

熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について*

山口 梅太郎¹

宮崎 道雄²

1. 緒 論

高圧電源や高周波加熱による岩石の破壊の方法、あるいはジェット・ピアシング等、従来のさく岩、爆破による岩石の破壊法とはまったく異なつた機構による岩石の破壊の方法が注目されるようになり、本会誌に発表された研究も^{2,3}にとどまらない¹⁾²⁾。これら特殊な方法による岩石の破壊の多くは、結局のところ局部的に発生する熱による破壊と考えられる。したがつて、岩石が熱せられた場合に、岩石の強度がどのように変化し破壊されるのか、その機構が如何なるものであるのか等を研究することは重要である。

加熱状態の岩石の強度の変化、あるいは破壊の問題もきわめて興味あるものであるが、岩石の熱による破壊の問題は非可逆な性格をもつものであるように思われるし、何よりも実験が非常に困難であるので、熱を経験した岩石の強度の変化、あるいは破壊を中心とした研究を行なつた。すなわち、加熱した後冷却した岩石試料について強度の変化や破壊の状況などを測定し、その結果について検討を加えた。

類似の問題についての研究も報告されているが³⁾、多少の知見を加えることができたと思つてまとめることとした。

2. 熱を経験した岩石の強度の変化

2.1 実験の方法

実験として特別に変つたものを行なつたわけではなく試験片をある温度に加熱したものについて強度試験を行なつたに過ぎない。ただこの場合に、試験片の加熱、冷却の状態、その後の測定の条件などにできるだけの注意を払うようにしたつもりである。

この目的のために、昇温速度をかなり正確にコントロールすることができ、内容量も充分な大きさを持つ最大加熱温度1,200°Cの電気炉を作成した。測定した強度は圧縮強度と圧裂引張強度で、試験方法は日本鉱業会の岩石強度測定法(案)に準拠した⁴⁾。実験に供した岩石は

稲田花こう岩、新小松安山岩、太平田石灰岩の3種類、実験条件としては徐熱徐冷、徐熱急冷の2通りである。

電気炉の仕様

非金属抵抗電気炉(三和電炉製) BMF-2040
カンタル線A-1 使用, 最大電力 8.5kW,
最高温度 1,200°C

有効寸法 幅200mm×高200mm×奥行400mm
プログラム信号発信器, 電子式自動温度調節器,
SCR電力制御器付

強度試験の方法——日本鉱業会岩石強度測定法(案)に準拠

使用試験機 リーレ型圧縮試験機(東京衡機製)
最大容量 20 t

試験片 大きさ約30mmφ×60mm
……圧縮試験片
約30mmφ×10mm……圧裂引張試験片

仕上げ 高温に加熱したため、上下面が僅かに荒れた場合には、カーボランダム粉末で軽く再研磨して試験を行なつた。

数 グラフの各点につき10個、安山岩の1,100°Cは5個

試験方法 荷重速度約10kg/cm²/sec……圧縮試験, 約10kg/sec……圧裂引張試験(試験片全体に対して)

加圧面と試験機のプラテンの間に0.2mm厚さの汙紙を挿入

供試岩石

稲田花こう岩(茨城県筑波地方産): 最大結晶粒5mm程度の中粒の灰白色花こう岩。有色鉱物は黒雲母。石英を約40%含む。見かけ比重2.72の堅硬緻密な花こう岩。

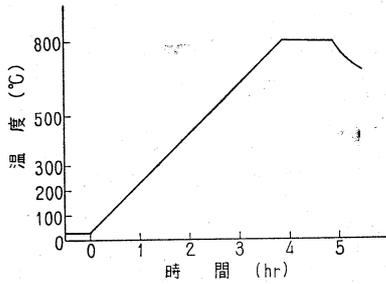
新小松安山岩(神奈川県真鶴地方産): 灰褐色の堅硬緻密な両輝石安山岩。1~2mmの長石の斑晶を持つ。見かけ比重2.62。

太平田石灰岩(茨城県日立市太平田鉱山産): 白色ザラメ状の結晶質石灰岩。茶色の薄い縞模様のある部分もある。結晶の大きさは1~2mm。見かけ比重2.72。

* 昭和44年9月24日受理

1. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科

2. 正会員 東京大学工学部資源開発工学科



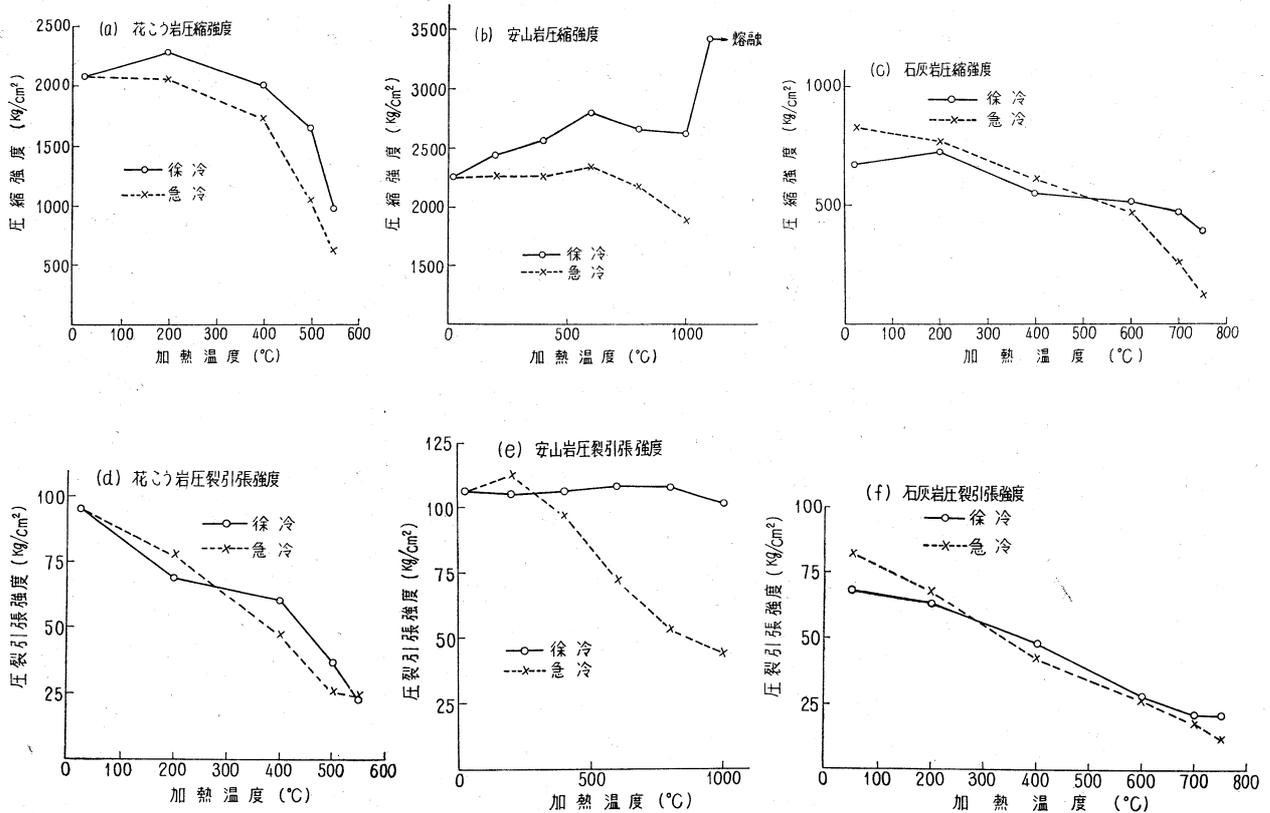
第1図 加熱昇温条件

■試験の結果は次小節以下で述べるが、それぞれの試験における試験片の加熱条件はすべて同じにとつた。すなわち、第1図に示すように、昇温速度200°C/hrで電気炉

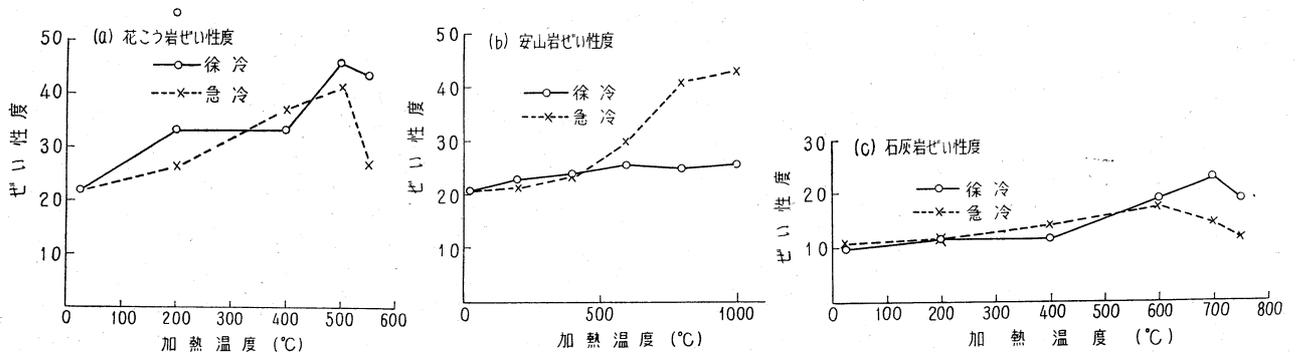
内のふん囲気温度^{a)}を上げ、炉内中央の温度が所定の温度に達したところで1時間その温度に保ち、炉内で自然冷却あるいは水中に投じて急冷する条件とした。第3節で述べるが、この昇温速度では、岩石試験片内に生ずる熱応力は破壊に対して考慮される大きさではない、と考えてよい。

2.2 徐熱徐冷の影響

昇温速度 200°C/hr で所定の温度とし、1時間その温度に保つた後、炉内で自然冷却^{b)}をした結果は第2図(a)~(f)に見られる。その影響が試験に供された3種類の岩石で非常に異なっていることがわかる。



第2図 加熱温度と強度の変化



第3図 加熱温度とぜい性度の変化

a) 電気炉の中央に設置した熱電対温度計により測定した温度。以下で炉内の温度または加熱温度と呼ぶものはすべてこの温度を指す。

b) 電気炉の電源を切つてしばらく放置した後、炉の覗き窓を開ける。その後さらに温度が下つたところで炉扉を開け、扇風機で過風する。1,000°C前後から常温まで下るのに2昼夜位かかる。

花こう岩、石灰岩においては、温度はいずれも強度を弱める方向に作用するが、安山岩ではむしろ強度を高めるように思われる。圧縮強度と圧裂引張強度とを比較すると、温度の影響は圧裂引張強度においてより強く現われる。このことは、第3図(a)~(c)の加熱温度とぜい性度の関係からも示される。とくに花こう岩で著るしい。

個々の岩石についてみると、安山岩ではほとんど強度の低下はみられず、圧縮強度はむしろ温度の増加とともに高くなり、1,100°Cで急激な強度の増加を示した後⁶⁾、溶解してしまう。花こう岩の圧裂引張強度は温度の上昇とともに徐々に強度の低下を示すが、圧縮強度は400°C前後までそれほど著るしい強度の低下は示さない。しかし、いずれも500°Cを越すと急速に強度が下がり、550°Cでは亀裂が生じて、強度は常温の1/2以下になってしまう。600°Cではほとんど崩壊状態となる。石灰岩は花こう岩に似た経過をたどるが、花こう岩にみられる500°C付近の崩壊温度ともいうべき値が700°C付近に移動する。

2.3 徐熱急冷の影響

2.2における徐熱徐冷の場合と同様に徐熱し、所定の温度に1時間置いた後、急激に水(水道水、水温約25°C)中に投入して急冷し⁴⁾、充分冷却した後、デシケータ中に3日以上放置して乾燥し、強度の測定を行なった。結果は第2図(a)~(f)に、徐熱徐冷の場合と併記して示してある。

安山岩、とくに圧裂引張強度において、著るしい強度の低下がみられるほかは、強度低下の割合が徐熱徐冷の場合に比して大きいことはたしかであるが、急冷の影響がそれ程顕著であるとはいえない。

この実験で興味深かったことであるが、石灰岩で700°C付近まで加熱した試験片を水中に投入すると、投入直後に試験片の表面が溶解し、冷却後水から引き上げた試験片の性状に著るしい劣化がみられた。

3. 熱応力に対する検討

電気炉内の昇温速度を200°C/hrとしたが、この値は試験片が熱応力によって破壊しない昇温速度ということで決められた。熱衝撃による熱応力破壊が起らない昇温速度の決定方法には適当なものがなく、経験や実験によって決められることが普通ようである。われわれも2, 3の試行実験⁹⁾を行なった後、最高温度1,000°C以上まで昇温するための時間などを考慮して200°C/hrを決定し

た。この値は、第2.2節の結果からも熱応力による破壊を起していないことが推論し得るし、次に述べる高津・高見の研究を参考にして行なった一応のチェックからも妥当であることが示された。

高津らの研究は⁹⁾、材料が徐熱または徐冷される場合の材料内の熱応力、あるいは最大の加熱または冷却速度をまえもつて算出できるチャートを作ることを目的としたものである。この研究結果を直接利用するためには、試験をする岩石の熱的性質や試験片のディメンション、とくに外界の最初と最後との温度差、適用の条件によって異なる熱伝達係数、引張強度、およびピオー数が必要である。ところが、それぞれの値は電気炉内の熱伝達の機構や岩石の熱的性質がはつきりしないため、正確には求められない。一応、次の数値を用いて高津らの研究結果にあてはめ、この範囲の昇温速度では熱応力による破壊は起らないことを確認した。用いた数値は次の通りである。

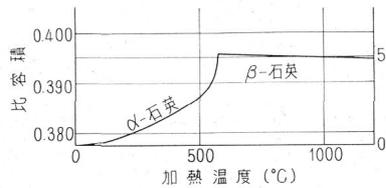
外界の最初と最後の温度差	1,000°C
岩石の熱伝導率 ⁶⁾	4kcal/m·hr·°C
岩石の温度伝導率 ⁶⁾	1×10 ⁻² m ² /hr
熱伝達係数 ⁷⁾	10kcal/m ² ·hr·°C
ピオー数	7.5×10 ⁻²
最大無次元熱応力	1.9×10 ⁻²
ポアソン比	0.25, ヤング率 2×10 ⁵ kg/cm ²
引張強度	50kg/cm ² , 熱膨張係数 1×10 ⁻⁵ /°C

冷却速度については、熱破壊を考える上で昇温速度以上に重要であるが⁹⁾、今回の徐熱徐冷の実験では問題がない。徐熱急冷の実験について行なった熱衝撃に関する理論計算では⁹⁾、ピオー数0.075、引張強度50kg/cm²とすると、最大許容温度差として1,100°Cが得られる。この値は、徐熱急冷の実験で熱破壊が生じないことを示しているが、実際には、安山岩の場合のように急冷の影響のみみられるものがある。理由として、岩石試験片と水との間の熱伝達の機構によって異なるピオー数のちがい¹⁰⁾、熱衝撃の理論計算式が試験片のような有限円筒に対して求められたものでないことによるちがいなどが考えられる。

以上の熱応力に対する検討をもとにして第2節の実験結果を考察すると、徐熱徐冷の試験条件では、岩石の試験片は熱応力による破壊を起していないとすることができる。花こう岩、石灰岩が徐熱徐冷で強度の低下を示したのは、熱応力以外の機構による影響を受けたと考えなくてはならない。

徐熱急冷の実験において、花こう岩、石灰岩の強度低下が徐熱徐冷の場合より幾分大きく現われたこと、徐熱徐冷でむしろ強度の増加を示した安山岩が、徐熱急冷によって、とくに圧裂引張強度において、著るしい強度低下を示したことは、熱応力の影響が急冷によって現われ

c) 第2図(b)の1,100°C点は4個の試験片の平均値で、5個の試験のうち1個は、溶解がある程度進行していて、変形してしまい、強度測定の試験片にはならなかった。
 d) 300°C程度の容器に水を流しておき、さらにかくはんしておいて、この中へ加熱した試験片を投入する。そのために、電気炉の覗き窓をあげ加熱しておいた電気炉バスマで試験片をつかんで水中に落とすようにした。
 e) 昇温速度を100°C/hr, 200°C/hr, 300°C/hrとして1個ずつの花こう岩試験片を試験した結果、差異が認められなかった。



第4図
石英の温度による体積変化

たとする根拠を与えることになる。

4. 熱応力以外の破壊の機構

徐熱徐冷、徐熱急冷の試験条件で行なつた実験の結果から、とくに花こう岩、石灰岩における岩石の強度の変化、あるいは破壊はむしろ熱応力以外の機構によるものと考えなくてはならないことがわかつた。その他の機構として考えられるものは、組成鉱物の熱分解、温度変化に伴う結晶型の転移による破壊、組成鉱物結晶相互の熱膨張による応力、あるいは熔融などである。この研究で試験に供された3種類の岩石は、その意味で、それぞれ異なつた破壊機構をもつ岩石の典型と考えてよいように思われる。

a) 温度変化に伴う結晶型の転移による破壊

稲田花こう岩は、加熱温度が500°Cを越した付近で急激な強度の低下を示し、573°Cに達したところ（実験では550~600°C付近）で、試験片に亀裂が生じ、変形し、強度はほとんどなくなつて崩壊状態になつてしまう。

石英は573°Cでα-石英からβ-石英に転移するが¹¹⁾、同時に急激な体積変化を起す(第4図)。石英を多量に含む(約40%)稲田花こう岩の強度の温度変化はこの石英の温度による体積変化、とくに573°Cにおける転移に伴う体積変化を基礎にしているといつてよいと考えられる。

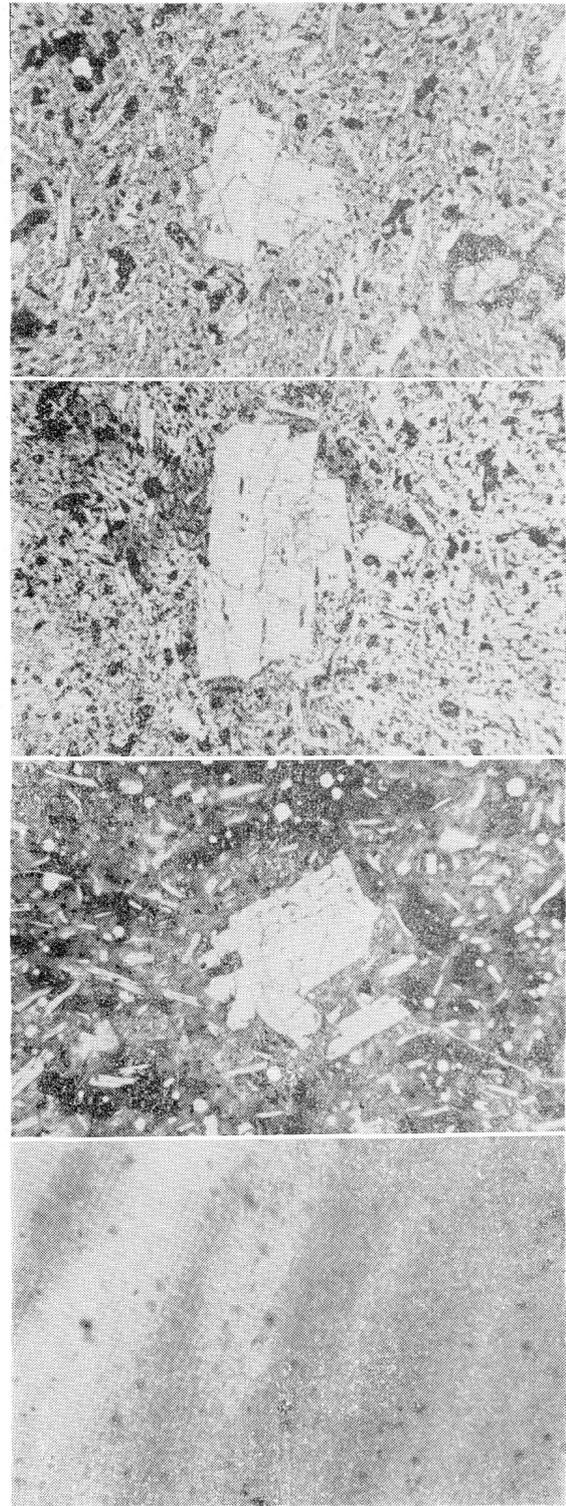
b) 組成鉱物の熱分解

太平田石灰岩はザラ目状の大理石に近い結晶質の石灰岩であるが、200°Cを越えると強度の低下がはじまり、600°C以上になると明らかに変質がみられる。750°Cでは完全に崩壊する。

第1表 炭酸カルシウムの分解温度とCO₂の分圧

温度 °C	587	701	800	857	881	894	894	1,000
CO ₂ 分 圧, mmHg	1	23	183	420	603	716	760	2,710
CO ₂ 濃 度, %	0.13	3.0	24.1	50.2	79.4	94.1	100	(3.86 atm)

石灰岩を構成している方解石は、第1表に示したように500°C付近から熱分解を起し、894°Cで大気圧に等しいCO₂の分圧を示す¹²⁾。示差熱分析でも870°C付近から著しい吸熱を示すピークがある。急冷の実験で加熱されていた石灰岩を水中に投じた場合、600°C以上に熱した試験片で、試験片の表面が溶解する様が観察されたが、これは熱分解によつて生じた生石灰CaOの溶解と考えてよい。したがつて、石灰岩の強度の変化においては、



上より (a) 常温 斑晶は斜長石
(b) 1,100°C 斑晶は斜長石
(c) 1,150°C 石基の部分に溶融しているものが見られる。斜長石の斑晶はまだ変化していない。
(d) 1,200°C 完全に溶融してガラス質になつた。

第5図 新小松安山岩の組織の変化(200倍)

方解石の熱分解が主たる機構であるといつてよさそうである。

c) 溶融

新小松安山岩の徐熱徐冷の場合、強度はほとんど変化しない。むしろ上昇の傾向を示す。約1,100°Cで急激に強度が増すが、1,200°Cでは溶融してしまう。1,100°Cでも試験片はすでに溶融をはじめており、試験片の形状に変化を来しているものもあつた。顕微鏡下の観察でも、石基の部分に溶融した部分のあるのが見られる(第5図)。

d) 組成鉱物結晶相互の熱膨張による応力

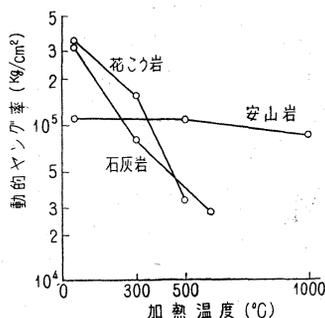
稲田花こう岩、太平田石灰岩の両者の徐熱徐冷の場合に見られる200~500°C付近での強度低下の説明はa), b)によるものでは説明し得ない。今回の研究では積極的な説明を与えることができないが、組成鉱物結晶相互の熱膨張係数のちがいによる膨張の差から生ずる応力などを考えることができそうに思われる。とくに花こう岩は異種の鉱物から成り立っており、石灰岩のように同一の鉱物で構成されているものでも、構成鉱物の結晶軸の方向による熱膨張率の差が、ランダムに配列している結晶粒子の間に応力を生ずることになると思われる。200~500°C付近の比較的低温において発生したこのような応力が、結晶粒子の結びつきの間に何らかの影響を与え、常温にまで冷却した後も岩石の強度に影響していると考えられる。

熱膨張による結晶の変位 dl は、弾性係数が温度に関係しないとすると

$$dl \propto \alpha Tl$$

で表わすことができ、熱膨張係数 α 、温度 T 、結晶の長さ l に比例するとしてよいから、結晶の粒子が大きいほど大きな変位が生じ、組成鉱物結晶相互の熱膨張のちがいによる強度の温度変化は、結晶粒子が大きいほど顕著であることが予想される。異種鉱物の結晶から成り立っている新小松安山岩がその強度の熱変化を示さないのは結晶の粒子が小さいことによるのではないかと思われる。

参考として、岩石の動的ヤング率の温度変化を徐熱徐冷による試験片について測定したので、その結果を第6



第6図 加熱温度と動的ヤング率の変化

図に示した。強度ではないが、何らかの組織の変化が試験片内に生じていることを示唆している。

e) その他

その他に、鉄鉱石に見られる熱割れ現象とか、結晶のデクレピテーションの原因である結晶生成時の温度やひずみに起因する破壊機構も考えなくてはならないであろう。

5. 結 論

ある温度に加熱した後常温まで冷却した岩石試料について強度試験を行なつて、熱を経験した岩石の強度の変化あるいは破壊の状況を観測し、検討を加えた。その結果、岩石の熱による破壊の機構にはいくつかのものが考えられた。もちろん、それぞれの機構はたがいに影響を与え合うものであろうが、それぞれの岩石によつて主たる機構が異なつてゐることが知られた。

われわれが試料として用いた稲田花こう岩、新小松安山岩、太平田石灰岩は、それぞれ、石英の573°Cにおける結晶の変態、熱応力、方解石の熱分解を主とする機構によつて破壊されることがわかつた。この他に、熱破壊の機構として、組成鉱物粒子相互の熱膨張の差、溶解なども考えなくてはならない。したがつて、熱によつて岩石を破壊する場合には、岩石の構成鉱物の組成や組織、熱の加え方あるいは冷却の方法などに十分な考慮を払う必要がある。

おわりに、本研究にあつて御指導をたまつた下村弥太郎教授、実験の手助けを惜まれない森田道明助手に厚く御礼申し上げます。なお、本研究の費用が、昭和41年、42年文部省科学試験研究費補助金によりまかなわれたことを付記するものである。

参 考 文 献

- 1) 伊藤一郎・佐々宏一・稲田善紀：日本鉱業会誌，83巻953号，昭和42年9月号，1071~1076頁
- 2) 渡辺善治郎・真藤宏樹：日本鉱業会誌，85巻，969号および970号，昭和44年1月号および2月号，21~25頁および73~76頁
- 3) 外尾善次郎・高島啓行，日本鉱業会誌，84巻，964号，昭和43年8月号，1071~1076頁
- 4) 日本鉱業会岩石強度測定法特別委員会：日本鉱業会誌，84巻，965号，昭和43年9月号，1479~1487頁
- 5) 高津学・高見昭雄：窯業協会誌，75巻，昭和42年11月号，315~324頁
- 6) H. St. G. Tucker: J. of the Mine Ventilation Society of South Africa, Oct. 1968, pp. 179~181
K. Kawada: Bull. the Earthquake Res. Inst., Vol. 42, pp. 631~647
V. V. Ржевский & Г. Я. Новик: Основы физики горных пород, издательство "наука", москва 1967, 190~193
- 7) 川下研介：熱伝導論，河出書房，昭和16年，21頁
- 8) F. H. Norton: Refractories (4th ed.) McGraw-Hill, 1968, p. 244
- 9) I. E. Campbell 編，島貫・城戸・国谷共訳：高温工学(再版)，コロナ社，昭和40年，469頁
- 10) 内田俊一・亀井三郎・八田四郎次：化学工学(第19版)，丸善，昭和36年，133頁
- 11) 坪井誠太郎：岩石学I，岩波書店，昭和26年，161頁。前掲8) p. 289
- 12) 日本化学会編：化学便覧，丸善：昭和33年，1440頁

A Study of the Strength or Failure of Rocks Heated to High Temperatures

by Umetaro YAMAGUCHI and Michio MIYAZAKI

There has been a rapid increase of interest to unconventional methods of fracturing rocks. Particularly, mechanics of thermal fracture, either by the application of direct heat or electrothermal conversion, are most favourable for practice.

In this paper, the authors reported their experiments to measure the strength changes of rocks heated to high temperatures and the thermal fracture.

From the experiments, several fracturing mechanisms of rocks heated to high temperatures were found. Which are ;

- a) Thermal elastic stresses induced in rock.
- b) Transformation of crystal form of the constituting minerals of rock.
- c) Decomposition of the constituting minerals.
- d) Melting.
- e) Thermal expansion of the constituting minerals.
- f) Others.

Nevertheless these mechanisms are all affecting to thermal fracturing of rock, one of them is a dominant factor to fracture a particular kind of rock by heat, for example b) to granite and c) to limestone.

▶新刊紹介◀

ニュージーランドの鉱業 New Zealand Official Yearbook 1969

ニュージーランドに関する歴史、経済、地理、貿易、法律、行政、生産、人口などに関し、政府の統計機関が編集した年鑑で、ニュージーランドを知る上には、まことに便利なものである。

製産資源としては、石炭・粘土・石灰岩・ドロマイトなどが工業的に重要なもので、鉱産物の生産価値の約90%は石炭、砂利、石灰石などで占められている。

1964年以降、政府は5ヶ年計画を3段階に押しすすめているが、第1段階では石油の探査とドロマイン鉱床の探鉱ならびに石

炭利用の研究に重点をおき、第2段階では石灰岩、骨材、ベントナイトの積極的な探鉱を、第3段階では地下水の供給および電気化学工業の発展に必要な長期計画に関するものである。

1967年の統計によれば、鉱産物の生産価値はつぎのような順になっている。単位千ドル。

道路用バラスト(16,962)、石炭(13,263)、建築用バラスト(5,770)、農業用石灰岩(1787)、塩(1214)、セメント用石灰岩(902)、金(361)、煉瓦用粘土(343)、珪

砂(225)、工業用石灰岩(215)などで、鉄・ウラン・金・タングステン・銅・マンガ・ン・水銀・アンチモン・鉛・亜鉛・錫・白金などの鉱産資源の開発は、今後の問題に残されている。(三野英彦)

Department of Statistics :-
New Zealand Official Yearbook
1969

pp. 1170, \$2.50

出版所：A. R. Shearer, Wellington
N.2. (Government Printer)