岩石の破壊靱性に及ぼす封圧および間隙水圧の影響*

松 木 浩 二¹ 青 木 智 幸²

[UDC 622.834]

The Effect of Confining and Pore Pressures on Fracture Toughness of Rocks

by Koji MATSUKI¹ and Tomoyuki AOKI²

1. Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980

2. Technology Research Center, Taisei Corporation

Four-point bending tests were carried out in a pressure vessel in order to know the effect of both confining pressure and pore pressure on fracture toughness of Ogino tuff, Tohoku marble and Inada granite. In the first experiment dried specimens were sealed with vinyl film and copper foil to know the effect of confining pressure and in the second experiment water saturated specimens were supplied in pressurized water without sealing to know the effect of pore pressure which is equal to confining pressure. A fatigue crack of 2~3 mm in length was created from the tip of a notch prior to testing and the fracture toughness K_{IQ} was evaluated by 5% offset method.

Main results obtained in this work are summarized as follows:

- (1) The effect of confining pressure on fracture toughness is different between Ogino tuff and the crystalline rocks of Inada granite and Tohoku marble. The fracture toughness of the crystalline rocks significantly increases with confining pressure while that of Ogino tuff increases slightly.
- (2) Fracture grows more straightly with confining pressure for all the rocks.
- (3) The closure of pre-existing cracks in the directions parallel to the notch plane due to the components of confining pressure in those directions enhances the resistance against the fracture growth and also forces the crack to grow more straightly.
- (4) Fracture toughness of water saturated specimen under atmospheric pressure decreases to about 90% of dried specimen for the crystalline rocks and to about 50% for Ogino tuff.
- (5) Fracture toughness of the crystalline rocks can be described with the effective confining pressure where as that of Ogino tuff remarkably increases with pore pressure which is equal to confining pressure. This phenomenon in Ogino tuff seems to be due to the change of microstructure with pore and confining pressures since the main component of the rock is the weak minerals such as zeolite and montmorillonite.

KEY WORDS: Rock, Fracture Toughness, Confining Pressure, Pore Pressure, Water Content

1. 緒 言

岩石の破壊靱性を知ることは、単に岩石の破壊過程の理解という基礎的な分野のみならず、地熱開発や採油における地下刺激法または地圧計測法としての水圧破碎技術¹⁾や地下深部における大空洞の安定性評価²⁾、さらには岩石発破などの各種岩盤掘削法による掘削性の評価³⁾など工学的問題にとっても重要である。このため、岩の力学国際学会 (ISRM) では、大気圧下における岩石の標準的破壊靱性試験法を制定した⁴⁾。しかし、このような実際問題に岩石の破壊靱性を応用しようとする場合、大気圧下における破壊靱性のみならず、岩盤が実際に置かれている状態における破壊靱性を知る必要があり、含水状態、地圧ならびに間隙水圧が破壊靱性に与える影響を明らかにする必要がある。

これまでの研究としては、Schmidtら⁵⁾が片側切り欠きを有する試験片の引張試験により石灰岩の破壊靱性に及ぼす封圧の影響を明らかにし、小林ら⁶⁾は引き裂き試験を用いて、また小杉⁷⁾は中空円筒の内圧試験により岩石の破壊靱性の封圧依存性を明らかにしている。しかし、これまでの研究の多くはいわゆる硬岩を主たる対象にしており、また間隙水圧の影響に関する研究は殆ど無いのが現状である。

本研究では、3種類の岩石について、封圧下および封圧と等しい間隙水圧が作用した場合の四点曲げ試験を行い、岩石のモードI破壊靱性に及ぼす封圧、含水状態および間隙水圧の影響について検討した。

2. 実 験 方 法

2・1 岩石試料

供試岩石は、福島県耶麻郡高郷村産の荻野凝灰岩 (以下、単に凝灰岩、図中の略号OT)、岩手県東磐井郡大東町産の東北大理石 (以下、単に大理石、図中の略号TM) および茨城県笠間市産

* 1990年4月24日受付 8月3日受理
1. 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科
2. 正会員 大成建設 (株) 技術研究所
キーワード: 岩石, 破壊靱性, 封圧, 間隙水圧, 含水比

Table 1 Mechanical and physical properties of rocks.

	apparent specific gravity (-)	effective porosity (%)	P-wave velocity (km/sec)	uniaxial tensile strength (MPa)	uniaxial compressive strength (MPa)
Ogino tuff	1.72	26.4	2.64	5.61	56.9
Tohoku marble	2.70	0.77	2.56	4.77	67.5
Inada granite	2.63	0.73	4.21	5.82	203

の稲田花崗岩（以下、単に花崗岩、図中の略号 I G）の3岩種である。

凝灰岩は主として細粒火山ガラス片からなり、極少量の石英、斜長石および黒雲母を含む。ガラス片の大部分は沸石化および粘土鉱物化（モンモリロナイト化）している。大理石は、ほぼ等粒の方解石の他形結晶で、結晶はへき開や双晶が発達しており、粒径は0.4～1.5 mmである。花崗岩の主成分は石英、正長石、微斜長石、斜長石、黒雲母で、長石はへき開が発達し、石英は割れ目が多い。石英の粒径は、3～4 mmが多く、長石は2～3 mmが多い。

それぞれの岩石の物理的および力学的性質を表1に示す。なお、P波速度は200 kHz 超音波パルス伝播法による。

2・2 試験装置ならびに試験方法

図1に試験装置の概略図を示す。図中、①は載荷用手動式油圧ポンプ、②は載荷用油圧ラム、③は載荷ピストン、④は容量24リットル、耐圧25 MPaの圧力容器、⑤は封圧用手動式油圧ポンプ、⑥は封圧計測用ブルドン管式圧力計、⑦は試験片、⑧は曲げモーメント載荷装置である。載荷装置の詳細を図2に示す。図中、①は球面座、②は曲げ荷重計測用円筒型ロードセル、③は載荷盤、④は荷重点用直径10 mmの鋼製丸棒（荷重点間隔80 mm）、⑤は試験片、⑥は支持点用直径10 mmの鋼製丸棒（支持点間隔160 mm）、⑦は支持台、⑧は開口変位測定用ナイフエッジ、⑨はき裂肩部開口変位測定用ひずみゲージ式クリップゲージである。なお、曲げ荷重用ロードセルが封圧の変動を検出しないようにするために、載荷盤と球面座には円孔が設けてあり、圧力媒体がロードセル内に入るようになっている。

試験片は、高さ40 mm、長さ約165 mmであり、幅は、凝灰岩と大理石は20 mm、花崗岩は粒径を考慮して40 mmとした。すべての試験片について、幅0.45 mmのダイヤモンドブレード、さらに先

端部の整形のために幅0.15 mmのレジノイドブレードを用いて長さ15 mmの直線的ノッチを作製した後、大気圧下、乾燥状態で破壊荷重の70～80%の荷重で1 Hzの片振り変位を与えて長さ2～3 mmの疲労き裂を導入し、予き裂とした。従って、予き裂の全長は17～18 mmである。なお、疲労き裂長はアセトンなどを用いて実測し、両側の平均値を用いた。また、試験に際しては、クリップゲージからのき裂肩部開口変位（CMOD, Crack Mouth Opening Displacement）とともにロードセルからの荷重をX-Yレコーダに入力し、荷重-CMOD線図を描かせた。なお、本研究では曲げモーメントの載荷に手動ポンプを用いたため変位速度の厳密な制御は行っていないが、曲げモーメントの載荷開始から試験終了までの時間は1～2分である。

封圧下の試験では、試験片を2週間以上デシケータ中で乾燥させた後、ノッチ面を除く部分を厚さ0.1 mmのビニールシートで被覆し、疲労き裂を除く上下のノッチ面はその前縁も含めて厚さ0.02 mmの銅箔で被覆した。また、試験片を被覆せず封圧＝間隙水压を加える試験では、圧力媒体として水道水を用い、試験片を原則として10日間水中に放置した後、真空ポンプを用いて減圧脱気して試験に供した。なお、水中への放置期間としては、このほかに2～4.5カ月間も併せて行い、水浸時間の影響も検討した。両試験における封圧は、大気圧も含めて0, 7.85, 15.7, 23.5 MPaであり、各条件について3～4個試験に供した。

3. 応力拡大係数と破壊靱性の評価

封圧下の四点曲げ試験における境界条件は図3に示すようであ

Fig. 1 A schematic diagram of testing apparatus. (1 pressure pump for bending moment, 2 ram, 3 loading piston, 4 pressure vessel, 5 pressure pump for confining pressure, 6 pressure gauge, 7 specimen, 8 loading apparatus)

Fig. 2 A schematic diagram of loading apparatus. (1 spherical seat, 2 load cell, 3 loading platen, 4 loading rollers, 5 specimen, 6 supporting rollers, 7 supporting plate, 8 knife edges, 9 clip gauge for measuring CMOD)

Fig. 3 Boundary condition in four-point bending test under confining pressure. (a: crack length, c: the length of fatigue crack, W: height of specimen, M: bending moment, p: confining pressure)

る。応力拡大係数は、曲げモーメント M による K_{IM} 、試験片軸方向の封圧成分による K_{IP} および疲労き裂を除くノッチ面に作用する封圧による K_{IB} を重ね合わせるにより得られる。前二者についてはそれぞれ帯板に曲げモーメントが作用する場合の解⁸⁾ および帯板軸方向に引張応力が作用する場合の解⁹⁾ の符号を反転して用いられたい。ノッチ面に静水圧が作用する場合については、き裂面に任意の圧力分布が作用する場合の Bueckner の解⁹⁾ を用いることにより、図 3 の記号を用いて次式で与えられる。

$$K_{IB} = (2W/\pi)^{0.5} H(\xi, \lambda) p, \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\xi = a/W$, $\lambda = c/a$ であり、

$$\left. \begin{aligned} H(\xi, \lambda) &= \xi^{0.5} \{ 2\lambda^{0.5} + 2m_1\lambda^{1.5}/3 + 0.4m_2\lambda^{2.5} \}, \\ m_1 &= 0.6147 + 17.1844\xi^2 + 8.7822\xi^6, \\ m_2 &= 0.2502 + 3.2889\xi^2 + 70.0444\xi^6. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

なお、封圧のうち、試験片軸方向以外の成分は応力拡大係数に直接的な影響を及ぼさない。また、試験片を被覆せず封圧＝間隙水圧を加えた試験における応力拡大係数は曲げモーメントによる K_{IM} のみである。

後に示すように、曲げモーメント-CMOD 線図は、その初期においてかなりの非線形性を示すが、ある荷重レベル以上では線

Fig. 4 Bending moment-CMOD diagram of Ogino tuff for (a) under confining pressure and (b) in pressurized water.

形部分が認められるので、本研究では 5% オフセット法¹⁰⁾ を用いて破壊靱性 K_Q を求めた。従って、き裂の初生に関する破壊靱性を求めたことになる。

4. 曲げモーメント-CMOD 線図および破壊靱性に及ぼす封圧と間隙水圧の影響

4.1 曲げモーメント-CMOD 線図

図 4～6 は、それぞれ、凝灰岩、大理石および花崗岩の単位幅当たりの曲げモーメント-CMOD 線図である。ただし、(a) は封圧下であり、(b) は水中において封圧と同じ間隙水圧を作用させた場合である。また、図中の矢印は 5% オフセット法で求めた破壊靱性の評価点である。なお、これらの曲げモーメント-CMOD 線図における終端の矢印は急激な破断を生じた点である。

封圧下の試験では、いずれの岩石も封圧とともに最大曲げモーメントが増加しかつ大気圧下と比べるとき裂の初生以後大きな非線形性を示しながら曲げモーメントが単調に増加する区間が長い。これは、封圧の作用のためにき裂が安定に成長するためである¹¹⁾。ただし、封圧が大きいくほど破断時の CMOD が小さくなる傾向が認められるが、これは、本研究で用いた試験片の被覆方法では封圧が高くなるとともに小さな開口変位で被覆が破れるためであると思われる。封圧＝間隙水圧が作用した場合の曲げモーメント-CMOD 線図は、凝灰岩と結晶質岩石である大理石や花崗岩で著しく異なっている。大理石や花崗岩では、封圧＝間隙水圧を加えても飽和含水状態の大気圧下と殆ど同じであるのに対し、凝灰岩の場合は、最大曲げモーメント前の非線形部が封圧＝間隙水圧とともに小さくなっているように、封圧＝間隙水圧により最大曲げモーメントが増加するとともに著しく線形のかつ脆的になっている。

4.2 破壊靱性

図 7 は、それぞれの岩石について破壊靱性 K_Q と封圧 (図中、白丸) または封圧＝間隙水圧 (図中、黒丸または黒四角) の関係を示したものである。なお、封圧＝間隙水圧の場合については水浸

Fig. 5 Bending moment-CMOD diagram of Tohoku marble for (a) under confining pressure and (b) in pressurized water.

Fig. 6 Bending moment-CMOD diagram of Inada granite for (a) under confining pressure and (b) in pressurized water.

時間の異なる場合も示してあるが、10日間と2～4.5カ月間でほとんど変わらないことがわかる。

全ての岩石とも乾燥状態試料の破壊靱性は封圧とともに増加しているが、増加傾向は結晶質岩石と凝灰岩ではかなり異なっている。結晶質岩石の K_Q が封圧とともに急増しているのに対し、凝灰岩に対する封圧の影響は小さく、封圧が15.7MPaまでは大気圧下とほぼ同じである。この結晶質岩石の傾向は、Schmidtらによる石灰石に関する結果⁴⁾と同様である。封圧が23.5MPaの場合を大気圧下と比較すると、凝灰岩で1.1倍、大理石で1.8倍、花崗岩で1.6倍である。

水中において試験片を被覆しない場合の破壊靱性 K_Q について、まず大気圧下における飽和含水状態を乾燥状態と比較すると、結晶質岩石である大理石と花崗岩ではそれぞれ0.94、0.91倍とやや小さくなる程度であるのに対して、凝灰岩では0.54倍と著しく低

下している。これは、既に述べたように、凝灰岩にはモンモリロナイトなどの粘土鉱物が含まれるために、これらの鉱物が水を含むことにより膨潤して弱化したためであると考えられる¹²⁾。

一方、封圧と同じ大きさの間隙水圧を加えた場合の効果も大理石や花崗岩と凝灰岩では著しく異なっている。大理石や花崗岩では、本研究の範囲内の封圧＝間隙水圧では大気圧下とほとんど変わらないのに対して、凝灰岩では封圧＝間隙水圧の増加とともに初め K_Q がほぼ直線的に増加し、その後増加率が小さくなっている。凝灰岩の場合、封圧＝間隙水圧が23.5MPaの場合を大気圧下と比較すると5.9倍にもなっており、23.5MPaの封圧のみが作用した場合と比較しても2.8倍である。このように、大理石や花崗岩などの結晶質岩石の破壊靱性に対しては力学的条件を有効応力で評価することが可能であるが、凝灰岩に対しては単なる有効応力では破壊靱性を記述できないことがわかる。

本研究での条件は封圧＝間隙水圧といういわば特殊な場合であるが、封圧より小さな任意の間隙水圧が作用する場合は、図7に示した乾燥状態と飽和含水状態の中間にくることになる。

4・3 破壊形態ならびに考察

図8は、それぞれの岩石について大気圧下乾燥状態および封圧23.5MPa乾燥状態における破面写真を示したものである。ただし、凝灰岩については封圧＝間隙水圧が23.5MPaの場合も示してある。大気圧下乾燥状態では、どの岩石とも破面全体の凹凸が比較的大きいのに対し、封圧下乾燥状態ではき裂成長の初期段階において比較的平坦な破面が形成された後に大きな凹凸の部分が生じている。この封圧下での大きな凹凸は被覆が破れて圧力媒体がき裂面に浸入したことによって生じた試験片の急激な破断に伴うものである¹¹⁾。このように、封圧下での急激な破断時を除けば、大気圧下ではジグザグのき裂経路であったものが封圧とともにより直線的になる。岩石は多かれ少なかれ先在欠陥を含んでおり、これは特に結晶質岩石の粒界または粒内にクラックとして多く存在する。従って、結晶質岩石の場合、大気圧下ではき裂が先在クラックなどの弱い部分を選択的に進むためにジグザグの経路をとる。例えば、東北大理石の場合、粒界が緩んでいるために約90%が粒界に沿って成長する¹³⁾。凝灰岩はその殆どが沸石や粘土鉱物からなるが、この場合でもその弱い部分や方向を選択的に進む結果ジグザグになると考えられる。このようなき裂の成長経路は決して二次元的なものではなく三次元的構造を有する。一方、封圧が加わった場合、ノッチ面と垂直な方向については、ノッチ先端

Fig. 7 The effect of confining pressure on K_Q (open circles) and the effect of confining and pore pressures on K_Q (solid symbols) for (a) Ogino tuff, (b) Tohoku marble and (c) Inada granite.

Fig. 8 The fracture surfaces of Ogino tuff, Tohoku marble and Inada granite for some conditions of confining and pore pressures.

の応力場が封圧に打ち勝って引張応力になる結果き裂の成長が起こるが、ノッチ面と平行な方向のうちノッチ軸方向はノッチ先端近傍以外は圧縮応力が作用し、またノッチ軸と垂直な方向は全領域にわたって圧縮応力下にある。従って、先在き裂などの方向性のある弱面はそれらの圧縮応力の方向に閉じ摩擦力が作用する。その結果、大気圧下に比べてノッチ面と垂直な引張応力のみでは先在き裂は開口しにくくなり、き裂の成長に対する抵抗が大きくなると同時にき裂先端近傍を越えてノッチ面外方向に成長しにくくなる。先在欠陥がクラック状である結晶質岩石の破壊靱性が封圧とともに大きく増加しかつき裂がより直線的になるのはこのためであると考えられる。他方、凝灰岩の場合、先在欠陥は主として丸い空隙状のものであり、封圧によって容易には閉じない。このため、凝灰岩の破壊靱性に及ぼす封圧の効果は小さい。しかし、主としてノッチ軸方向の封圧成分によってノッチ面外方向に成長しにくいのは同様である。このように、地圧によって周囲より圧縮応力が作用する場合の岩石の破壊靱性は、成長するき裂面と平行な方向の圧縮応力により岩石の微視的状态が変化するために増加すると考えられ、その際三次元的形状を有するクラック状の先在欠陥が大きな役割を果たすと考えられる。

封圧＝間隙水圧を作用させた場合の破面については、大理石と花崗岩の場合、いずれの条件でも大気圧下乾燥状態とほとんど同じであった。これは、封圧と等しい間隙水圧が作用しているために先在クラックが新たに閉じることもなく力学的には大気圧下と同じであるためであり、このため曲げモーメント-CMOD線図や破壊靱性に対する封圧＝間隙水圧の影響が認められない。ただし、同じ大気圧下で飽和含水状態の破壊靱性の方が乾燥状態より小さいのは、先在き裂が水で満たされることによりもともと微視的に接触しているき裂面の摩擦力が小さくなることならびに水により応力腐食割れが助長されることなどによると考えられる。他方、

凝灰岩の場合、大気圧下飽和含水状態では大気圧下乾燥状態と同様に破面全体の凹凸が比較的大きかったのに対して、図8に示すように封圧＝間隙水圧とともに破面全体が極めて平坦になっており、かつ斜め方向に交差する縞模様が観察される。すなわち、見掛け上乾燥状態でかなりの高封圧を受けた状態のようである。現在までのところ、このような縞模様の発生機構や破壊靱性の増加機構の解明は今後の研究を待たねばならないが、外部から封圧、内部から間隙水圧を受けることにより構成鉱物である沸石などの組織・構造が変化し、より強固になったためであると思われる。一方、大理石や花崗岩の構成鉱物はもともと十分強固であり、本研究で用いた封圧＝間隙水圧の範囲ではその力学的性質が変化するとは考えにくい。このように、封圧＝間隙水圧によって岩石の微視的组织・構造が変化しない場合についてのみ有効応力の法則が成立することがわかる。

5. 結 言

四点曲げ試験により3種の岩石のモードI破壊靱性に及ぼす封圧、含水状態および間隙水圧の影響を調べた結果、次のような知見を得た。

(1) 乾燥状態試料の破壊靱性に及ぼす封圧の効果は結晶質岩石である東北大理石や稲田花崗岩と堆積岩である荻野凝灰岩で異なる。前者の破壊靱性が封圧とともに急激に増加するのに対して後者への封圧の影響は比較的小さい。

(2) いずれの岩石においても封圧により破面が平坦になる。

(3) 封圧による破壊靱性の増加は、封圧によって生ずるノッチ面と平行な方向の圧縮応力により先在き裂が閉じ開口しにくくなることによってき裂進展に対する抵抗が増加するためであると考えられた。

(4) 大気圧下飽和含水状態の破壊靱性は、結晶質岩石である東

北大理石や稲田花崗岩で乾燥状態の約90%であるのに対し、荻野凝灰岩では約50%まで低下する。

(5) 結晶質岩石である東北大理石や稲田花崗岩の破壊靱性が有効応力の法則で記述できるのに対し、沸石などを含む荻野凝灰岩の破壊靱性には有効応力の法則が成立せず、封圧＝間隙水圧とともに著しく増加した。

最後に本研究を遂行するに当たりご指導いただいた故小林良二教授（東北大学工学部）に深く感謝申し上げるとともに心よりご冥福をお祈りする。また、本研究をまとめるに当たり貴重なご教示をいただいた鈴木舜一教授（東北大学工学部）に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Takahashi, H. : Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy, ed. Nemat-Nasser, S. et al., Martinus Nijhoff Pub., 291~305, (1983)
- 2) Matsuki, K. : Proc. of the 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, 1071~1075, (1985)
- 3) Matsuki, K. : Proc. of Int. Waterjet Sympo., Beijing, 3.32~3.42, (1987)
- 4) ISRM Commission on Testing Method : Suggested Methods for Determining Fracture Toughness of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 25, 71~96, (1988)
- 5) Schmidt, R. A. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 14, 289~293, (1977)
- 6) 小林良二他：日本鉱業会誌, 96 [1114], 879~884, (1980)
- 7) 小杉昌幸：日本鉱業会誌, 102 [1182], 469~475, (1986)
- 8) 岡村弘之：線形破壊力学入門, 培風館, (1981)
- 9) Bueckner, H. F. : Mechanics of Fracture, 1, ed. Sih, G. C., Noordhoff Int. Pub., 239~314, (1973)
- 10) ASTM Standard, E 399-81, (1981)
- 11) 松木浩二他：日本鉱業会誌, 97 [1117], 161~166, (1981)
- 12) 日本粘土学会：粘土ハンドブック, 技報堂, 1091~1092, (1987)
- 13) S. S. ハシブアン他：資源・素材学会春季大会講演要旨集, 321~322, (1990)

新刊案内

中村悦郎監修

“環境シミュレーションシリーズ”

第1巻 地球環境問題

(平成2年11月発行予定)

- (1) 長距離輸送
 - 酸性雨
 - 放射性物質
 - オゾン層
- (2) エネルギーと二酸化炭素循環
 - エネルギーモデル
 - (二酸化炭素発生量推定)
 - 炭素循環モデル
- (3) 地球温暖化 / 気候変動
 - 放射平衡モデル
 - 大循環モデル

第2巻 大気のシミュレーション

(平成3年2月発行予定)

- (1) 大気の流れ
 - 大規模な流れ (シノプステックスケール)
 - 局地風系 (メソスケール)
 - 境界層 (メソ-マイクロスケール)

(2) 拡散と沈着

差分法
拡散式
ランダムウォークモデル
沈着とウォッシュアウト

(3) 騒音

音線方程式
ヘルムホルツの音波方程式

第3巻 水圏のシミュレーション

(平成3年6月発行予定)

- (1) 水の流れ
 - 河川, 湖沼, 内湾, 海洋, 地下水
 - (2) 拡散
 - 差分法
 - 移行モデル
 - (3) 生態系
 - 生態系モデル
- <各A5判・約250頁・予価3,000円>

推薦のことば

人間が自ら作った科学技術の進歩に伴う環境破壊について本書は、幾つかの実例と対策について、分かり易くシミュレーションしている。本書ではこれから起こり得るであろう環境破壊の原因追求とその対策について専門家の立場から、一般の理工系技術者やこの分野の研究に興味をもつ研究者を対象に易しくまとめている。

工学全般から見て環境問題は、今後もっとも重大かつ緊急な研究テーマであろう。まことに時宜を得たものと、本書を推薦したい。(抜粋)

1990年8月

(日本工学会 須田 了)

白亜書房：TEL 03-253-5905

FAX 03-253-5906