

# 旧幌別硫黄鉱山における酸性坑内水の流量および Fe 濃度の長期変動

## Long-term change in the flow rate and iron concentration of acid mine drainage from the closed Horobetsu Sulfur Mine in Southwest Hokkaido

野呂田晋・遠藤祐司・荻野 激

Susumu Norota, Yuuji Endou and Tagiru Ogino

キーワード: 幌別硫黄鉱山, 酸性坑内水, 流量, Fe 濃度

Key words: Horobetsu Sulfur Mine, acid mine drainage, flow rate, iron concentration

### I はじめに

かつて硫黄や鉄等の金属を採掘していた鉱山では、操業終了後においても、鉱石を採掘するために設けられた坑道等から砒素や鉛等の有害物質を含む坑廃水\*の流出が続く場合がある。これを放置すれば、周辺の河川水などの水質悪化の原因となるため、坑廃水の処理(浄化)が必要となる。坑廃水の源は降水及び地下水であり、その流出が自然に止まることは無く、また、これを物理的に止めることも困難である。このため、有害な坑廃水の流出が続く休廃止鉱山では、その処理を半永久的に継続していくことが必要となる。

旧幌別硫黄鉱山は、北海道西南部の壮瞥町にあり、長流川水系弁景川上流の標高500~620mの山間に位置する(第1図)。当鉱山では、操業時に掘削した坑道(第2通洞坑)から流出する坑内水の水処理が実施されてきている。坑内水の流量は、その時々降雨等の自然的条件によって変化するため、それらの制御は難しい。また、当鉱山におけるこれまでの調査により、坑

内水には季節的な流量変化、流量変化に伴う水質変化、さらには経年的な水質変動も認められている。

そこで本報告では、今後も永続する水処理を円滑に行っていくための基礎資料として、第2通洞坑から流出する坑内水の流量および流量に伴って変化する T-Fe 濃度について、これまでの調査をもとに、その変動傾向をとりまとめた。

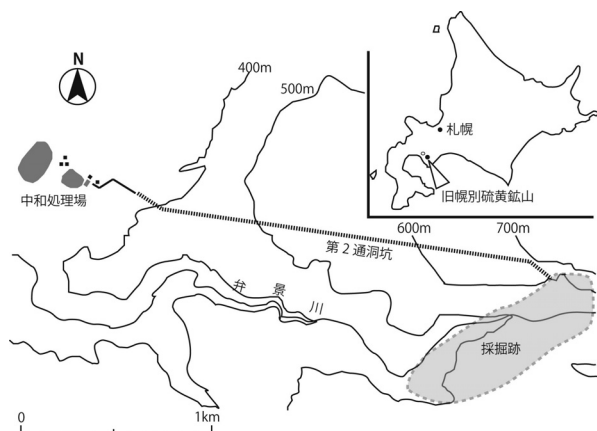
### II 経緯

旧幌別硫黄鉱山は、日本における屈指の硫黄・硫化鉄鉱山として操業していたが、1965年に発生した坑内崩落と坑内火災、さらには石油精製によって生産される脱硫硫黄の流通による硫黄価格の低迷が重なり、1973年に閉山した(和田ほか, 1983)。

閉山時には、採掘跡から延びる長さ約2.2kmの第2通洞坑から坑内水を一括して排出させるため、他の坑道は密閉された。また、第2通洞坑では、空気遮断工事(第2図)が実施され、通洞坑内への大気流入による水質悪化を防止する措置がとられた(和田ほか, 1983)。しかし、1980年~1985年ころには、第2通洞坑内での工事のため、遮断工が撤去された(中和処理場での聞き取り)。

旧幌別硫黄鉱山の坑内水は、第2通洞坑の奥に存在する採掘跡から流下してくるものと、坑道の出口周辺で湧出するものからなる。以下では、採掘跡から流下してくる坑内水を原水、坑道の出口周辺で湧出する坑内水を坑道湧水と呼ぶ。単に坑内水としているものは、原水と坑道湧水をあわせたものを示す(第3図)。このうち坑道湧水は、原水に比べ水質が良好であり(第1表)、降雨や融雪の影響を強く受け、流量の増減も著しい傾向がある。

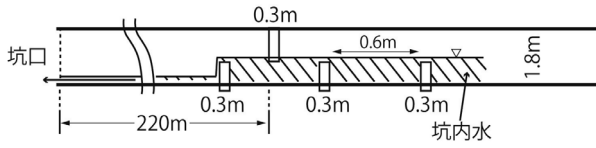
2017年現在、第2通洞坑からは毎分4m<sup>3</sup>前後の流量で酸性の坑内水の流出が続いており、北海道が実施主体となり中和処理等の鉱害防止事業が続けられている



第1図 旧幌別硫黄鉱山の位置および鉱山付近の平面図

Fig. 1 Locality of the closed Horobetsu Sulfur Mine and its outline.

\*坑廃水: 操業時に掘削した坑道(地下空間)からの流出水(坑内水)と鉱さいの集積場等からの浸出水(廃水)を合わせて坑廃水と呼ぶ。



第2図 第2通洞坑の空気遮断状況(縦断面図)(和田ほか(1983)の第9図を改変)

Fig. 2 Mine sealing plug of the No.2 level's opening (Modified from Fig. 9 in Wada et al.,(1983)).

(北海道・壮瞥町, 2011). 地質研究所は, 北海道が実施する鉱害防止事業に対する技術支援を目的とし, 1980年から調査等に関わってきており, 地方独立行政法人となった2010年以降も, 北海道からの委託事業として, 調査研究を継続している.

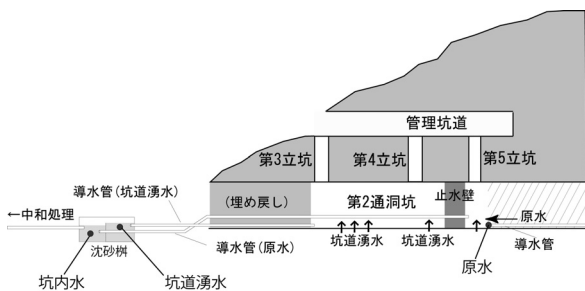
### Ⅲ 坑内水の流量

第4図に1990年~2016年の坑内水流量の変動状況を示す. 図示した流量は, 1時間毎に記録された流量データの日平均値である. 現地で観測している1時間毎の雨量データによる日降水量も合わせて図示した. なお, これらの観測データは, 中和処理を受託している北硫建設株式会社が得ているものである.

坑内水流量は, 大きく見ると, 毎年4月~6月と7月~12月にかけて, 年に2回の増加期がある. 前者は主に融雪, 後者は降雨による流量増加である. 一般に融雪に伴う流量増加の方が大きく, 各年の最大流量は4月下旬~5月中旬に記録される場合が多い.

7月~12月にかけての降雨による流量増加期においては, 各期間の降雨の状況に応じ, いくつかの流量ピークが認められる. 2006年や2012年のように, 融雪による流量増加期に大雨が重なると, 坑内水の著しい流量増加につながる(遠藤, 2013). このような融雪と大雨による顕著な流量増加は, 第2通洞坑の坑口周辺に湧出する坑道湧水(第3図)の流量増加によってもたらされる(遠藤・荻野, 2008).

一方, 積雪期の1~3月の期間は, 降水が積雪として地表に固定され, 地下への降雨の浸透が絶たれるため, 坑内水流量は少なくなり, その変化も乏しくなる.



第3図 坑内水の導水経路の概要

Fig. 3 The outline of the headrace of the mine drainage.

第1表 坑道湧水, 原水, 坑内水の水質(2014~2016年の平均値)

Table.1 The mine water quality flowing out of the No.2 level's opening (raw water, pit spring, mine drainage) (average from 2014 to 2016).

採水地点	pH	T-Fe (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	As (mg/L)
原水	1.8	282	2,049	7.95
坑道湧水	5.0	0.107	54.0	0.069
坑内水	2.0	231	1,736	6.81

その結果, 1月から3月にかけて流量が漸減し, 3月下旬には3m<sup>3</sup>/min前後と, 年間の最小値を示すようになる.

### Ⅳ 坑内水の T-Fe 濃度

中和処理を受託している北硫建設株式会社が行ってきた T-Fe 濃度の測定値に基づき, その変化状況と特徴を, 年間の季節的变化と閉山後からの長期的変化に分けて, 以下にまとめる.

#### Ⅳ.1 季節的变化

旧幌別硫黄鉱山では, 坑内水の流量変化に伴って T-Fe 濃度も変化することが明らかとなっている. その一例として, 2011年における坑内水の T-Fe 濃度と坑内水流量および日降水量の変化を第5図に示す.

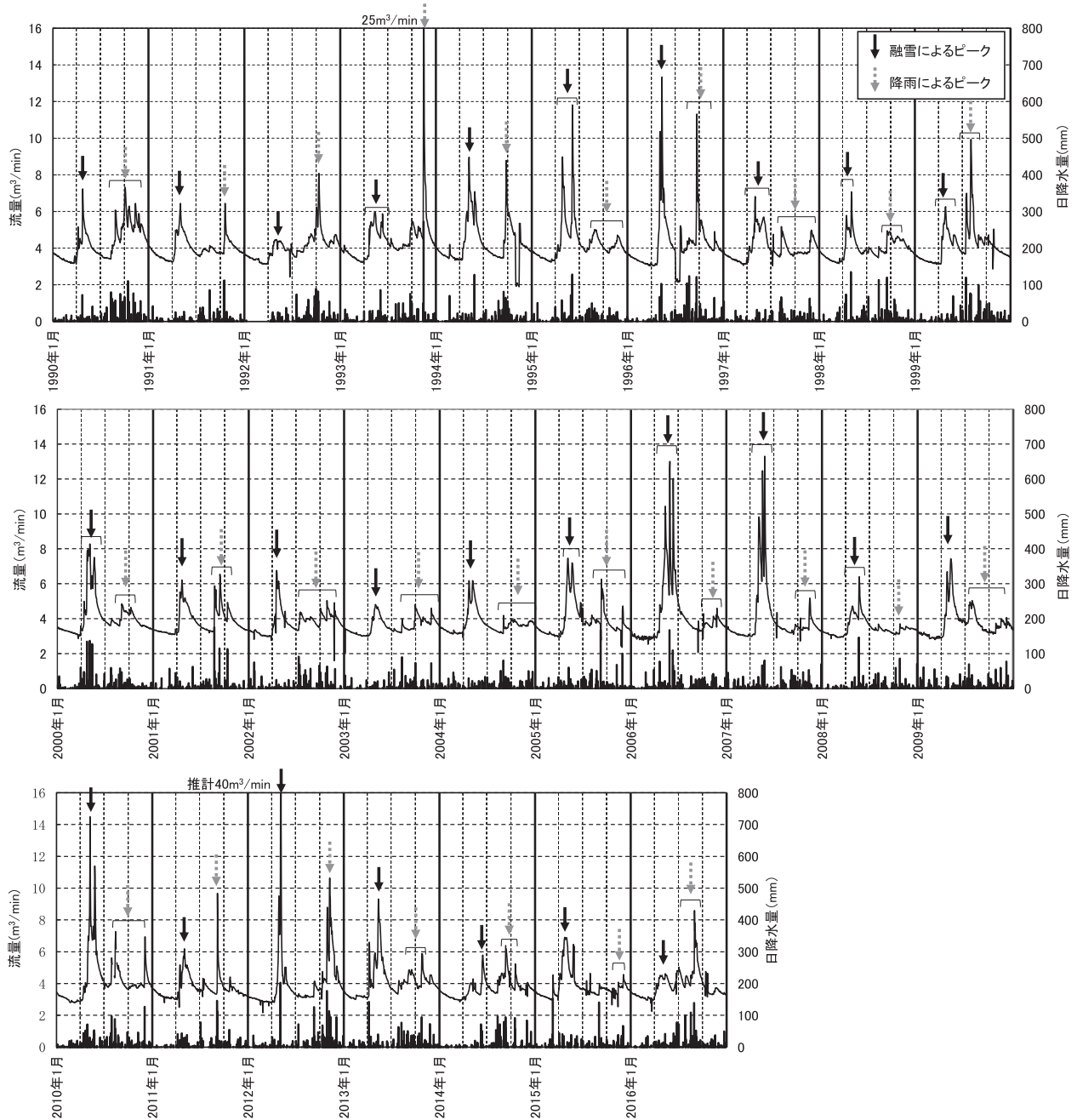
1月~3月にかけての期間は, T-Fe 濃度は330~350 mg/L程度で安定しており, その変化も小さい. また, この期間は積雪期にあたるため, 坑内水流量の変化も小さくなっている.

4月~6月の期間は, 坑内水の流量が増加すると T-Fe 濃度は減少し, 流量が減少すると T-Fe 濃度は逆に増加するという相反的な変化が顕著に現れる. また, 融雪による流量増加のピーク後の T-Fe 濃度に注目すると, 流量が増加し始める前の値よりもさらに高い値まで増加していることが判る. この状況は数ヶ月続き, 10月に入ると流量増加前の T-Fe 濃度まで減少する. この例では, 3月下旬の値は330 mg/L前後であり, 5月後半の値は400 mg/L程度である. その後, 10月下旬には350 mg/L以下まで減少している.

7月~12月の期間は, 降雨による坑内水の流量の増減に応じ, T-Fe 濃度も増減するという融雪期と同様の相反的な変化を示す. ただし, T-Fe 濃度は, 流量が増加する以前の値より高くなることはない.

以上に述べた T-Fe 濃度の季節的变化は, 以下の通り説明される.

特に融雪期に顕著に現れた坑内水流量と T-Fe 濃度の相反的な関係は, T-Fe 濃度が低い坑道湧水の流量



第4図 坑内水の流量変化(1990～2016年)

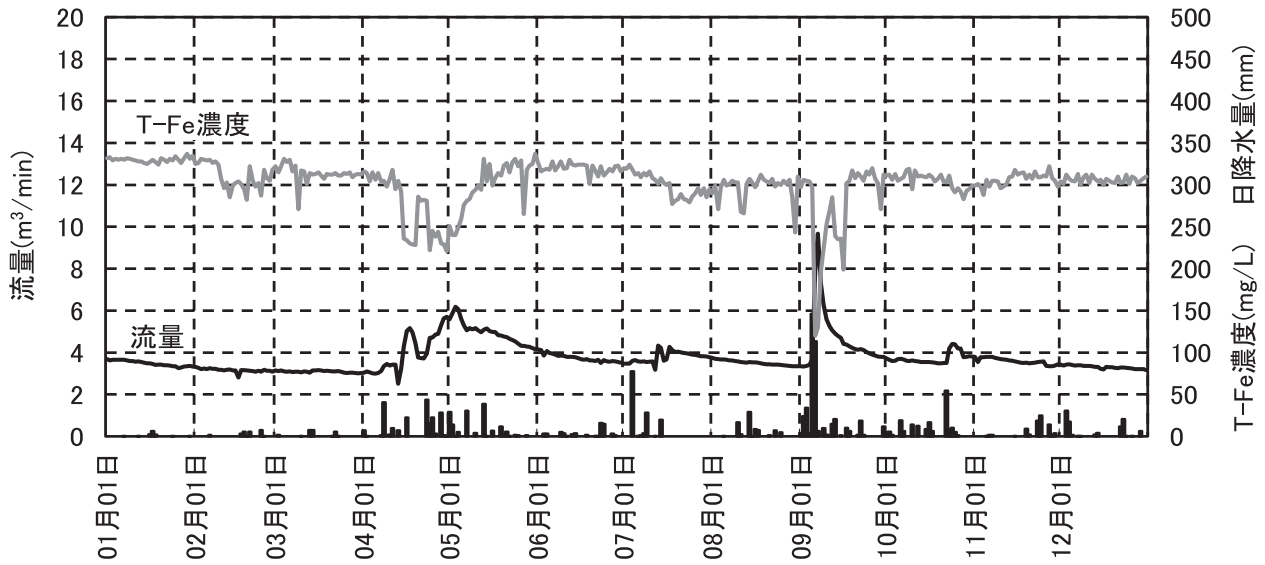
Fig. 4 Change in flow rate of the mine drainage since 1990 to 2016.

増加によって原水が希釈されたことが原因である。また、積雪期の1月～3月の期間においては、坑道湧水の流量が低下することで、坑内水の水質に対する坑道湧水の影響が小さくなり、この期間の坑内水の水質は安定する。従って、この時期の坑内水は、採掘跡から流下してくる原水の水質に最も近づいているものと考えられる。

次に、T-Fe濃度が融雪期以前より融雪期以後に高くなるメカニズムについて考察する。

採掘跡には幾筋もの原水の水路があるが、積雪期間には採掘跡への地下水の供給が減少するため、流れが

途絶える水路も出てくる。流れが途絶えた水路は、完全に干上がるのではなく、所々にある窪みに溜まった状態となる。このようにして窪みにたまった原水は、融雪によって採掘跡への地下水の供給が増えるまでの間、そこに滞留することになる。滞留している間も、硫化鉄の酸化条件が整っていれば、酸化反応が進行していき滞留している原水の酸性化は進み、T-Fe濃度は次第に上昇していく。また、採掘跡の岩盤の亀裂や微細な間隙の中でも、同様の現象が起こっているものと考えられる。採掘跡の空間を流れる原水と同様、岩盤中の間隙水が長く停滞を続けることで酸性度が増し、



第5図 2011年の坑内水の T-Fe 濃度変化

Fig. 5 Total Fe concentration change in the mine drainage of 2010.

結果として T-Fe 濃度が上昇していくことになる。

このように、積雪期を通して採掘跡や岩盤の間隙中に滞留した原水は、通常よりも高濃度の Fe を含むようになる。それらが融雪による洗い出しによって坑外へ流出し、融雪期以降の坑内水の T-Fe 濃度の上昇につながっていると考えられる。

## IV.2 長期的変化

第6図に、1975年以降の坑内水の T-Fe 濃度の変動状況を示す。図示したグラフは、1983年まではおよそ1か月に1回の頻度、1984～1988年までは1か月に2～3回の頻度、1989年～2001年までは週に1回の頻度、2001年4月以降は毎日測定されたデータを用いたが、経年的な変動を把握するため、図には月平均値をプロットした。

坑内水の T-Fe 濃度は、1985年以前は400～1,000 mg/L と、ばらつきが大きい。特に1980年～1984年にかけての期間は、最大1,000 mg/L 程度の T-Fe 濃度を示すなど、全体に T-Fe 濃度が高い状態で推移している。また、その同時期には、閉山時に施工された空気遮断工が撤去されたようである。以上から、1980年～1984年における高い T-Fe 濃度の推移は、閉山時に作られた空気遮断工の撤去が原因と推測される。すなわち、空気遮断工の撤去により第2通洞坑の奥部に大気が入りやすくなり、それまで酸素に暴露されていなかった岩盤が酸素と反応し重金属の溶出が促進されたものと推測される。

1985年～2013年前後の期間の T-Fe 濃度は、一時的に500 mg/L 程度のピーク濃度を示す時期があるものの、徐々に濃度が低下する傾向が認められる。Koide et al.(2012)、大塚ほか(2014)は、鉱物の反応速度等に基づき酸性坑廃水の水質変化を検討し、坑廃水の T-

Fe 濃度等は時間経過とともに指数関数的に減少していくと指摘している。そして、この原因として、坑内水に含まれる Fe 等の起源となる鉱石からの重金属等溶出ポテンシャルが時間とともに低下していくことを挙げている。これを踏まえると、旧幌別硫黄鉱山における1985年～2013年前後までの T-Fe 濃度の低下も、採掘跡における Fe の溶出ポテンシャルが徐々に低下してきた結果であると考えられる。

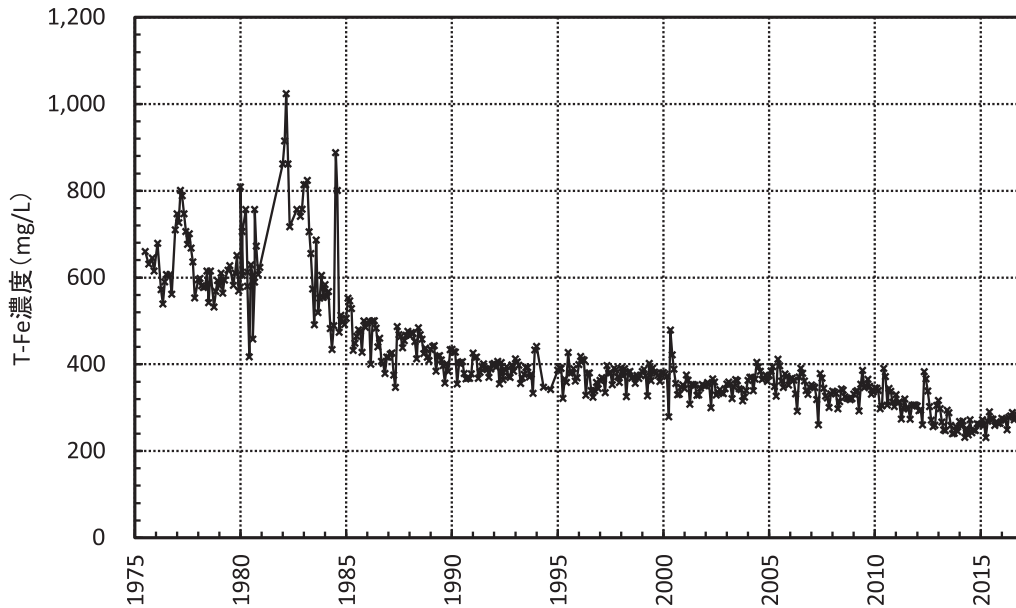
しかし、2014年～2016年の期間は、2013年以前の傾向とは異なり、わずかに T-Fe 濃度が上昇に転じている。この原因の詳細は不明であるが、落盤など坑道奥部の採掘跡の空間で何らかの異常が発生し、坑内水の流動状況が変化し、その結果、T-Fe 濃度が上昇したものと推測できる。

今後、どこまで T-Fe 濃度が上昇するのか注視していく必要がある。

## V まとめ

本報告では、旧幌別硫黄鉱山における坑内水流量および T-Fe 濃度について、長期的な変動状況を概観した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 坑内水流量は大きく見ると、年に2回の増加期がある。4月～6月にかけては主に融雪による流量増加、6月～12月は降雨による流量増加である。
- 2) 坑内水流量は、1月～3月の積雪期に少なくなり、その変化にも乏しくなる。3月下旬には年間の最小値を示す。
- 3) 坑内水の T-Fe 濃度は、融雪や降雨による坑内水流量の増加に伴い低下する。これは、T-Fe 濃度の低い坑道湧水の流量増加により原水が希釈されるためである。



第6図 坑内水の T-Fe 濃度の長期的変化(1975～2016年)

Fig. 6 Long-term change of total Fe concentration in the mine drainage since 1975 to 2016.

- 4) 融雪による流量ピークを過ぎた頃、坑内水の T-Fe 濃度は融雪前の濃度よりも高くなる傾向を示す。これは、坑内水に占める原水の混合割合が増えたことや原水自体の水質悪化が原因と考えられる。
- 5) 坑内水の T-Fe 濃度は、1980年～1984年にかけて、全体に高い濃度で推移している。その原因は、閉山時に作られた空気遮断工の撤去により、第2通洞坑の奥部に大気が流入しやすくなり、岩盤から重金属の溶出が促進された結果と推測される。
- 6) 1985年～2013年には、坑内水の T-Fe 濃度が徐々に低下している。これは、採掘跡における T-Fe の溶出ポテンシャルが徐々に低下してきた結果であると考えられる。
- 7) 2014年前後から2016年にかけて、坑内水の T-Fe 濃度がわずかに上昇している。原因は定かではないが、2014年前後から坑道周辺においてなんらかの変化が起こり、T-Fe 濃度の漸増につながった可能性が推測される。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、北海道経済部産業振興

局環境・エネルギー室、壮瞥町、及び北硫建設株式会社の関係各位に協力をいただきました。高橋徹哉資源環境部長には、原稿の校閲をしていただきました。以上の方々に、ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- 遠藤祐司(2013)：2012年5月に発生した旧幌別硫黄鉱山における坑内水の著しい増加現象，85，51-54。
- 遠藤祐司・荻野激(2008)：融雪期における旧幌別硫黄鉱山の坑内水の流量変化，北海道立地質研究所報告，79，23-34。
- 北海道・壮瞥町(2011)：幌別硫黄鉱山坑内水処理事業の概要，10p。
- Koide,R., Tokoro,C., Murakami,S., Adachi, T. and Takahashi, A. (2012)：A Model for Prediction of Neutralizer Usage and Sludge Generation in the Treatment of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines：Case Studies in Japan. *Mine Water and the Environment*, 31, 4, 287-296。
- 大塚啓司・村上進亮・山富二郎・小出瑠・所千晴(2014)：統計解析と地球化学コードを用いた酸性坑内水処理の将来予測に関する研究。 *Journal of MMIJ*, 130, 488-493。
- 和田信彦・沼部明博・鈴木守・斉藤尚志(1983)：旧幌別硫黄鉱山地域の汚濁水の性状と対策，地下資源調査所報告，54，1-92。