault breccia, microfibrics*

一、前言

有關斷層岩(*faulted rocks*)的研究工作已有好幾個世紀，但最早對斷層岩作比較詳細的描述是萊柏伍斯(*Lapworth, 1885*)，他提出所謂『糜嶺岩(*mylonite*)』一詞，來描述蘇格蘭西北莫因(*Moine*)逆斷層伴生的特殊類型岩石。雖然這個名詞由字面上是指『被碾碎的岩石』，但現今糜嶺岩則多被認為是塑性變形過程的產物。事實上由萊柏伍斯的時代到現在，對斷層成因的了解和描的名詞都非常混亂，其中有很多時候是由斷層岩的多變性所引起的。

關於斷層岩的成因，克力斯汀(*Christie, 1960*)曾指出除碎裂作用外，再結晶作用也扮演了相當重要的角色。典型的糜嶺岩的顆粒減小可以完全由塑性流動造成，而不僅僅是由脆性破裂作用造成(*Bell and Etheridge, 1973*)。對同樣的初始材料(原岩)而言，常可形成一系列連續變化的斷層岩，其間的命名與分類仍存有相當多的爭議(*Wise et al., 1984*)。目前對斷層岩的分類與命名常根據其膠結程度，分為膠結的和非膠結的岩石(*Sibson, 1977*)。非膠結類的岩石分類依其顆粒大小，從角礫到斷層泥。膠結類的岩石則基於母岩顆粒的破碎程度及細粒基質相對於岩屑和殘留粗晶體的含量。在糜嶺岩系列中，後者被稱為殘碎斑晶。它們與變斑晶明顯不同，變晶出現於變晶糜嶺岩中，在塑性變形之中或之後生長。

辛柏森(*Sibson, 1977*)曾將斷層岩的生成機制分為兩個主要型式，即『彈性』與『摩擦』，其微觀機制主要是脆性破裂和“準塑性”變形，包括有一定程度的晶體內部塑性變形，也包括了各種溶解和擴散的過程。在彈性摩擦過程中包括母岩的脆性破裂、摩擦(磨蝕)磨損和斷層泥或角礫岩碎裂變形。辛柏森把非膠結岩石的形成和磨碎岩系列歸入彈性摩擦過程，糜嶺岩系列則歸入準塑性過程。一般可以預期，隨深度增加(壓力和溫度增加)，在斷層帶遇

到的岩石將遵循某一途徑轉換。

事實上斷層帶中的斷層岩，包括斷層泥、斷層角礫岩與各種磨碎岩(*Cataclasites*)，乃至於糜嶺岩，均為斷層活動的過程提供了主要的證據。由於斷層岩穿過了整個脆性的碎裂地層，甚至以韌性剪切帶的方式穿過了地殼深部塑性的部份，因此在其變形過程中包含著一系列變形機制，也產生了各式各樣的岩石，而且許多這樣的岩石可能經受多期變形，且經常是在不同的條件下。研究較深層次的斷層岩時，必須透過對抬升暴露出來的古老斷層之觀察。如果斷層運動持續於整個過程中，斷層帶中將會暴露出形成於不同條件的各種岩石。後期的構造和岩石可能會抹掉早期的構造和岩石，快速地震剪切中所形成的岩石在地質上可能是短暫的。所以在構造地質學上要重建斷層帶的變形機制和構造歷史常常是非常困難而關鍵的。

臺灣島位於板塊邊界的造山帶與地震帶中，過去對活動斷層的研究經地球科學界的研究人員共同努力，已有若干的研究成果(徐鐵良，1962；石再添等人，1982；李錫堤等人，1993；林啟文等人，2000；朱傲祖等人，1995；楊貴三，1986；張徽正等人，1998)。但對於斷層帶中的斷層泥與斷層角礫岩，甚或糜嶺岩的研究，雖有若干由工程地質或岩石力學觀點出發的研究工作(沉建志，1995；林銘郎等人，2000；洪清琳，1996；許麗芬，1993；陳正興，1978；劉俊杰，1993)，但仍缺乏對這些岩石細部的觀察與分析，尤其是九二一集集地震之後，對活動斷層的研究與調查工作更為迫切，但由斷層泥與斷層角礫岩的礦物學方法、岩象學方法與岩理組構(*Textural Fabrics*)的分析，應可提供斷層作用時的化學與物理變化資訊，以探討斷層帶的變形機制和構造歷史。

本研究計劃針對此一構造地質學上的困難與問題，利用斷層泥和斷層角礫岩在斷層作用發生時可能產生的礦物作用(反應)及微組構(*microfibrics*)變化，提供斷層作用時的化學與物理變化資訊，以探討斷層帶的變形機制和構造歷史。主要可分下列三方面：

1. 藉由斷層泥和斷層角礫岩中之岩理組構

- 及應變分析來瞭解斷層作用時的運動學機制。
- 藉由斷層泥和斷層角礫岩中之黏土礦物相關分析資料與研究，來探討斷層作用時的礦物反應與次序關係。
 - 由斷層泥和斷層角礫岩中之伊利石 (*illite*)與膨潤石 (*smectite*)黏土礦物之變化來瞭解斷層作用時的動力學機制，並據以探討斷層構造演化之模式。

二、斷層岩之黏土礦物定量分析 野外調查與標本採集

本研究以臺灣西部沉積岩區為目標，選定車籠埔斷層為對象，分別以車籠埔斷層沿線由南至北之清水溪桶頭橋剖面、樟坪溪大埤里剖面、乾溪光復國中剖面、草湖溪竹子坑剖面、頭汴溪一江橋剖面、廓子坑溪廓子坑口剖面、大里溪大坑路剖面、大甲溪埤豐橋剖面等進行斷層沿線的路線地質圖與地質剖面測製，並依序採集斷層帶中的各種斷層岩進行以下各項分析研究。

標本處理

- 取出深色之泥塊，將其剝細，置於85 之烘箱烘乾，視其乾濕程度及份量調整時間長短。
- 烘乾後之泥塊，用不銹鋼鉢敲碎至粉末狀；依含沙量或含泥量之多寡定其篩網大小；含沙量多者使用2mm之篩網，含泥較多則使用1mm之篩網。
- 過篩後之粉末均勻攪拌，取重；取重之方式含泥較多者一般取30或40g；含沙量較多者則約取50g。
- 秤重後之粉末置於600ml之燒杯，加入蒸餾水，均勻攪拌5分鐘後靜置。
- 靜置後如沈澱相當快速或經數十分鐘後已呈半透明狀態，表示顆粒表面陽離子分散不均，需加入 $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ 解凝劑(約2g)，再行攪拌5分鐘後靜置；若懸浮良好者則不須加入。
- 靜置6小時後用滴管抽取懸浮液，抽取時避免攪動燒杯中的溶液；杯底沈澱者為顆粒較大之砂粒級部份，因此只需抽取距離沈澱物1cm以上之懸浮液，即為黏土粒級之部份。一般須重複抽取兩次才可取得足夠之份量。

- 抽取後之黏土懸浮液使用離心機將其快速沈澱。
- 離心後之黏土待其至濃稠度適中時，塗抹於玻片之上，自然風乾後，進行XRD分析。

薄片處理

- 自然定向薄片：黏土塗抹玻片後在室溫下自然風乾。
- 熱處理薄片：將自然定向薄片放入高溫爐中，以20 /min的升溫速率，加熱至550 持溫2 hours。將樣本置放在高溫爐中緩慢冷卻，避免在高溫時直接取出，以防熱膨脹冷卻效應，造成黏土礦物剝落。待高溫爐內冷卻至110 左右時，將薄片取出放置在玻璃乾燥器中，直接上X-ray機分析以防樣本重新吸水。加熱處理可使 d 10Å的繞設鋒較對稱。本次實驗之樣本加熱後皆由原來的灰黑色轉變為紅褐色。
- 甘油處理薄片：將玻璃乾燥器的底部倒入甘油，黏土薄片放在上方，密封後放入100 烘箱中持溫24 hours。甘油處理主要是將*smectite*的低角度繞設鋒使其出現較明顯。處理後薄片表面略顯油亮，但並無變色。

XRD 分析

抽取出之黏土製備兩片定向薄片，其中一片做甘油處理後上X-ray機。另一片直接上機做全礦物及黏土鑑定分析，取出後連同玻片做550 的加熱處理後立刻上機分析。X-ray掃描設定如下：

- 全礦物分析(N)：2°~70° 5°/min
- 黏土鑑定(N)：2°~30° 2°/min
- 加熱處理(550)：2°~30° 2°/min
- 甘油處理(G)：2°~30° 2°/min

黏土礦物定量分析

Schultz(1964)提出一種計算方式，可以將K(*kaolinite*)、C(*chlorite*)、I(*illite*)、S(*smectite*)和I/S ratio共五種含量之相對比例同時計算出。實驗的方法為將黏土進行300、550 和乙二醇的處理，以使*kaolinite/chlorite*及*illite/smectite*的繞射鋒區別出來以利計算。本次的測試實驗，以陳洪起及趙杏媛(1986)提出修正Schultz法，作為計算定量之方法，中國石油工業部將此法作為部頒標準(1988)。其修正Schultz之方法為加熱的部份由原先的300 及

550 改為只用550 持溫加熱2小時，他們提出此方法使得 $d=10 \times 10^{-1} nm$ 繞射鋒的對稱性會比較好，可減少誤差。修正Schultz之公式如下：

$$K + C = \frac{I_{7.1 \times 10^{-1} nm}(N)}{I_{7.1 \times 10^{-1} nm}(N) + I_{10.1 \times 10^{-1} nm}(550^\circ C) \times 1.5}$$

$$K = \frac{h_{3.58 \times 10^{-1} nm}(N)}{h_{3.58 \times 10^{-1} nm}(N) + h_{3.53 \times 10^{-1} nm}(N)} \times (K + C)$$

$$\therefore C = (K + C) - K$$

$$I = \frac{I_{10.1 \times 10^{-1} nm}(EG)}{I_{10.1 \times 10^{-1} nm}(550^\circ C)} \times [100 - (K + C)]$$

因此 S (或 I/S) = $100 - (K + C + I)$
 其中 K 、 C 、 I 、 S 及 I/S 分別代表 kaolinite, chlorite, illite, smectite, 及 I/S ratio。

N ：自然風乾定向薄片。

EG ：乙二醇處理薄片。

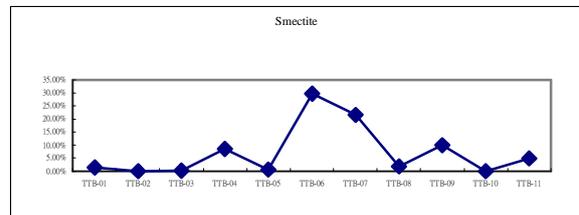
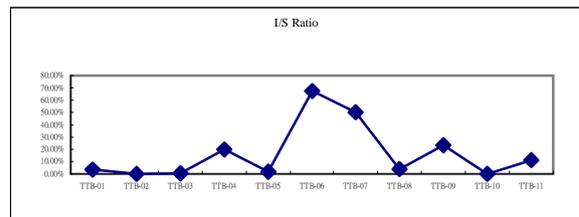
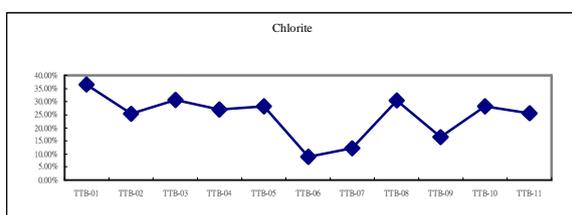
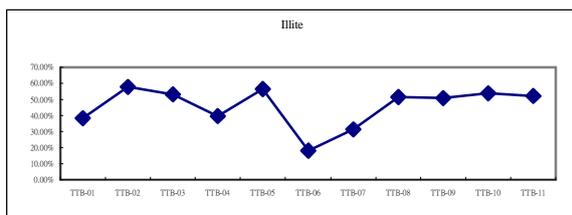
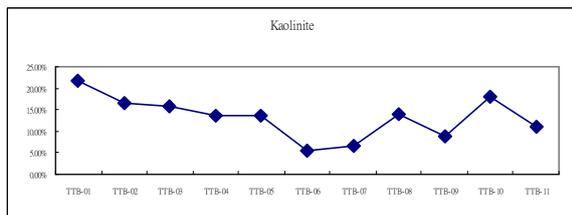
550：經過550 熱處理2小時之薄片。

H ：各相應繞射鋒之鋒高

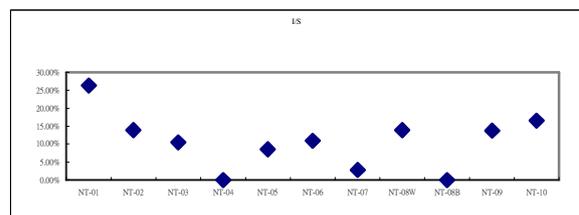
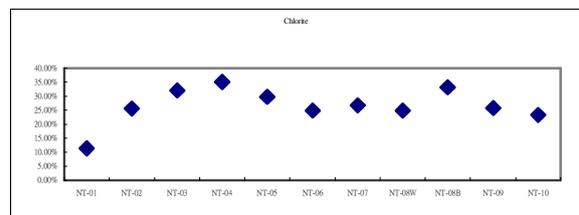
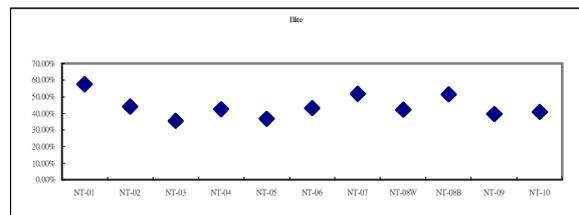
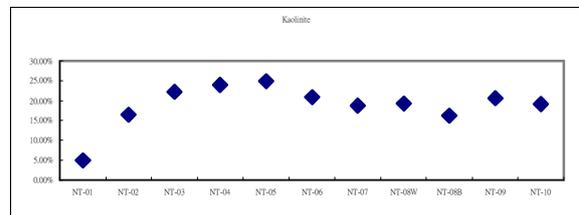
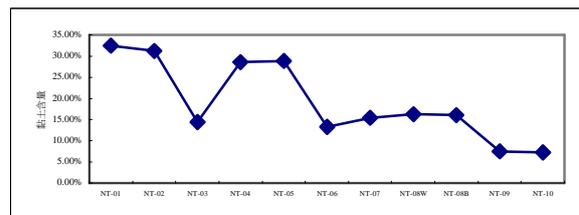
I ：各相應繞射鋒之積分強度

三、分析結果

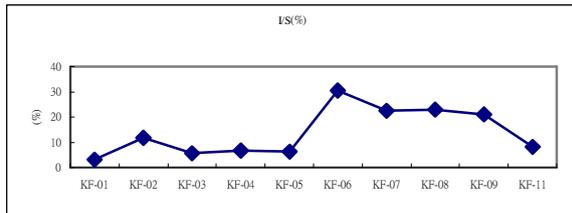
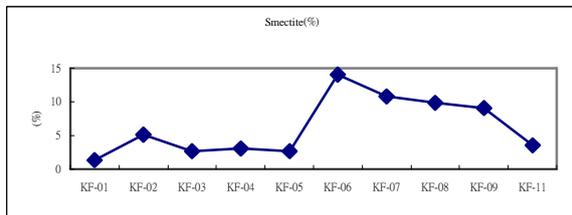
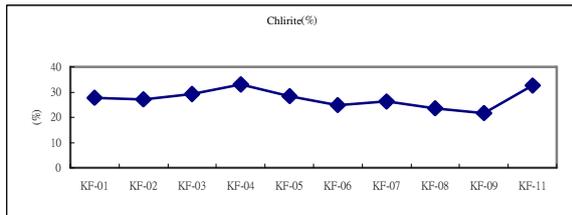
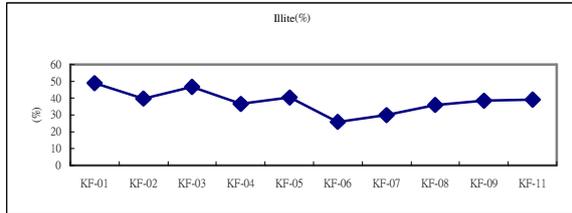
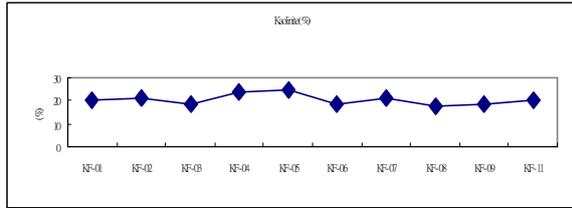
清水溪桶頭橋剖面



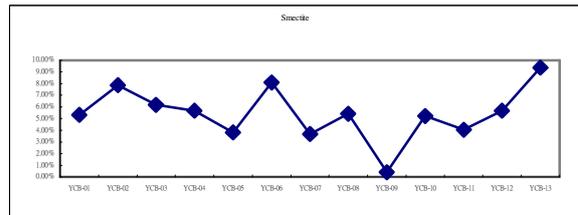
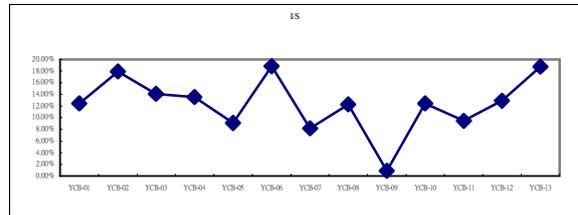
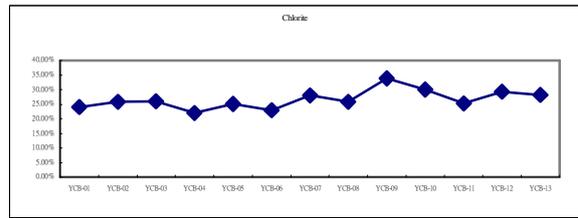
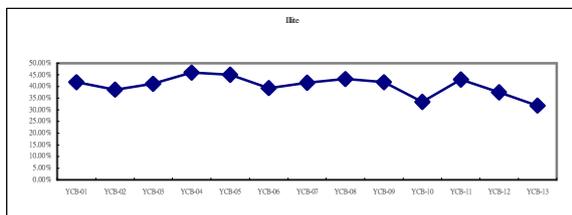
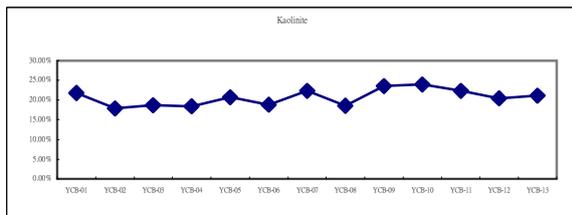
樟坪溪大埤里剖面



乾溪光復國中剖面



頭汴溪一江橋剖面



四、結論與討論

斷層泥和斷層角礫岩為斷層帶中常見的斷層岩，其組成與構造在斷層演化上具有非常關鍵的重要性。本研究藉由車籠埔斷層沿線由南至北之清水溪桶頭橋剖面、樟坪溪大埤里剖面、乾溪光復國中剖面、草湖溪竹子坑剖面、頭汴溪一江橋剖面、廓子坑溪廓子坑口剖面、大里溪大坑路剖面、大甲溪埤豐橋剖面等之斷層岩中的黏土礦物變化與分析，嘗試提出斷層泥和斷層角礫岩在斷層作用發生時曾參與的礦物反應與微組構的變化的初步相關證據。此一資料對於斷層活動機械作用的粘土礦物反應，提供了若干思考的方向與討論空間；惟若進一步討論斷層的演化，則可能要從更廣泛的區域與圍岩具更多岩性變化的斷層，甚至於韌性剪切帶之糜嶺岩來討論。同時亦可探討在臺灣不同之地質區與不同地質條件下斷層岩之變化。

五、參考文獻

- 石再添、張瑞津、楊三貴 (1982) 活動斷層的研究概觀。中國地理學會會刊，第十期，50-57頁。
- 朱傲祖、游明聖 (1995) 花東縱谷活動斷層調查研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，

- NSC83-0202-M-047-001, 共186頁。
- 李錫堤、謝昭輝、鄧屬予 (1993) 台灣西部活動斷層之綜合研究, 國科會防災科技研究報告81-66號。
- 徐鐵良 (1962) 東台灣縱谷之現代斷層活動。中國地質學會專刊, 第1號, 95-102頁。
- 楊三貴 (1986) 台灣活斷層的地形研究-特論活斷層與地形面的關係。私立中國大學研究所博士論文, 178頁。
- 劉俊杰 (1993) 新莊斷層及其斷層泥特性之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論, 共92頁
- Scholz, C.H.(1990) *The mechanics of earthquakes an faulting*. Cambridge University Press, New York.
- Schulz, S.E., Evans, J.P.(1998) *Spatial variability in microscopic deformation and composition of the Punchbowl fault, southern California: implications for mechanisms, fluid-rock interaction, and fault morphology*. *Tectonophysics* no.295, p.223-244.
- Sibson, R.H.(1977) *Fault rocks and mechanisms*. *Journal of the Geological Society of London* no.133, p.190-213.
- Spiess, R., Bell T.H.(1996) *Microstructural controls on sites of metamorphic reaction: a case study of the inter-relationship between deformation and metamorphism*. *European Journal of Mineralogy* no.8, p.165-186.
- Srodon, J., Eberl, D.D.(1984) Illite. In: Bailey, S.W., (Eds.), *Review in Mineralogical Society of America*, Washington, D.C., p. 495-544.
- Suchy, V., Frey, M., Wolf, M.(1997) *Vitrinite reflectance and shear-induced graphitization in orogenic belts: A case study from the Kandersteg area, Helvetic Alps, Switzerland*. *International Journal of Coal geology* no.34, p.1-20.
- Summers, R., Byerlee, J.(1977) *A note on the effect of fault gouge composition on the stability of frictional sliding*. *International Journal of Rock Mechanics and Mineral Science* no.14, p.15-160.
- Sweeney, J.J., Burnham, A.K.(1990) *Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics*. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* no.74, p.1559-1570.
- van der Pluijm, B.A., Harris, J.H., Peacor, D.R., et al.(1997) *Fault gouge of the Lewis thrust, Canada: Mineralogy, texture, and age*, geological society of America. *Abstracts with Programs*, Salt Lake City, UT, 1997, p.A-200.
- Velde, B., Vasseur, G.(1992) *Estimation of the diagenetic smectite to illite transformation in time-temperature space*. *American Mineralogist* no.40, p.629-643.
- Vrolijk, P.J.(1990) *on the mechanical role smectite in subduction zones*. *Geology* no.18, p.703-707.
- Walderhaug, O.(1996) *Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs*. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* no.80, p.731-745.
- Wang, C.Y., Mao, N.H., Wu, F.T.(1980) *Mechanical properties of clays at pressure*. *Journal of Geophysical Research* no.85, p.1462-1468.
- Wintsch, R.P., Christoffersen, R., Kronenberg, A.K.(1995) *Fluid-rock reaction weakening of fault zones*. *Journal of Geophysical Research* no.100, p.13021-13032.
- Wu, T.C., Bassett, W.A., Huang, W.L., et al.(1997) *Montmorillonite under high H₂O pressure: Stability of hydrate phases, rehydration, hysteresis, and the effect of interlayer cations*. *American Mineralogist* no.82, p.69-78.

