HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	粉鐵鑛の凍結に關する研究 : Ⅰ. 凍結速度
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 小藤, 英登
Citation	低温科學, 2, 39-46
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17397
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p39-46.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

粉鐵鑛の凍結に關する研究*

I. 凍結速度

中谷宇吉郎, 小藤英登**

§1. 緒　　言

本報告は日鐵より依頼されたる粉狀鐵鑛石の凍結防止策に關する研究の第1報告にして，脇方の粉鐵鑛，釜石及び茂山の粉鑛に就いて研究したる結果を述べる．凍結防止策の基礎としての鑛石凍結の研究は，產出地及び輸送路に於ける氣象的條件との關連に於て調査する必要ある爲，各種鐵鑛の個々に就いて研究した．

第1報告に於ては，之等の粉鑛の含水率を色々かえ，その凍結速度を測定した結果について述べる．粉體は一般に含水量の增加と共に，熱の傳導は良くなるものであるが，その冷却の過程に凍結現象が介在すると，凍結の際に出す氷の潛熱のために，含水量の多いもの程，凍結速度が遲くなる場合も考えられる．それで零度以上に於ける熱傳導度の測定と，凍結の起る場合とを分けて測定する必要がある．本報文では零度以下の場合についてのみ報告し，零度以上の普通の意味での熱傳導度の測定結果は後報に載せる．

資料は含水量を廣範圍に亙つて變え，殆ど飽水狀態に近いものから，乾燥狀態に至る間，種々の含水狀態のものを作つて調べた．同一の含水資料についても，その凍結速度は，外氣の溫度には勿論，資料自身の初めの溫度にも關係するものである．これ等の條件によつて資料中の含水量は凍結によつて移動し，更にこの水分の移動は凍結の進行狀態を左右するものであるから，その點に就いても一應の調査をした．實際の凍結防止對策としては，凍結粉鑛の硬度が重要な問題となるのであるが，その點については第4報で詳述する．

§2. 凍結速度及びその測定方法

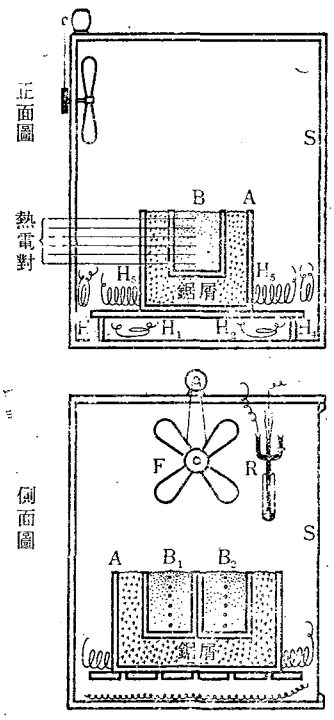
實驗裝置は第1圖に示す通りである．Sは恒溫箱で，−25°C 乃至 −35°C の範圍に變化する低溫室內に置かれ，所要の溫度に一定に保てるようになつている．H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 は電熱線で，Rは溫度調節器である．尙，恒溫槽內は場所によつて溫度の分布が異らないように，送風

* 北海道大學低溫科學研究所業績　第 23 號.

** 低溫科學研究所.

機Fによつて槽内の空氣は絶えず靜かに攪拌されている．但しこの際，送風機による空氣の流れは，箱壁に沿つて流れるようにされている．この程度の空氣の流れによつては，箱の中央部にある鑛石の表面では風の影響は殆ど無視出來る程度である．風の有無ということは，凍結には直接大きな影響を及ぼすものであるが，今回は風の影響を調べる迄には至らなかつた．

B，P_2 は鑛石凍結用の箱で，15×15 cm², 深さ 29 cm の木箱である．これを A なる保溫箱の中に並べて入れ，凍結箱と保溫箱との間を，周圍 8 cm, 底部を 10 cm の鋸屑の層で斷熱する．この箱を恆溫箱内で一定溫度の下に冷却すると，鑛石自身は上面からのみ冷却されて行くと考えられる．その時の鑛石の溫度を，上面から 2 cm, 5 cm, 8 cm, 11 cm, 14 cm, 18 cm の位置について，側方から水平に鑛石の中心部に挿入された銅コンスタンタンの熱電對にて測定した．溫度の測定は冷却速度の速いものについては 30 分置きに，遲いものについては 1 時間乃至 2 時間置きに行えば充分である．此の場合 0°C の線を凍結線と見做して差支えないので，その沈降速度を時間的に追跡して凍結線の動きを調べた．



第　1　圖

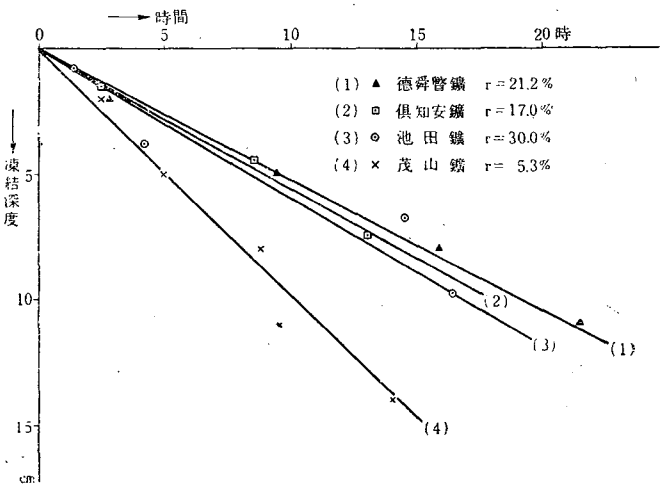
凍結が充分進行した時，又は完了した時，資料を取り出して，これを4cmづつ5個に切取り，その含水量の垂直分布を調べた．

資料は現場にて採掘された粉鑛石を乾燥させた後，粉碎機にかけて大體一樣な粉狀とする．更にその各粒の大いさを規定するために，3 mm 目の篩にかけた．從つて資料として使われた粉鑛の各粒の大いさは 3 mm 以下のものであるが，1 mm 以上のものは極く少量で大半はそれ以下の細い粉である．これに適當量の水を加えて，必要とする含水率の資料を作る．こゝに，含水率というのは，水を含んだ資料の質量を M，その中の水分のみの質量を w とするとき，$w/M=r$ で表わされる値である．この資料は，含水率及び，溫度の不均一なることを避けるため，よく攪拌しなければならない．そして全體が一定溫度に達したら速かに凍結箱に詰める．このとき資料の一部を採つて，正確な含水率を測定する．十數個の實驗資料について，初期溫度としてはすべて +3°C を選んだ．資料の詰め方は成るべく一樣になるように注意した．

一回の實驗に同時に 2 個の資料を並び用いるのであるが，その兩者は成るべく含水率の相近いものを選ぶ必要がある．冷却に伴つて生ずる兩者の溫度差が，相互に影響することを少くするため

である．保温用の鋸屑も適當に濡らしたものを，鑛石と略同温度にして使用する．鋸屑は濡らす事によつて，温度が 0°C 以下になる迄の時間を遲延し得るからである．初期温度が +3°C で，比較的 0°C に近い爲に鑛石の側面の斷熱はこれによつて充分果される．これを恒温箱内で冷却して行くのであるが，鑛石が側面及び底面から冷却されるか否かについては，時々取り出してその凍結面の形を調べて見れば分る．その結果は，凍結面は大抵の場合殆ど完全な水平面をなして居り，又鑛石が完全に凍結した後でも，その底面に接する鋸屑は凍結せずにいることが認められた．鑛石が底部から先に凍るようなことは一度もなかつた．凍結に長時間を要する場合に幾分底面からの冷却が見られたが，それも中心部にまでその影響は及ばないものと見て差支えない程度である．尙以上のことは，熱電對の位置をずらして見ることによつても確められた．卽ち，この方法でもつて，表面からのみ冷却する場合の鑛石の凍結現象を調べ得るわけである．

此の裝置によつて鑛石中を凍結線が下降して行く狀態を，4 種の鐵鑛について測定して見た．その結果は第2圖に示す如く，凍結線は時間と共に略ゝ直線的に下降して行くことが分つた．それでこの線の傾斜を凍結速度と名付け，それを詳しく測定することにした．凍結速度は鑛石の種類によつて異るばかりでなく，氣温，含水率等によつても著しく左右されるので，それ等との關係を調べた．



第　2　圖

§ 3. 凍結速度の測定結果

上述の如く凍結速度なる量を測定し得ることが分つたので，俱知安及び茂山の粉鑛について，−13°C に於ける凍結速度を含水率の函數として測定した．

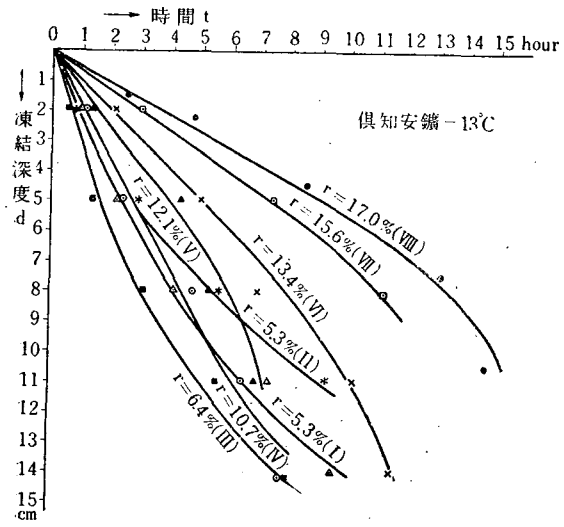
a) 俱知安鑛石

先ず恒温槽内の氣温を −13°C に一定に保つた場合の實驗經過を述べる．鑛石資料は，5.3% から17% に至る 7 種の含水率のものを用いた．夫々の含水率のものについて，凍結線が上面から 2 cm, 5 cm, 8 cm, 11 cm, 14 cm の深さに達するまでの時間を表示したものが第1表である．

第 1 表 倶知安鑛，−13°C

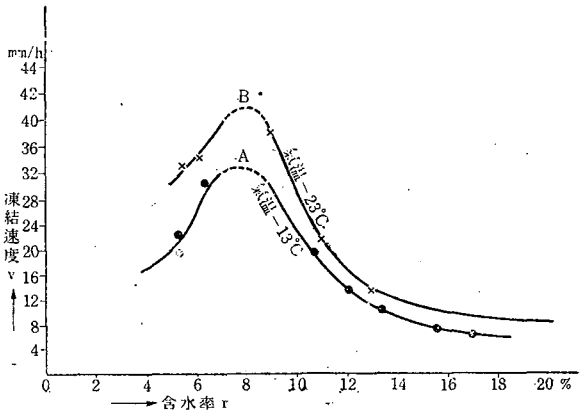
實驗番號	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	實驗番號	Ⅷ
r% / d cm	5.3	5·3	6.4	10.7	12.1	13.4	15.6	r% / d cm	17.0
2	h m 0 55	h m 0 42	h m 0 33	h m 1 05	h m 1 20	h m 2 05	h m 2 55	1.5	h m 2 30
5	2 10	2 55	1 25	2 20	4 15	5 00	7 25	4.5	8 30
8	4 10	5 45	2 55	4 45	5 20	6 50	11 00	7.5	13 05
11	7 15	9 15	5 30	6 25	6 50	10 10		10.5	14 30
14	9 30		7 40	7 30		11 25			

第1表で，d は凍結深度，r は含水率を表す．此の結果即ち冷却時間と凍結深度との關係を圖示すると，第3圖の樣な曲線群を得る．前表からも知られる通り，凍結の進行は含水率によつて非常に異り，含水率の大きいものでは凍結が遲く，その減少と共に次第に速くなり，或る程度以下に減少すると再び遲くなつているのである．例えば，凍結深度が 8 cm に達するに要する時間は，含水率 17.0% では 13 時間餘の長きにわたり，含水率の減少と共に次第に短く，6.4% で 2 時間 55 分という最短時間を示し，5.3% では 4 時間 10 分，或は 5 時間 45 分というように再び長くなつているのである．更に第3圖から分るとおり，凍結の進行は含水率の大きいものほど，深度と共に速くなり，小さいものではその逆になつている．しかし 5 cm 乃至 8 cm の深さまでは，凍結深度と時間とが直線的關係にある．前者は後述の如く凍結によつて鑛石内の含水率分布が變化する爲であり，後者は深部ほど冷却效率が弱くなる爲と說明される．しかし現在の目的には初めの直線部分の凍結狀態が大切なので，この直線部分の傾斜から凍結速度 v mm/h を求め，第 2 表に示す．第2表を圖示すれば第4圖A曲線を得る．凍結速度と含水率との間の關係に極大があることは面白い現象である．初め含水率が 8% 附近までは含水率と共に凍結速度が增すことは，この粉



第 3 圖

鑛の傳導率が小さく，水の增加と共に傳導率が增し凍結速度が大きくなると解せられる．ところが或る限度以上水が多くなると，水の凍結による潛熱の發生が大きくなり，その影響が打ち勝つて來るので，10%以上では含水率の增加と共に凍結速度が減るものと說明される．後述の茂山粉鑛の如く粉自身が熱傳導率の大きいものではこの現象は見られない．



第 4 圖　俱 知 安 鑛

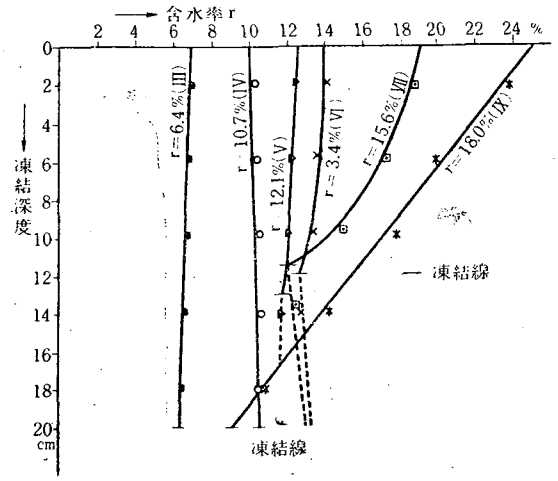
第 2 表　俱知安鑛，−13°C

實驗番號	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
r%	5.3	5.3	6.4	10.7	12.1	13.4	15.6	17.0
v mm/h	22	17	30	19	13	10	7	6

次に凍上の研究によつて判明している現象，卽ち凍結に伴つて含水率の分布が最初の狀態より異つて來る現象が此の場合にも起きるか否かを調べて見た．これには，前記凍結速度の測定に使つた資料を用い，直接それについて調べた．完全に凍結して了つたものは高さ 4 cm づつ 5 個に切取り，又途中まで凍結したものは，凍結線の上下を別個に適當に分割して，これも亦 5 個に切取つてその含水率を調べた．各部分の高さの中間値をとつてこれを深度とし，夫々の部分の含水率をこれに對應するものとして，その數値表及び圖示を第 3 表及び第 5 圖に揭げる．第 5 圖中破線で引かれた部分は未凍結部分なることを示している．

第 3 表　俱知安鑛，−13°C

實驗番號	III	IV	V 凍結深度 13 cm	VI 凍結深度 12 cm	IX	實驗番號	VII 凍結深度 11.5 cm
初めの含水率 r% / d cm	6.4	10.7	12.1	13·4	18.0	r% / d cm	15.6
2	7.1	10.2	12.5	14.0	23.8	2	18.6
6	6.8	10.3	12.1	13.6	19.8	6	17.2
10	6.5	10.4	12.3	13.4	17.7	9.7	15.0
14	6.5	10.5	11.7	12.6	14.2	13.7	12.0
18	6.3	10.4		13.1	10.5	17.7	12.8



第　5　圖

第5圖によるに，鑛石中の含有水分が凍結と共に凍結部分に移動する現象が粉鑛の場合にもあることが判明した．淺い部分ほど含水率が大きく，凍結線の直下に於て最もよく乾燥している．又含水率の變化の狀態は，初めの含水率の大きいものほど激しく，小さいものは，殆ど變化しないことが知られる．此の種の水分移動は土壤の凍結の場合にはもつと著しく現われるので，豫期された通りである．(1) 前に述べた，含水率の大きいものほど深度と共に凍結速度が速くなる事實はこの現象によつてよく說明される．卽ち，凍結深度が進むにつれて凍結線下の含水率は減少して行く．或る値までは含水率の減少と共に凍結速度は速くなるのであるから，深所に於ける凍結速度は時間と共に速くなつて行くわけである．

以上と同樣の實驗を氣溫 −23°C に於て繰り返した．鑛石資料は，5.5% より殆ど飽水狀態に近い 19.2% に至る間6種のものについて測定を行つた．鑛石の初期溫度は前回同樣 +3°C である．凍結線が 2 cm, 5 cm, 8 cm, 11 cm の深さに達する迄の時間を第 4 表に示す．それから前と同樣にして求めた含水率と凍結速度との關係は，第 4 圖 B 曲線に示す如くである．−23°C

第 4 表　俱知安鑛，−23°C

實驗番號	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
r% / d cm	5.5	6.2	9.0	11.0	13.0	19.2
2.0	h m 0 25	h m 0 30	h m 0 20	h m 0 36	h m 1 08	h m 2 27
5.0	1 10	1 30	1 45	2 48	4 45	6 45
8.0	3 45	3 40	3 35	5 15	9 05	9 40
11.0	7 00	6 40	5 55		9 55	12 05

の場合卽ちB曲線が前の −13°C の時の A 曲線と似た山型の形になるのは，此の種の現象が偶然の結果でないことを示している．

凍結による含水率分布の變化も前同樣に認められ，その結果は第5表及び第6圖に示す如くで

(1)　中谷：氣象集誌，第2輯，第 19 卷（昭和 16 年），125 頁．

ある. 第6圖に於て $r=6.2\%$, 11.0%の場合は含水量の移動が著しく見られないのは, 氣溫が低

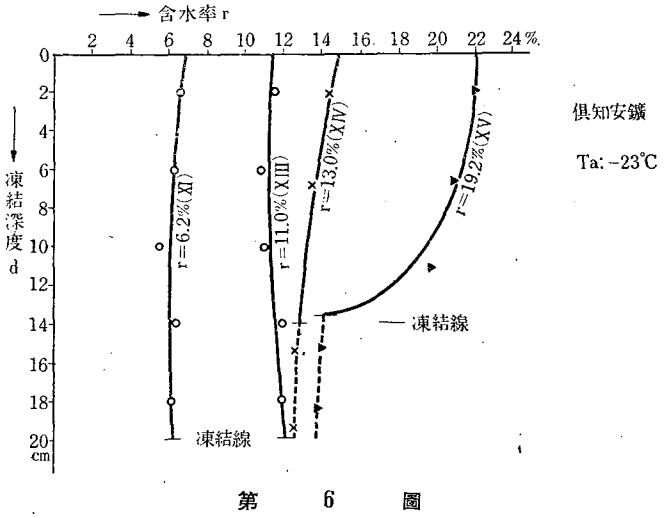
第 5 表 俱知安鑛, −23°C

實驗番號	XII 全部凍結	XIII 全部凍結	實驗番號	XIV 凍結深度 14 cm	實驗番號	XV 凍結深度 13.5 cm
初めの含水率 r% / 深度 dcm	6.2	11.0	r% / dcm	13.0	r% / dcm	19.2
2	6.7	11.6	2.3	14.4	2.2	21.9
6	6.2	10.8	6.9	13.5	6.6	20.8
10	5.4	11.0	11.6	13.1	11.0	19.7
14	6.2	11.9	15.5	12.4	15.1	14.0
18	6.0	11.8	19.5	12.5	18.4	13.8

い爲に凍結速度が大きく比較的迅速に凍結する爲に水の移動が十分に行われないとして説明出來る. $r=19.2\%$の資料は第4圖 B 曲線で分るように, 含水率が多い爲に −23°C の低溫に於ても凍結速度は著しく小さくなる. 低溫に於て緩慢に凍結するので水分の移動も多くなるのである.

b) 茂山及び釜石粉鑛

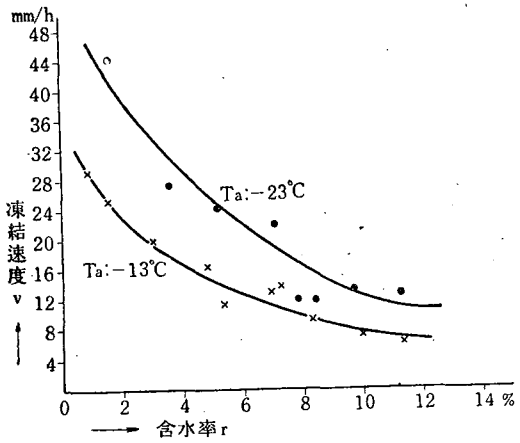
前節で述べた俱知安粉鑛についての實驗と全く同じ實驗を茂山の粉鑛及び釜石の粉鑛についても行つた. 俱知安鑛は多孔質で多量の空氣を含み熱傳導率が小さいが, 茂山及び釜石の粉鑛はよく熱を傳え, 凍結速度と含水率との關係も異つた傾向を示すことが知られた.



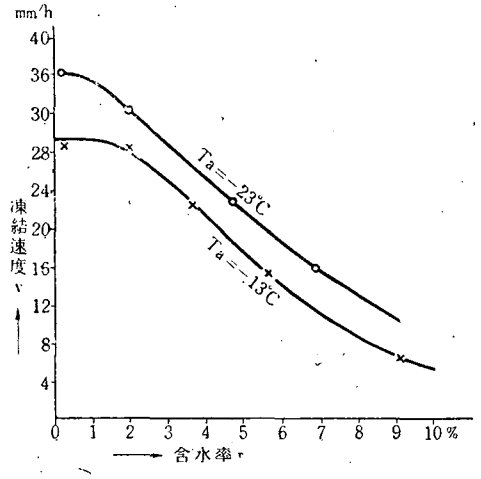
第 6 圖

その結果を要約して, 凍結速度と含水率との關係だけを, 前同樣氣溫 −13°C 及び −23°C の場合に就いて, 第 7 及び 8 圖に示す. 凍結を生ぜしめる直前の濕粉鑛の溫度も前と同樣 +3°C に選んだ.

第 7, 8 兩圖を比較してみるに, 兩者共に俱知安鑛の場合のような極大が見られず, 含水率の增大と共に凍結速度は漸次減少する. 此の種の熱傳導度の大きい鑛石では含水率の增加につれて氷の凍結潛熱の影響だけが效いてきているのである.



第7圖 茂山鑛 含水率と凍結速度との關係



第8圖 釜石鑛 含水率と凍結速度との關係

§ 4. 豫備的考察

俱知安粉鑛の如き多孔質で空氣を多量に含み從つて熱傳導度の小さい粉鑛では水の混入によつて空氣間隙がふさがり，熱の傳導をよくする爲に含水量の增加と共に凍結速度は增す．しかし水が十分多くなると凍結の際に出す潛熱の影響が效いて來て，約 8%以上になると含水率が增すと却つて凍結速度は小さくなる．故に俱知安鑛については含水率を減少することによつて凍結を遲めようとするには十分によく乾燥する必要がある．茂山や釜石の粉鑛のように熱傳導度の大きいものでは，含水率が小さくなるに從つて漸次凍結速度は增す．故に凍結を防ぐだけの目的ならば水が多い方が却つてその目的に適うことになる．しかし後報に詳述する如く，凍結鑛の硬度の問題から言えば，含水率の小さい程脆いので，凍結しても製鐵事業には餘り支障を來さない．

それで實際問題としては，山元から製鐵所まで鑛石が凍結しないくらいの比較的短時間に輸送が出來る場合には，含水率の多い方が凍結を防止することになる．輸送時間がそれ以上かかる場合には，凍結は防ぎ得ないとして，凍結しても事業に支障を來さないように，卽ち容易に碎いて積下しの出來るように，初めの含水率を小さくしておく必要がある．

凍結速度は案外小さいもので，輸送さえ敏速に行えば凍結は左程恐れる必要がない場合の例を第3報で述べる．又凍結硬度の問題については第4報で詳報する．

本研究は日本製鐵株式會社よりの委託研究で，研究費は同會社の支辨によつたものである．本報告の發表を許容された同社幹部の方の好意に感謝の意を表記する．