



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍結させた鉾石の曲げ破壊について
Author(s)	大浦, 浩文; OURA, Hirobumi; 相沢, 健 他
Citation	低温科学. 物理篇, 16, 47-54
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17928
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p47-54.pdf



凍結させた鉱石の曲げ破壊について*

大 浦 浩 文

(低温科学研究所 応用物理学部門)

相 沢 健

(住友金属鉱山株式会社 北海道国富鉱業所製錬課)

(昭和 32 年 6 月受理)

I. ま え が き

鉱山では堀出した鉱石を野外に積んでおくことがあるが、北海道のような寒地ではそれが冬期間に凍結する。そのため、それを他に運搬する必要が生じたとき、それを崩すのに非常な困難に出あうが、それに応ずるためには、まず凍結した鉱石の固さを知っていなければならない。それで鉱業所が初めて取扱う鉱石については予めその固さを調べておく必要がある。そのためには、これまで扱ってきたその固さの程度のわかっている鉱石の試料と、これから取扱おうとしている固さのわかっていない試料とを低温室で凍結させて、その固さを比較することが望ましい。ここでは前者として土畑鉱山産の Charcopyrite (銅鉱) を浮遊選鉱にかけたものを用い、後者としてはニューカレドニア産の Garnierite (珪苦ニッケル鉱) を用いた。いずれも粉鉱である。これ等の粒度及び化学成分を第 1 表、第 2 表に示す。尚粒度のくわしい分布を第 1 図に示した。浮遊選鉱にかけた銅鉱は粒径 0.01 mm 以下が 10%、0.13 mm 以上が 10% で、あとの 80% は 0.01 mm から 0.13 mm の間にある非常に粒の大きさの揃った材料であるが、ニッケル鉱は粒子の大きさが広い範囲に分布していて、0.003 mm 以下が 10%、2.0 mm 以上が 10% あつて、あとの 80% も 0.003 mm から 2.0 mm の間に一様に分布している。

これ等の材料が凍結したときの固さを正しく表現するには、引張強度、圧縮強度、曲げ強

第 1 表

試料	粒径範囲 (mm)	粒 度 分 布				土 質 名	比 重	備 考
		0.001 0.005 粘 土 (%)	0.005 0.05 シルト (%)	0.05 2.0 砂 (%)	2.0 以上 砂 利 (%)			
銅 磁 石		2	73	25		沈泥質 ローム	3.79	灰 緑 色
ニッケル磁石		13	37	40	10	ローム	2.99	茶 褐 色

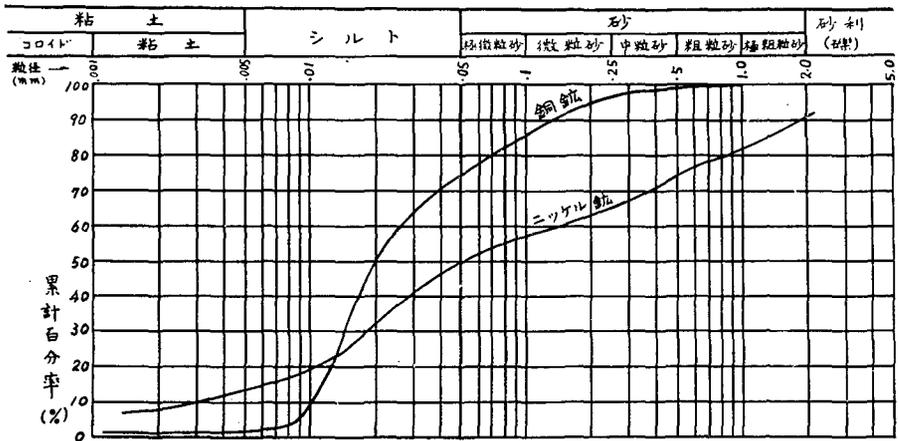
* 北海道大学低温科学研究所業績 第 370 号

第 2 表
銅 鋳 石 の 成 分 (%)

Cu	Pb	Zn	Fe	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	SiO ₂
19.07	tr	2.64	24.55	3.86	tr	0.52	28.18	19.46

ニッケル 鋳 石 の 成 分 (%)

Ni	Fe	MgO	SiO ₂	Co	結 晶 水
3	10	15	30	0.2	5
4	15	25	40	0.4	10



第 1 図 銅鋳及びニッケル鋳の粒度分布

横軸は粒径 (mm), 縦軸はその粒径より小さい粒子全部を加えた重量の全重量に対する百分率。

度, 剪断強度, その他いろいろな破壊の方法を用いた場合の強度が必要であるがここでは曲げ強度だけを測定して比較した。試料は密度, 含水率を変え, ちがった温度で凍結させて試験した。又試料に塩化カルシウムを入れると強度が減少することをたしかめた。

II. 実験方法

a. 試料の作成 灰緑色沈泥質ローム状の銅鋳石と, 茶褐色ローム状のニッケル鋳石とを高さ 3 cm, 巾 4 cm, 長さ 10 cm の直方体にして -5°C , -13°C , -25°C の室に約 1 昼夜入れて凍結させ, 曲げ破壊を行なった。試料は台の上に並べて低温室の空気に曝しておいたので凍結は先ず台に接している面を除いて全表面から始まり, 次いで台に接した面も多少遅れて凍結しはじめる。したがって, 凍結面は表面から中心に向つて進行していたわけである。積んだ鋳石から試料をとつたとすれば, そのなかでの凍結は 1 つの方向だけから進行していたであろうから, 今の場合と氷層の分布情況がちがう。そのために強度にも差違があるのではないかと思

われるが、この点については特別な考慮は払わなかつた。はじめに述べた通り、この測定は、2種類の鉱石の比較試験であるから、その意味で、両者について同じ凍結様式さえとらせておけば一応の目的は達せられるであろう。

銅鉱石については、含水率 10%、(含水率は全重量に対する水分の重量の割合) 密度 2.7 g/cc の試料だけを用いた。ニッケル鉱石の試料としては、含水率 41% のもの以外に、乾燥させて含水率 35.1% にしたものもつかつた。試料を形につめるときも手で可能な最大加圧を加えたり、適度に加圧したり、ばらばらにならない程度に加圧したりして、いろいろ密度のちがつたものを作つた。こうして含水率 41% のものでは密度 1.7 g/cc, 1.5 g/cc, 1.0 g/cc の試料ができ、含水率 35.1% のものでは最大の加圧によつて密度 1.4 g/cc の試料が作られた。このように含水率、密度、温度等について各種の条件をもつた試料をそれぞれ 10 個づつ準備して試験した。含水率 41% のニッケル鉱石については、その重量に対して粒状の塩化カルシウムを 3%、5%、8%、10%、添加混合し、密度 1.7 g/cc に成形した試料を作つた。

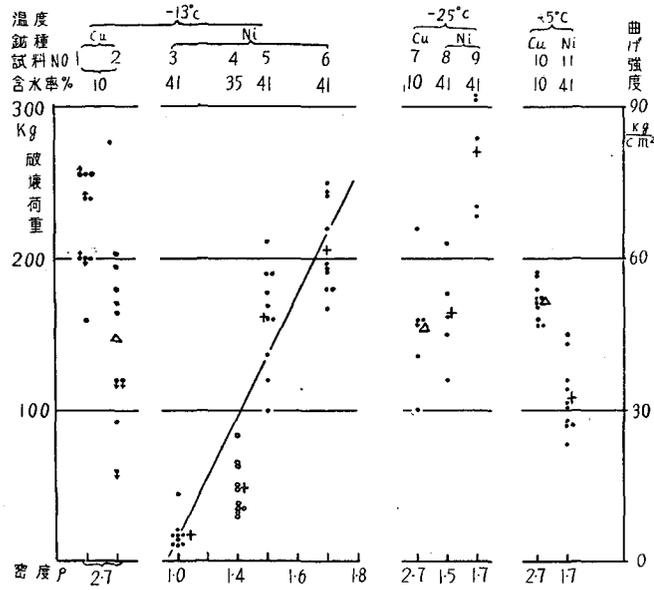
b. 曲げ試験の方法 7.3 cm 離して平行に置いた 2 本の鉄の丸棒 (直径 9 mm) に試料をのせ、この 2 本の丸棒に平行な第 3 番目の丸棒で試料の中央に荷重をかけた。荷重をかけるには挺によつた。すなわち、約 1 m 30 cm の長いパイプの 1 端を回転軸とし、回転軸から 1 m 20 cm のところに錘りをかけ、回転軸から 30 cm のところで試料に荷重をかけるようにした。したがつて、試料にかかる荷重は錘りにの 4 倍になる。

はじめは錘りを 5 kg ずつ 50 kg まで増していつたが、これでは、試料にかかる荷重が 20 kg ずつ増加することになり、1 回の増し高があまり大きすぎる。試料 No. 1 と試料 No. 6 の一部にはこの方法を用いたが、他の試料については次のようにした。すなわち、パイプの回転軸から 90 cm のところを最大目盛 20 kg の棒状ばね秤で下に引張る。ばね秤の目盛が 20 kg になつても破壊しないときには、ばね秤を引張る心をゆるめて錘りの方を 15 kg 増して、それからまたばね秤りを引張る。こうゆうやりかたで、試料にかかる荷重をなるべく連続的に増すようにしたのである。試料にかかる荷重は増えたり減つたりしながらも、平均としては 2 kg/sec 位の割合で増えていつた。

III. 測定結果

いろいろな条件における試料の曲げ強度は第 2 図に示してある。同じ条件で試験した試料には同じ試料番号をつけてひとまとめにしてある。左の縦軸に添つては破壊時において試料に加えられていた荷重を示している。このとき試料に生じていた最大張力は、試料の下面中央の張力であるが、その張力の値を曲げ強度として図の右の縦軸にそつて示してある。荷重を kg、張力を kg/cm^2 であらわすとここで用いた試料の大きさでは、破壊荷重のほぼ 0.3 倍が曲げ強度となる。

各組の平均値を銅鉱石では三角、ニッケル鉱石では十字で示した。試料 No. 1 は試料の作り方や測定法が他の場合と違うので平均値を算出してない。

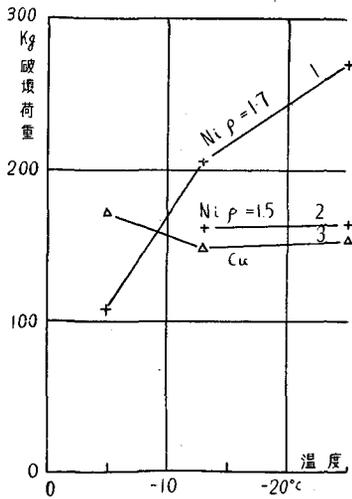


第 2 図

密度、含水率と強度との関係 試料 No. 3, No. 4, No. 5, No. 6 はニッケル鉱石であるが、No. 4 だけは含水率が 35.1% で他の 3 つの試料の含水率は 41% である。密度は No. 3 が 1.0 g/cc (型につめるとき、ばらばらにならない程度に加圧)、No. 5 が 1.5 g/cc (適度の加圧) No. 6 が 1.7 g/cc, No. 4 が 1.4 g/cc (No. 6, No. 4 何れも手による最大加圧) である。この 4 つの試料を -13°C の低温室で凍結させたときの破壊荷重と密度との関係を第 2 図の中央部にまとめてある。同一の含水率の試料については破壊荷重と密度とが直線的な関係にあるものとするれば、含水率の小さい No. 4 の値は、この直線からはずれて小さい値を示していることになる。しかし、含水率が 41% で、No. 4 と同一の密度 1.4 g/cc の場合の実験が無いので、くわしい議論はできないが、破壊荷重と密度との関係はもともと直線的でなく、密度が 1.5 g/cc より小さくなると急激に破壊荷重も小さくなると言う場合も考えられる。

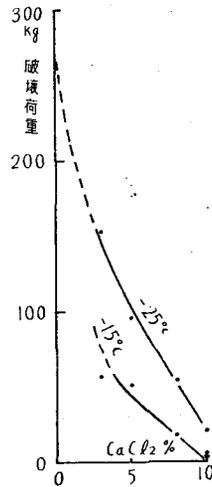
一方、含水率の違った試料を比較するのに水を除いた鉱石粒子のみの密度が等しいもの(空隙率の等しいもの)同志を比較することができる。No. 4 についてこの鉱石粒子のみの密度を算出すると 0.9 g/cc (空隙率 70%) になる。No. 4 に水を加えて含水率 41% の試料を作つた場合、その密度は 1.54 g/cc となるが、このような試料の強度と No. 4 の強度とを比較すれば、No. 4 の強度は明らかに小さく、1.54 g/cc の試料の強度の約 $1/3$ である。この差があらわれたのは、粒子と粒子とを結合している氷の量の多寡によることは明らかである。凍結前における試料 No. 4 の水の含有量は 0.49 g/cc であり、含水率 41%、密度 1.54 g/cc の試料では 0.63 g/cc であつてその差は 0.14 g/cc である。尚水で飽和した場合の水の含有量は 0.70 g/cc である。

含水率が 41% で 1 cc 中の実質部分(鉱石粒子と水とを合せた体積)が試料 No. 4 と等し



第3図 平均破壊荷重と温度との関係

1. Ni, $\rho=1.7$, 含水率41%
2. Ni, $\rho=1.5$, 含水率41%
3. Cu, $\rho=2.7$, 含水率10%



第4図 塩化カルシウムの添加量と破壊荷重との関係

く0.79 ccであるような試料の密度は1.32 g/ccで、このような試料の測定はされていないが、試料 No. 4 と同程度の強度であると思われる。

温度と強度との関係 同密度、同含水率の試料について、温度の影響を示したのが第3図である。含水率41%、密度1.7 g/ccのニッケル鉱石(試料1 cc中の実質部分1.0 cc, 水0.7 cc, 鉱石粒子0.34 cc)では明らかに温度の影響があらわれ、低い温度ほど強度は大きい。含水率41%、密度1.5 g/ccのニッケル鉱石(実質部分0.92 cc, 水0.62 cc, 鉱石粒子0.30 cc)や、含水率10%、密度2.7 g/ccの銅鉱石(実質部分0.91 cc, 水0.27 cc, 鉱石粒子0.64 cc)では、はっきりした温度の影響はないようである。

塩化カルシウムの影響 次に含水率41%、密度1.7 g/ccのニッケル鉱石に塩化カルシウムを添加して強度を調べた。その結果を第4図に示してある。添加量の増加とともに強度は減少している。但し、塩化カルシウムは粒状のまま鉱石と混合したものである。したがって試料の中に完全な溶液となつて入っているわけではなく、場合によつては局部的に、飽和溶液につつまれて、固形の塩化カルシウムが残っていることもあつた。もし、完全に一様な濃度の溶液になつているものとするれば、水を含んだ鉱石の重量に対する塩化カルシウムの添加量3%、5%、8%、10%に相当する氷点は -3.5°C 、 -6.5°C 、 -12.7°C 、 -17.5°C である。添加量10%の試料を -15°C で凍結させた場合の強度として第4図の上には6 kg以下の印が示されているが、これは試験の際の最小荷重が6 kgであつたため、実際は零とみてよいであろう。

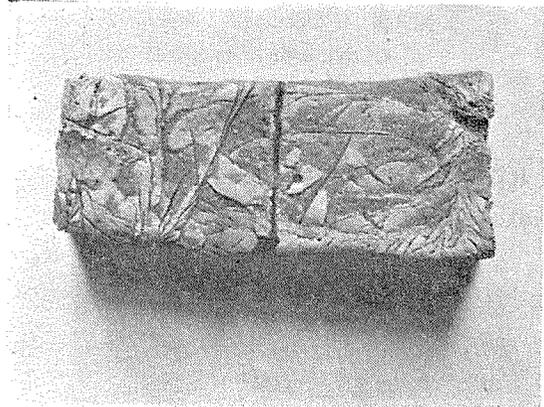
おくれ破壊の観察 No. 1 と No. 2 とは同じ密度、同じ含水率の銅鉱石試料であるが、違った結果が得られた。No. 1. と No. 2 との違いは、先ず試料を作るとき No. 1 は大きな塊の材

料から所定の大きさの試料に成形したのに、No. 2 は材料の小片をつぎつぎに型につめ込んで所定の大きさにしたこと、次に第 II 節 b 項で説明したように荷重のかけ方が No. 1 は他の場合と違っていたことによるのであろう。

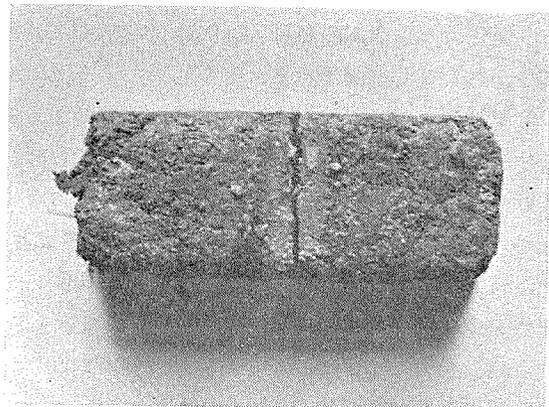
No. 1 の全部と、No. 6 の一部については、試験の際に錘りが充分でなかつたので、最大荷重をかけても破壊が起らなかつた場合には、荷重をかけたままにして破壊が起るまでの時間をはかつた。No. 1 では、200 kg をかけてから 1 分後に突然破壊した場合、240 kg をかけてから 1 分 15 秒後に突然破壊した場合、256 kg をかけてから 1 分 15 秒後に突然破壊した場があつた。No. 6 では 180 kg をかけてから 15 秒後に、192 kg をかけてから 20 秒後に破壊した場が記録されている。このようなおくれ破壊或いは静疲労と云われている現象があるとゆうことは、試料の強度が荷重時間に大きく左右されることを物語っている。

前に説明したように、No. 1, No. 6 以外の試料に対する荷重のかけ方は、鋸齒状に荷重の増減をくりかえしながら、平均 2 kg/sec 程度の速度で荷重を増していった。したがつて、荷重速度が小さいための影響と、荷重の増減をくりかえしたための疲労の影響とが重なつて、普通に荷重をかけた場合よりも弱い値を示しているものと想像される。

凍結及び破壊の状態 第 5 図の写真は銅鉱石の破壊した状態であり、第 6 図の写真は密度 1.7 g/cc のニッケル鉱石の破壊した状態である。銅鉱石では凍結に際して写真にみられるような美しい縞模様があらわれる。この縞は、氷層と試料の表面との交線である。このような縞模様のできる理由はよくわからないが、鉱石粒子の大きさが揃つていて、その 80% までが直径 0.01 mm から 0.13 mm の範囲にあることと無関係ではなく、凍結に際して内部の氷が表面に容易に移動して氷層を作るのに適しているものと思われる。氷層は表面に多く、内部には少ない。氷層は必ずしも表面に平行ではなく、表面に殆んど垂直に入つているものもある。これは試料が小さいためにみられる現象で、上面が 10×10 cm で深さの方向に長い角柱状の試料を上面から冷した場合に



第 5 図 凍結した銅鉱石の曲げ破壊による割れ目



第 6 図 凍結したニッケル鉱石の曲げ破壊による割れ目

は、氷層は上面にはほぼ平行に入っていた。ニッケル鉱石は直径が0.001 mm以下の粘土質に属する粒子を13%も含んでいるが、一方0.5 mm以上の砂或いは砂利に属する粒子を50%も含んでいる。したがって、見ただけでも構造の粗いことがはつきりわかり、粒子が団子状に集つたものが単位となつて、構成されている。この場合には水の移動が困難なため氷層はあらわれない。このような粗い構造のものでは、応力の集中する点が非常に多く、破壊の仕方はかえつて理想的に均一な等方性物質が割れるように、上から当たつた丸棒と力の方向が作る平面で真二つに割れる。しかし、密度が1.0 mg/cc位に小さくなると、構造が更に粗くなり、応力の集中する点が不均一に分布し、割れ目は凸凹で対称性は失われる。銅鉱石もほぼ真二つに割れるが、異方性が目立ち、ほぼ平面で割れる場合でも、岩石を割つた時の破壊面によくあるような鋭い稜を持つた凸凹がみられる。

この実験に当り終始亙らぬ御指導を賜つた吉田順五教授に深く感謝する。又粒度分布測定に御援助下さつた工学部真井耕象教授に厚くお礼申し上げる。

Résumé

In the cold winter of Hokkaido the mineral ores dug out of the mines in the form of wet powder freeze into a solid mass while in storage giving rise to technical difficulties in the process of refining them. The worst is the unbreakable hardness of the frozen ores. The present authors have made experimental measurements of their mechanical strength with the hope to help the miners dispose of the difficulties. The ores used in the experiments were grey loamy copper ore and reddish brown loamy nickel ore; cumulative distribution curves of their grain size are shown in Fig. 1 of the text. They were pressed into beams of the size 3 cm × 4 cm × 10 cm, frozen completely by being kept for 24 hours at each of the temperatures -5°C , -13°C , -25°C and then subjected to the bending tests. In practice, the ores are not the same in density and moisture content according to the circumstances. For their experimental use the authors prepared many sorts of beams different in their density and moisture content. In one case, in order to learn the softening actions of calcium chloride on the frozen ores, the nickel ore containing moisture 41% was mixed with granular calcium chloride in the ratios of 3%, 5%, 8%, 10% by weight so as to make the density of all the mixtures equal to 1.7 g/cc.

The beam was laid in horizontal position with its bottom surface 4 cm wide upon two steel pillows of semi-circular section placed 7.3 cm apart parallel to each other on an iron base. The beam was pressed downwards with an increasing load until it was broken; the pressure was applied by means of a semicylindrical steel bar placed at the centre of its top surface parallel to the steel pillows. The load pressure was increased at the rate of about 2 kg/sec.

The experimental results are shown in Fig. 2 of the text. The temperature ($^{\circ}\text{C}$)

and the moisture content (%) are shown in the top margin of the figure. The left ordinate indicates by unit kgs the load at which the beam was broken down while the right one represents by units of kg/cm^2 the largest tensile stress appearing on the bottom surface of the beam at the moment of its rupture. The figures in the bottom margin of Fig. 2 show the density of the beams. In the case of nickel ore containing moisture 41%, at the temperature -13°C the largest tensile stress of the beam increased with increase in its density; the stress was about 5 kg/cm^2 at the density of 1 g/cc while it was enlarged to 60 kg/cm^2 when the density became as great as 1.7 g/cc . As for the beams having the same density, the strength of the beam which contains comparatively more moisture seems to be larger than that of the beam containing less moisture. In the case of beams of the same porosity, the larger the moisture content of the beams, the greater the strength; the nickel ore of moisture content 35.1% and of density 1.4 g/cc has the same porosity 70% as that of moisture content 41% and of density 1.54 g/cc whereas the former shows the strength amounting only to about one-third of that of the latter.

Three groups of marks connected by lines in Fig. 3 represent respectively, the strength of beams having the same density and moisture content. The samples belonging to the group marked Ni, $\rho=1.7$ contained 41% moisture leaving no air voids within themselves. Such samples became stronger as the temperature was decreased. The change in temperature seems to have had no effect on the strength of one of each of the samples belonging to the other two groups which were not so compact as to have no air voids.

The softening effect of introducing calcium chloride into the ores is clearly shown in Fig. 4. With the increase of the mixed-in percentage of calcium chloride the strength was much reduced.

When the beam was loaded with a constant weight 200 kg or 250 kg, unlike the above described cases of increasing loads, the beam broke down suddenly some time after the applications of the load. The maximum time interval during which the beam endured the load was found to be about 75 sec. This fact suggests that the strength of the beams would be largely influenced by the increasing rate of loading.