

地下利用における ROCK MECHANICS の課題, 石油備蓄を例として

星 野 一 男*

Role of Rock Mechanics in Underground Construction, Referring to a Case of the Large Caverns for Oil Storage

Kazuo HOSHINO*

Abstract

Rock mechanics belong to basic fields of science and technology, and are related to mining, oil, and civil engineering, as well as geology, geophysics, tectonics, and seismology.

A national project of the underground caverns for oil storage was conducted throughout the 1980s and 1990s to study suitable construction sites. In this study, data on rock mechanics such as obtained by the rock deformation laboratory of the Geological Survey of Japan proved to be very valuable. These data were obtained from more than 500 rock specimens collected on foot from geologically representative localities nationwide. Finally, three sites, two consisted of granite and one of pyroclastic rock, were selected for construction. Detailed microscopic study of the failure pattern of specimens after the experiment indicated distinguishing brittle and ductile deformation characteristics. Brittle rock such as granite is harder in strength, sometimes with increased permeability; on the other hand, ductile rock such as pyroclastic rock is less permeable.

Key words : rock mechanics, high pressure rock deformation, underground oil storage, International Society of Rock Mechanics; ISRM, brittle-ductile transition, mode of deformation, types of failure, pyroclastic rock, permeability

キーワード : 岩石物性, 高圧岩石変形, 地下石油備蓄, 岩の力学国際学会; ISRM, 脆性 延性転移, 変形様式, 破壊形態, 火砕岩, 透水係数

I. 岩石物性と Rock Mechanics

地学雑誌の特徴は特集号が多いことである。最新のテーマについて、諸分野の最先端で研究を行っている方々の力作を集めた特集号は平生の限られた専門誌しか読まなくなった私にとって大変

に有難い企画である。昨年初頭に配布された特集号、114巻6号の表紙に「近年の岩石物性研究」というタイトルを発見したときにはある懐かしみを抑えきれなかった。本来、岩石物性は半世紀まえに欧米で広まった Rock Mechanics に対応して使われるようになった用語であるが、最近の長い

* 元地質調査所(現産総研)燃料資源部長

* Ex-chief of Fuel Geology Department, Geological Survey of Japan

本稿は2006年12月20日に行った地学クラブ講演の報告である。

期間、あまり目に触れることがなかったからである。

私の記憶では Rock Mechanics という言葉が始めて文献に現れたのは 1950 年代半ばのアメリカである (星野, 1964, 1966a, 1966b)。1956 年にコロラド鉱山大学など鉱山・採鉱関係の 4 大学が連合して第 1 回の Symposium on Rock Mechanics を行った。1960 年代にはいるとヨーロッパ, 日本をふくむ全世界的な国際学会, International Society of Rock Mechanics (ISRM) が組織され, 1966 年を初回として 4 年ごとに各国の持ち回りで International Congress on Rock Mechanics, 岩石物性国際会議が開催されることになった。1995 年に東京で開催された第 8 回はアジアで初めての岩石物性国際会議としてまだ記憶に新しい。

日本では周知のように, 土木学会, 地盤工学会 (もと土質工学会), 資源・素材学会 (もと日本鉱山学会), 日本材料学会の 4 学会が ISRM の日本代表機関として岩の力学連合会 (英語名, The Japanese Committee for Rock Mechanics) を運営して, 関連のシンポジウムなどを行うほか, 学会誌として年 4 回の岩の力学ニュースを発行している。

このように, 工学分野では Rock Mechanics に「岩の力学」という日本語を当てている。「岩石物性」という呼称はむしろ理学関係で早い時期から使われていたと思う。記録によれば, 1964 年に地震学会を中心とした研究者が集まって, 岩石物性研究会をつくっている。ただし, その頃の会報をチェックしてみるとその英語名は The Research Group for Rock Physics となっていた。ここで気になって 114 巻 6 号の特集号を見直すと, やはり, 英語のタイトルは Rock Physics であった。

Rock Mechanics は当初, リモート・センシングと同じようにそれまでのどの専門分野にも極限できない新しい課題として, 地質, 岩石, 鉱物, 地震, などの理学から鉱山, 石油, 土木, 建築, などの工学まで多種多様の分野の人々が実験室から現場への連繫を模索してスタートし, 広まった

大きな領域である。発足以来半世紀を経て多くの研究成果が生まれているが, その成果を多様な技術目標にどのように繋げていけばよいのか, 私が体験した石油備蓄の例をここで述べてみたい。

II . 石油地下備蓄プロジェクトの始まり

1973 年にわが国を襲った石油危機は社会にある種のパニックを引き起こした。国はある程度の石油を国家施設に貯蔵して不時の事態に備えるという体制を調えることになったが不足する地上タンクの代わりに新しい技術を募集した。ここで浮び上がったのが欧米で行われていた地下貯蔵システムである。その手法は水封式と呼ばれ, 1960 年代に北欧諸国で開発された新しい技術であった。地下深部では岩盤の空隙は地下水で満たされている。人工掘削の空洞も当然地下水が充満しているが, 空洞内の水を石油で置換すると石油の比重は水よりも小さいので石油は周辺岩盤の地下水圧力で押え込まれ空洞内部に封じ込められる。これが, 水封式石油備蓄の原理である。

資源エネルギー庁に委員会が設置され, 水封式の研究を始めることになったのは 1976 年のことである。早速, 欧米の状況を調べると水封式が適応できる地層には難しい物性条件があることが理解されてきた。第 1 : 岩盤透水性は過大でも過少でも不可で, 後で述べるように適正な範囲でなくてはならない。第 2 : 貯蔵中の石油の品質汚染を防ぐために空洞内部は鉄鋼・モルタルなどの補強材料は使用不可能で壁面は素掘りのままに残されるので, 長期の空洞安定性を保持するために岩盤の強度など堅硬性が十分に大きくなければならない。この物性 2 条件を地質にあてはめると, 岩盤の透水性を大きくする要素にも, 堅硬性を損なう要素にも最も大きな影響を与えるのは岩盤中の断層, 節理, 割れ目である。したがって, 最も理解しやすい地質条件は断層の少ない, 岩相の安定した岩盤ということになる。以上の物性・地質条件に適合する岩石として, 先行した欧米諸国が石油地下備蓄の母岩として使っていたのは, 北欧では先カンブリア紀楯状地の堅硬な片麻岩などの変成岩, 中欧, アメリカではジュラ・白亜紀の緻密

な石灰岩、大理石や深部の岩塩層であった。しかし、世界で最も若い造山帯に属し、活断層、活火山が一面に分布するわが国では、堅硬で断層の少ない変成岩も、緻密で岩質の安定した石灰質岩の地層も望むべくはなかった。

プロジェクトの最初の課題は、日本では欧米の備蓄母岩の代わりをつとめる岩石は何か、果たして、日本の国内でそのような岩盤がありうるのだろうかという疑問であった。石油地下備蓄プロジェクトの最初の仕事はそれはどんな岩盤で、何処にあるかを探ることであった。このような次第で、このような大きな工学プロジェクトでは前例の無いことであったが、最初の段階で地質調査所が先鋒を務めることになったのである。

III . Rock Deformation と ISRM の 岩盤備蓄シンポジウム

実は欧米で水封式地下貯蔵システムがこの時期に大きく展開した陰には岩石物性分野の活動が基盤を作っていたのである。1950 から 1960 年代にアメリカで Rock Mechanics が誕生した頃、構造地質学の分野では石油会社の研究所にいた John Handin 等が非静水圧型の岩石変形実験機を製作して多数の実験を行った (Griggs and Handin, 1960; Handin, 1966)。

1960 年の Griggs and Handin の論文を掲載したアメリカ地質学会のメモワール 97 号のタイトルが *Rock Deformation* (岩石変形) となっているように地質分野では Rock Mechanics イコール Rock Deformation だったのである。Handin 等はずから工夫して作り上げた非静水圧型三軸試験機を駆使して封圧効果による脆性 延性転移を発見したのである。この頃から北欧では堅硬な変成岩岩盤の物性研究、現場測定が盛んに行われていた。1977 年、1980 年とこの頃継続してスエデンで ISRM の部会として開催された Rock Store と Subsurface Space のシンポジウムはこのあたりの雰囲気をよく示している。

話を日本の地下備蓄プロジェクトに戻すと、私達にとって幸運だったことには、日本でも似たような状況が生まれていたのである。地質調査所

は当時世界の最先端である Handin-Donath 型の高圧岩石変形試験機を完成させており (星野, 1966c)、堆積岩約 100 種について三軸実験を完了し、応力 歪線、モール円、強度、延性度 (ductility) などの図表を付して、日本産堆積岩の高圧物性として公刊済みだったことである (Hoshino *et al.*, 1972)。岩石変形研究室 (地質力学研究室) を中心として、実験室の体制も整備されつつあり、堆積岩の他に花崗岩、火山岩などの実験データも蓄積されていた。例えば、物性数値としてはわが国の新鮮な花崗岩の強度、弾性波速度はそれぞれ $2000 \sim 2400 \text{ kg/cm}^2$, $4.3 \sim 5.2 \text{ km/sec}$ の値をもっておりこれは北欧の堅硬変成岩に匹敵する数字であった。このようにして、物性的に、備蓄母岩としての適性が認められる花崗岩など数種の高圧物性値を表示した (星野, 1979; 星野, 1980)。さらに、各地のルート調査と地質資料調査によって 1977 年に日本国内 57 箇所の候補地を選定することが出来た。

以降、待望の建設工事が始まったのは 1987 年、すべての地下備蓄基地が完成して空洞が原油で満たされたのは 1994 年で、それから更に 20 年近い歳月が続くことになる。次第に、土木、建設技術者との交流も増えて、地質にしても、岩石物性にしてもそれまでの体験を越えた新しい分野が広がっていく楽しみを経験することができたのだが、詳細は巻末に掲載した 1964 から 2000 年の諸文献を参照して頂くことにして、本誌では特に岩石物性に関係の深い 1, 2 のエピソードを取り上げる事にしたい。地質調査関係の経過については講演会でもお配りした資料、(星野, 2000) に簡単に総括した。工事関係の事項は日本地下石油備蓄会社 (1996) に詳しい。

IV . 水封岩盤の安定性：延性度の意味

1978 年に再度の石油危機が起こると、国はいよいよ地下貯蔵を推進する政策を固め、わが国での水封式備蓄の可能性を実際の花崗岩でテストをすることになった。上の候補地から愛媛県菊間町に分布する領家帯花崗岩を選定し菊間実証実験 (1980 1981) を実施した。この壮大な現場実験

は海水面下 42 ~ 62 m の深度に掘削された、幅 15 m、高さ 20 m、長さ 112 m、容量 2 万 5 千キロリットルのカマボコ型大空洞で行われた。実験の結果は成功でわが国でも物性条件の優れた花崗岩を選べば、北欧規模の水封式大規模貯油空洞は十分に可能であることが実証され、関係者は大きな自信を得たのである（星野, 1983, 1984a）。

実証実験の成果に力を得て、国は、菊間に岩手県久慈市（北上帯花崗岩）と鹿児島県串木野市（北薩安山岩）の 2 箇所を加え、計 3 地域で合計 500 万キロリットルの原油備蓄基地を完成させる計画を立案した。1 地域の容量を最大 150 万キロリットルとすれば、これは 1 基地で実証実験の空洞の 60 倍の体積の空洞を建設することになる。

次の課題は想定された 3 候補地に備蓄岩盤がこのような大きな空洞を建設できる適当な良質岩盤の分布を地上からのボーリングから調査することであった。石油地下備蓄技術委員会（石油公団）は調査の重点目標として

空洞の力学的安定性

岩盤の水理的安定性

2 項目を設定した。

力学的安定性については、まず、強度、弾性波速度など通常の力学項目が注目しなければならないのは当然のこととして、私は地質調査所地質力学研究室の一同が足で稼いだ膨大な実験データ（星野, 1984b; 星野ほか, 2001; Hoshino *et al.*, 1972）を整理して延性度にもっと注目してみようと考えた。前章で述べたが延性度、即ち、脆性 延性転移は Handin 等がアメリカ産岩石の高圧実験から見出したものだが、私達が愚直に積み上げた 500 種類の岩石のデータを総合すると転移圧力は種類によってかなりの違いのあることが分かった（星野ほか, 2001）。更に重要なことは破壊の進行に伴って岩石内部に微小割れ目が発生することである。私達は応力 歪曲線の形態によって変形様式を 5 段階に分け、また、割れ目の模様によって、破壊形態を 4 段階に分けた（図 1）。脆性では単一剪断型が多い。一方、延性の割れ目は共役型の微小な割れ目が密集する網の目型である。しかし、詳しく観察すると、図 2 の

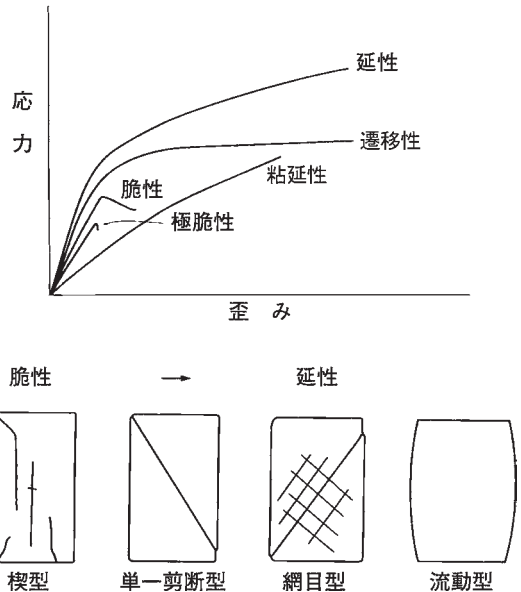


図 1 脆性 延性の転移過程に於ける変形様式（上）と破壊形態（下）の変化（星野ほか, 2001）。

Fig. 1 Classification of results from rock deformation laboratory of the Geological Survey of Japan. The upper: mode of deformation is classified into five stages from brittle, ductile, and to visco-ductile. The lower: types of failure are classified into four stages from wedge (extension), shear (single shear and network), and to flow, (Hoshino *et al.*, 2001).

ように脆性破壊でも基本的には降伏点付近から共役型の微小な割れ目が生まれる点では同じである（小出, 星野, 1967; Hoshino and Koide, 1970）。筆者は微小割れ目を考慮して判定する岩盤の延性度は岩盤の透水性をある程度指示できる重要な指標ではないかと考えた。

これを、このような岩盤物性の要素が備蓄母岩の決め手となった串木野のケースで説明したい。串木野で対象となった岩盤は、他の 2 基地がいずれも花崗岩であるのにたいして火山岩である。串木野周辺の地表に僅かに見出される安山岩類は概略の地質調査で中新世の海底火山と想定された。主要な地層は噴出した溶岩が海水で急冷されてバラバラとなった自破砕凝灰岩層（LB）、および、その上位の、海面が上昇した段階で噴出した通常の溶岩層（LA）、であった。自破砕凝灰岩層

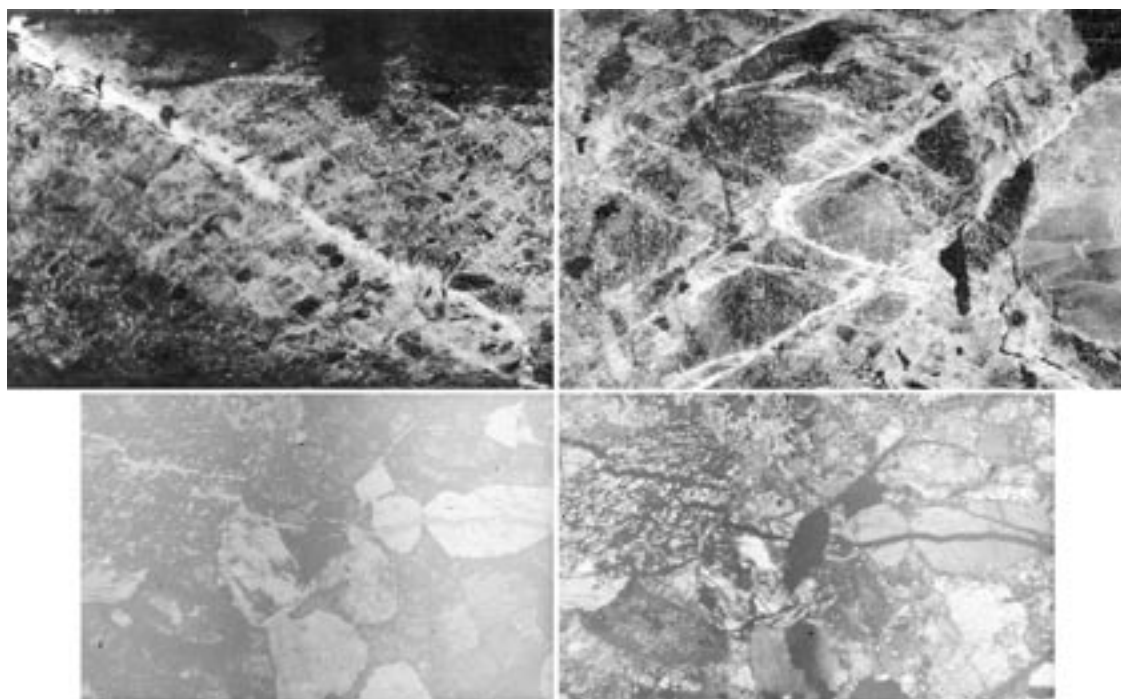


図 2 割れ目の拡大写真：上段左は中粒砂岩，単一剪断型；右は粗粒火山質砂岩，網目型．下段は中粒砂岩，網目型の薄片顕微鏡写真：右，ニコル．結晶サイズは上右が 1 2 mm，上左は 0.2 0.5 mm 程度(小出・星野，1967；Hoshino and Koide，1970)．

Fig. 2 Failure pattern of experimentally deformed specimens. Left upper shows *single shear* in medium sandstone, 0.2 0.5 mm in grain-size, and right upper shows *network shear* in coarse volcanic sandstone, 1 2 mm in grain-size. The lower two are microscopic photos of *network shear* mode in the medium sandstone. The right with Nicol, (Koide and Hoshino, 1967; Hoshino and Koide, 1970).

は部分的に大きな角礫を含むことがあるが全体に緻密で断層，割れ目が非常に少ない，明らかに延性度の大きな岩盤で適度の透水性をもっていた。これに対して，溶岩層は堅硬で，強度，脆性度が大きな岩盤であったが，節理・層理面が多数存在する事が原因となって透水係数が過大であった。このような観察の結果，この時には初期の段階から空洞建設対象を LB 層にしぼり，爾後の調査はボーリングによって LB の三次元的分布を確認することを第一目標とした。LB 層は特異な成因の火山岩層であるためにはたして岩相，岩質が急に変わることがないか，必要な厚さが何処まで続くか，を懸念しながらの調査であったが，4 年間のボーリング調査の結果，幸運に恵まれて，目標とされた 150 万キロリットル原油を貯蔵する，高

さ 22 m，幅 18 m，長さ 555 m のトンネル 10 本を収納するに十分な LB 岩盤の広がりを確認して，建設工事に移ったのは 1987 年であった(図 3；Hoshino, 1993)。

延性度の高い自破砕凝灰岩層(LB)は岩盤としては中欧の石灰岩タイプである。これに対して，菊間，久慈の花崗岩は脆性岩盤で北欧の堅硬変成岩タイプである。勤勉な日本人は期せずして欧米の 2 タイプの地下備蓄タンクを手に入れる事ができたのである。

V. あとがき

石油地下備蓄プロジェクトは資源エネルギー庁の研究会を発足から数えると実に 20 年の長丁場であった。個人的には地質調査所でしこしこ

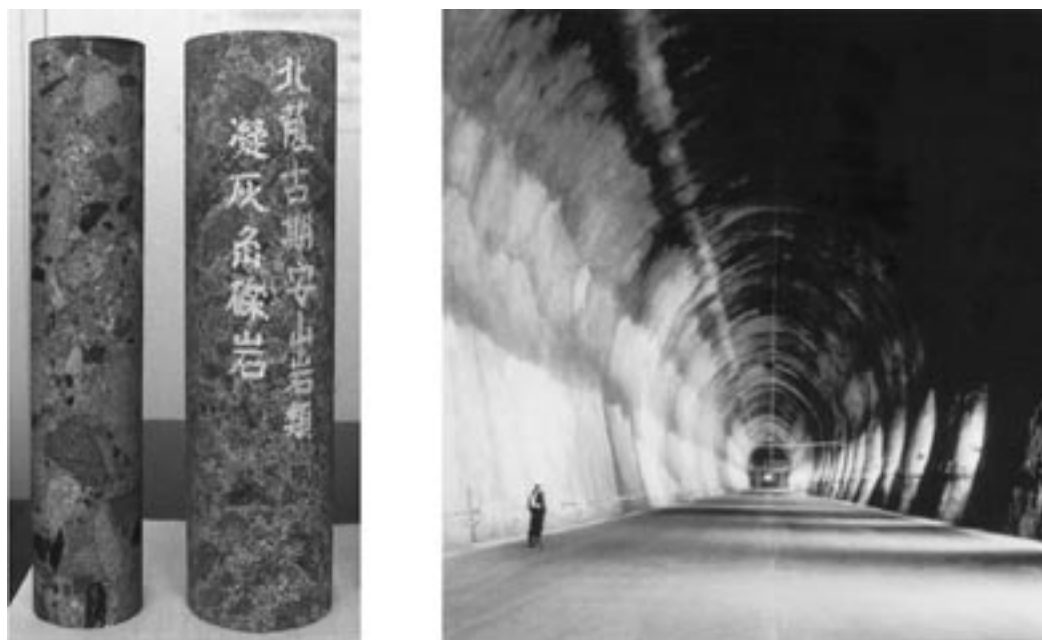


図 3 右は串木野基地に完成した貯油空洞。人物は巨大空洞の大きさを実感する助けになるであろう。左は母岩，中新世凝灰角礫岩 (LB) のボーリング・コア。

Fig. 3 Underground cavern for oil storage completed in Kushikino pyroclastic rock. Its dimensions are 22 m in height, 18 m in width, and 555 m in length. A man is standing on the floor to give an idea of the huge dimensions of the cavern. The left photo shows the cores of the pyroclastic rocks, Miocene tuff breccia (LB).

やっていた岩石高圧実験が思いがけないきっかけで実験室とは比較にならない大きなスケールの現場を体験することができたのは幸運であった。振り返ってみると、現場では誰からも岩石物性とか岩の力学とかの言葉は聞かなかったような気がする。しかし、誰もが、目の前の岩の中に、岩盤の深い底に石油をしっかりと閉じ込める空間を掘りあげるのだという共通の目標を意識していたと思う。大きな目標を共有しているという信頼感で結ばれた、Rock Mechanics よりも Human Mechanics こそが大プロジェクトを成功に導いたのだと信じたい。

文 献

Griggs, D. and Handin, J. (1960) Observation on fracture and a hypothesis of earthquakes. *Geological Society of America Memoir 79, Rock Deformation*, 347-373.

Handin, J. (1966) Strength and ductility. *Geological Society of America Memoir 97, Handbook of Physical Constants*, 223-289.

星野一男 (1964) モーニングサイドハイツ日より、アメリカ鉱山技術学会と岩石物性。地質ニュース, 117, 38-57.

星野一男 (1966a) 最近のアメリカ構造地質学会。地質ニュース, 139, 47-53.

星野一男 (1966b) 最近のアメリカ構造地質学会。地質ニュース, 140, 29-35.

星野一男 (1966c) 動き始めた高圧岩石変形試験機。地質ニュース, 144, 30-31.

星野一男 (1979) わが国に於ける石油地下備蓄の岩盤条件。基礎工, 79, 14-21.

星野一男 (1980) 石油地下貯蔵の適地調査。応用地質, 21, 216-223.

星野一男 (1983) 菊間石油地下備蓄実証実験プラント()。地質ニュース, 350, 6-18.

星野一男 (1984a) 菊間石油地下備蓄実証実験プラント()。地質ニュース, 353, 48-62.

星野一男 (1984b) 岩石の物性を支配する地質要因について。第6回岩の力学論文集, 145-150.

Hoshino, K. (1993) Construction of underground

- caverns for petroleum storage in orogenic Areas: Geological stability. *Eng. Geol.*, **35**, 199-205.
- 星野一男 (2000) 地下石油備蓄プロジェクトの25年を回顧して 深部岩盤に対する地質調査の一例として. *岩の力学ニュース*, **57**, 1-4.
- 星野一男・古見喜八郎 (1998) 地下空間利用のための地盤調査. *基礎工*, **26** **3**, 65-69.
- 星野一男・加藤碩一・田中荘一・小俣 明・森口安宏・服部昌樹・今村哲己 (2001) 本邦産岩石の深部物性データ集. *地質調査総合センター速報 No.23*, 479p.
- Hoshino, K. and Koide, H. (1970) Process of deformation of the sedimentary rocks. *Proceedings of 2nd. Congress, ISRM, Beograd*, 41-43.
- Hoshino, K., Koide, H., Inami, K., Iwamura, S. and Mitsui, S. (1972) Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressure. *Geological Survey of Japan, Special Report No.244*, 200p, with 23 plates.
- 小出 仁・星野一男 (1967) 三軸下の岩石中の微小割れ目の発達について (序報). *地震*, **20**, 85-97.
- 日本地下石油備蓄株式会社 (1996) 日本地下石油備蓄10年史.