

土木研究所資料

電磁波による岩石破碎

昭和 58 年 3 月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

Copyright © (1 9 8 2) Fiscalyear by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ま え が き

トンネルや岩石法面等の掘削には、現在のところほとんど火薬による発破が用いられている。しかしながら本工法は、建設公害といわれる騒音や振動の原因となり、また地山の不用な緩みも生じさせやすく、一方では熟練したトンネル技術者も不足して来ている。このようなことから、公害対策や緩みの軽減、省力化を考慮した新しい掘削工法の開発が望まれている。近年これらの問題に対処できる一方法として、岩盤に電磁波（マイクロ波）を照射して破碎する方法の開発が進められている。

地質研究室では、マイクロ波による岩石破碎法の適用性を検討するため、最大100kwの能力をもつ岩石破碎装置を使って破碎実験を行って来た。そして、種々の岩石の発熱、破碎特性と照射方法等との検討を行ったので、その結果をここにとりまとめた。

昭和58年3月

建設省土木研究所地質化学部

地質研究室	室長	桑原啓三
	研究員	平野勇
		神保悟

目 次

ま え が き

1. マイクロ波による岩石破碎の原理	1
1.1 マイクロ波による誘電加熱	1
1.2 岩石破碎のメカニズム	2
2. 装置の概要	3
2.1 マイクロ波発生装置本体	4
2.2 照射装置	4
2.3 冷却水循環装置	4
3. 実験方法	6
3.1 供試体	6
3.2 温度計測	6
3.3 マイクロ波照射	6
3.4 照射状況の観察	10
3.5 シュミットハンマーテスト	10
4. 実験結果	11
4.1 誘電加熱特性	11
4.1.1 温度分布特性	11
4.1.2 発熱特性	17
4.1.3 岩質および含水比と誘電加熱特性	19
(1) 鉱物組成	19
(2) 含水比	21
(3) 間隙率	21
4.1.4 照射パターンと誘電加熱特性	21
(1) 照射出力	21
(2) 照射時間	21
4.2 破碎特性	25
4.2.1 岩種別にみた破碎特性	25
4.2.2 岩質および含水比と破碎特性	25
(1) 鉱物組成	25
(2) 含水比	31

4.2.3 照射パターンと破碎特性	31
(1) 照射出力	31
(2) 照射時間	33
4.3 照射前後の岩石の力学的変化	33
5. まとめ	37
あとがき	38
謝 辞	38
参考文献	39

1. マイクロ波による岩石破碎の原理

1.1 マイクロ波による誘電加熱

マイクロ波による誘電加熱を利用したものに一般的に使われている家庭用電子レンジがある。これは、誘電体（電氣的に絶縁体のもの）である食物が、500wのマイクロ波によって誘電加熱するものである。以下に誘電加熱の原理を述べる。

よく知られているように直流電圧を加えた時に生ずる平行板コンデンサーの電荷は誘電体がある場合には ϵ_r 倍に増加する。この ϵ_r を比誘電率という。これは誘電体中の正電荷と負電荷が電界 E のためにずれて誘電体表面に極板電荷と反対符号の分極電荷を生じ、その誘導によって極板電荷が増加したためである。

次にこのコンデンサーに交流電圧を加えた場合交流理論からこの電圧に対し 90° 進みの電流を生ずる。しかし実際に誘電体を入れたコンデンサーでは電圧と電流の関係は電圧に対し $(90^\circ - \delta)$ だけ進みの電流になる。

このため 90° 進んだ容量 I_c 分の他に同相の成分 I_r を生ずるから電力損失が起り、誘電体内に発熱を生ずる。これを誘電加熱といい、このため発生する単位時間当りの熱量は次式で与えられる。

$$W = V I_r = V I_c \tan \delta = 2 \pi f C V^2 \tan \delta \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 δ : 誘電体損失角、 V : 交流電圧

f : 周波数、 C : コンデンサーの容量

さらに幾何学的な静電容量や誘電体を含まない時の電界強度を(1)式に代入することにより

$$W = \frac{5}{9} A d f \epsilon_r E^2 \tan \delta \times 10^{-10} \text{ (W)} \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。ただし A はコンデンサーの面積、 d は平行板の間隔、 E は電界強度である。

したがって周波数 f の正弦波電界において誘電体中に単位体積、単位時間当り発生する熱量は次式で与えられる²⁾。

$$P = \frac{5}{9} f \epsilon_r E^2 \tan \delta \times 10^{-10} \text{ (W/m}^3\text{)} \dots\dots\dots(3)$$

一般に岩石は種々の物質から構成され、複合的な性質を持つものであるが、 ϵ_r および $\tan \delta$ 誘電正接が得られれば、これを上式に代入し当該する岩石の発熱量を求めることができる。また岩石を加熱によって破碎するには一部分の発熱だけでなく、全体の分布にも注意しなければならない。電磁波が岩石のような損失のある誘電体中を z 方向に進行する時 x 方向の電界は以下のごとく表すことができる³⁾。

$$E = \sqrt{2} E_0 e^{-\alpha z} \cos (\omega t - \beta z + \theta) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 E_0 ：電界の実効値、 α ：減衰定数

ω ：角周波数、 β および θ ：定数

この式から電界は進行につれて1 m 当り $e^{-\alpha}$ 倍に減少する。この α はまた次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 μ ：誘磁率、 ϵ ：透電率、 σ ：導電率

σ は使用周波数における値であり、直流における値とは一般に異なる。また $\sigma/W\epsilon$ は導電電流と変位電流の比であり $\tan\delta$ に等しい。この関係から α は通常の岩石で $\mu \approx \mu_0$ (ただし μ_0 ：真空中の透磁率) とすると次式で示される。

$$\alpha = 1.046 \times 10^{-8} f \sqrt{\epsilon_r} \tan\delta \dots\dots\dots(6)$$

また電磁波によって運ばれる岩石中の電力密度の平均値は損失の小さい場合

$$P_{av} = \frac{E_0^2}{Z_0} e^{-2\alpha z} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 Z_0 ：固有インピーダンス

となる。(7)式から電力密度は $e^{-2\alpha z}$ で減少することがわかる。たとえば $z = 1/\alpha = 9.56 \times 10^7 / (f \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan\delta)$ m だけ進むと電力密度は $e^{-2} = 0.135$ 倍に減少する。

1.2 岩石破碎のメカニズム

マイクロ波を岩石に照射した場合先に述べたような誘電加熱により岩石が加熱され次のような変化が生じる。

① 岩石を構成する造岩鉱物の物理化学的変化。

② 岩石の空隙中に存在する水や気体の物理化学的変化による間隙圧の増加。

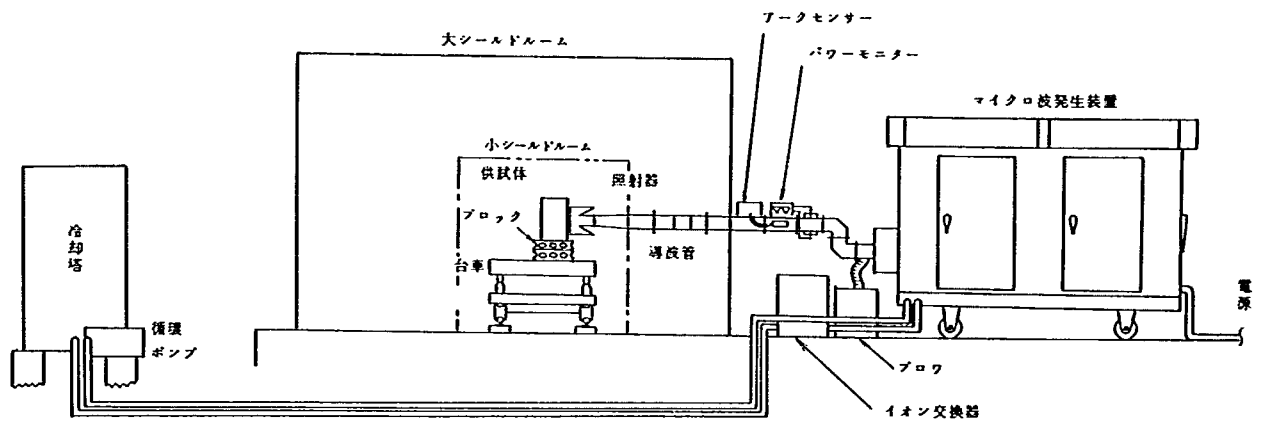
①については熱膨張による体積増加、結晶学的方位により熱膨張率が異なる異方性、転位温度付近での熱膨張率の急激な増加(例えば α 型石英 $\rightarrow\beta$ 型石英)等にもとづく圧力の増加や強度の低下をあげることができる。

②については空隙中の水分が水蒸気に変化したり、気体の熱膨張により周囲に圧力をおよぼし、破碎や爆発をおこす効果をあげることができる。

これらは一定の温度に達したり、一定の熱量が与えられた場合周囲の温度分布に無関係におきるものであるがマイクロ波照射による岩石内部には加熱効果が大きくかつ冷却しにくい領域とそうでない領域との間に大きい温度勾配を生ずる。このため熱応力が発生し破碎に大きな役割を果たしていると推定される。

2. 装置の概要

岩石破碎試験装置は大別すると、マイクロ波発生装置本体、照射装置ならびに冷却水循環装置とからなっている。



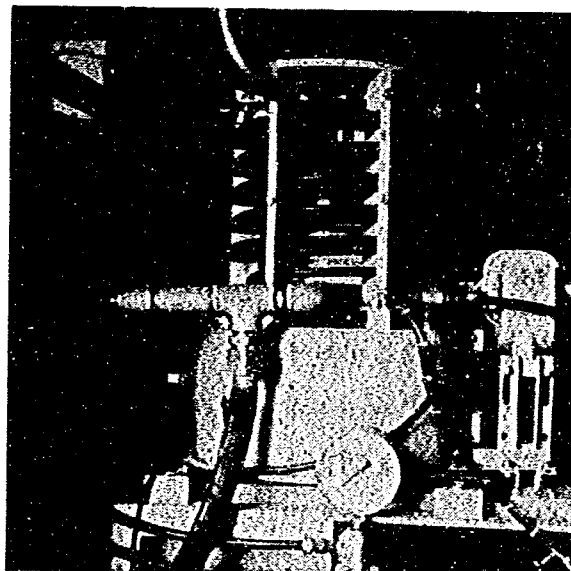
図－1 岩石破碎試験装置概念図

主要諸元

発振周波数 $915 \pm 25 \text{ MHz}$

発振管出力 100 kW (常用 $30 \sim 85 \text{ kW}$)

発振方式 マグネトロンによる自励、連続発振



写真－1 マグネトロン発振管

使用発振管 M1287 (新日本無線〔株〕製)

許容負荷反射電力 連続 30 kW 以下または全反射 1 分以内

冷却方式 水冷 (水温 $+5 \sim 25^\circ \text{C}$)

所要電源 交流420V, 3相, 50Hz, 180kVA

マイクロ波発生装置外形寸法 幅2.26m, 奥行3.3m, 高さ2.4m

2.1 マイクロ波発生装置本体

装置本体は電源部, マイクロ波発振部, アイソレータ, 各電源制御回路および保護回路等からなっている。

電源部はマグネトロンを発振させるための高圧電源とヒータ電源, それにマグネトロンの発振出力を増減するマグネット電源からなる。

マグネトロンより発振されたマイクロ波はマグネットコイルに流れる電流を操作することによって出力を調節しながら, 高周波結合器を通りアイソレータを経て導波管へ導かれる。アイソレータはサーキュレータ, ダミーロード, 導波管等の部分からなり, マグネトロン発振管を安定かつ安全に作動させるためのものである。すなわち, マグネトロンより発生したマイクロ波が供試体照射面に照射された後に反射して戻ってくる反射波をカットし, マグネトロンの破壊を防ぐものである。

保護回路は各電源の制御および保護回路自体の動作チェックを行なうものである。本体に異常があれば保護回路が作動し, そのままの状態ではマイクロ波の発生が行なえないようにし, ブザーと表示灯により警報を発する。操作者は表示灯によって示された箇所を点検確認し, 再び動作チェックを行なう。なお, 保護回路が作動した時にはマイクロ波の照射スイッチははいらず, 照射中に作動した場合には自動的にスイッチが切れるシステムになっている。

2.2 照射装置

照射装置は導波管, 照射器, シールドルーム等からなっている。

導波管は発生されたマイクロ波を導くためのものである。導波管には図-1のようにパワーモニターやアークセンサーが取付けてあり, 入射電力, 反射電力および内部放電の有無をモニタリングしている。

パワーモニターは導波管内を通るマイクロ波の入射電力と反射電力を感知するもので, 照射エネルギーの記録をとっている。アークセンサーは導波管内部の放電を感知するものであり, 内部放電が生じた場合, 保護回路が作動してスイッチが切れるようになっている。

シールドルームは大小2つのシールドルームからなる二重構造である。これはマイクロ波の漏洩による人体や通信, 計測等への影響を防止するためのものである。

照射器は導波管の先端につけてマイクロ波を供試体に照射するものである。図-1に示すような形状をしており, 反射波をなるべく少なくするような構造となっている。

2.3 冷却水循環装置

冷却水循環装置は図-1のように冷却塔, 制御盤, イオン交換器等からなる。

イオン交換器は冷却水の浮遊物をろ過し, 有害なイオンを除去するものである。また, マイクロ波発生装置本体内にも同様のものが組み込まれており, 二重に冷却水のチェックができるように

なっている。

冷却水は主に、アイソレータのダミーロード及びマグネットコイルの冷却に用いている。

3. 実験方法

3.1 供試体

供試体として用いた岩種は表-1のとおりである。供試体はすべて縦50,横50,厚さ30cmに整形し,内部温度を測定するための細孔($\phi 7 \sim 10 \text{ mm}$)を図-2のように穿孔した。また,深成岩については鉱物組成の測定をした。

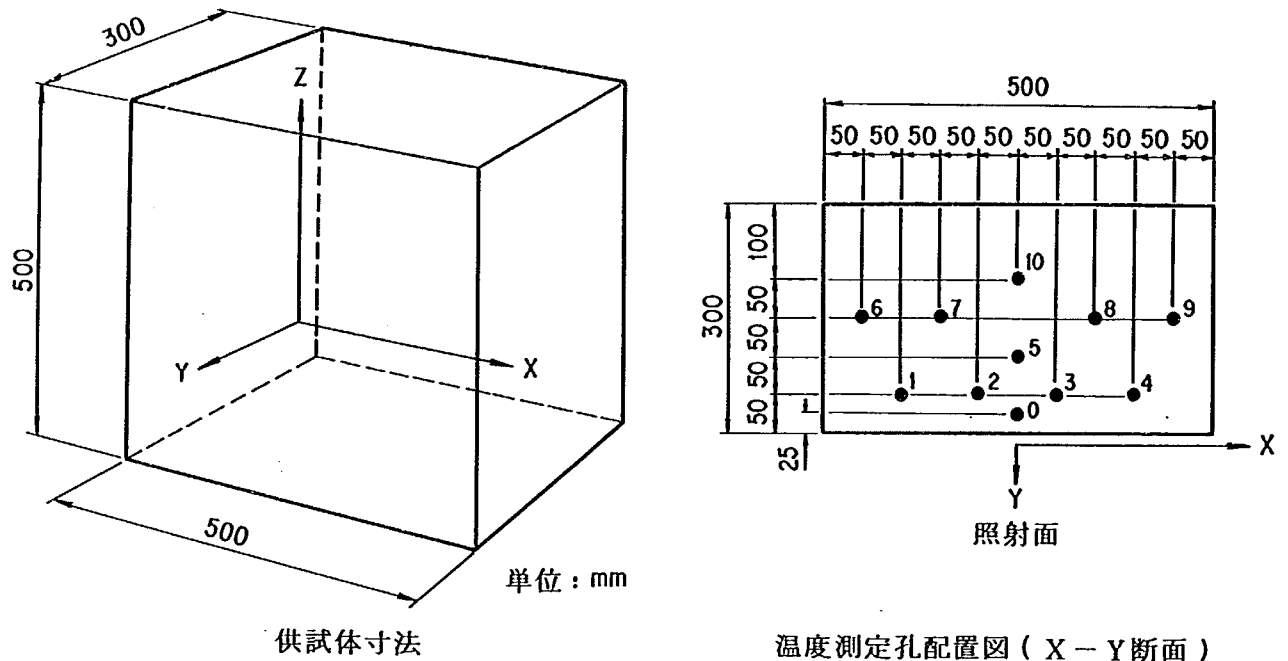


図-2 供 試 体

3.2 温度計測

供試体の温度は,原則としてマイクロ波照射前(温度上昇前の初期温度),照射5分後(1次温度と呼ぶ),照射25分後(2次温度)に測定した。内部温度は写真-2に示すように熱電対を,表面温度は写真-3に示すように赤外線放射温度計(スポット式)を用いて測定した。

マイクロ波の照射によって上昇した供試体の温度の測定は,正確には照射中に計測しなければならない。しかし,シールドルーム内の供試体に近づくことはできず,計測機器もマイクロ波の影響で置けない。そこで,マイクロ波照射終了時温度(以降温度と呼ぶ)は,先に述べた1次温度と2次温度の時間差より外推して求めた。

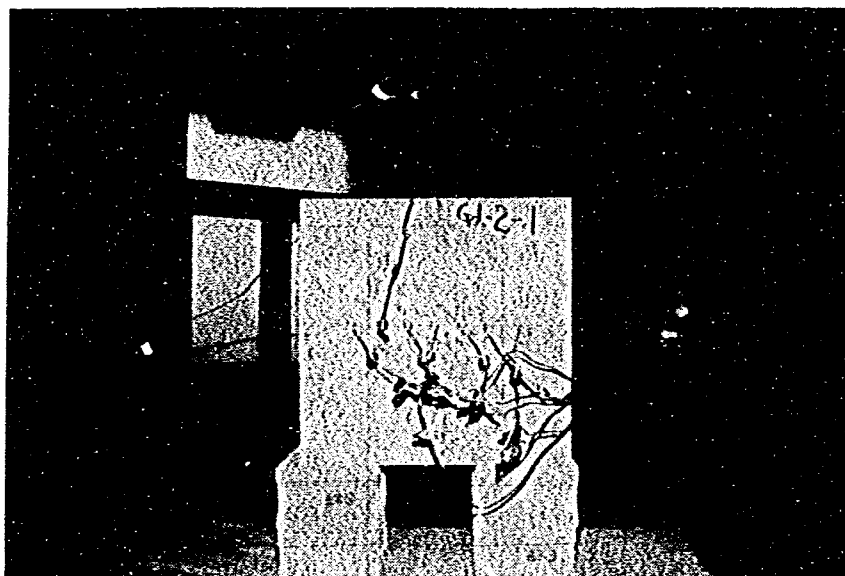
3.3 マイクロ波照射

マイクロ波の照射は図-1のようにセットされた供試体に所定の照射出力(kw)×時間(min)で行った。照射出力や反射出力はパワーモニタ(図-1)で検出し,記録する(図-3)。

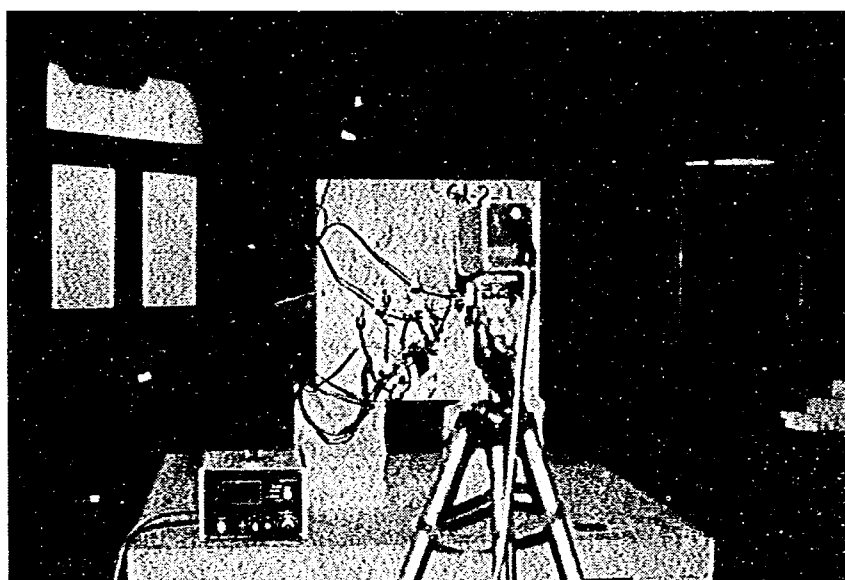
表-1 供試体岩石の物理・力学的性質

岩 種	一軸圧縮強度 (Kg/cm ²)	引張強度 (Kg/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ Kg/cm ²)	超音波速度 上段: V _p 下段: V _s (m/sec)	有効間隙率 (%)	吸 水 率 (%)	誘 電 率 ※ ϵ	誘電体力率 ※ $\tan \delta$
花 崗 岩 Gr	1,713	79.0	4.13	3790 1460	0.77	0.29	5~7	0.013~0.018
花崗閃緑岩 Gd	1,603	120.0	34.2	4000 1500	1.14	0.43	—	—
閃 緑 岩 Di	1,363	104.2	44.5	5230 2255	0.52	0.17	—	—
はんれい岩 Ga	2,105	150.0	5.24	4980 2050	0.26	0.09	7	—
黒色安山岩 AI	1,113	76.8	14.0	3235 1560	5.96	2.74	9~10	0.120~0.150
灰色安山岩 AII	1,967	86.6	28.0	3210 1500	23.5	0.86	9~10	0.120~0.150
玄 武 岩 Ba	1,520	99.8	2.13	3795 1640	1.69	1.21	6~10	0.120
石 灰 岩 Li	1,230	65.2	6.36	5825 2440	0.13	0.05	10~11	0.030
粘 板 岩 Md	1,332	112.6	1.50	4385 2060	0.50	0.20	—	0.60
砂 岩 Sd	1,365	94.9	22.2	2870 1480	5.87	23.5	7~8	0.038~0.058
大 谷 石 Tf	85.6	19.7	0.15	1630 900	38.66	28.11	8	—
コンクリート ブロック Cb	273	20.6	0.80	3445 1325	15.41	6.87	5~6	0.024
モルタル ブロック Cb	475	38.4	1.61	3850 1830	18.62	9.05	5~6	0.024

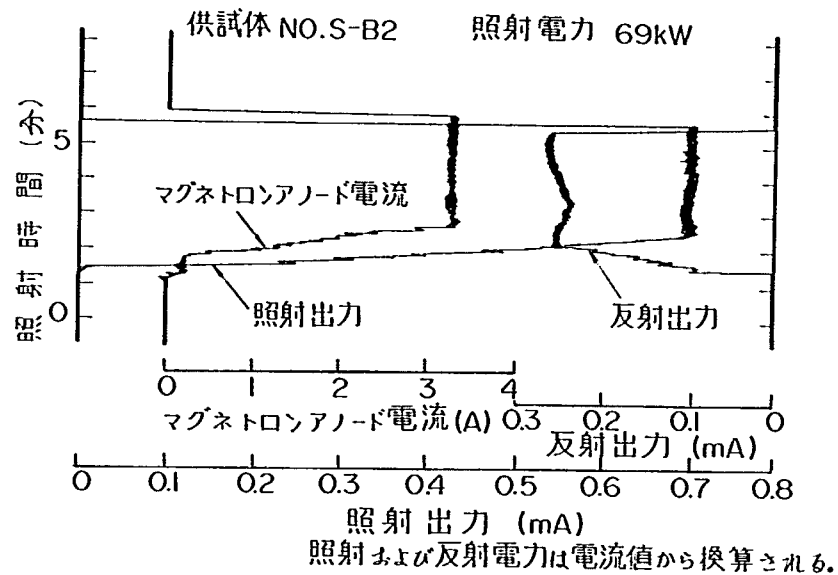
※は文献による。



写真－２ 熱電対による内部温度の測定

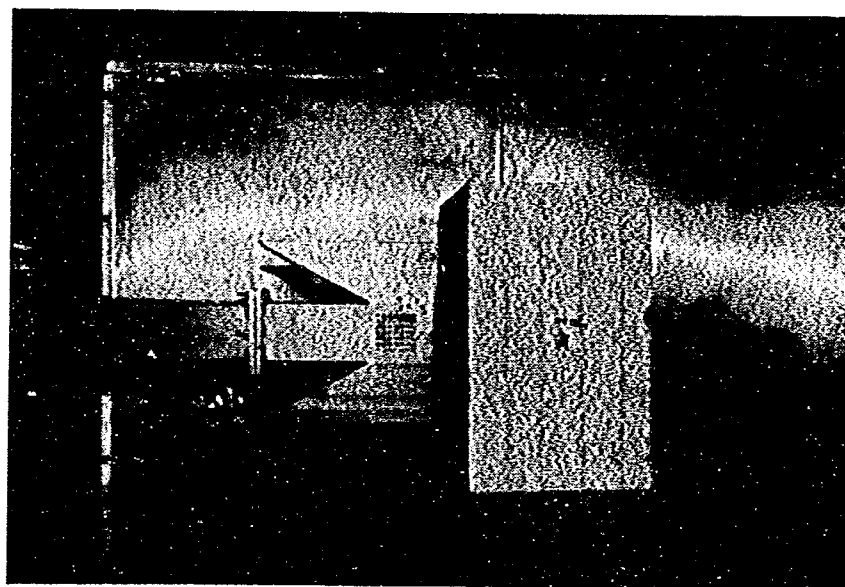


写真－３ 赤外線放射温度計による
表面温度の測定

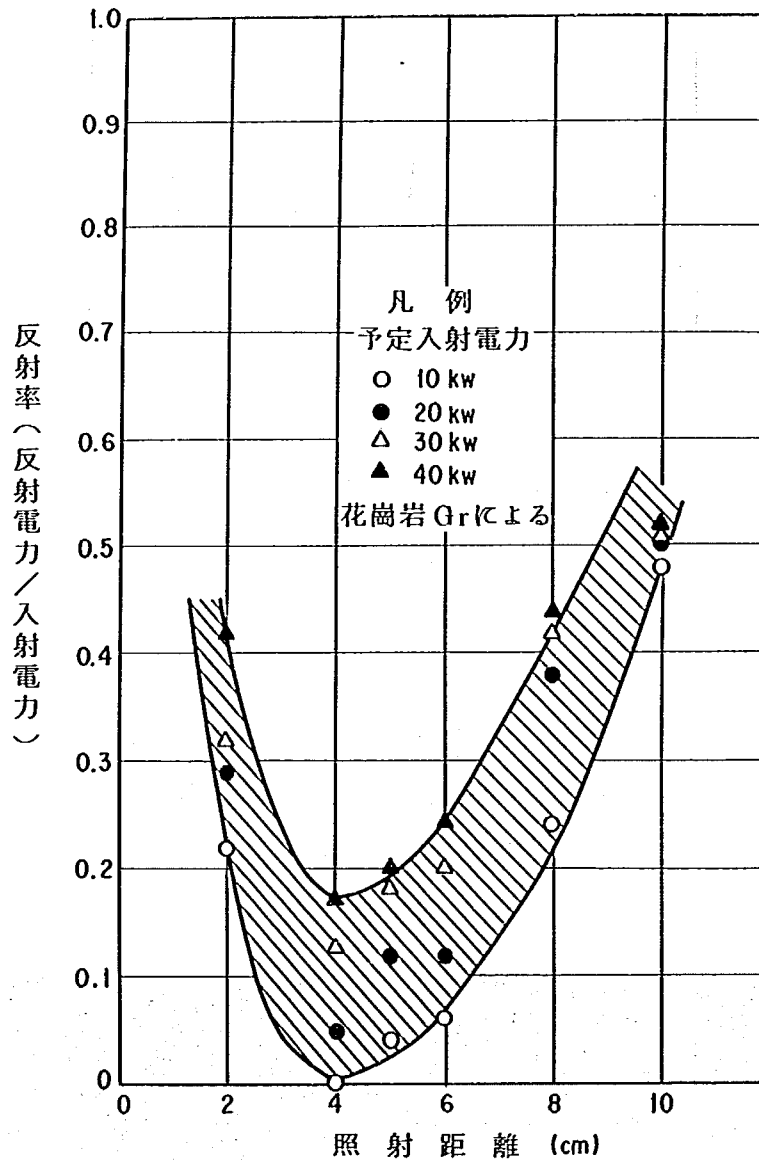


図－3 パワーモニター出力およびアノード電流記録例

反射出力／照射出力＝反射率は照射距離（照射ホーンと供試体表面との距離）によって異なり（図－4），反射率が最小となる4 cmが最適な照射距離と判断される。したがって照射距離はすべて4 cmで一定とした。写真－4 に照射状況を示す。



写真－4 照射状況



図－4 反射強度と照射距離

3.4 破碎状況の観察

照射途中の破碎状況を観察するためモニターテレビを用いた。また、破碎量の測定のために照射前の供試体から潜在クラックの有無をスケッチし、照射後はクラック長と破碎容量を測定した。

3.5 シュミットハンマーテスト

マイクロ波照射前後において、供試体の力学的性状の変化を測定するために、シュミットハンマーテストを行った。測定点は照射面中心に3 cm毎のグリッドをもうけ、縦5×横5点、合計25点とした。

4. 実験結果

4.1 誘電加熱特性

4.1.1 温度分布特性

マイクロ波による誘電加熱特性，すなわち最高温度を含めた意味での温度分布特性や照射エネルギーに対するエネルギー効率は，岩石の力学的性質とともに，岩石の破砕特性や破砕効率に直接かかわっている。図-5は岩種毎に一定照射条件（20 kw・2min）での最高温度を示したものである。これによると石灰岩および花崗岩系統の岩石が温度上昇が小さく，砂岩やコンクリート（一種の人工の碎屑岩），粘板岩などの碎屑岩の温度上昇が大きい。

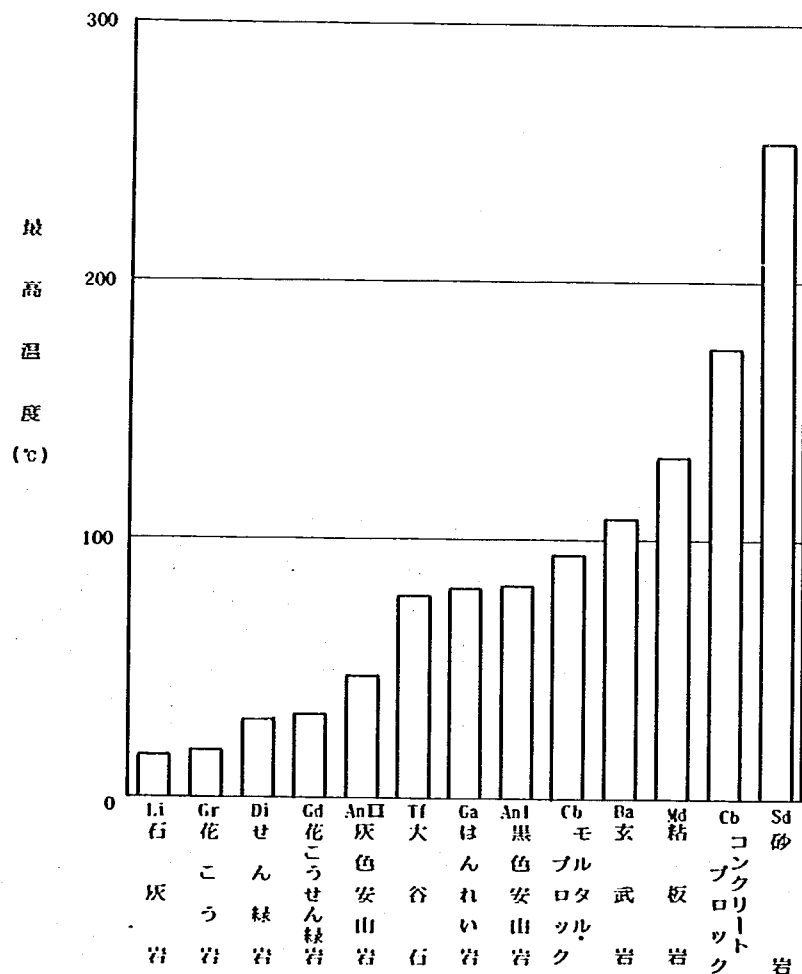


図-5 岩種と最高温度

図-6は20 kw・2min 照射における表面および内部温度分布を，図-7はその時のY方向の温度勾配を示したものである。図-6によれば，岩種によって内部温度分布のパターンが大きく2つに分類され，温度上昇が表面付近に限定される大谷石，モルタルブロック，コンクリートブロック，砂岩のグループと，深い部分まで温度上昇がみられ，広い範囲に誘電加熱の影響のある石灰岩，火成岩等のグループがある。図-7の温度勾配を見れば，前者のグループは急勾配であり，後者のグループは比較的緩勾配である。

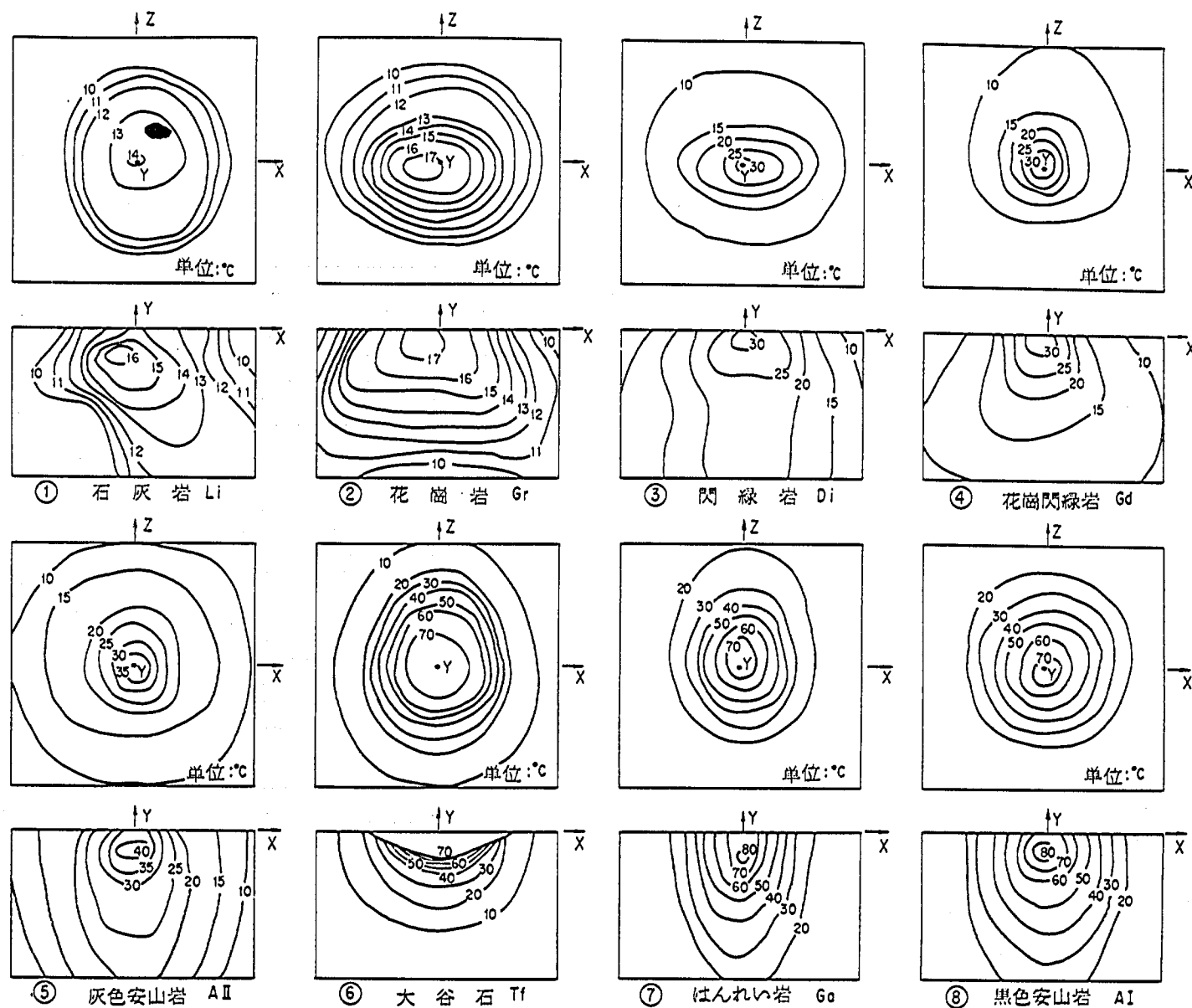


図-6 (その1) 20 kW · 2 min 照射における各岩種の温度分布

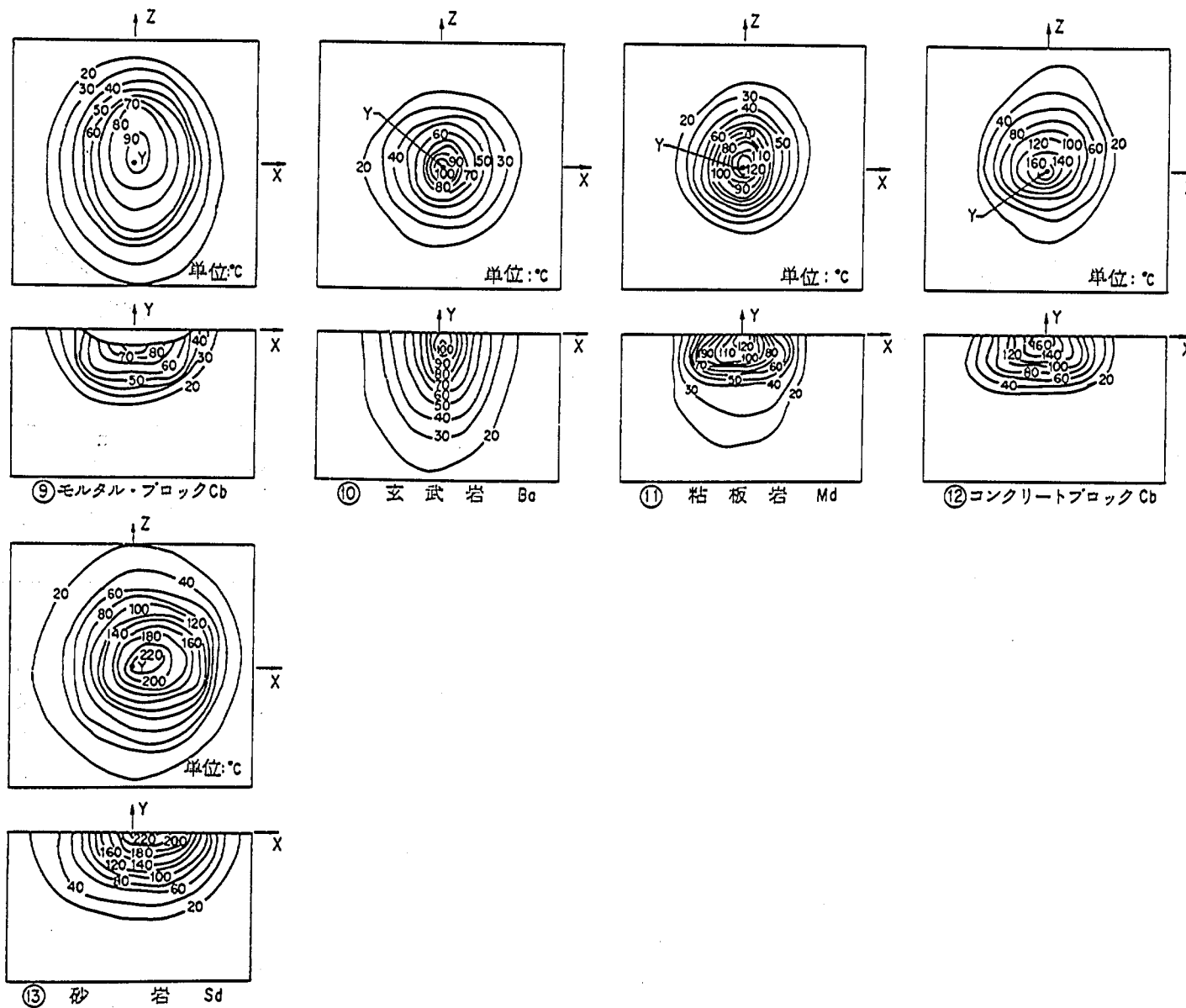


図-6 (その2) 20 kW · 2 min 照射における各岩種の温度分布

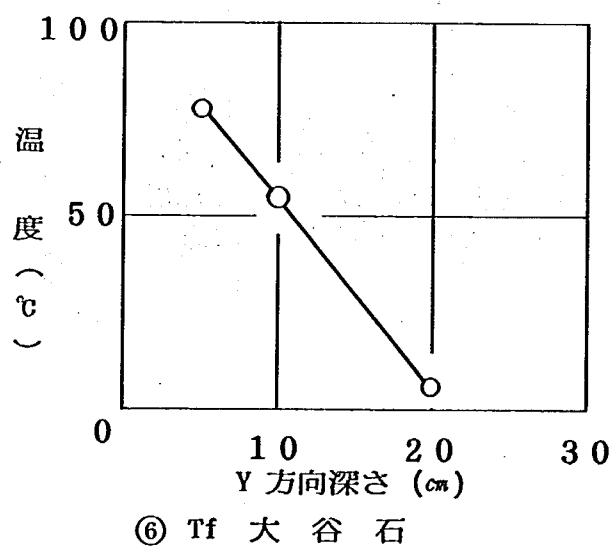
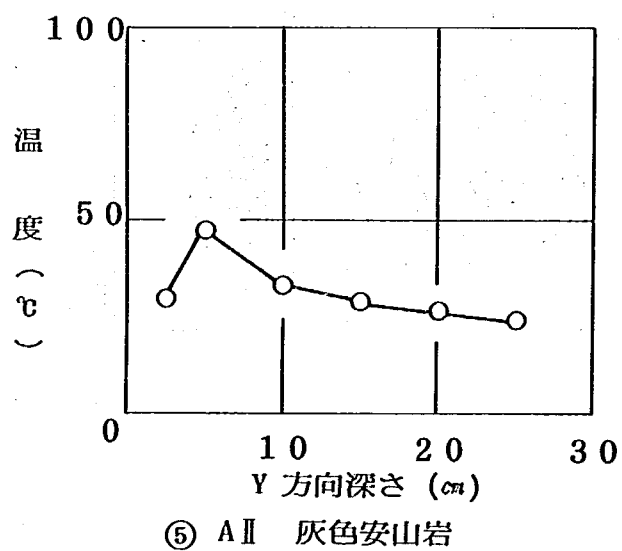
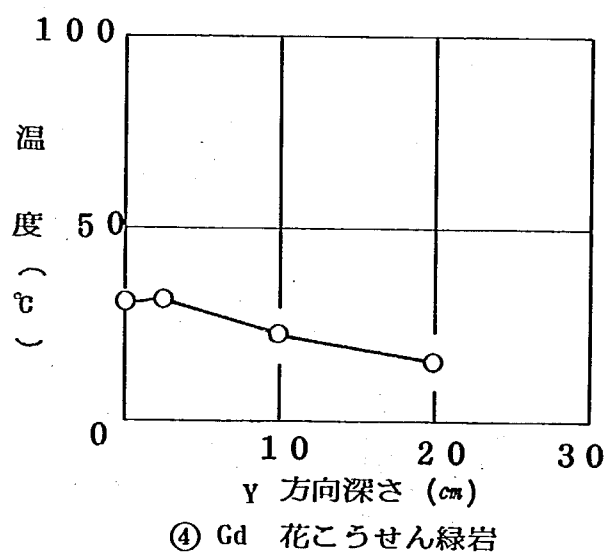
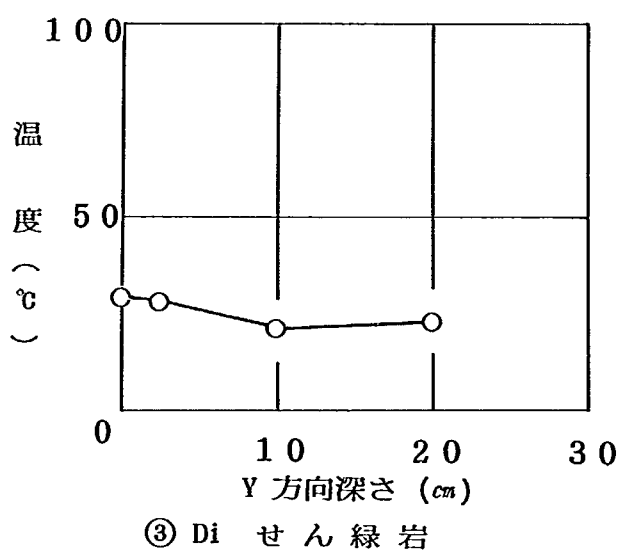
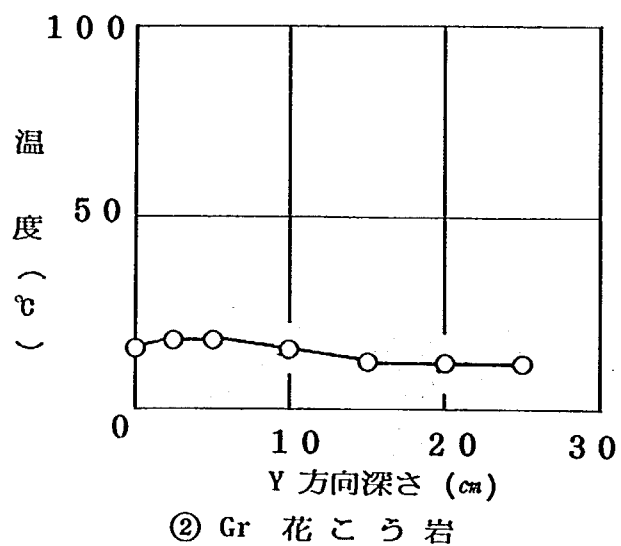
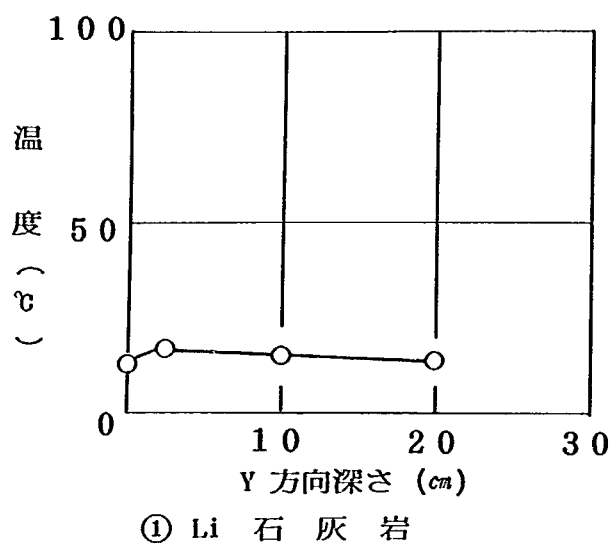
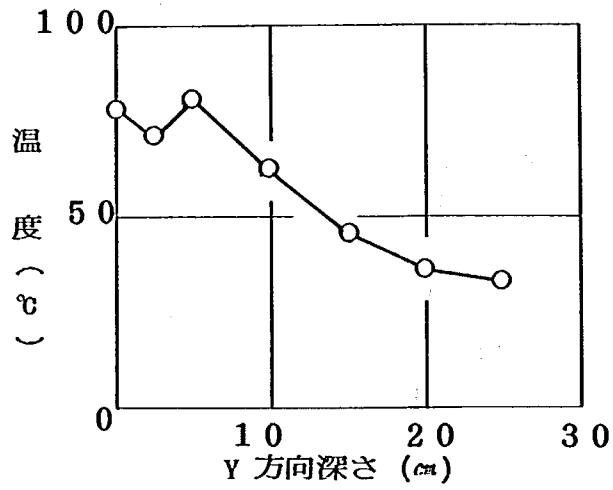
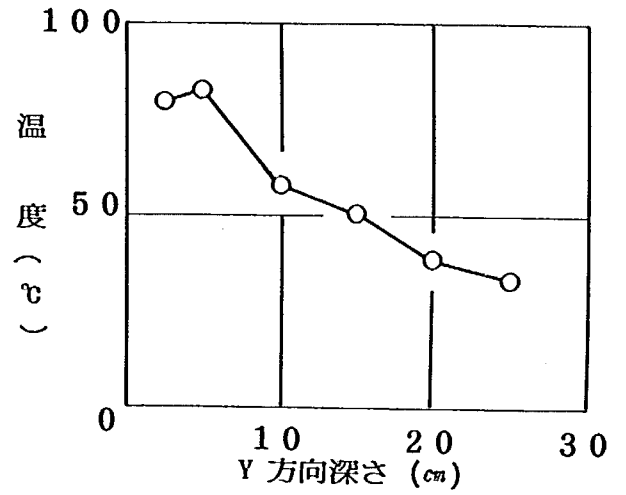


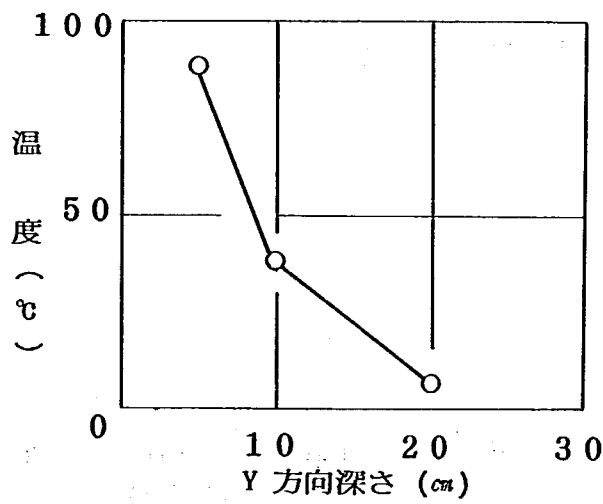
図-7(a) 20kW・2min照射におけるY方向温度勾配



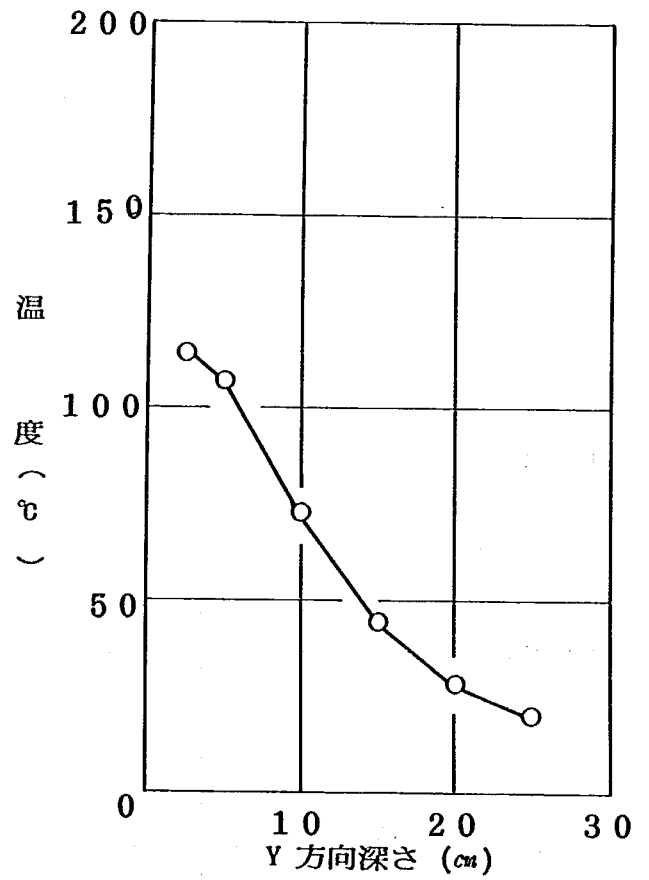
⑦ Ga はんれい岩



⑧ AI 黒色安山岩

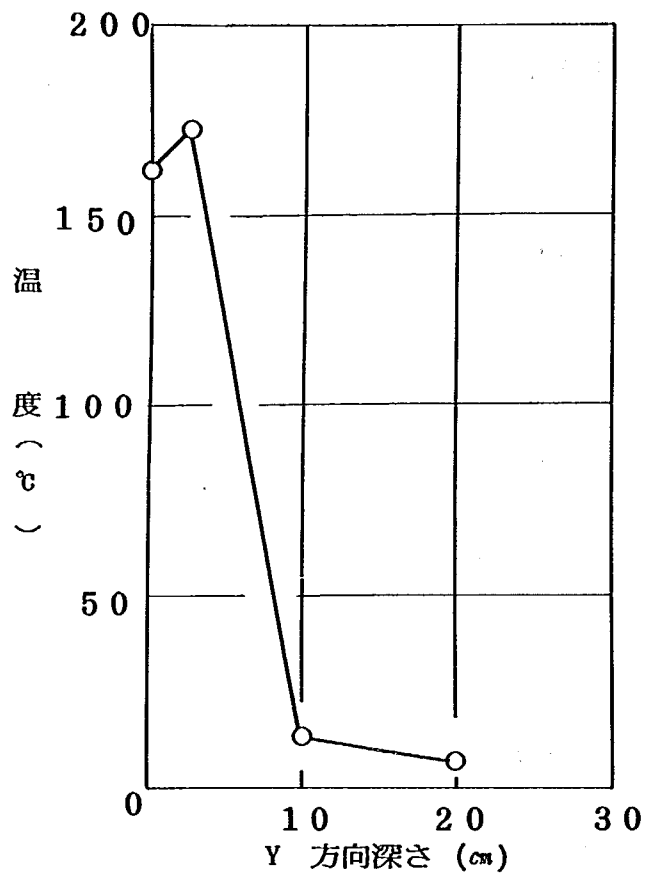


⑨ Cb モルタルブロック

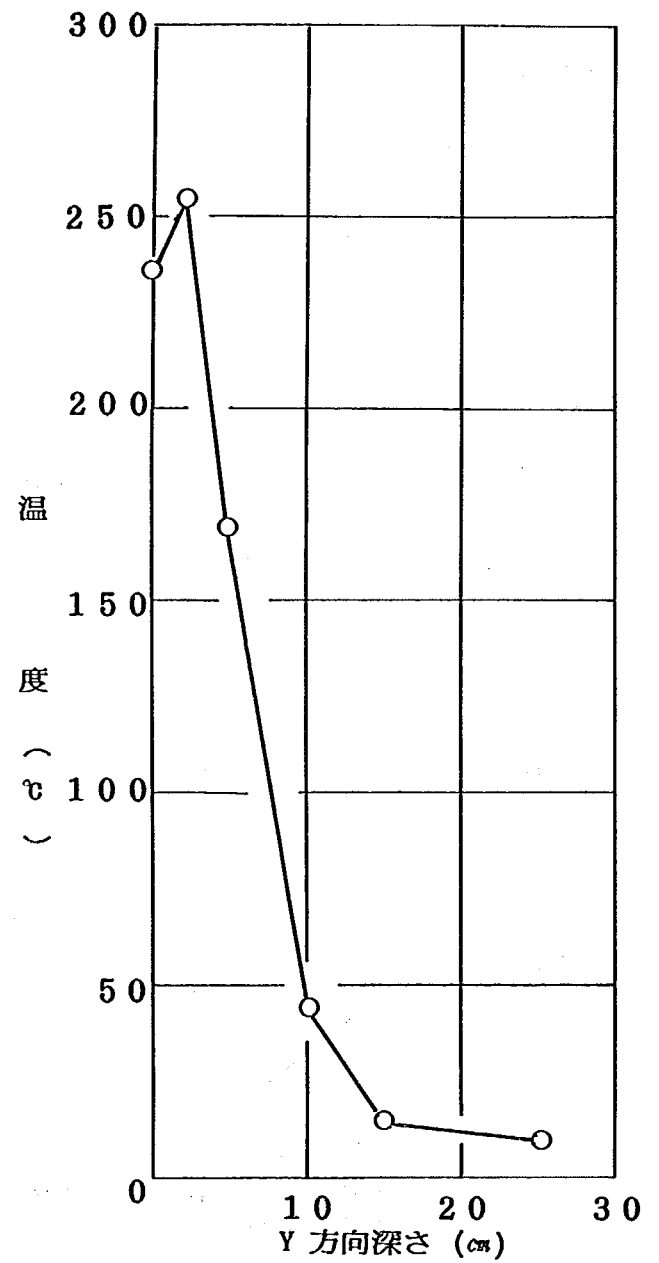


⑩ Ba 玄武岩

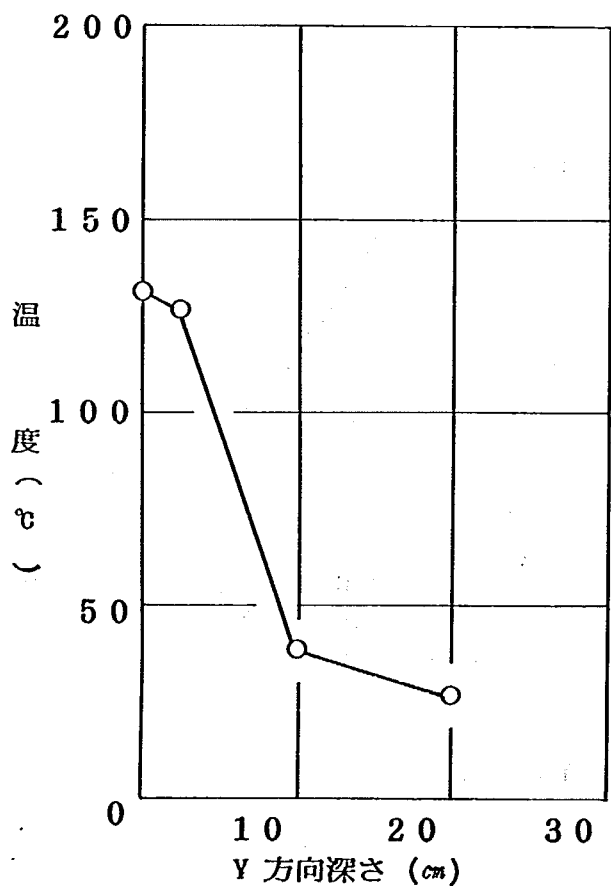
図-7(b) 20 kW・2 min照射におけるY方向温度勾配



⑪ Cb コンクリートブロック



⑬ Sd 砂岩



⑫ Md 粘板岩

図-7(c) 20kW・2min照射におけるY方向温度勾配

表-1に示されるように、前者のグループは有効間隙率・誘電体力率が大きく、反対に後者のグループは有効間隙率・誘電体力率が小さい。そこで、便宜上前者を孔隙岩質型、後者を緻密岩質型と呼ぶこととする。

誘電体力率が大きいということは、マイクロ波の吸収性の良さを意味するものであり、そのため孔隙岩質型は浅部でマイクロ波エネルギーの熱変換が行われると推測できる。

4.1.2 発熱特性

表-2は各岩種に20kw, 2min照射を行った時の熱変換エネルギー効率を求めたものである。ここで、発熱量の算定は(8)式で行った。

$$\text{発熱量 } \Delta Q = mH(T - T_0) \text{ cal} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

m : 質量 (g) H : 比熱 (cal/g°C)

T : 温度 (°C) T₀ : 初期温度 (°C)

また、照射出力・時間 (kw・min) は次の関係式で cal に変換した。

$$1 \text{ kw} \cdot \text{min} = 6.00 \times 10^4 \text{ Joule}$$

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ Joule} = 6.97 \times 10^{-5} \text{ kw} \cdot \text{min}$$

$$1 \text{ kw} \cdot \text{min} = 14.347 \text{ kcal}$$

発熱量は比熱を理科年表、その他より求め、図-6の温度分布によって各部分の温度上昇量から計算した。

各エネルギー効率の算出は(9)・(10)式による。

$$\text{対照射エネルギー効率 (\%)} = \frac{\text{発熱量 (kcal)}}{\text{照射エネルギー (kcal)}} \times 100 \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{対吸収エネルギー効率 (\%)} = \frac{\text{発熱量 (kcal)}}{\text{吸収エネルギー (kcal)}} \times 100 \dots\dots\dots(10)$$

吸収エネルギーは照射出力と反射出力の差より求めたもので、この中には実際には反射されても反射出力として検出されず、周辺に散乱したものも多少含んでいる。

表-2をみると、吸収エネルギーはどの岩種もほぼ一様であり、照射エネルギーに対して80~100%を示している。マイクロ波の熱変換エネルギー効率の大きいものは閃緑岩、はんれい岩、黒色安山岩、粘板岩等であり、60~80%である。逆に効率の悪いものとして灰色安山岩、大谷石、花崗岩等で20~30%を示す。

表-2 各岩種における発熱量

岩種	Li 石灰岩	Gr 花崗岩	Di 閃緑岩	Gd 花崗閃緑岩	AnI 灰色安山岩	Tf 大谷石	Ga はんれい岩	AnI 黒色安山岩	Cb モルタル	Ba 玄武岩	Md 粘板岩	Cb コンクリ	Sd 砂岩
照射エネルギー (Kcal)	573.89	573.89	573.89	573.89	573.89	573.89	573.89	545.15	573.89	573.89	573.89	573.89	573.89
吸収エネルギー (Kcal)	545.19	545.19	459.11	473.46	573.89	502.15	573.89	516.50	545.19	545.19	516.50	545.19	516.50
発熱量 (Kcal)	163.88	194.84	369.69	188.68	123.65	129.49	357.47	308.95	233.83	171.07	351.77	223.64	276.92
対照射エネルギー 効率(%)	28.56	33.95	64.42	32.88	21.55	22.56	62.29	56.67	40.74	29.80	61.30	38.97	48.25
対吸収エネルギー 効率(%)	30.06	35.74	80.52	39.85	21.55	25.78	62.29	59.82	42.89	31.38	68.11	41.02	53.61

$$\text{対照射エネルギー効率(}\%) = \frac{\text{発熱量(Kcal)}}{\text{照射エネルギー(Kcal)}} \times 100, \quad \text{対吸収エネルギー効率(}\%) = \frac{\text{発熱量(Kcal)}}{\text{吸収エネルギー(Kcal)}} \times 100$$

4.1.3 岩質および含水比と誘電加熱特性

次に、岩質・含水比・間隙率によって誘電加熱特性がどのように変化するかを、深成岩および大谷石、コンクリートについて検討した。

(1) 鉱物組成

岩石の誘電加熱特性は、その岩石を構成する鉱物の種類、粒度や配列に関連しているものと思われる。表-3は深成岩の岩石薄片を作製し、その顕微鏡鑑定より求めた鉱物種の構成比を表わしたものである。ここでカラーインデックスは(1)式で示される。

$$\text{カラーインデックス (\%)} = \frac{\text{有色鉱物量}}{\text{有色鉱物量} + \text{無色鉱物量}} \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

カラーインデックスは、カンラン石や輝石、角閃石、黒雲母等の有色鉱物の全鉱物に対する構成率を示したものである。一般的に、肉眼で黒っぽく見える岩石がカラーインデックスは大きい。

図-8はカラーインデックスと最高温度、発熱量との関係について示したものである。これによればカラーインデックスが大きくなると最高温度、発熱量とも大きくなる傾向がある。ただし、閃緑岩については温度が比較的低い。この原因として、閃緑岩は図-6に見られるように温度上昇が広範にわたって起り、局所的な加熱のないことがあげられる。また、今回用いた閃緑岩は他の岩石と異なって、鉄鉱物や緑泥石などを多く含み、やや変質も見られるが、これがその原因かとおか未だ不明な点が多い。

表-3 供試体（深成岩）の鉱物組成（カラーインデックス）

鉱物 \ 岩種		花こう岩 ^{Gr}	花こうせん緑岩 ^{Gd}	せんだん緑岩 ^{Di}	はんれい岩 ^{Ga}
無色 鉱物	石英	40.8	40.5	6.6	7.3
	長石	53.7	50.0	52.3	53.4
	白雲母	0.3	0	0	0
	合計	94.8	90.5	58.9	60.7
有色 鉱物	黒雲母	4.8	9.5	7.8	3.4
	角閃石	0	0	16.3	31.6
	輝石	0.3	0	17.1	0
	鉄鉱物	0	0	0	3.6
	緑泥石	0.3	0	0	0.8
	合計	5.4	9.5	41.2	39.4
カラーインデックス (%)		5.39	9.50	41.16	39.36

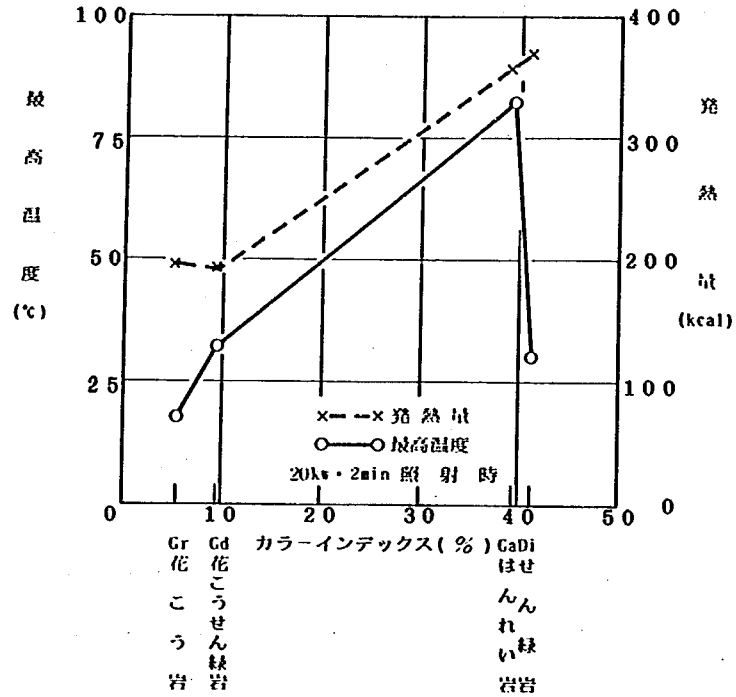


図-8 カラーインデックスと誘電加熱特性

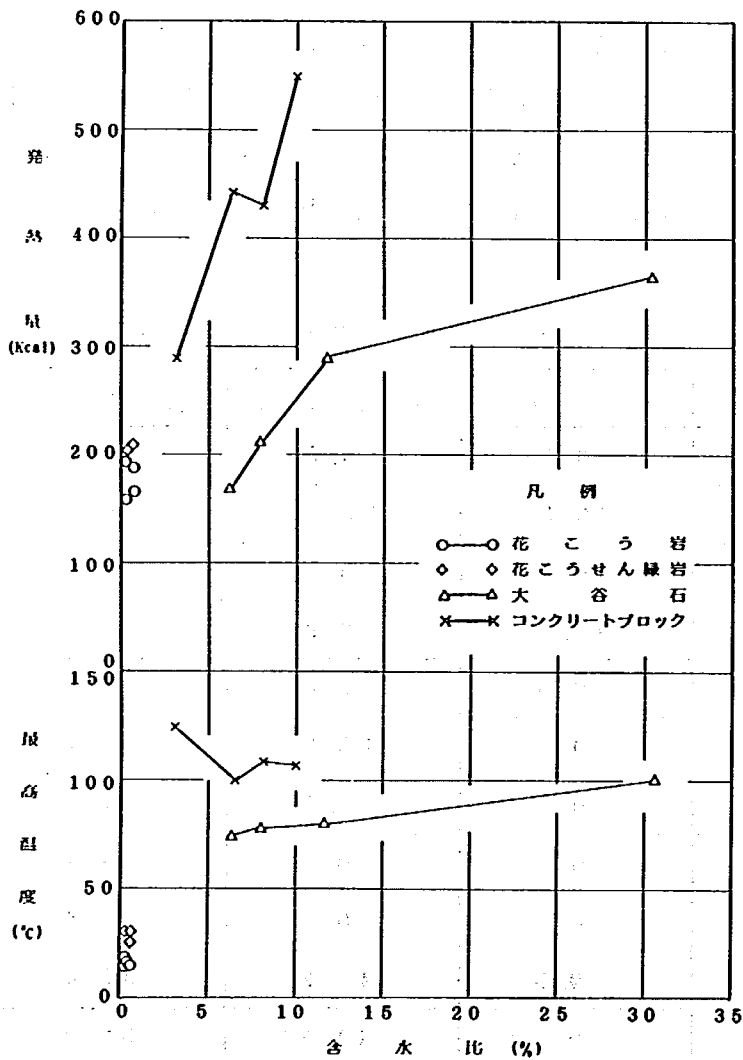


図-9 含水比を変化させた時の誘電加熱

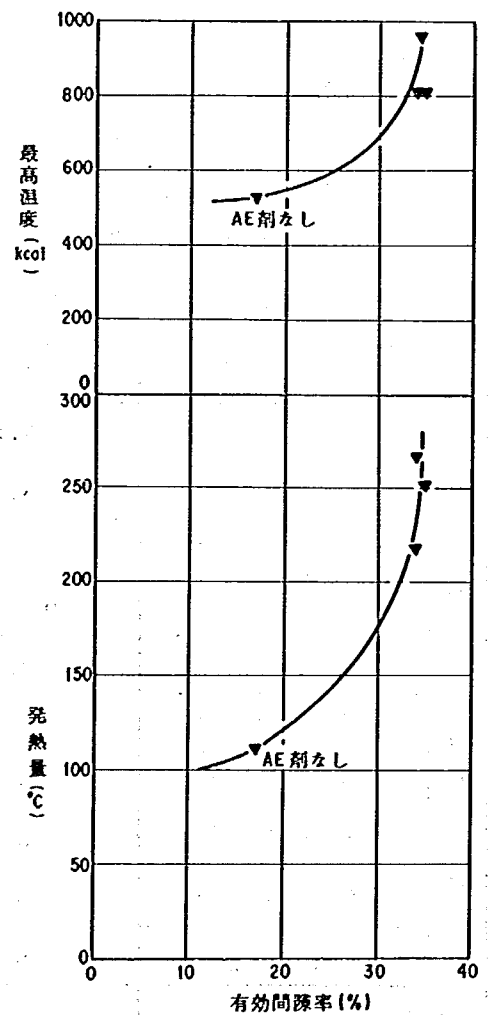


図-10 AE剤入りモルタルの間隙率と誘電加熱

(2) 含水比

誘電加熱は、水分子の量によって影響されると思われた。そこで、含水比を変化させた岩石を用いて照射実験を行った結果が図-9である。これによると、含水比が低い深成岩には顕著な傾向はみられないが、大谷石やコンクリートブロックは含水比が大きくなると発熱量が大きくなり、水分子の影響は大きいと言える。

(3) 間隙率

間隙率と誘電加熱特性の関係を調べるため、モルタルにAE剤（発泡剤ボゾラン）を混入し、モルタルブロックの間隙率を意図的に変化させた。図-10はAE剤を混入しないものと、セメントに対して1～3%のAE剤を混入したものを図示したもので、いずれも含水比は4～6%である。これによると間隙率の大きいものほど最高温度・発熱量は大きい。

また、図-6・7に示した温度分布と表-1の有効間隙率とを見ると、一般的に間隙率の高い岩種ほど加熱範囲が限定され、浅部での加熱が起り、温度勾配も急であると言える。

4.1.4 照射パターンと誘電加熱特性

岩石の熱的性質、すなわち熱伝導や熱拡散は、マイクロ波を長時間照射する場合は無視できない。マイクロ波照射中はエネルギーが熱に変換されて温度が上昇する現象と熱伝導・熱拡散は常に並行して起っている。これが、最高温度や温度分布に影響し、破碎形状や破碎効率に影響するものと考えられる。

(1) 照射出力

図-11は、照射時間2minのときの照射出力と最高温度および発熱量の関係を20～60kwについて、すべての岩種のもをまとめたものである。これによると、照射時間が一定のとき、照射出力が大きくなるにつれて最高温度・発熱量は、やや下に凸のカーブで上昇する。この傾向を確認するため、照射エネルギーを40kw・minと一定とし、出力・時間を変化させたのが図-12である。この図をみると明らかに、短時間で出力が大きければ、最高温度、発熱量ともに大きくなり、対照射エネルギー効率も良いことがわかる。

(2) 照射時間

図-13は、照射出力を20, 50kw一定とし、照射時間を変えた時の誘電加熱を示している。これによると、20kw出力の場合は照射時間を長くしても最高温度・発熱量ともほぼ一定値を示している。これは、出力が小さいと熱放射等によって供試体表面等から失われる熱の割合が高いことを示している。このことは、対照射エネルギー効率にも表わされており、照射時間が長くなるにつれて効率が悪くなっていることがわかる。

一方、50kw出力では照射時間が長くなるにつれて、最高温度、発熱量とも大きくなり、対照射エネルギー効率も一定～上昇の傾向がみられる。

以上のように、エネルギー効率を高めるためには、大出力で短時間にマイクロ波を照射した方が良いことがわかる。

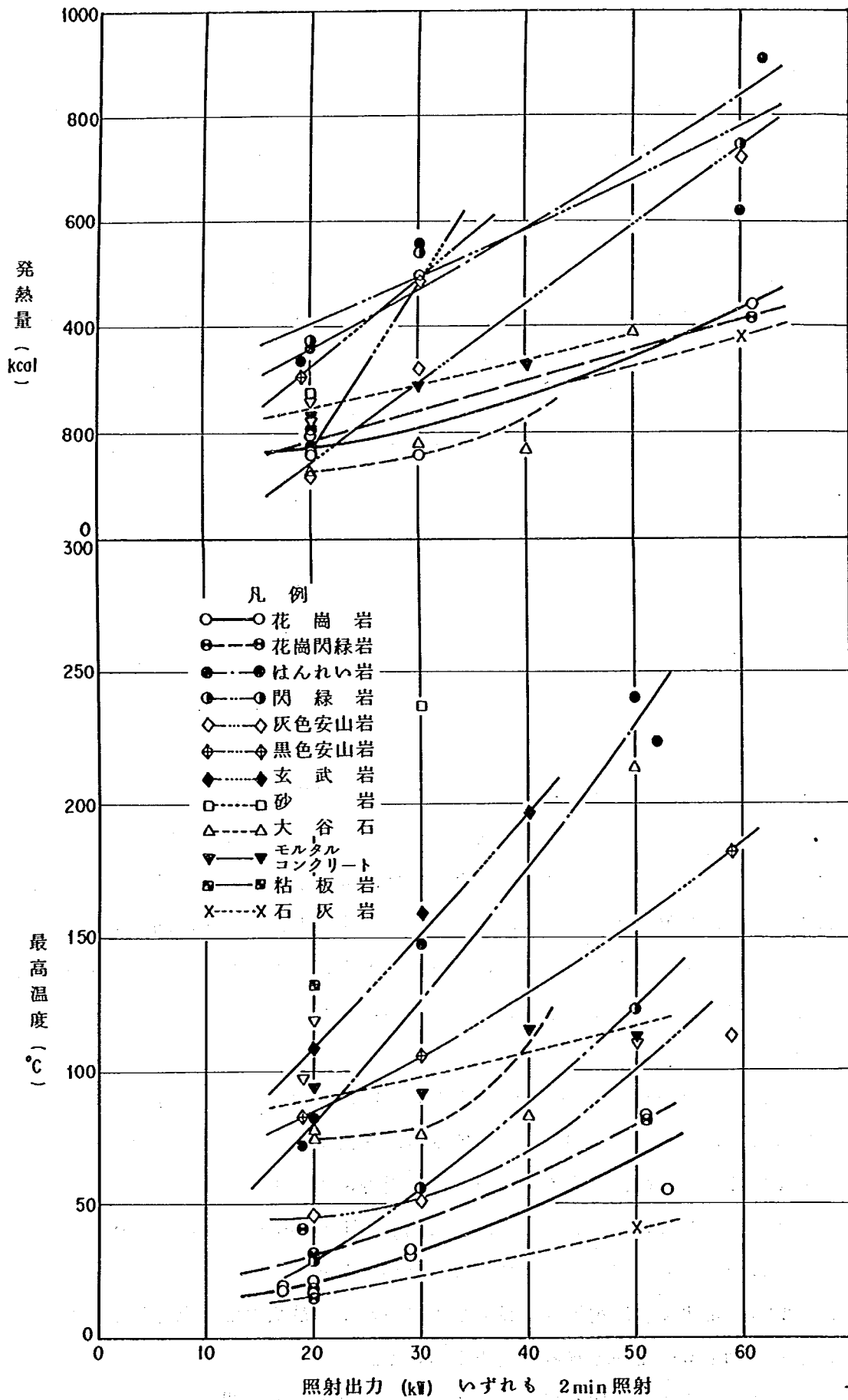


図-1 1 照射出力と誘電加熱

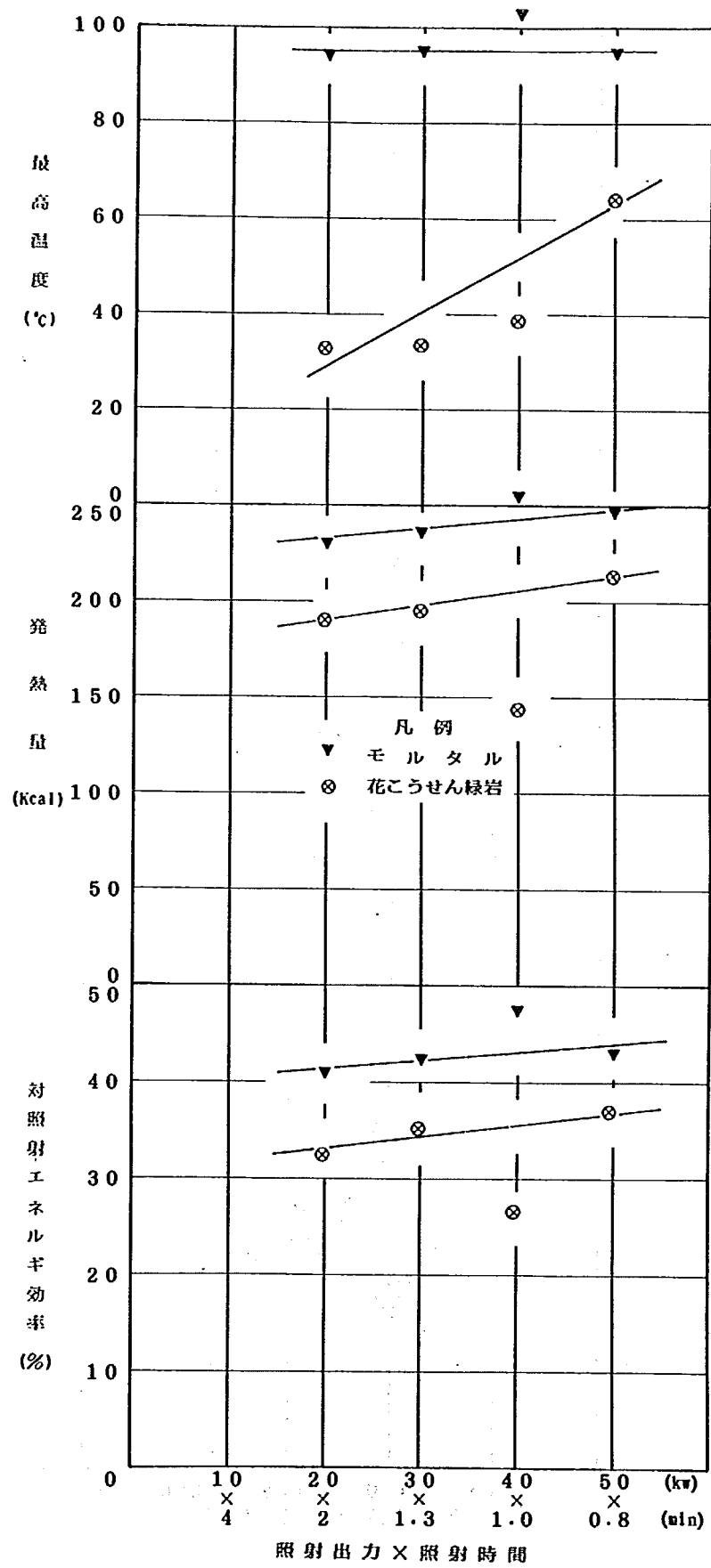


図-12 同エネルギー照射の出力と誘電加熱

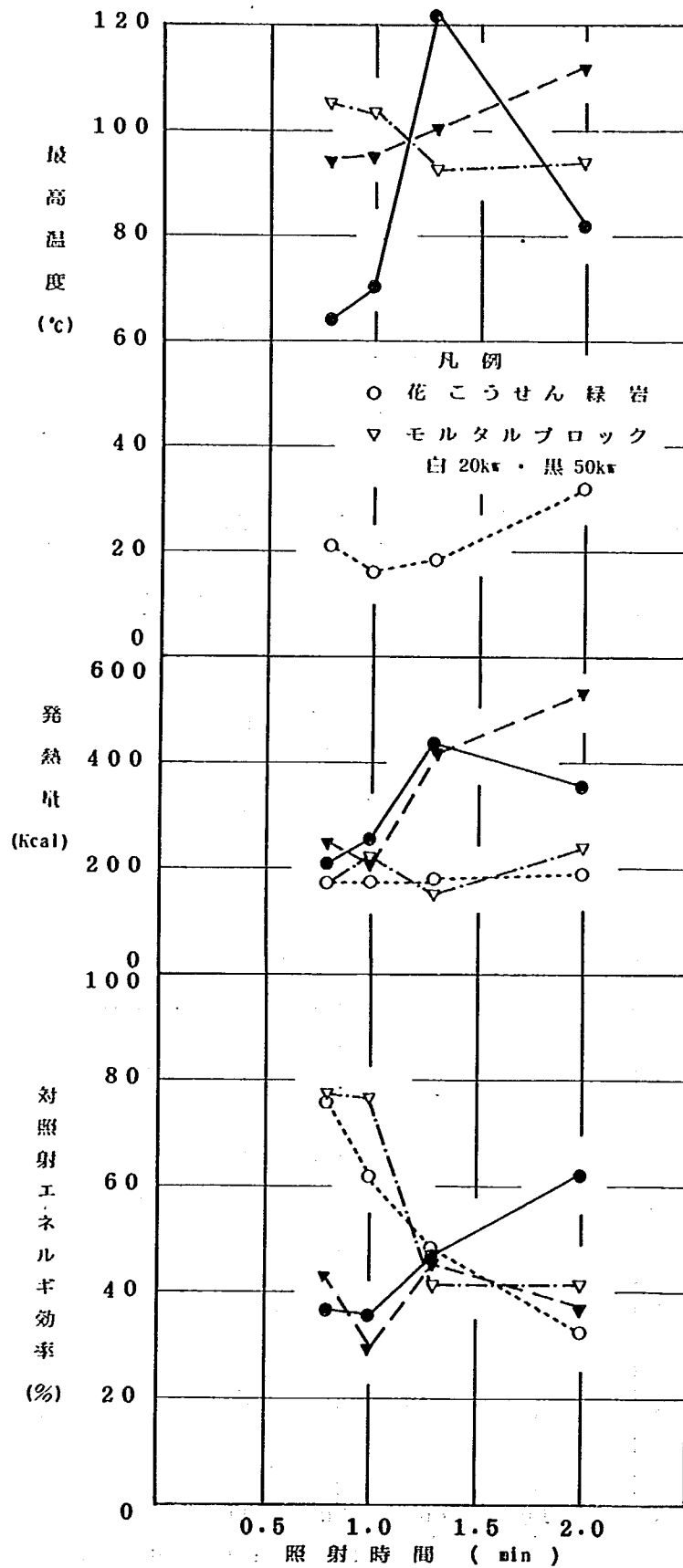


図-13 出力一定の時の照射時間と誘電加熱

4.2 破碎特性

4.2.1 岩種別にみた破碎特性

写真5～17に各岩種における供試体の破碎状況を示した。これらの写真の照射出力・時間は20kw・2minまたは50kw・2minであるが、それによって大きく破碎状況が異なることは無い。

これらの供試体の破碎形状を大きく分けると2つのグループに分けられる。1つは、バーンと言う音とともにクレータ型の爆裂孔を生じて破碎するもので、マイクロ波の照射を継続すると破碎が少しずつ進行するものである。他方は、供試体に縦および横のクラックを生じて破碎するもので、通常は無音でマイクロ波の照射とともにクラック数や長さが増加するものである。

ここで、前者のグループは大谷石、モルタルおよびコンクリートブロックに代表され、温度分布パターンで孔隙岩質型としたものであり、このタイプの破碎をクレータ型と呼ぶ。また、後者のグループは緻密岩質型としたもので、このタイプの破碎をクラック型と呼ぶことにする。

なお、両者の破碎パターンの違いを生じる原因については、別途報告する予定である。

表-4は岩種による破碎効率の違いを表わしたものである。破碎効率は、破碎量(クレータ型は容積 cm^3 で、クラック型は長さ cm であらわす)を照射出力で除した値である。この表から、照射条件の同じものについて岩種どうしの破碎効率を比較したのが図-14(a)・(b)である。

図-14(a)は20kw・2min照射における破碎量を示したものである。破碎量の大きいものは、大谷石・モルタルブロック・コンクリートブロックと閃緑岩等であり、石灰岩、花崗岩、花崗閃緑岩等では破碎を生じない。

図-14(b)では50kw・2minと出力を大きくしたものを示したが、大谷石とモルタルブロックの破碎量が大きくなっている他はあまり変化がなく、石灰岩、花崗岩、花崗閃緑岩等ではやはり破碎が起らない。

表-4には、20kwおよび50kw・2minでも破碎しないものについて、条件付きで示した。

4.2.2 岩質および含水比と破碎特性

破碎特性が、岩質や含水比によってどう変化するかを深成岩、大谷石、モルタルブロックを例に検討した。

(1) 鉱物組成

深成岩におけるカラーインデックスと破碎効率との関係は、有色鉱物の含有量が大きいものほど破碎効率が良いという傾向がうかがえる。



写真-5 Li 石灰岩

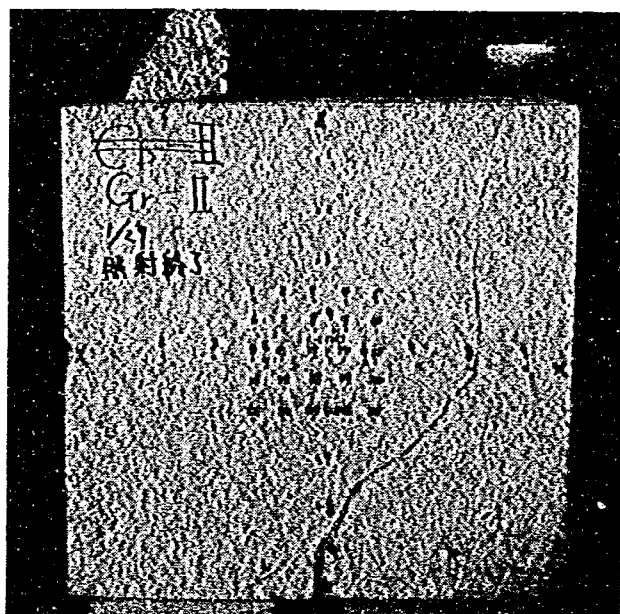


写真-6 Gr 花崗岩

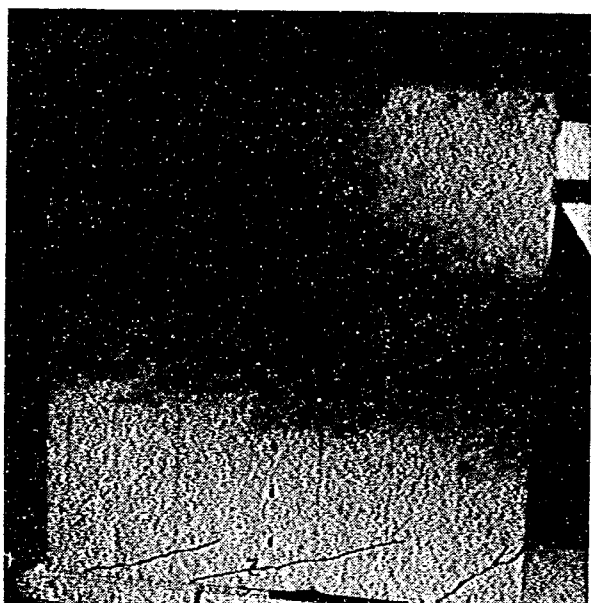


写真-7 Di 閃緑岩

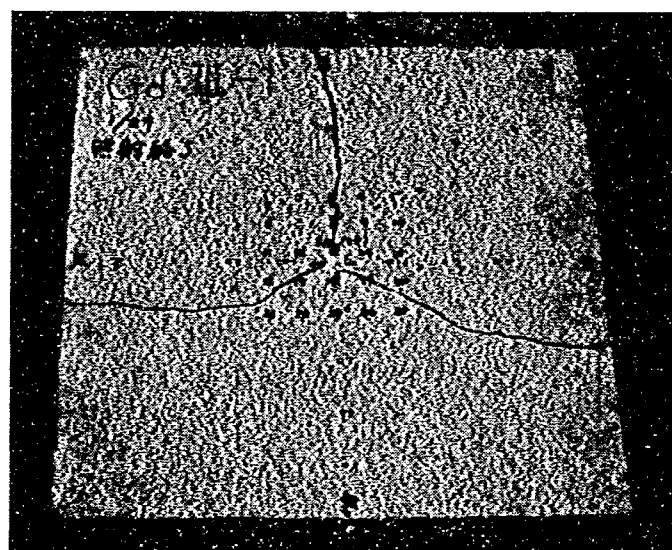


写真-8 Gd 花崗閃緑岩

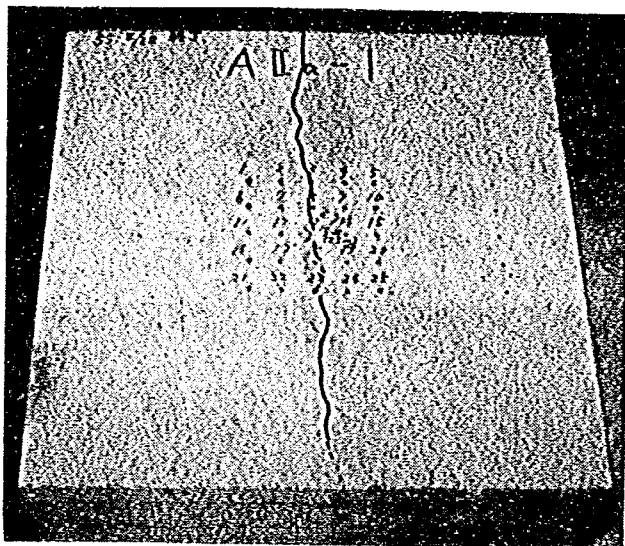


写真-9 AII 灰色安山岩

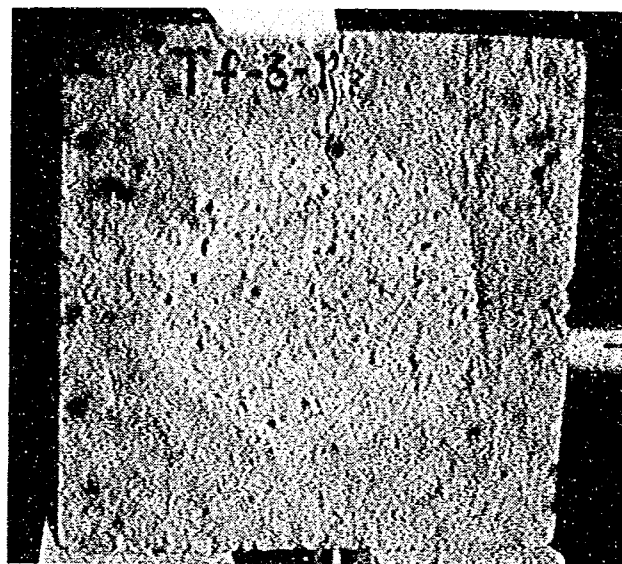


写真-10 Tf 大谷石

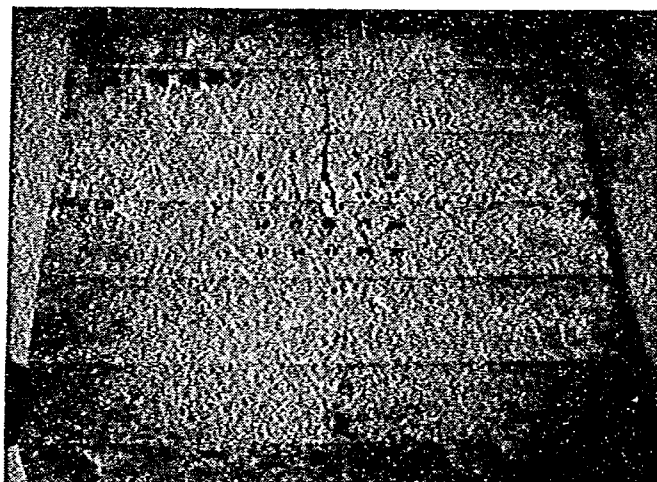


写真-11 Ga はんれい岩

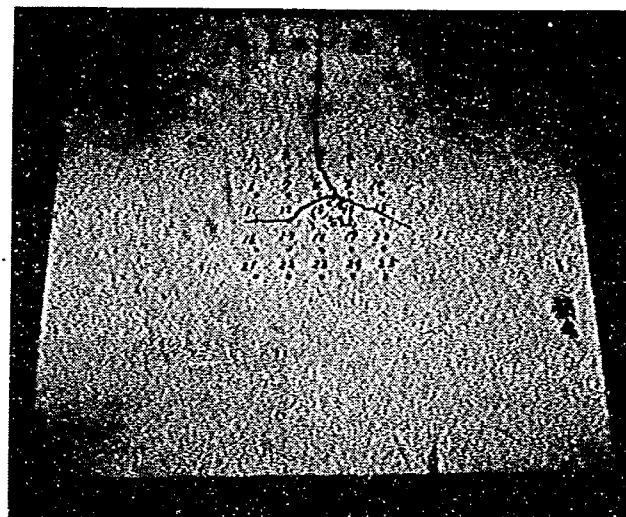


写真-12 AI 黒色安山岩



写真-13 Cb モルタルブロック

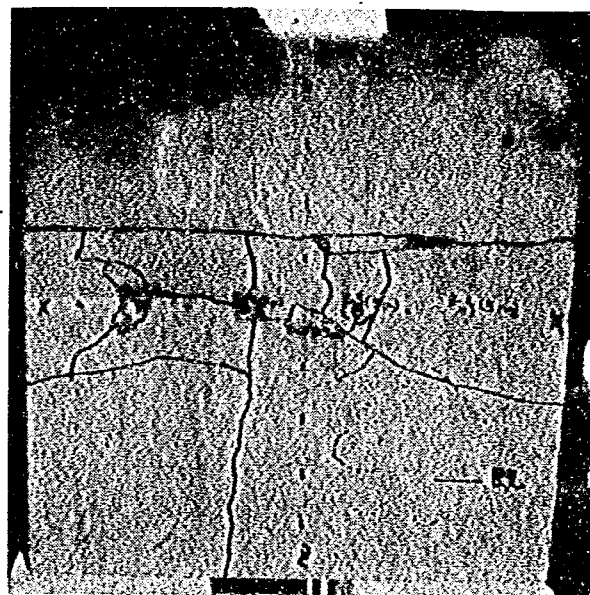


写真-14 Md 粘板岩

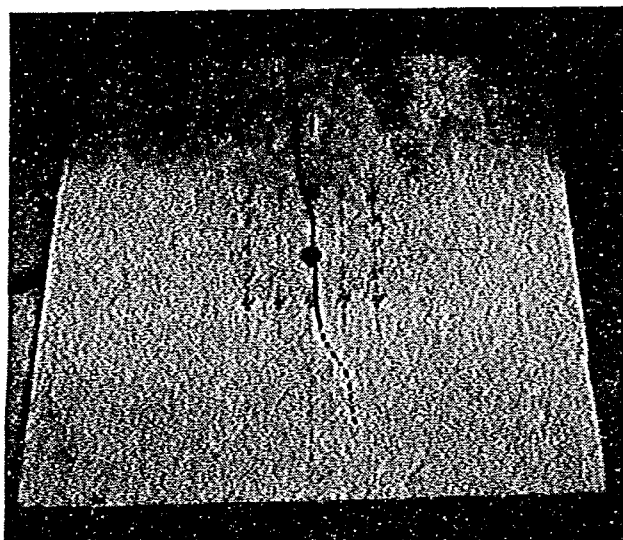


写真-15 Ba玄武岩

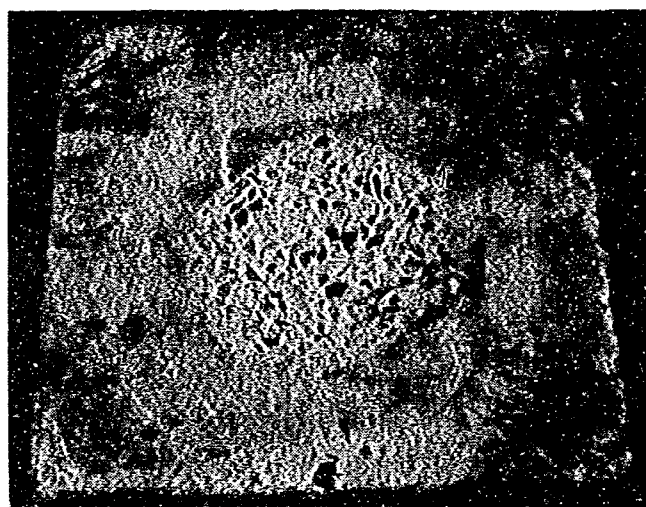


写真-16 Cbコンクリートブロック



写真-17 Sd砂岩

表-4 岩種と破砕効率

岩種	照射出力×時間 (kw×min)	照射エネルギー (Kcal)	発熱量 (Kcal)	対照射エネルギー 効率 (%)	破 砕 量 (上:cm ³ 下:cm)	破 砕 効 率 (上:cm ³ /kw・min 下:cm/kw・min)
石灰岩 Li	20×20	573.89	163.88	28.56	0	0
	☆ 50×10.0	7173.60	2172.34	30.28	150	0.52
花崗岩 Gr	20×20	573.89	194.84	33.95	0	0
	※ 194kwmin	27833.5	8323.5	29.90	187	0.96
閃緑岩 Di	20×20	573.89	369.69	64.61	263	6.58
	50×20	14347.2	7409.9	51.64	80	0.87
花崗閃緑岩 Gd	20×20	573.89	188.68	32.88	0	0
	☆ 20×0.8	2295.6	1754.0	76.41	83	5.46
灰色安山岩 Al	20×20	573.89	123.65	21.55	0	0
	50×20	14347.2	726.02	50.60	12	0.14
大谷石 Tf	20×20	573.89	726.02	22.56	1690 10	422.5 0.25
	50×20	14347.2	129.49	27.31	1900 23	28.35 0.34
はんれい岩 Ga	20×20	573.89	357.47	62.29	?	?
	50×20	14347.2	620.71	43.26	30	0.38
黒色安山岩 Al	20×20	573.89	308.95	56.67	0	0
	※ 856kwmin	12281.20	6959.76	56.67	202	0.24
モルタル ブロック Cb	20×20	573.89	233.83	40.74	715 117	17.88 2.93
	50×20	14347.2	5325.0	37.11	2170 99	33.39 1.52
玄武岩 Ba	20×20	573.89	171.07	29.80	0	0
	※ 736kwmin	10559.54	314.67	29.80	117	0.16
粘板岩 Md	20×20	573.89	351.77	61.30	23	0.58
	※ 316kwmin	4533.72	2779.17	61.30	682	2.16
コンクリート ブロック Cb	20×20	573.89	223.64	38.97	790 51	19.75 1.28
	☆ 16×20	459.11	239.84	52.24	695	21.72
砂 岩 Sd	20×20	573.89	276.92	48.25	0	0
	☆ 17×20	516.50	317.84	61.54	516	15.18

注) 各岩種の上段は20kw・2min, 下段は50kw・2min照射のもの。50kw・2minが無いものは☆出力・時間が異なる。 ※段続的に数回照射で合計したエネルギーを表わす。

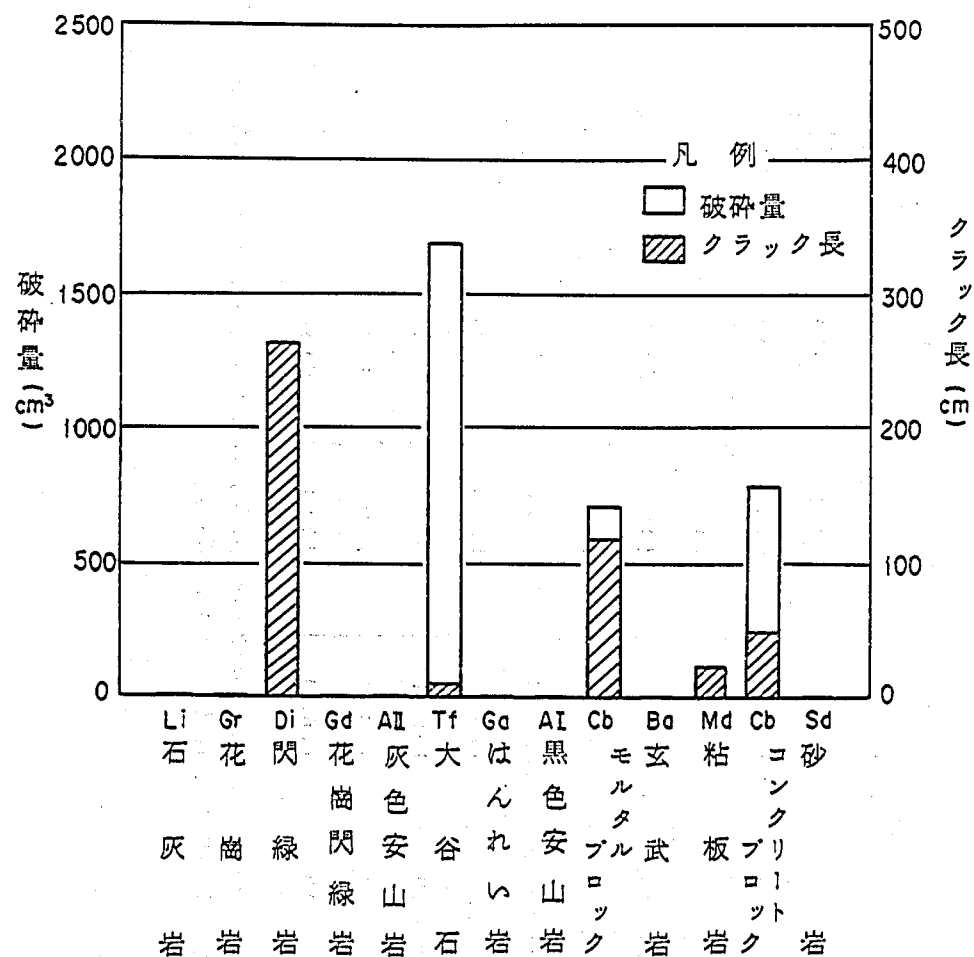


図-14(a) 20kw・2min照射における破砕量

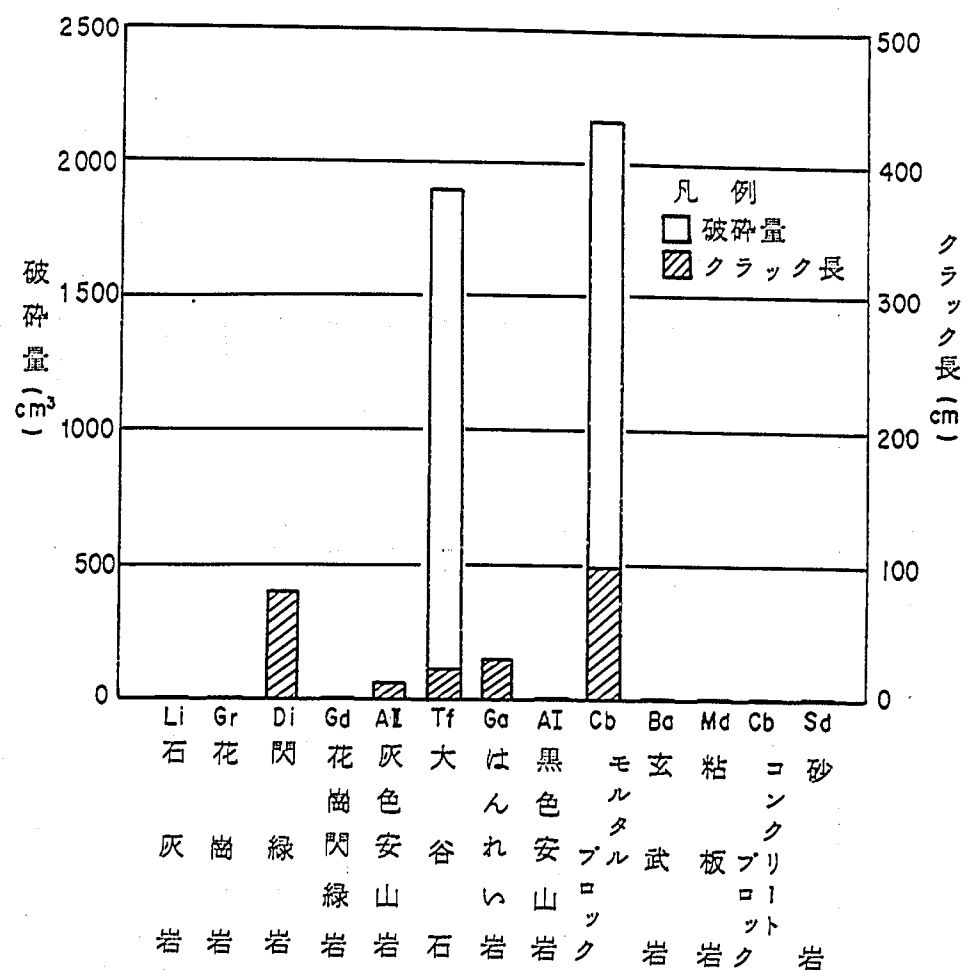


図-14(b) 50kw・2min照射における破砕量

(2) 含水比

供試体の含水比と破碎効率の関係について大谷石、モルタルブロックを例に図-15に示す。これによると、含水比が大きくなるにつれて破碎効率は下がる傾向にある。これは次のように考えられる。大谷石やモルタルの発熱量は図-9に示したように、含水比が大きくなると大きくなる。それは、含水比が大きくなると広範な温度上昇があることを示すもので、温度勾配が緩くなることを示している。したがって、爆裂的なクレータ型破碎は、温度勾配が急なほど破碎効率は良くなると言える。

4.2.3 照射パターンと破碎特性

(1) 照射出力

図-16は照射時間を一定としたときの照射出力と破碎効率の関係を大谷石、モルタルブロックについて示したものである。また図-17はモルタルブロックの照射エネルギーを一定とした時の破碎効率を示す。これらによると破碎効率は大出力ほど大きくなる。前項で、温度勾配が急なほど破碎効率は良いと述べたが、この結果もそれと一致する。それは、含水比が同程度なら最高温度は大出力ほど大きく(図-11)なり、温度勾配も急になる傾向があることから証明される。

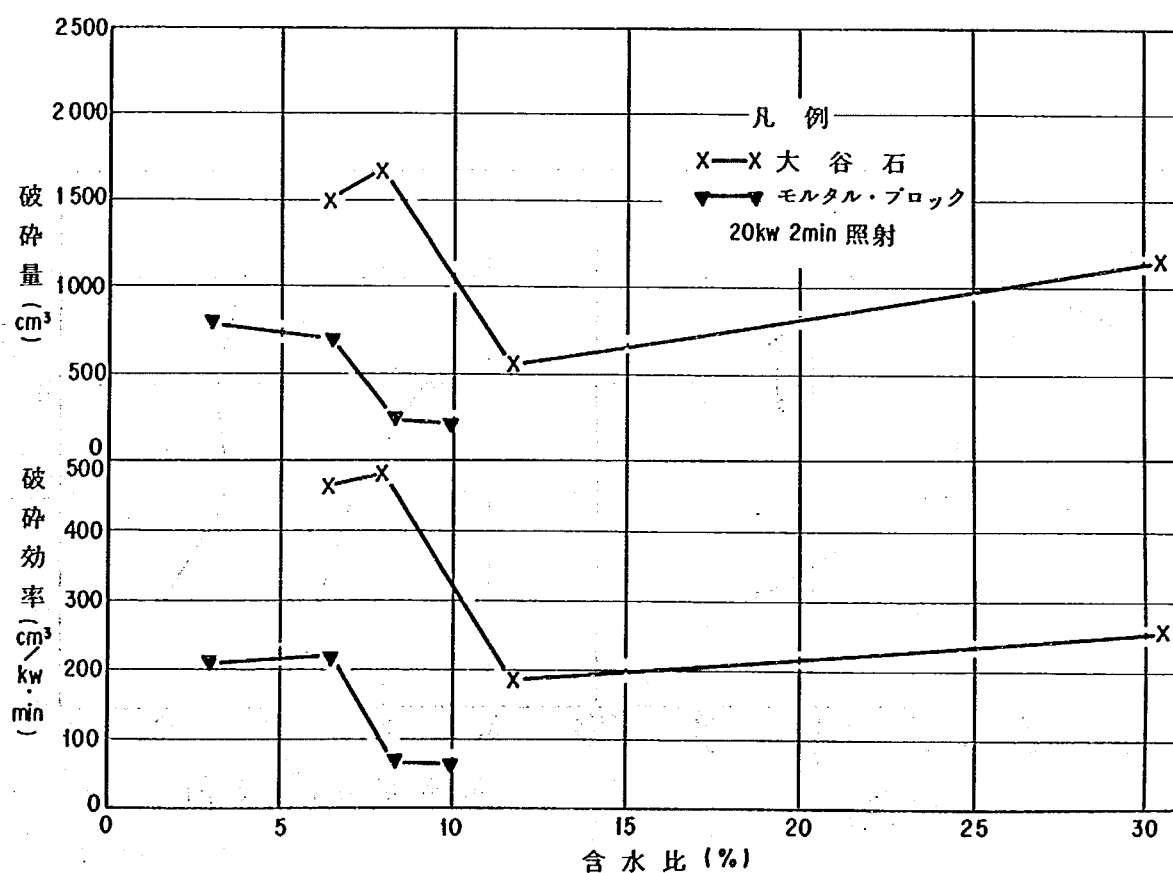


図-15 含水比と破碎効率

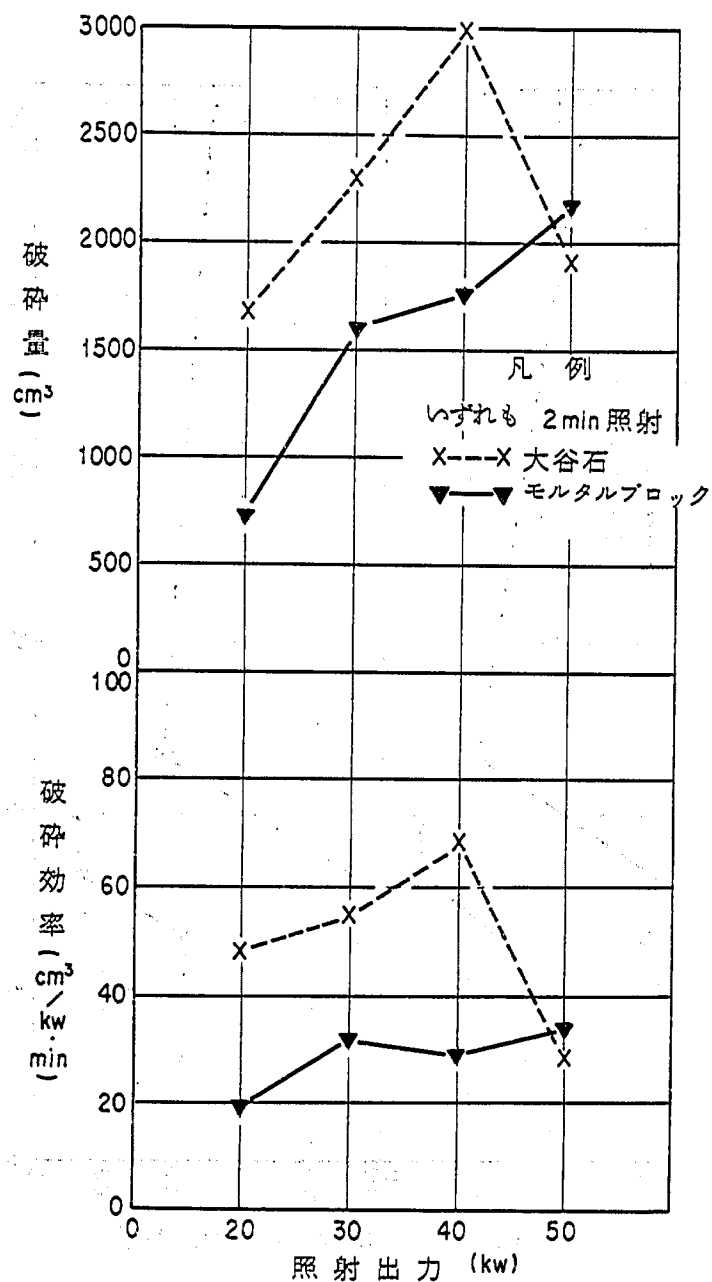


図-16 照射出力と破砕効率

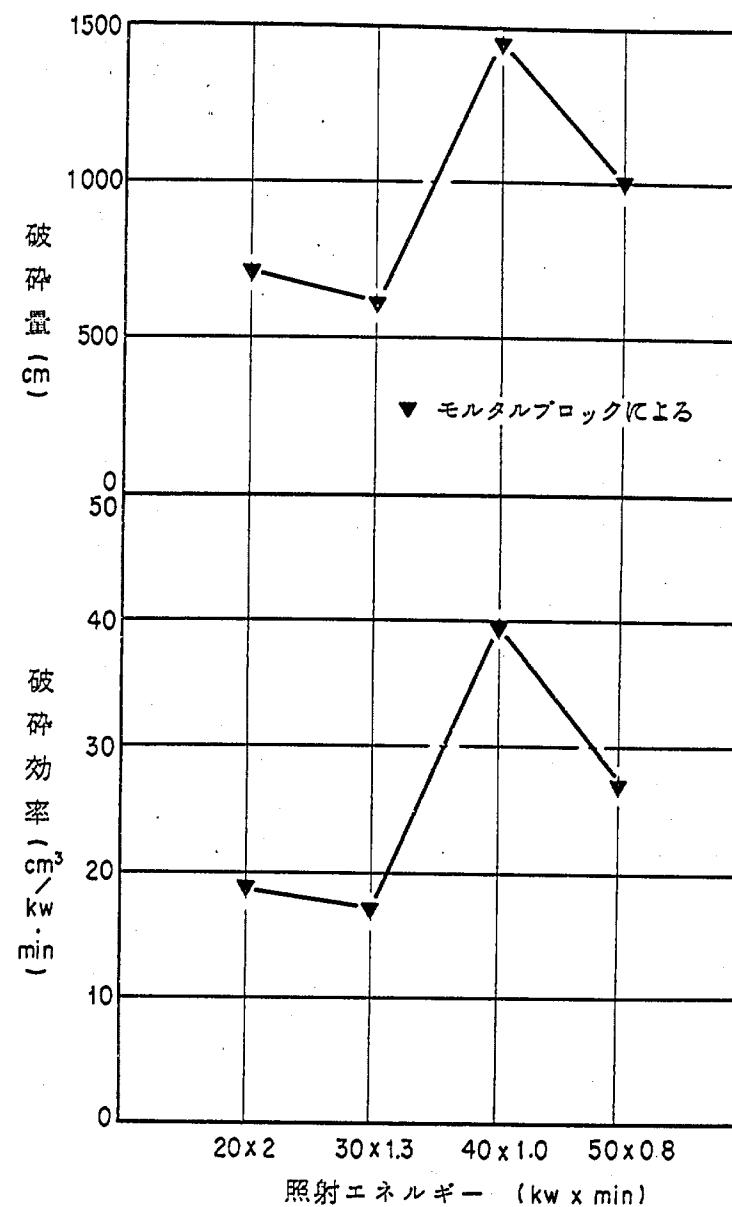


図-17 照射エネルギー定時の破砕効率

(2) 照射時間

図-18は20kw, 50kw 出力における照射時間と破碎効率についてモルタルブロックを例に示したものである。これによれば, 照射時間が長くなるほど破碎効率・破碎量ともに大きくなる。しかし, 照射時間が長くなるにつれ, 両値とも延びが減少し頭打ちになる傾向がある。図-18は, クレータ型破碎のモルタルブロックについて示したものであり, 照射時間の経過とともに, 破碎によって照射面の形状が変化し, 照射距離や供試体内の応力分布等が変わる。そして, 破碎が生じにくい状態になるので, 照射時間は長くしても破碎効率は良くならないことを示している。

そこで, 図-19に1回目の破碎が起った時点でマイクロ波の照射を中止し, 破碎に要する最小時間を計ったモルタルブロックの実験結果を示す。この図によれば, 破碎に要する時間は出力の増大とともに指数関数的に減少し, 最高温度は増大するが, 破碎量, 破碎効率は減少する。図-20はそれらの温度分布と破碎断面を示したものであるが, 出力が大きいほど温度の分布範囲がせまく, 最高温度は高いから温度勾配は急であることを示している。しかし, 図-19および20の, 出力が大きいほど, また温度勾配が急なほど破碎効率が悪いというのは, 図-16, 17の結果とは矛盾するように思われ, これについては次のように考えられる。

岩石供試体が, マイクロ波照射の誘電加熱によって破碎されるには, 充分な破碎エネルギー(内部応力)の蓄積が必要であると推察される。照射出力が小さいと, それに達するためには長時間かかり, 広範な温度分布があるために破碎域が広く, 破碎量も大きい。一方, 大出力では容易にエネルギーが蓄えられるため, 短時間で破碎するが, その域が照射表面部に限られるため, 破碎量は小さい。

このように, 温度分布と破碎量・破碎エネルギー(内部応力)は密接に関わりを持っている。これらについては検討を加え, 別途報告する。

4.3 照射前後の岩石の力学的変化

表-5にマイクロ波照射前後のシュミットハンマーテストの結果を示す。数字は表面に設けた測定点25点の平均値であるが, 破碎面(いわゆるクレータ型破碎を起して, 表面が碎屑状になっているもの)で測定したもの以外はやや小さくなっている程度である。これは, 表面に正じたクラックがシュミットハンマーの衝撃を吸収し易くしているため, 反発度が小さくあらわれると推測される。

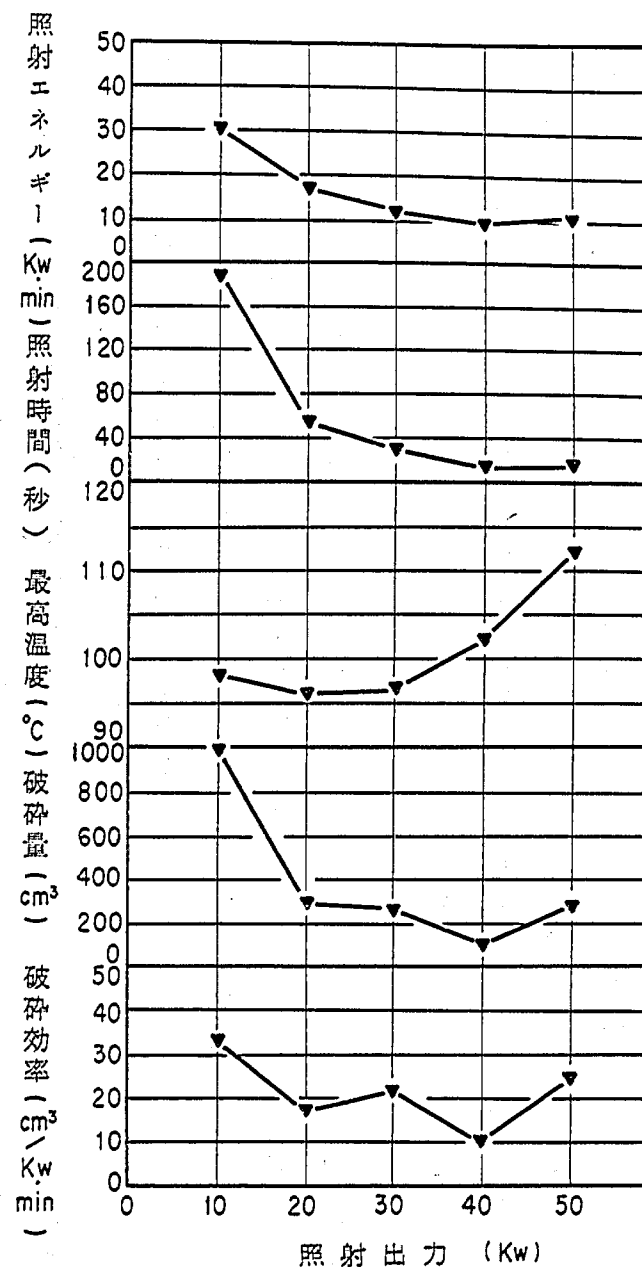
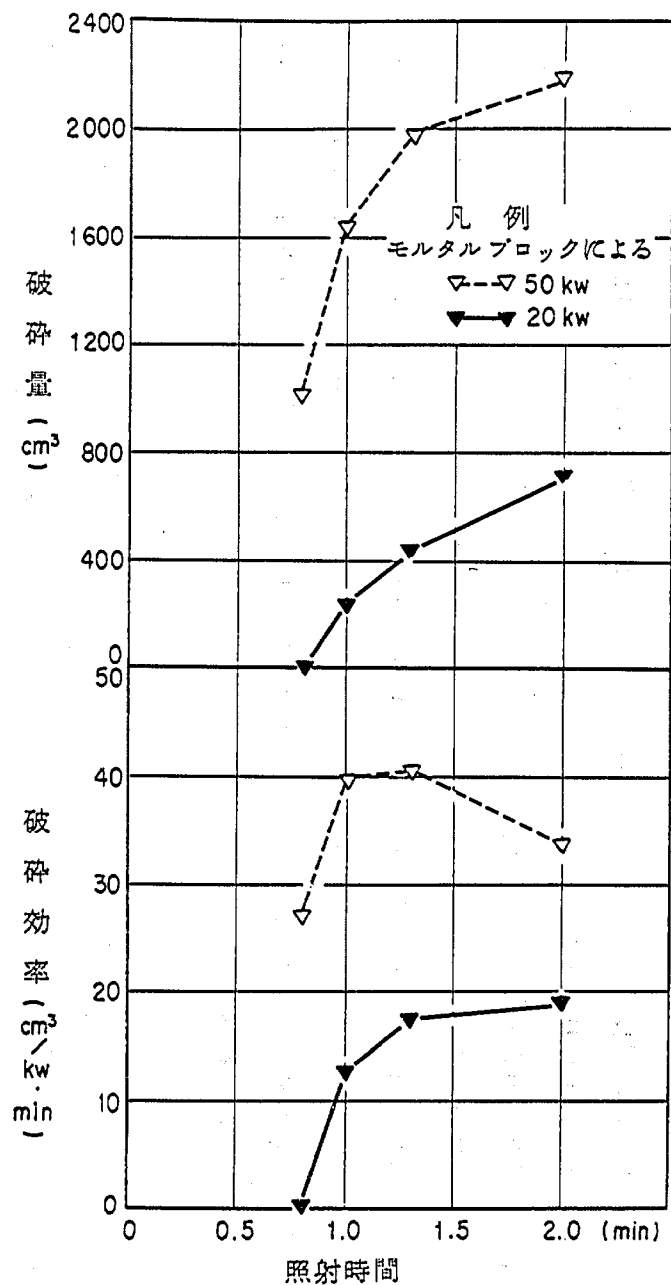
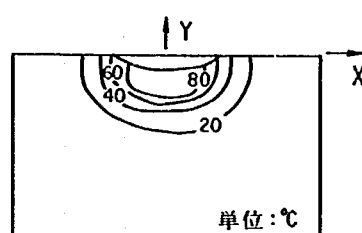
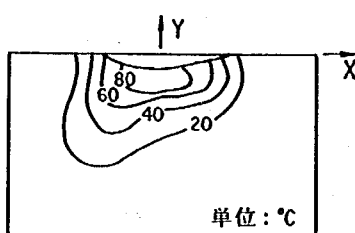
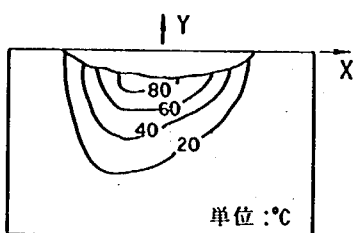
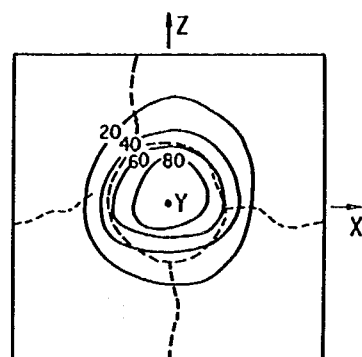
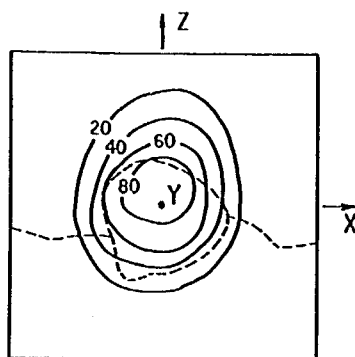
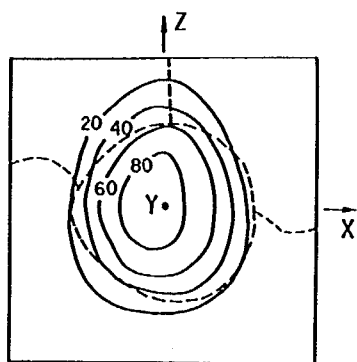


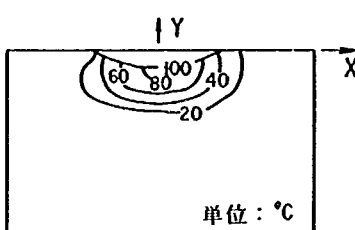
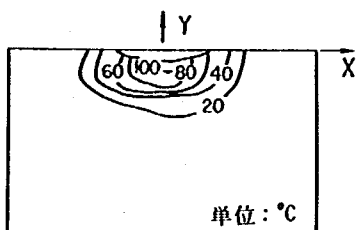
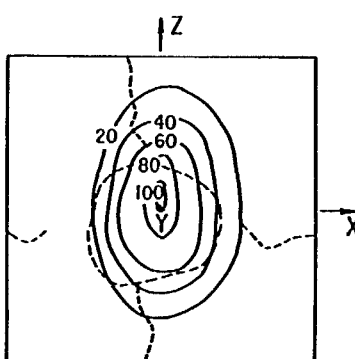
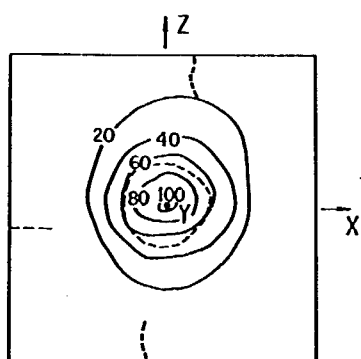
図-18 出力一定とした時の照射時間と誘電加熱（クレータ破砕） 図-19 出力別に見た破砕に要する最小時間・最高温度・破砕量



① 10 kw 191"
(破砕量 990 cm³)

② 20 kw 54.50"
(破砕量 285 cm³)

③ 30 kw 25.76"
(破砕量 255 cm³)



④ 40 kw 14.40"
(破砕量 90 cm³)

⑤ 50 kw 14.34"
(破砕量 265 cm³)

図一 20 出力別にみた破砕に要する最小時間と温度分布、破砕断面

表-5 シュミットロックハンマーテスト結果

	照 射 前	照 射 後	照射エネルギー合計
花 崗 岩 Gr	72	67	1.1 025 kwmin
花 崗 閃 緑 岩 Gd	72	68	6 34 kwmin
閃 緑 岩 Di			
はんれい岩 Ga	71	66	5 53 kwmin
黒 色 安 山 岩 Al	70	69	8 56 kwmin
灰 色 安 山 岩 Al	75	74	7 82 kwmin
玄 武 岩 Ba	74	70	7 36 kwmin
石 灰 岩 Li			
粘 板 岩 Md	72	62	3 36 kwmin
砂 岩 Sd	56	54	4 79 kwmin
大 谷 石 Tf	37	※ 33	5 6 kwmin
コンクリートブロックCb	44	※ 27	3 6 kwmin
モルタルブロック Cb			

※破砕面で測定

5. ま と め

以上のように、種々の岩石による供試体を用いてマイクロ波による発熱・破碎特性について検討した。それは次のように要約できる。

- ① 一定の照射条件下における内部温度分布パターンは、大きく2つに分けられる。1つは、大谷石・モルタルブロック等に代表される孔隙岩質型、他方は花崗岩・安山岩等に代表される緻密岩質型である。前者は照射面付近の局部的な加熱が起り、後者は広く深い範囲に渡って加熱が起る。
- ② マイクロ波の照射エネルギーに対して発熱効率の良いものは、閃緑岩・はんれい岩・粘板岩等の比較的黒色系統の岩種で、反対に効率の悪いものは、大谷石・花崗岩・石灰岩等の白色系統の岩種である。
- ③ 供試体の含水比は、高いほど発熱量は高く発熱効率も良いが、破碎量はかえって少なく破碎効率も悪くなる。
- ④ マイクロ波の照射法として、誘電加熱の効率を高めるには、照射出力が大きいほど良い。
- ⑤ マイクロ波照射による破碎のパターンは、今回用いた供試体の寸法だと2つある。1つは孔隙岩質型の温度分布の岩種にみられる爆裂孔を生じて破碎するクレータ型。他方は緻密岩質型の温度分布を示す岩種にみられるクラック型の破碎である。
- ⑥ 破碎効率を向上させるには、大出力のマイクロ波照射が良い。また、1回の破碎で大量に破碎するには、小出力の長時間照射が良い。

あ と が き

マイクロ波による岩石破碎は、トンネル切端や切取法面、マスコンクリート等の岩盤破碎を目的としている。今回行った供試体での照射実験は、その過程として、各岩種の温度分布パターンや破碎パターンを検討したもので、一応の成果を見た。

そこで今後は、これらの実験結果をもとに岩盤を想定し、FEM等の温度応力解析を行って、岩盤における破碎形状や破碎効率について検討する必要がある。

さらに、現場への本工法の適用については、効率的な照射方法の検討とともに、機器の小型軽量化等の改良やマイクロ波のシールド技術も必要である。

謝 辞

本資料をまとめるにあたり、有意義な御助言をいただいた岡本隆一前地質官（現〔財〕ダム技術センター）および蒔田実地質化学部長ならびに、在任中は本研究を担当された菅原捷前地質研究室長（現水資源開発公団試験所）、神尾重雄元研究員（現中国地建八田原工事事務所）に心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 森, 松浦, 安田, 細野: マイクロ波によるコンクリート及び岩石の破碎技術, マイクロ波研究会資料, 1972年
- 2) 熊谷三郎編: 電子工学ハンドブック, 朝倉書店, 1964年
- 3) 岡村総吾: 岩波講座基礎工学2 電磁気学Ⅲ, 岩波書店, 1974年
- 4) 須藤俊男: 粘土鉱物(岩波全書), 岩波書店, 1963年
- 5) 三沢, 高橋, 岸本, 内藤: 電磁波による岩石破碎試験, 鉄道技術研究所速報 71-40, 昭和46年
- 6) United States Geological Survey: Hand Book of Physical Constants, 1966年
- 7) 川下研介: 熱伝導論, オーム社, 昭和44年
- 8) 日本機械学会: 機械工学便覧, 昭和43年
- 9) 菅原捷・神尾重雄・神保悟: マイクロ波による岩石の破碎, 土木技術資料, vol. 21 766, 1979年. 6月
- 10) 奥出律・高橋英俊: 岩盤浚渫における電磁波砕岩技術の開発, 運輸省港湾技術研究所, 1980年. 12月

電磁波による岩石破碎

ISSN 0386-5878
土研資料 第1929号
昭和58年3月(1983)

キーワード：マイクロ波，誘電加熱
岩石，破碎

桑 原 啓 三
平 野 勇
神 保 悟

要 旨

電磁波（マイクロ波）照射による数種の岩石の
発熱特性や破碎特性を，供試体実験によって検討
した。



郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい。

茨城県筑波研究学園都市

建設省土木研究所

地質研究室 御中

No. 12

No. 12

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第1929号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑨

