唐澤 廣和¹ 三澤 茂夫¹ 吉田 覚²

[UDC 622.23.051]

Studies on Optimum Rake Angles for PDC Bits

by Hirokazu KARASAWA¹, Shigeo MISAWA¹ and Satoru YOSHIDA²

1. National Institute for Resources and Environment, MITI, Onogawa, Tsukuba 305

2. Former National Institute for Resources and Environment

The effect of rake angles on the performance of polycrystalline diamond compact (PDC) bits was investigated by rock cutting tests, drilling tests and durability tests. Two types of PDC cutters, a conventional one and a new one, were used for these tests. The structure of the new PDC cutter, whose diamond layer is protected by a tungsten carbide layer, is different from that of the conventional one. Rake angles of bits for the rock cutting tests were changed between negative 10 deg. and negative 40 deg. Core bits for the drilling and the durability tests had both backrake and siderake angles of negative 5 deg., 10 deg., 15 deg. and 20 deg. Marble, granite and two types of andesite were used for the tests. The results are summarized as follows:

1. Horizontal and vertical forces were minimized at negative rake angle of 10 deg. independent of rock type.
2. Core bits with negative 10 deg. and 15 deg. both backrake and siderake angles showed better performance concerning penetration rate and cutter strength.
3. The new PDC core bit showed higher penetration rate and better cutter strength than the conventional PDC core bit. The new PDC cutter may be able to apply to drilling of hard formations.

KEY WORDS: PDC Bit, Rake Angle, Drilling

1. はじめに

多結晶体のダイヤモンド、PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 刃先材は1970年代半ばに、岩盤掘削ビット用の新素材として実用化された。この刃先材は、主として人造ダイヤモンド粉末とタングステンカーバイド粉末を材料とし、それらを圧力5～6 GPa、温度1300～1500℃程度¹⁾の超高压、高温下で焼結したもので、直径8.2～50.8mmのものが製品化されている。PDC刃先材を用いたビット(PDCビット)は、刃先材の直径がサーフェイスセットタイプなどのダイヤモンドビットに用いられている単結晶ダイヤモンドに比べて非常に大きいため、岩石の掘削におけるビット1回転当たりの切削体積が大きく、低速回転で大きな掘進率を得ることができると同時に、多結晶ダイヤモンド粒子の自生作用(self-sharpening)により、単結晶ダイヤモンドに比べて摩擦による掘進率の低下が小さいなどの利点を有している。

PDCビットは以上のような利点を有するが、一方で、硬質岩の掘削において、刃先材を構成するダイヤモンド層の欠損や剥離が発生するため、適用範囲が均質な軟～中硬岩に制約されている。

た。筆者らは、PDCビットの適用範囲を拡大し、地熱井等の硬質岩も掘削可能なビットの開発を目的として、直線切削実験²⁾によりPDC刃先材の硬質岩への適用性を基礎的に検討するとともに、回転掘削実験³⁾により刃先材のビット台金への取付角(レーキ角)および刃先構造の検討を行ってきた。

上記回転掘削実験においては、レーキ角^{b)}を20°～40°の範囲で変化させた外径66mmのコアビットを用いて、レーキ角が掘進率や刃先強度^{c)}などのビット性能に及ぼす影響を検討した。その結果、一般にレーキ角が20°のビットが最も優れた性能を示し、レーキ角を20°より小さい値に設定することによってビット性能はさらに向上すると推察された。また、試作した新型刃先材は、花こう岩の掘削において市販刃先材に比べ、掘進率および刃先強度の点で優れていることも確認された。従って、20°以下のレーキ角についてビット性能とレーキ角の関係を究明し、さらに、新型刃先材の性能を詳細に検討するため、直線切削実験、回転掘削実験および耐久試験を実施した。

2. レーキ角に関する従来の研究概要

レーキ角がPDCビットの性能に大きな影響を及ぼすため、頁岩、砂岩、大理石、安山岩および花こう岩などを対象とした切削および掘削実験⁴⁾により、最適レーキ角の検討が掘削関連分野において幅広く行われてきている。Hough⁵⁾がこれら実験結果のま

* 1991年3月19日受付 7月22日受理 資源・素材学会平成元年度春季大会および第11回ニュージーランド地熱集会以一部発表

1. 正会員 公害資源研究所資源開発部^{a)}

2. 元公害資源研究所資源開発部

キーワード: PDCビット, レーキ角, 掘削

a) 現 資源環境技術総合研究所地殻工学部 (1991年10月1日 名称変更)

b) 本論文でのレーキ角は負を正として表現した。

c) 刃先強度とは刃先の耐久損性を指す。

Fig. 1 Cross section of PDC cutter.

とめを詳細に報告しているのので、以下にその概要のみを述べる。切削実験の場合、 5° ～ 20° の範囲のレーキ角で切削抵抗が最小となっている。さらに、掘削用ビットのレーキ角にはバックレーキ角とサイドレーキ角があり、掘削実験ではビット性能に及ぼすバックレーキ角の影響がおもに検討され、 20° あるいは 25° のバックレーキ角が優れていると報告されている⁴⁾⁵⁾。

上記切削および掘削実験の各結果は、最適レーキ角が 5° から 25° の範囲に存在することを示しており、その値にばらつきが認められる。ばらつきの一因として、岩種による影響が考えられるものの、その原因は明確ではない。なお、ビットを製作する際のバックレーキ角は、一般に 15° または 20° が採用されている。

3. 実験

3.1 PDC刃先材

図1に、実験用ビットに用いた直径13.3mmの2種類のPDC刃先材の構造を示す。(a)は市販刃先材である。(b)は新型刃先材で、ダイヤモンド層の欠損を防止するため、岩石を切削する一部を除いてダイヤモンド層を厚さ0.2～0.3mmのタングステンカーバイド層で被覆してある。なお、両刃先材の材質は同一であり、市販されている数種類の刃先材の中では硬質岩の掘削に最も適しているものである²⁾。

3.2 実験用ビット

(1) 直線切削実験 単一の刃先材を取り付けた切削実験用のビットを図2に示す。切削実験用ビットは、市販刃先材のみを用いて製作し、ビットのレーキ角(すくい角)は、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° および 40° とした。なお、レーキ角が 10° 、 15° 、 20° および 25° のビットのクリアランス角(逃げ角)は、それぞれレーキ角と同じ値であるが、レーキ角が 30° と 40° のビットのクリアランス角は 10° に設定した。予備実験において、レーキ角およびクリアランス角が 30° と 40° のビットは岩石の切削を開始するのとはほとんど同時に刃先に欠損を生じた。この刃先の欠損は、レーキ角が約 30° 以上の場合においてクリアランス角をレーキ角とほぼ同じ値に設定すると、水平方向の力に対し、タングステンカーバイド層で支持されていないダイヤモンド層先端部の体積が増加する結果、水平方向の力に対する刃先先端部の強度が低下することによって生ずるものと考えられる。従って、ダイヤモンド層先端部を背面から支えるタングステンカーバイド層の体積を減らすために、上述のようにレーキ角が 30° と 40° のビットはクリアランス角を 10° とした。

(2) 回転掘削実験 市販および新型の両刃先材を用いて製作した掘削実験用コアビットを図3に示す。ビットには外径側に6個、内径側に6個合計12個の刃先材をろう付けにより取り付けた。刃先間の外径および内径はそれぞれ98.4と66.0mmである。図に示すように、レーキ角は、ビット進行方向と半径方向に対する刃先材の傾きを表すバックレーキ角とサイドレーキ角とがある。市販刃先材および新型刃先材コアビットともバックレーキ角とサイドレーキ角は同一であり、その値は 10° 、 15° 、 20° とした。両レーキ角の値を等しくした理由は、前出の研究³⁾において、掘進

Fig. 2 Bit for rock cutting test.

Fig. 3 Core bit for drilling test.

Table 1 New PDC core bits used for durability test.

No.	Backrake Angle ($^{\circ}$)	Siderake Angle ($^{\circ}$)	Number of Cutters
1	5	5	12
2	10	10	12
3	15	15	12
4	10	10	8

率に及ぼすバックレーキ角とサイドレーキ角の影響がほぼ同じという結果に基づくものである。

(3) 耐久試験 上記コアビットを用いた掘削実験により、 15° 以下のレーキ角が掘進率や刃先強度に優れ、かつ、新型刃先材は市販刃先材に比べ優れた性能を有することが明らかとなった。このため、新型刃先材を用いて、刃先取付数が12個で、バックレーキ角およびサイドレーキ角が表1のNo.1～3に示すコアビットを新規に製作し、耐久性に及ぼすレーキ角の影響を検討した。

さらに、刃先材の取付数と耐久性との関係を検討するために、表1のNo.4に示すバックレーキ角とサイドレーキ角の刃先取付数が8個のコアビット(内径側4個、外径側4個)による耐久試験を行い、No.4のビットと同一の両レーキ角を有するNo.2のコアビットと耐久性を比較した。耐久試験用コアビットの形状は、一部レーキ角や刃先数は異なるが、掘削実験用のものと同一である。

3.3 実験方法

(1) 直線切削実験 切削実験装置は、切削深さが所定の値になるように固定したビットに対して、油圧ラムにより岩石を移動させて切削を行う方式のものである(図4)。ビットにかかる力の測定は、水晶圧電素子を用いたスイスKISTLER社製9067A-4型をセンサとする三分力切削動力計により行った。

実験においては、切削速度、切削深さをそれぞれ5m/min、0.5mm一定とし、レーキ角の異なるビットを用いて秋吉大理石、三城目安山岩、新小松安山岩および沢入花こう岩を切削した。ビットにかかる主分力と背分力の測定に当たっては、データレコーダに収録された信号を400μsecのサンプリング速度でA/D変換し、それらを平均して求めた。表2に、供試岩石の機械的性質を示す。表中、上段の数値は切削実験に用いた岩石の値であり、下段の括弧内の数値は以下に述べる掘削実験および耐久試験に用いた岩石の値である。

(2) 回転掘削実験 実験には図5に示す掘削実験装置を用いたが、装置の詳細については既に報告⁶⁾してあるので省略する。

レーキ角の異なる市販および新型刃先材コアビットによる掘削実験は、三城目安山岩、新小松安山岩および沢入花こう岩に対して実施した。実験においては各ビット1個により上記3種類の岩

a: Bit slide motor, b: Piezoelectric dynamometer, c: Bit
d: Electric furnace, e: Rock, f: Hydraulic ram for rock fixing
g: Hydraulic ram for rock sliding

Fig. 4 Rock cutting machine.

Table 2 Mechanical properties of rock specimens.

Rock	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Akiyoshi Marble	59 (—)	4.4 (—)
Sanjome Andesite	74 (99)	4.9 (7.5)
Shinkomatsu Andesite	186 (179)	8.3 (9.9)
Sori Granite	144 (178)	7.8 (9.8)

Fig. 5 Drilling machine.

石を掘削したが、データに及ぼすビット摩耗の影響を小さくするため、三城目安山岩、新小松安山岩、沢入花こう岩の順に行った。実験は、ビット回転数を一定とし、ビット荷重を4~15kNの範囲で変化させて行った。また、ビット回転数は、各々の岩石について50, 80, 110rpmの3段階に変化させた。なお、掘削流体には清水を用い、流量は90 l/min一定とした。

(3) 耐久試験 耐久試験は上記の掘削実験装置(図5)を用いて行った。レーキ角および刃先数の異なる新型刃先材コアビットの耐久性は、沢入花こう岩を約12m掘削することにより評価した。試験はビット回転数を50rpm一定とし、掘進率が約5 cm/min一定になるようにビット荷重を調整して行った。掘削流体条件は、掘削実験の場合と同一である。

4. 実験結果および考察

4・1 直線切削実験

図6, 7に、それぞれレーキ角と主分力(F_h)、レーキ角と背分力(F_v)との関係を示す。レーキ角が $10^\circ \sim 40^\circ$ の範囲では、主分力と背分力は岩種にかかわらずレーキ角が大きくなるに従って、増大する傾向を示している。沢入花こう岩の場合は、 15° のレーキ角の方が 10° のレーキ角より若干、主分力および背分力が小さい値を示したが、全般的にはレーキ角が $10^\circ \sim 40^\circ$ の範囲ではレーキ角が 10° で主分力および背分力がほぼ最小となっている。

以上のように所定の切削深さを得るのに要する背分力は、小さいレーキ角の方が小さい。これは背分力を同一とすれば、小さいレーキ角の方が切削深さが大きくなることを示している。従って、実際の回転掘削用ビットで掘削する場合には、背分力がビット荷重に相当すると考えられるので、同一ビット荷重下では小さいレーキ角の方が大きな掘進率が得られると推定される。

なお、クリアランス角を 10° としたレーキ角が 30° と 40° のビットはレーキ角が 25° 以下のビットと比較して主分力および背分力が大きい値を示している。これは、クリアランス角、レーキ角いずれも 10° のビットの主分力および背分力が小さいことを勘案すれば、クリアランス角を小さくした影響ではなく、レーキ角が大きくなったことに起因するものとみなされる。

レーキ角が 25° のビットは、秋吉大理石を除いて、ダイヤモンド層に欠損が生じたため、データを得ることができなかった。し

Fig. 6 Effect of rake angle on horizontal force.

Fig. 7 Effect of rake angle on vertical force.

かし、クリアランス角を 10° としたレーキ角が 30° と 40° のビットは、今回、ダイヤモンド層に欠損が認められず良好な刃先状態を示した。前述のとおり予備実験において、レーキ角およびクリアランス角が 30° と 40° のビットは、ダイヤモンド層に欠損が生じた。これらのことから、レーキ角が 25° 以上のビットは主分力および背分力が大きくなるばかりでなく、クリアランス角を小さく設定しなければ刃先強度も低下することが分かる。

4・2 回転掘削実験

ビット回転数を変化させた市販および新型刃先材コアビットによる掘削実験では、いずれのビット回転数においても掘進率に及ぼすレーキ角の影響はほぼ同様な傾向を示したので、ビット回転数が50rpmの場合を例にとり、以下に掘削実験結果を示す。図8は、市販刃先材コアビットによる三城目安山岩、新小松安山岩および沢入花こう岩に対する実験結果である。また、図9に、新型刃先材コアビットによる上記岩石類に対する掘削実験結果を示した。図8、9中の10、15、20は、それぞれバックレーキ角およびサイドレーキ角が 10° 、 15° 、 20° のビットを表わしている。

市販刃先材コアビットの場合（図8）、レーキ角と掘進率との関係に規則性は認められないが、バックレーキ角およびサイドレーキ角が 10° のビットが 15° や 20° のビットに比べて掘進率が大きい傾向を示した。新型刃先材コアビットの場合（図9）、安山岩類では両レーキ角が 10° と 15° のビットが 20° のビットに比べて掘進率が大きく、花こう岩では 15° のビットが最も大きい掘進率を示した。

直線切削実験結果からは、前述のとおり同一ビット荷重下ではレーキ角が小さくなるほど掘進率が大きくなることが推測された。

しかし、掘削実験においてはレーキ角と掘進率の明瞭な関係は得られなかった。これは、掘進率がレーキ角のみによって左右されるのではなくこの他に、掘削にともなうPDC刃先材の刃先状態、すなわち、ダイヤモンド層の欠損あるいは摩耗幅の大小や岩石と接触する部分のダイヤモンド粒子の摩耗状態など複数の要因に影響されるためと考えられる。切削タイプのビットは、刃先の摩耗幅が大きくなると所定の掘進率を得るのに要するビット荷重が大きくなることが一般に知られている。ダイヤモンド粒子の自生作用があるPDCビットの場合、掘進率は摩耗幅などの他に、岩石と直接接する部分のダイヤモンド粒子の鋭利さにも影響されることが推測される。前述のレーキ角に関する従来の研究概要において、最適レーキ角にばらつきの認められることを述べ、その一因として岩種による影響をあげた。これ以外の原因として、掘進率はレーキ角ばかりでなく、上記した刃先状態にも影響されることが考えられる。

さらに、図8、9から明らかなように、市販刃先材コアビットと新型刃先材コアビットの掘進率は、三城目安山岩ではほぼ同一である。しかし、新小松安山岩や沢入花こう岩ではバックレーキ角およびサイドレーキ角が 10° や 15° の新型刃先材コアビットが同一レーキ角の市販刃先材コアビットよりかなり掘進率が大きく、硬質岩の掘削において新型刃先材は市販刃先材に比べて優れた性能を示した。この原因は、後述のように新型刃先材が市販刃先材と比較してダイヤモンド層の欠損が少ないことにありと考えられる。

図10、11は、3種類の岩石を掘削した後（総掘削長は約5m）の市販および新型刃先材コアビットの刃先状態を示したものであ

Fig. 8 Results of drilling test for conventional PDC core bits.

Fig. 9 Results of drilling test for new PDC core bits.

る。図中のA, B, Cは、それぞれバックレーキ角およびサイドレーキ角が 10° , 15° , 20° のビットの代表的な一例である。掘削実験後のこれら全ての刃先材を観察した結果、市販刃先材は、両レーキ角が小さくなるに従って

A : 10 deg. backrake & siderake angles
B : 15 deg. backrake & siderake angles
C : 20 deg. backrake & siderake angles

Fig. 10 Conventional PDC cutter after drilling test.

A : 10 deg. backrake & siderake angles
B : 15 deg. backrake & siderake angles
C : 20 deg. backrake & siderake angles

Fig. 11 New PDC cutter after drilling test.

Fig. 12 Result of durability test. (No. 1 bit shown in Table 1)

Fig. 13 Result of durability test. (No. 2 bit shown in Table 1)

Fig. 14 Result of durability test. (No. 3 bit shown in Table 1)

Fig. 15 Result of durability test. (No. 4 bit shown in Table 1)

ダイヤモンド層の欠損が小さくなる、すなわち刃先強度が大きくなることが明らかとなった。新型刃先材は、両レーキ角が 10° と 15° のビットの刃先材にダイヤモンド層の欠損がほとんど発生しなかったため両者に明瞭な相違は認められないが、 15° の方がダイヤモンド層の微細な欠損や摩耗がやや多く、市販刃先材の場合と同様に小さいレーキ角の方が刃先強度に関し、優れている傾向を示した。図10, 11から、新型刃先材は市販刃先材と比較してダイヤモンド層の欠損が少なく、新型刃先材の方が刃先強度が大きいことが分かる。

ビット寿命の向上を図る上で、刃先強度に優れたレーキ角の値を選択することが最も重要であると考えられる。新型刃先材コアビットについては、両レーキ角が 10° と 15° のビットに明瞭な刃先強度の相違は認められなかったが、一般に、バックレーキ角およびサイドレーキ角が小さくなると刃先強度が大きくなっていることから、小さいレーキ角のビットの方が大きなビット寿命が得られると推測される。

以上の回転掘削実験結果から、バックレーキ角およびサイドレーキ角が $10^\circ \sim 20^\circ$ の範囲において、一般に小さいレーキ角の方が掘進率や刃先強度の点で優れていることが明らかになった。掘削実験用コアビットはバックレーキ角とサイドレーキ角を同じ値で変化させており、本実験結果はビット性能とバックレーキ角のみの関係を示すものではない。しかし、切削実験結果も考慮すれば、PDCビットのバックレーキ角は、従来の一般のPDCビットに採用されている 15° あるいは 20° より 10° あるいは 15° の方がビット性能の点で優れていると推測される。

4.3 耐久試験

バックレーキ角およびサイドレーキ角が 5° , 10° , 15° で、刃先取付数が12個の新型刃先材コアビットによる沢入花こう岩に対する耐久試験結果を図12～14に示す。さらに図15は、両レーキ角が 10° 、刃先取付数が8個のコアビットによる沢入花こう岩に対する耐久試験結果である。

図12～14から、花こう岩を約12m掘削する際、ほぼ同一の掘進率を得るのに要するビット荷重は、両レーキ角が 10° , 15° , 5° のビットの順に大きいことが明らかである。両レーキ角が 10° と 15° のビットについてはビット荷重に大きな相違は認められないが、 5° のビットは 10° のビットに比べて2倍近いビット荷重を要している。大きなビット荷重は、岩石切削時に生ずる摩擦熱を増大させ、PDC刃先材の熱的劣化を促進させる可能性がある³⁾と同時に、ダイヤモンド層の欠損の原因となることから、 5° のバックレーキ角およびサイドレーキ角は、花こう岩の掘削において適切ではないと思われる。

沢入花こう岩を12m掘削した後の耐久試験用コアビットの刃先材の観察では、バックレーキ角およびサイドレーキ角が 15° のビットが両レーキ角が 5° や 10° のビットよりダイヤモンド層の欠損が少ない傾向が認められたが、ダイヤモンド層の欠損や摩耗に及ぼすレーキ角の影響を明瞭に把握するまでに至らなかった。また、刃先材の観察から、いずれのビットも一部の刃先材に比較的大きなダイヤモンド層の欠損や摩耗が認められるものの、良好な状態を示す刃先材も多く、ビット寿命の限界に達するまでには、まだかなりの長さの花こう岩の掘削が可能であることが容易に推測できる。

耐久試験ではレーキ角と刃先強度の明瞭な関係は把握できなかったものの、ほぼ同一の掘進率を得るためのビット荷重を考慮すれば、両レーキ角が 10° あるいは 15° のビットが 5° のビットよりビット寿命が大きいと推測できる。しかし、両レーキ角が 10° と 15° のビットのいずれがビット寿命の点で優れているかは確認で

きなかった。

両レーキ角が 10° で刃先取付数が8個のコアビットは、同じレーキ角を有する刃先取付数が12個のコアビットと比較して、同一あるいはやや小さいビット荷重でほぼ同一の掘進率が得られた(図13, 15)。これは、刃先取付数が8個のビットが刃先取付数が12個のビットに比べて1刃当たりの荷重が大きくなるため、1刃当たりの岩石切削体積が大きくなることに起因するものと考えられる。刃先強度の点に関しては、両ビットに大きな相違は認められなかった。耐久試験により、花こう岩の掘削において、刃先取付数が8個のコアビットも十分な性能を有することが明らかとなった。しかし、刃先取付数が8個および12個のコアビットとも本耐久試験において、ビット寿命の限界に達しなかったため、いずれのビットが経済的に有利であるかは確認できなかった。

5. 結 論

PDCビットの掘削性能に及ぼすレーキ角の影響を究明するとともに、新構造のPDC刃先材の性能を評価することを目的に、市販あるいは新型刃先材を用いたレーキ角の異なる実験用ビットにより各種岩石に対して直線切削、回転掘削実験および耐久試験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) レーキ角が $10^\circ \sim 40^\circ$ の範囲では、岩種にかかわらず、レーキ角が小さくなるに従って主分力および背分力は減少する。また、レーキ角およびクリアランス角が 25° 以上になると刃先強度が低下し、ダイヤモンド層が欠損しやすくなる。

(2) バックレーキ角およびサイドレーキ角が $10^\circ \sim 20^\circ$ の範囲において、掘進率および刃先強度の点で、市販刃先材は 10° の両レーキ角が優れ、新型刃先材は 10° あるいは 15° の両レーキ角が優れている。花こう岩の掘削において、バックレーキ角およびサイドレーキ角が 5° のビットは、両レーキ角が 10° や 15° のビットに比べて、同一掘進率を得るのに要するビット荷重がかなり大きい。

(3) 新型刃先材は、硬質岩の掘削において市販刃先材よりも掘進率および刃先強度の点で優れており、花こう岩のような硬質岩の掘削にも十分適用できる。

(4) 外径98mm、内径66mm程度のコアビットの場合、8個の刃先数でも硬質岩の掘削において十分な性能が得られる。

以上、本研究により、室内実験的にはPDCビットが硬質岩の掘削においても優れた性能を有していることが確認された。

また、本研究とは別に、花こう岩採石場で実施した現場掘削実験⁷⁾においても外径98.4mmのPDCコアビットは立派な掘削成績をあげている。今後さらに、地熱開発、鉱山、土木などの広い分野でPDCビットが信頼をもって適用されるよう、現場掘削実験を継続し、硬質岩掘削の実績を積み重ねて行きたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 土井良彦・矢津修示・中井哲男：住友電気，122，100～108，(1983)
- 2) 唐澤廣和・三澤茂夫：採鉱と保安，33[12]，1～11，(1987)
- 3) 唐澤廣和・三澤茂夫・吉田 寛：採鉱と保安，34[2]，12～21，(1988)
- 4) 例えば Hoover, E. R., & Middleton, J. N.: J. of Petroleum Tech., 33[12]，2316～2321，(1981)
- 5) Hough, C. L., Jr.: ASME J. of Energy Resources Tech., 108[4]，305～309，(1986)
- 6) 三澤茂夫・唐澤廣和・吉田 寛：採鉱と保安，34[2]，1～11，(1988)
- 7) 三澤茂夫・唐澤廣和・吉田 寛：資源，1[9]，1～12，(1989)