陸前井内菊石の變形

(昭和十七年九月三日受領)

槇　山　次　郎

序　　言

此報文は横山又次郎先生追悼講演會に於て化石結構論第一報と題して公表したるものであつたが時間が無くて充分に講述し得ず，ことに大事な終末の部分は極めて簡略になつてしまつたので此處に改めて記述することにした。

化石結構論とは化石を利用しての地質結構の意味であつて，結構とは Gefüge の適當なる譯語として選んだものである。岩石結構論は Sander と Schmidt の一派の學者が創始したる學問であつて近年各國に研究者が現れてゐる。Sander が主張するに岩石結構論は變動岩 (Tektonit) の粗成粒子結構を記述して，なほ統合した大結構を考究し地質構造論の基本たらしめんとする。粒子結構の研究方法は主として統計であり，Fedorov の載物臺を利用する。大結構は變動岩層に見る歪の考究にも眼をおく。此二は獨立ではなく相關する。大結構の基礎は今から50年前頃に於ける Becker の岩石劈開の理論研究に出發する。しかるに最近の塑性學の進歩と並行し，地質學者獨創の見解を加味して著しく發展した。此新興の學問は構造地質學の基本であるばかりでなく變成岩の本質を明白にするに多大の貢獻をなしつゝある。京都の帝國大學地質學鑛物學教室では故小川教授先づ之に注意し次いで故中村教授もまた新進學徒のため研究課題としてゐたが不幸にして志をとげず夭折した故郡場學士の他には其人を得ず，荏苒今日に至つたのである。

結構論に化石が材料となる事は可能である。そこで化石結構論が成立するが，之は要するに大結構にも粒結構にも應用し得るので此等と對立するものではない。石灰質構成岩中の有孔蟲其他の化石は粒結構の要素たり得る。今こゝに記述するのは肉眼で觀察し得る菊石に就てである。

復 原 法 可 否

宮城縣石巻市附近井内の三疊紀菊石類が歪んだ形をしてゐるのは知明である。楕圓狀の輪廓をした此菊石も元は圓狀の形態をした普通の菊石に相違ないことは疑ない所である。しからば元の形を再現するのははたして可能であらうか。此は容易の樣であるが實は困難な仕事である。しかしもし二三の假定を許せば復原は近似的に可能である。

第一に要求する假定は菊石の輪廓が對數螺旋であるとする。菊石が幼少期の發達階梯

を終へ成熟形と相似形を執るに至れば，共後は口縁部の成長により老衰期に入るまでは相似形を大體に保持する。共一部分が他の部分もしくは全部に相似なる螺旋は對數螺旋である。實際 Naumann 共他の計測によれば殆ど此形式の曲線をなすのを認める。

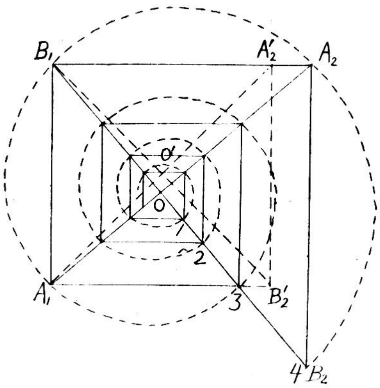
第二の假定は歪が均等なることゝ非變容であることである。此假定は大體に認め得る。化石の周圍にある堆積岩の小部分は均等な歪をしてゐるとして不可なく，塑性變形は容積不變として不可ない。もし均等な歪が認め得るならば楕圓狀をなす變形菊石の最長軸に於ける螺旋の徑は元の比例を殘してゐる。

井内の菊石の中で Danubites naumanni は外卷であるから對數螺旋の歪んだ形が明瞭である。丁度手本に恰好な標本があつたので，此を主材として研討を試みることにした。

對數螺旋の特性

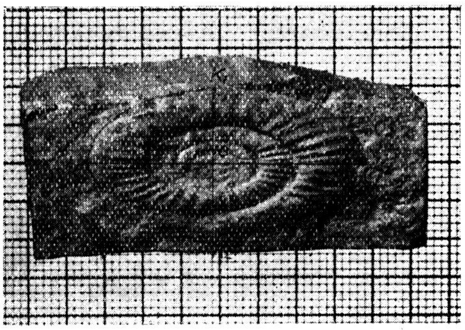
極座標で此曲線は $\gamma=e^{\theta\cot\alpha}$ で表はすことが出來る。α は定常角である。徑 γ と切線のなす角で之が定まつてゐる。また對數螺旋は同一の徑上に一定の比例で增大する距離で何囘も繰り返へして交會する。卽ち第一圖の 01, 02, 03, 04 は 01 : 02=02 : 03=03 : 04 である。また圖に於て互に直角に交はる二の徑がある。卽ち A_1OA_2, B_1OB_2 であるが A_1B_1 B_1A_2 A_2B_2 を結ぶと三角形 A_1B_1O と B_1A_2O と A_2B_2O は相似三角形である。また此等は三角形 $A_1B_1A_2$ とも相似であつて，從つて A_1, B_1, A_2, 等に於ける角 $A_1B_1A_2$ 等は直角である。そこで對數螺旋の中には直角の角を持つ鍵形の圖形がある。A_1B_2 に等しく $B_1A'_2$ をとり正方形 $A_1B_1A'_2B'_2$ を作る。此正方形は變形菊石では菱形になる筈である。

第　一　圖



第二圖は井内產 Danubites の陰象を示し最長軸を L_1L_2 とし，それに直角なる最短軸を K_1K_2 とした。K_1K_2 と L_1L_2 は中心 O に於て直角に交はる。菱形 $K_1L_1K'_2L'_2$ は第一圖の正方形 $A_1B_1A'_2B'_2$ が變形したるものである。いま標本上に此菱形を求め得たとして，元の正方形の邊の長さが定まりさへすれば，元の對數螺旋，從つて近似的な Danubites naumanni の原形が判るわ

第　二　圖



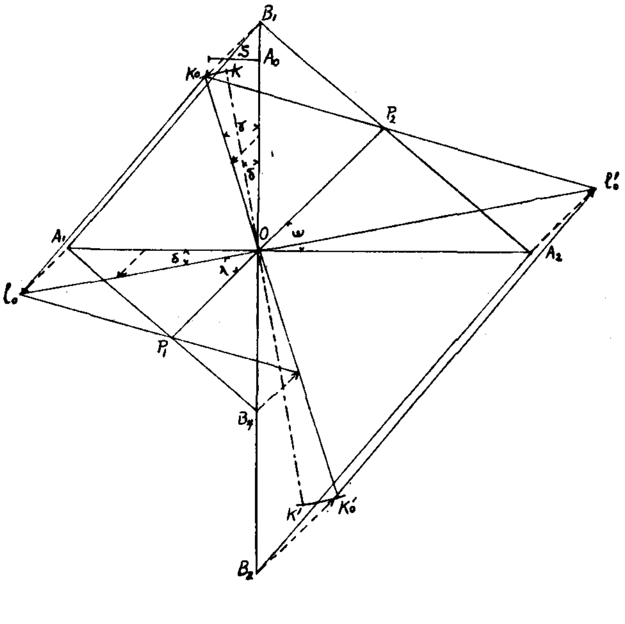
けである。しかしながら菱形と正方形の關係は全く不明である。もし働いた應力が如何にかして測り得たならば理論的な此關係を或程度知り得る。此處では最もあり得べき假定を設ける。第一に面積不變と假定する。しかるときは容易に求むる正方形を畫き得る。またあり得べき第二の假定は菱形の一邊が正方形の一邊と等しき長さありとする。廻轉性の歪に於て屢々實驗の手段に用ふる直角織の枠付網をひさげ斜角織の網としたる歪は之に當る。第一の歪は二次元に於ける單一剪斷である。さて正方形の對角線 $A_1A'_2$ と $B_1B'_2$ とは中心 O と通らずに O_1 にて交はる。角 $O'B_1O$ は定常角 α と直角の差である。ある菊石の歪標本 L_1L_2 に沿ふ各層幅の比を 1.7 とするならば $\log\gamma=2\pi\cot\alpha$ により α は略 85° になる。そこで差角 5° に B_1O を引き，同樣 A_1O を引き，夫々延長して容易に A_2 と B_2 を求める。

此を基準とすれば對數螺旋を畫き得る。正方形は假定第一，第二何れを選んでも出來上りの螺旋は $\gamma=e^{\theta\cot 85°}$ なる同一のものであるが，長さが少しく異り，從つて面積は異る。第二は明かに第一より小さい。

平面上歪としての求め方

上記の復原作圖法は極めて大づかみであるが放射數 35 を 36° に均等に配分すれば原形を繪に仕上げることが出來る。しかしながら菊石の如く歪形でも種屬別の判斷つくものをわざわざ手數をかけて原形に近い圖を作るのは大して意義はない。地質學の上では夫よりも變形そのものが大事である。

第三圖



そこで歪を求むる方法を考へて見る。對數螺旋の直角に交はる2軸をとりその半軸の一を單位とみなすとき，直角なる隣の軸は $\tan\beta$ の長さである。第三圖で A_1O を1とすれば B_1O は $\tan\beta$ である。β は B_1A_1O である。螺旋が時計廻りなるときは右へ隣る。次にその右隣卽ち A_2O は $B_1O\times\tan\beta$ であるから $\tan^2\beta$ である。B_2O は $\tan^3\beta$ である。A_2 の外側に來るべき

軸と曲線の交點への O よりの長さは $\tan^4\beta$ になる。歪形に於て $L_1O:OL_2=A_1O:A_2O$ である。勿論之は均等なる歪と假定してである。そこで L_1O を 1 とすれば OL_2 は 1 $\tan^2\beta$ である。Danubites naumanni の標本で數回連續測定し，平均を求めた（測定には時計工用のカリパを使用した）。かくして K_1O, K_1K_2, K_2O と L_1O, L_1L_2, L_2O（第二圖）を測り $\tan\beta=1.088$ を得た。

面積不變の歪とせば $kl=m^2\tan\beta$ である。k とは K_1O, l とは L_1O である。$k=9.77$, $l=15.7$ であるから $m=\sqrt{140.6}=11.88$ である。

そこで $B_1O=m\ \tan\beta=11.88\times1.088=-12.94$

である。歪 $\epsilon_2=-\dfrac{m\ \tan\beta-k}{m\tan\beta}=-0.242$

$$\epsilon_1=\frac{l-m}{m}=0.320$$

こゝで $\epsilon_2=-\dfrac{\epsilon_1}{1+\epsilon_1}$

$(1+\epsilon_1)(1+\epsilon_2)=1$ でなければならないが，よく上記の値に合致する。m, $m\ \tan\beta$ $m\ \tan^2\beta$, $m\ \tan^3\beta$ と軸をとれば螺旋は定まる。しかし此を今は必要としない。

さて今の面積不變の變形としての測定計算が合致する。特に $1+\epsilon_1=\dfrac{1}{1+\epsilon_2}$ なる條件に適合する如き 2 軸の橢圓を歪菊石が含む事は判つた。

しからば此歪は何であらうか。純粋剪斷ではあるまい。即ち短軸の方向の壓縮または長軸の方向の引張によるものとすれば軸に約 45° なる對稱的剪斷面を有する筈であるが原標本にはそれらしいものがない。長軸に20°—30°をなす若干の裂け目が見え，長軸に對しては非對稱である。また長軸に平行なる縮れが澤山に見える。この縮れは長軸に斜角をなすものもあるが大勢は平行である。

第二に單一剪斷を考へる。此場合の滑り量は $2S=\epsilon_1-\epsilon_2$ で計算は

$0.320+0.242=0.562=\tan29°20'$

$S=0.281$ である。之は $\tan16°30'$

此角を γ とする。第三圖に於ける如く剪斷面（滑り線）と螺旋の A_1O 軸のなす角を ω とし，歪橢圓の長軸となす角を λ とし，$\omega-\lambda=\delta$ とし，B_1O がひさげて KO となつた角，即ち B_1OK を γ とする。

單一剪斷では

$$\tan\lambda=\frac{(1+\epsilon_1)^2-1}{2S(1+\epsilon_1)^2}$$

$$\tan\omega=\frac{(1+\epsilon_1)^2-1}{2S}$$

また $\delta=\gamma$ でなければならぬ。計算では $\lambda=36°20'$ $\omega=52°50'$ 今一の滑り線

の角は $\omega'=37°10'$ である。 $\omega-\lambda=\delta=16°30'=\gamma$ である。單一剪斷では第三圖の K_0 と K は一致する。さて此が實狀と合致するならばよいが長軸と 36° の角をなす滑り線はない。辛じて 35° のものがあるが，之はもつと低角の二本の間にある連結裂線にすぎず，滑り線ではない。そこで單一剪斷とは認め難い。

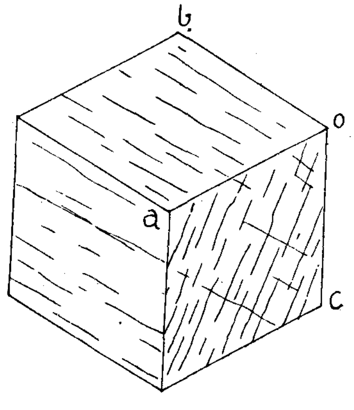
單一剪斷でないとして，大して夫と異ならぬものを考へてみる。第三圖の如く，K と K_0 と離れ $\gamma \neq \delta$ とする。$\gamma-\delta$ が充分小であれば實際測定は KK^1 で行つてゐるが K_0 OL_1 なる角は直角でない。ω を $47°40'$ として γ は $20°30'$ とし，λ は $33°30'$ になる。かくすれば稍近いものになつた。しかし約 33° なる滑り線はやはり少い。僅かに 32°, 29°30′, 27°50′, 27°, 24°50′, 24°10′ なる裂線を見るが此等は主剪斷の滑り線ではない。最初は顯微鏡が不完全で此等のみを認めて滑り線と假定し，長軸に平行なる縮れを，共間に挾まれた引曳と解釋した。此は全く誤りである。

標本に於ける主剪斷面の觀察

菊石標本は陰象である。化石は凹みを作してゐる。此を擴大觀察するのにライツ製の Ultrapak を使用した。その結果歪長軸に平行なる縮れと見たものが滑り線であることが判明した。斜角をなす若干の線は裂線であり，また特に低角なるは平行主剪斷線の變り種にすぎぬ。雲母片は多少は線に入らんとする姿勢にある。滑りに沿ふて粘土質物が流線をなす。

また地層面（菊石は地層面上に横はる）に平行と此に直角に二面を磨き同じ樣に鏡檢した。標本が地層面に約 80° である二の劈開面と，此と地層面に直角なる二面に取り圍れてゐるのに鑑み二の磨面の一は劈開面と地層面の稜に平行に，一は兩端面に平行にした。其結果第四圖に示す如く地層面に平行なる面 (ab) と，劈開稜に平行なる直立面 (bc) とでは劈開稜に平行なる滑り線を，直角斷面 (ac) では斜なる滑り線を見た。之により主剪斷面は地層面と 78° の角をなすを知つた。また稜を ao, bo, co と稱すれば卽ち Sander の軸になる。

第　四　圖



次に熊谷博士の好意により稻井村八津の無化石細砂岩と薄頁岩互層（やはり三疊紀で井内の層と大差なき層準にあると思はれる）の標本で同じ樣な互に直角なる三面の薄片を檢した。地層面をAとし，劈開稜に平行なるをBとし，其等に直角なるをCと命名する。A片ではｂ軸に平行な，ａ軸に直角なる滑り線を明白に認める。剪斷面の特質として砂粒は何れかの側にあり，從つて滑り線は屈

曲しながらも大勢は一の方向を保つてゐる。長くは連續せずに消へる。C片では地層に斜角をなす滑り線が見事に發達してゐるのを見る。斜角は62°—71°であつた。第二剪斷面の線が少しある。此は地層面と 74° である。兩面の角は第一を 76° とすれば 88° である。此等の線は頁岩層の所で極めて明白であるが砂岩層では不明であり消滅する。卽ち砂岩は粒子の廻轉をなし，頁岩では剪斷面に沿ひ滑る。B片は非常に銳角をなす二の滑り線を認める。卽ちC片に見た二主剪斷面の他の斷面である。薄片が正しく直角であり得ないからでもある。此は理想的にはB片では平行に出て來る筈である。また實際平行であるとして差支へない程に銳角をなしてゐるのである。

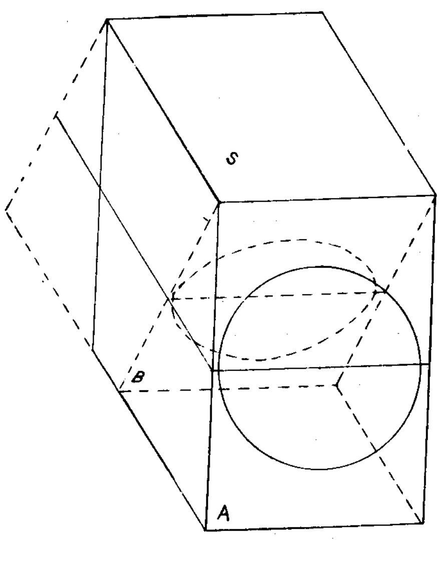
雲母片はC片で見ると滑り線に接して折れたり曲つたりしてをり，終には流線に入らんとする姿勢が觀取される。石英粒は角ばつてゐる。石英の粒結構を定めることは出來ない。何となれば砂粒として堆積結構をなしたものが廻轉してゐるので，結晶は之に關係がないからである。

以上の觀察により，材料は單一剪斷の特質を示すものである事が了解出來る。また Diener の圖や東北大學所有標本の寫眞に依つても，何の種類の菊石でも明かに歪長軸に平行に線條を見るのである。なほ放射肋は長軸附近にては集結し短軸方面で粗散する。

菊石變形の本態

前節に於ける考察では面積不變を假定したのが誤りである。菊石は地層面上の圖形とすれば岩石變形の二次元問題としたのが悪いのである。岩石自體は非變容で單一剪斷をしてゐるが地層面圖形の平面上の變形は面積が變る。

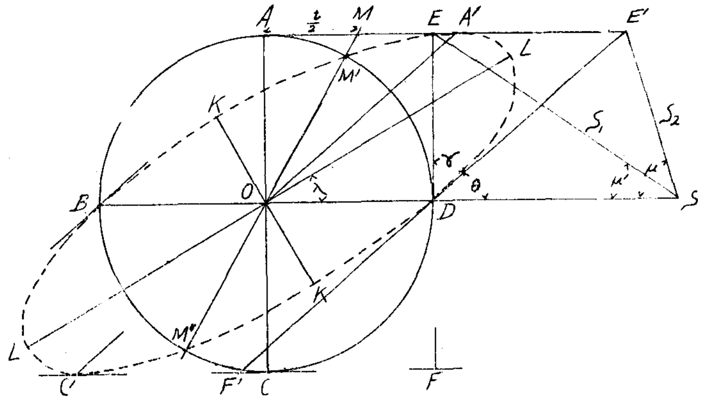
第　五　圖



今第五圖の様な岩石塊をとる。Sを主剪斷面とする。A面を地層面とする。A面上の圓は單一剪斷でB面まで滑つたときに橢圓となる。Aの圓のSに平行なる面上にある直徑はB橢圓の長軸に等しい。またB面上の圓はA面上で橢圓になるが短軸が圓の直徑に等しい。AからBへの移動では面積縮少し，滑り線は長軸に平行である。BからAへの移動では面積擴大し，滑り線は長軸に直角である。

第六圖は此様な單一剪斷を理解せしめる目的で作圖した。S_1を第一の面卽ち第五圖のAとし，S_2をBとする。SDOBやE′EA

第　六　圖



は主剪斷面を示す。即ち此圖は第三圖の樣な岩石塊の斷面圖である。μ は S_2, μ' は S_1 が剪斷面となす角とすれば, $\mu>\mu'$ であり, S_1 の圓は S_2 の橢圓となる。圓の直徑を 2 とすれば橢圓の長軸は 2 であり，半短軸を b とすれば

$$b=\frac{\sin\mu'}{\sin\mu} \text{ である。}$$

μ は 78° であるから $\sin\mu=0.978$ で $\sin\mu'$ は 0.561 となり μ' は 34° である。こゝに b は Danubites naumanni の場合には次の如く直接に計算する。對數螺旋で歪形の長軸に相當する徑は其と同じであるから，短軸に相當する半徑は $l\tan\beta$ であり 1.088×15.7 で 17.08 である。しかるに測定せる半短軸は 9.77 であるから 7.21 の差がある。即ち橢圓になほせば半長軸が單位なるとき半短軸は 0.578 である。

第六圖で正方形 AODE は平方四邊形 A'ODE' に變形し，圓 ABCD は橢圓 KKLL となつた。滑りの量は EE' であり，其は $\cot\mu'-\cot\mu$ である。これは 1.482—0.213= 1.269 である。$\tan\gamma=1.269$ であるから γ は 51°46' である。 EO は第二剪斷面である。二の剪斷面のなす角 θ は 38°14' である。 1.269 を t とする(前には 2S とした)。前節に於ける如き ω 及び ω' は

$$\tan\omega=\frac{t+\sqrt{4+t^2}}{2}$$

$$\tan\omega^1=\frac{t\cancel{+}\sqrt{4+t^2}}{2}$$

こゝでは $\tan\omega=1.818$ となる。また

$$\tan\omega=\frac{\alpha^2-1}{t} \quad \text{但し } \alpha=1+\varepsilon_1$$

そこで α^2 は 3.307 と計算し，α は 1.818 になり $\varepsilon_1=0.818$ である。 $\alpha^{-1}=0.549$ $\varepsilon_2=-0.451$ また ε_2 は $-\frac{0.818}{1.818}=-0.451$ と計算してもよい。ω は 61°11' である。$t=\varepsilon_1-\varepsilon_2=1.269$ である。

橢圓の軸は AM を $\frac{t}{2}$ にとる。即ち 0.635 である。 M を O と結び圓と M' に會

する。M' はまた楕圓の通る點であり，$0.6°35'$ を正切とする角は $32°35'$ である。λ は楕圓の長軸が BOD となす角である。$90°-32°25'$ の半分で $\lambda=28°45'$ である。また λ は $\tan\gamma\frac{\alpha'-1}{t\alpha^2}=0.552$ でも計算出來る。後のは $\tan 28°54'$ になる。

かくの如くして Danubites naumanni をのせた岩石塊の歪の楕圓體は解けた。可なり激しい塑性の歪である事がわかつた。但し楕圓體の斷面に直角なる中等歪は O としてあるは斷るまでもない。他の井內產菊石に就いても殆んど同じであつて圖上の計測から計算した歪は僅かに少數點下二位に於て差異あるらしい。實物に就て計測を行ひ統計をしたいと考へてゐる。

さて地層面上の楕圓と等しき面積の圓の半徑は $\sqrt{\frac{\sin\mu'}{\sin\mu}}=0.758$ である。卽ち半徑が單位の圓は面積も 0.758 に縮少し，それから單純剪斷と同じ様に楕圓へ移つたと同じ結果になつてゐる。また S_1 上の圓は單位半徑の球の斷面と見ることが出來る。S_1 か S_2 に移ると球は楕圓體になるが，其中等軸は單位で殘る。斷面の圓は斷面の楕圓となり其長軸は中等軸で單位である。第六圖で中心 O を通過する S_1 と S_2 に平行なる二線を引き夫々の圓及び楕圓內にある部分が，兩面上の圓の直徑及び楕圓の短軸を示すものである。

地質構造との關係

最初劈開が地層面に 34° の面をなして發生する。次に此劈開に平行にある剪斷面及び此とほゞ直角の第二剪斷面に沿ひ滑動する。砂粒子は廻轉し，微細粒子より成る等方質物は切斷流動する。地層面と78°の角をなすに至つて止まり，永久變形となつて殘つた。滑りは主として第一剪斷面に沿ふてゐるが，極めて部分的には第二剪斷面に沿ふてゐる。

さて最初に劈開を發生した時の層位と現在層位とは，井內地方に於ける野外調査を必要とする。文獻上にはかゝる必要なる計測が見當らない。以上はたゞ室內作業であるから此後になるべく速かに外業を完了し方位との關係を明白にしたいと期してゐる。

次に單位球の樣な礫が假にあるとすれば，楕圓體に變形し，現在の地層面には μ 及び λ の餘角の和の角度をなす方向に長く延びてゐなければならない。卽ち $73°15'$ である。μが直角に近いと，延びる方向も直角に近い。此はまことに面白い事であつて Fairbairn の考へる所と方向が異つてゐる。實際との適合を速かに吟味したいと思つてゐる。

結　　論

化石を單に時代を指示するものとして利用するにとどまらず，活用して塑性變形の尺度とすれば地質學上に多大の役をなすことが了解出來た。地質構造論は精密なるを要する。企圖する重點は此處にあるのである。室內作業ではあるが野外作業に於ける重要な一指針たり得ると信ずる。最後に熊谷直一博士の教示に感謝する。