

メキシコ合衆国

鉱山公害対策計画調査

ファイナルレポート

平成4年3月

国際協力事業団

鉱計資

CR(3)

92-024

JICA LIBRARY



1098325(2)

23826

メキシコ合衆国

鉾山公害対策計画調査

ファイナルレポート

平成 4 年 3 月

国際協力事業団

国際協力事業団

23826

序 文

日本国政府は、メキシコ合衆国政府の要請に基づき、同国の鉱山公害対策計画にかかる開発調査を行うことを決定し、国際協力事業団がこの調査を実施いたしました。

当事業団は、平成3年1月より平成4年2月までの3次にわたり、同和鉱業株式会社の橋本 滋氏を団長とする調査団を現地に派遣しました。

調査団は、メキシコ政府関係者と協議を行うとともに、計画対象地域における現地調査を実施し、帰国後の国内作業を経て、ここに本報告書完成の運びとなりました。この報告書が本計画の推進に寄与するとともに、両国の友好・親善の一層の発展に役立つことを願うものです。

終わりに、調査に御協力と御支援をいただいた関係各位に対し、心より感謝申し上げます。

平成4年3月

国際協力事業団

総裁 柳谷 謙介

目 次

1. 序 言	1
2. 現地調査の概要	2
3. エルボテ地域調査結果と対策	4
3-1 一般概況	4
3-2 地 質	5
3-3 電気探査	9
3-4 水 理	10
3-5 土 壌	20
3-6 堆 積 場	23
3-7 粉 塵	30
3-8 調査結果要約	34
3-9 鉱害防止対策	35
4. パラル地域調査結果と対策	43
4-1 一般概況	43
4-2 地 質	43
4-3 電気探査	46
4-4 水 理	48
4-5 土 壌	60
4-6 堆 積 場	62
4-7 粉 塵	68
4-8 調査結果要約	70
4-9 鉱害防止対策	71
5. 新エルココ地域調査結果と対策	81
5-1 一般概況	81
5-2 地 質	81
5-3 電気探査	87
5-4 水 理	88
5-5 土 壌	100
5-6 堆積場モデル	102
5-7 調査結果要約	105
5-8 鉱害防止対策	105
6. 結 言	113
付録 A 地下水流動シミュレーション法	

付 図

第2-1図 調査位置図

Fig. 2-1 Location Map

第2-2図 調査地域写真

Fig. 2-2 Photographs of Survey Area

第2-3図 乾期現地調査実績図

Fig. 2-3 Progress in the Field Investigation (Dry Season)

第2-4図 雨期現地調査実績図

Fig. 2-4 Progress in the Field Investigation (Rainy Season)

第3-1-1図 水理・気象図

Fig. 3-1-1 Hydrologic and Meteorologic Map

第3-2-1図 地質平面図

Fig. 3-2-1 Geological Plane Map

第3-2-2図 地質断面図

Fig. 3-2-2 Geological Cross Section

第3-2-3図 地質柱状図

Fig. 3-2-3 Geologic Column

第3-2-4図 ボーリング位置図

Fig. 3-2-4 Location Map of Boring Site

第3-2-5図 ボーリング柱状図

Fig. 3-2-5 Boring Log

第3-2-6図 断裂系測定位置図

Fig. 3-2-6 Location Map of Fissure Measuring Site

第3-2-7図 断裂系ウルフネット図

Fig. 3-2-7 Wulff's Net of Fissure Direction

第3-3-1図 電気探査測点位置図

Fig. 3-3-1 Location Map of Electrical Prospecting Station

第3-3-2図 比抵抗解析図

Fig. 3-3-2 Resistivity Cross Section

第3-4-1図 河川流量・水質分析位置図

Fig. 3-4-1 Location Map of Flow Rate Measurement and
Chemical Analysis of Water

第3-4-2図 表流水の水収支

Fig. 3-4-2 Surface Water Balance

- 第3-4-3図 水質分析結果図
Fig. 3-4-3 Analysis Map of Chemical Data of Water
- 第3-4-4図 微流速測定結果図
Fig. 3-4-4 Micro Flow Analysis
- 第3-4-5図 地下水解析図（平面図）
Fig. 3-4-5 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Plane)
- 第3-4-6図 地下水解析図（断面図）
Fig. 3-4-6 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Cross Section)
- 第3-4-7図 透水係数試験試料採取位置図
Fig. 3-4-7 Location Map of Permeability Test Sample
- 第3-4-8図 地下水流動解析範囲図
Fig. 3-4-8 Groundwater Simulation Area
- 第3-4-9図 岩石物性区分図
Fig. 3-4-9 Rock Classification Map
- 第3-4-10図 地下水飽和図
Fig. 3-4-10 Groundwater Saturation Map
- 第3-4-11図 地下水流速図
Fig. 3-4-11 Groundwater Velocity Map
- 第3-5-1図 土壌解析図
Fig. 3-5-1 Analysis Map of Chemical Data of Soil
- 第3-6-1図 降水の流下経路
Fig. 3-6-1 The Flow of Rainwater
- 第3-6-2図 ボーリング及びサンプリング位置図
Fig. 3-6-2 Boring and Soil Test Sample Point
- 第3-6-3図 粒径加積曲線
Fig. 3-6-3 Grain Size Accumulation Curve
- 第3-6-4図 エルボテ堆積場地質断面図
Fig. 3-6-4 El Bote Tailing Dam Geological Cross Section
- 第3-6-5図 境界線推定方法
Fig. 3-6-5 The Method for Presumption of Border Line
- 第3-6-6図 堆積場安定解析モデル
Fig. 3-6-6 The Model of Tailing Dam Stability Analysis
- 第3-6-7図 堆積場安定計算結果（1）
Fig. 3-6-7 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (1)

- 第3-6-8図 堆積場安定計算結果 (2)
- Fig.3-6-8 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (2)
- 第3-6-9図 堆積場安定計算結果 (3)
- Fig.3-6-9 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (3)
- 第3-6-10図 堆積場安定計算結果 (4)
- Fig.3-6-10 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (4)
- 第3-6-11図 液状化による危険性の判定
- Fig.3-6-11 The Scope for Danger of Liquefaction
- 第3-7-1図 気象観測点位置図
- Fig.3-7-1 Location Map of Meteorological Station
- 第3-7-2図 ダストジャー設置位置図
- Fig.3-7-2 Location Map of Dust Jar Sampling
- 第3-7-3図 ローボリュームサンプラー測定位置図
- Fig.3-7-3 Location Map of Low Volume Sampler
- 第3-7-4図 デジタル粉塵計測定位置図
- Fig.3-7-4 Location Map of Digital Dust Monitors
- 第3-7-5図 粉塵飛散解析図
- Fig.3-7-5 Analysis Map of Digital Dust Monitors
- 第3-9-1図 押え盛土工モデル
- Fig.3-9-1 The Model of Counter Load
- 第3-9-2図 堆積場安定解析用断面モデル
- Fig.3-9-2 The Model of Tailing Dam Stability Analysis
- 第3-9-3図 堆積場安定計算結果 (1)
- Fig.3-9-3 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (1)
- 第3-9-4図 堆積場安定計算結果 (2)
- Fig.3-9-4 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (2)
- 第3-9-5図 堆積場安定計算結果 (3)
- Fig.3-9-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (3)
- 第3-9-6図 堆積場安定計算結果 (4)
- Fig.3-9-6 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (4)
- 第3-9-7図 排水工平面図
- Fig.3-9-7 Drainage Plan
- 第3-9-8図 確率降水量
- Fig.3-9-8 Probability Precipitation

- 第3-9-9図 排水溝標準図
Fig. 3-9-9 Typical Cross Section of Drainage
- 第4-1-1図 水理・気象図
Fig. 4-1-1 Hydrologic and Meteorologic Map
- 第4-2-1図 地質平面図
Fig. 4-2-1 Geological Plane Map
- 第4-2-2図 地質断面図
Fig. 4-2-2 Geological Cross Section
- 第4-2-3図 地質柱状図
Fig. 4-2-3 Geologic Column
- 第4-2-4図 ボーリング位置図
Fig. 4-2-4 Location Map of Boring Site
- 第4-2-5図 ボーリング柱状図
Fig. 4-2-5 Boring Log
- 第4-2-6図 断裂系測定位置図
Fig. 4-2-6 Location Map of Fissure Measuring Site
- 第4-2-7図 断裂系ウルフネット図
Fig. 4-2-7 Wulff's Net of Fissure Direction
- 第4-3-1図 電気探査測点位置図
Fig. 4-3-1 Location Map of Electrical Prospecting Station
- 第4-3-2図 比抵抗解析図
Fig. 4-3-2 Resistivity Cross Section
- 第4-4-1図 河川流量・水質分析位置図
Fig. 4-4-1 Location Map of Flow Rate Measurement and Chemical Analysis of Water
- 第4-4-2図 表流水の水収支
Fig. 4-4-2 Surface Water Balance
- 第4-4-3図 水質分析結果図
Fig. 4-4-3 Analysis Map of Chemical Data of Water
- 第4-4-4図 微流速測定結果図
Fig. 4-4-4 Micro Flow Analysis
- 第4-4-5図 地下水解析図（平面図）
Fig. 4-4-5 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Plane)

- 第4-4-6図 地下水解析図（断面図）
 Fig.4-4-6 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Cross Section)
- 第4-4-7図 透水係数試験試料採取位置図
 Fig.4-4-7 Location Map of Permeability Test Sample
- 第4-4-8図 地下水流動解析範囲図
 Fig.4-4-8 Groundwater Simulation Area
- 第4-4-9図 岩石物性区分図
 Fig.4-4-9 Rock Classification Map
- 第4-4-10図 地下水飽和図
 Fig.4-4-10 Groundwater Saturation Map
- 第4-4-11図 地下水流速図
 Fig.4-4-11 Groundwater Velocity Map
- 第4-5-1図 土壌解析図
 Fig.4-5-1 Analysis Map of Chemical Data of soil
- 第4-6-1図 ボーリング及びサンプリング位置図
 Fig.4-6-1 Boring and Soil Test Sample Point
- 第4-6-2図 粒径加積曲線
 Fig.4-6-2 Grain Size Accumulation Curve
- 第4-6-3図 パラル堆積場地質断面図
 Fig.4-6-3 Parral Tailing Dam Geological Cross Section
- 第4-6-4図 堆積場安定解析モデル
 Fig.4-6-4 The Model of Tailing Dam Stability Analysis
- 第4-6-5図 堆積場安定計算結果（1）
 Fig.4-6-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (1)
- 第4-6-6図 堆積場安定計算結果（2）
 Fig.4-6-6 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (2)
- 第4-6-7図 堆積場安定計算結果（3）
 Fig.4-6-7 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (3)
- 第4-6-8図 堆積場安定計算結果（4）
 Fig.4-6-8 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (4)
- 第4-6-9図 液状化による危険性の判定
 Fig.4-6-9 The Scope for Danger of Liquefaction
- 第4-7-1図 気象観測点位置図
 Fig.4-7-1 Location Map of Meteorological Station

- 第4-7-2図 ダストジャー設置位置図
Fig. 4-7-2 Location Map of Dust Jar Sampling
- 第4-7-3図 ローボリュームサンプラー測定位置図
Fig. 4-7-3 Location Map of Low Volume Sampler
- 第4-7-4図 デジタル粉塵計測定位置図
Fig. 4-7-4 Location Map of Digital Dust Monitors
- 第4-9-1図 押え盛土工モデル
Fig. 4-9-1 The Model of Counter Load
- 第4-9-2図 堆積場安定解析用断面モデル
Fig. 4-9-2 The Model of Tailing Dam Stability Analysis
- 第4-9-3図 堆積場安定計算結果 (1)
Fig. 4-9-3 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (1)
- 第4-9-4図 堆積場安定計算結果 (2)
Fig. 4-9-4 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (2)
- 第4-9-5図 堆積場安定計算結果 (3)
Fig. 4-9-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (3)
- 第4-9-6図 堆積場安定計算結果 (4)
Fig. 4-9-6 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (4)
- 第4-9-7図 排水工平面図
Fig. 4-9-7 Drainage Plan
- 第4-9-8図 排水工断面図
Fig. 4-9-8 Drainage Section
- 第4-9-9図 排水溝標準図
Fig. 4-9-9 Typical Cross Section of Drainage
- 第4-9-10図 確率降水量
Fig. 4-9-10 Probability Precipitation
- 第5-1-1図 水理・気象図
Fig. 5-1-1 Hydrologic and Meteorologic Map
- 第5-1-2図 温度・湿度測定結果図
Fig. 5-1-2 Temperature-Humidity Variation Diagram
- 第5-2-1図 地質平面図
Fig. 5-2-1 Geological Plane Map
- 第5-2-2図 地質断面図
Fig. 5-2-2 Geological Cross Section

- 第5-2-3図 地質柱状図
Fig.5-2-3 Geologic Column
- 第5-2-4図 ボーリング位置図
Fig.5-2-4 Location Map of Boring Site
- 第5-2-5図 ボーリング柱状図
Fig.5-2-5 Boring Log
- 第5-2-6図 断裂系測定位置図
Fig.3-2-6 Location Map of Fissure Measuring Site
- 第5-2-7図 断裂系ウルフネット図
Fig.5-2-7 Wulff's Net of Fissure Direction
- 第5-3-1図 電気探査測点位置図
Fig.5-3-1 Location Map of Electrical Prospecting Station
- 第5-3-2図 比抵抗解析図
Fig.5-3-2 Resistivity Cross Section
- 第5-4-1図 河川流量・水質分析位置図
Fig.5-4-1 Location Map of Flow Rate Measurement and Chemical Analysis of Water
- 第5-4-2図 表流水の水収支
Fig.5-4-2 Surface Water Balance
- 第5-4-3図 水質分析結果図
Fig.5-4-3 Analysis Map of Chemical Data of Water
- 第5-4-4図 微流速測定結果図
Fig.5-4-4 Micro Flow Analysis
- 第5-4-5図 地下水解析図（平面図）
Fig.5-4-5 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Plane)
- 第5-4-6図 地下水解析図（断面図）
Fig.5-4-6 Analysis Map of Groundwater Reservoir (Cross Section)
- 第5-4-7図 降雨－水位変動解析図
Fig.5-4-7 Rainfall and Groundwater Level Variation Diagram
- 第5-4-8図 透水係数試験試料採取位置図
Fig.5-4-8 Location Map of Permeability Test Sample
- 第5-4-9図 地下水流動解析範囲図
Fig.5-4-9 Groundwater Simulation Area

第5-4-10図 岩石物性区分図

Fig.5-4-10 Rock Classification Map

第5-4-11図 地下水飽和図

Fig.5-4-11 Groundwater Saturation Map

第5-4-12図 地下水流速図

Fig.5-4-12 Groundwater Velocity Map

第5-4-13図 岩石物性区分図（堆積場設置後）

Fig.5-4-13 Rock Classification Map (after Setting up a Tailing Dam)

第5-4-14図 地下水飽和図（堆積場設置後）

Fig.5-4-14 Groundwater Saturation Map (after Setting up a Tailing Dam)

第5-4-15図 地下水流速図（堆積場設置後）

Fig.5-4-15 Groundwater Velocity Map (after Setting up a Tailing Dam)

第5-5-1図 土壌解析図

Fig.5-5-1 Analysis Map of Chemical Data of soil

第5-6-1図 ボーリング及びサンプリング位置図

Fig.5-6-1 Boring and Soil Test Sample Point

第5-6-2図 粒径加積曲線

Fig.5-6-2 Grain Size Accumulation Curve

第5-6-3図 新エルココ堆積場モデル

Fig.5-6-3 Model of New El Coco Tailing Dam

第5-8-1図 堆積場安定解析用断面モデル

Fig.5-8-1 The Model of Tailing Dam Stability Analysis

第5-8-2図 堆積場安定計算結果（1）

Fig.5-8-2 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (1)

第5-8-3図 堆積場安定計算結果（2）

Fig.5-8-3 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (2)

第5-8-4図 堆積場安定計算結果（3）

Fig.5-8-4 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (3)

第5-8-5図 堆積場安定計算結果（4）

Fig.5-8-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis (4)

第5-8-6図 排水フロー

Fig.5-8-6 Drainage Flow

第5-8-7図 新エルココ堆積場排水工平面図

Fig.5-8-7 New El Coco Tailing Dam Drainage Plan

第5-8-8図 確率降水量

Fig.5-8-8 Probability Precipitation

第5-8-9図 模式排水断面図

Fig.5-8-9 Typical Cross Section of Drainage

付 表

第2-1表 電気探査とボーリング工事数量実績表

Table 2-1 Total Amount of Electric Exploration and Boring Works

第3-4-1表 表流水測定結果一覧表

Table 3-4-1 Hydrologic Measurment of Surface Water

第3-4-2表 水質汚染物質の基準値

Table 3-4-2 Background and Water Supply Ceiling of Chemical Components
in Water

第3-4-3表 表流水化学分析結果一覧表

Table 3-4-3 Chemical Analysis of Surface Water

第3-4-4表 微流速計測定結果一覧表

Table 3-4-4 Micro Flow Measurement Data

第3-4-5表 帯水層の諸元

Table 3-4-5 Characteristic of Aquifer

第3-4-6表 地下水化学分析結果一覧表

Table 3-4-6 Chemical Analysis of Groundwater

第3-4-7表 透水係数測定結果一覧表

Table 3-4-7 Permeability Coefficient Data

第3-4-8表 透水係数と間隙率のモデル

Table 3-4-8 Permeability and Porosity Model

第3-5-1表 土壌化学分析結果一覧表

Table 3-5-1 Chemical Analysis of Soil

第3-6-1表 土質試験数量一覧表

Table 3-6-1 Soil Test Quantity

第3-6-2表 土質試験結果一覧表

Table 3-6-2 Soil Test Data

第3-6-3表 自然含水比と湿潤密度の関係

Table 3-6-3 Natural Moisture Content and Wet Density

第3-6-4表 土のコンシステンシー特性値

Table 3-6-4 Consistency Data of Soil

第3-6-5表 堆積場安定計算結果

Table 3-6-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis

第3-7-1表 風向風速計の測定概要

Table 3-7-1 Wind System Data

第3-7-2表 風速測定結果一覧表

Table 3-7-2 Wind Speed Data

第3-7-3表 風向測定結果一覧表

Table 3-7-3 Wind Direction Data

第3-7-4表 ダストジャー測定結果一覧表

Table 3-7-4 Dust Jar Measurement Data

第3-7-5表 降下粉塵化学分析結果一覧表

Table 3-7-5 Chemical Analysis of Falling Dust

第3-7-6表 ローボリューム・エアーサンプラー測定条件

Table 3-7-6 Condition of Low Volume Air Sampler

第3-7-7表 ローボリューム・エアーサンプラー測定結果一覧表

Table 3-7-7 Low Volume Air Sampler Measurement Data

第3-7-8表 デジタル粉塵計測定結果一覧表

Table 3-7-8 Digital Type Dust Monitor Data

第3-7-9表 デジタル粉塵計比較試験結果一覧表

Table 3-7-9 Comparative Data of Digital Type Dust Monitors

第3-9-1表 堆積場安定計算結果

Table 3-9-1 A Result of Tailing Dam Stability Analysis

第3-9-2表 日確率降水量計算表

Table 3-9-2 Day Probability Precipitation

第4-4-1表 表流水測定結果一覧表

Table 4-4-1 Hydrologic Measurement of Surface Water

第4-4-2表 水質汚染物質の基準値

Table 4-4-2 Background and Water Supply Ceiling of Chemical Components
in Water

第4-4-3表 表流水化学分析結果一覧表

Table 4-4-3 Chemical Analysis of Surface Water

第4-4-4表 微流速測定結果一覧表

Table 4-4-4 Micro Flow Measurement Data

第4-4-5表 帯水層の諸元

Table 4-4-5 Characteristic of Aquifer

第4-4-6表 地下水化学分析結果一覧表

Table 4-4-6 Chemical Analysis of Groundwater

第4-4-7表 透水係数測定結果一覧表

Table 4-4-7 Permeability Coefficient Data

第4-4-8表 透水係数と間隙率のモデル

Table 4-4-8 Permeability and Porosity Model

第4-5-1表 土壌化学分析結果一覧表

Table 4-5-1 Chemical Analysis of Soil

第4-5-2表 土壌からの溶出濃度分析結果一覧表

Table 4-5-2 Chemical Analysis of Solution Extracted
from the Soil Samples

第4-6-1表 土質試験数量一覧表

Table 4-6-2 Soil Test Quantity

第4-6-2表 土質試験結果一覧表

Table 4-6-2 Soil Test Data

第4-6-3表 自然含水比と湿潤密度の関係

Table 4-6-3 Natural Moisture Content and Wet Density

第4-6-4表 土のコンシステンシー特性値

Table 4-6-4 Consistency Data of Soil

第4-6-5表 堆積場安定計算結果

Table 4-6-5 A Result of Tailing Dam Stability Analysis

第4-7-1表 風速測定結果一覧表

Table 4-7-1 Wind Speed Data

第4-7-2表 風向測定結果一覧表

Table 4-7-2 Wind Direction Data

第4-7-3表 ダストジャー測定結果一覧表

Table 4-7-3 Dust Jar Measurement Data

第4-7-4表 ローボリューム・エアーサンプラー測定条件

Table 4-7-4 Condition of Low Volume Air Sampler

第4-7-5表 ローボリューム・エアーサンプラー測定結果一覧表

Table 4-7-5 Low Volume Air Sampler Measurement Data

第4-7-6表 デジタル粉塵計測定結果一覧表

Table 4-7-6 Digital Type Dust Monitor Data

第4-9-1表 堆積場安定計算結果

Table 4-9-1 A Result of Tailing Dam Stability Analysis

第4-9-2表 日確率降水量計算表

Table 4-9-2 Day Probability Precipitation

第5-4-1表 表流水測定結果一覧表

Table 5-4-1 Hydrologic Measurement of Surface Water

第5-4-2表 水質汚染物質の基準値

Table 5-4-2 Background and Water Supply Ceiling of Chemical Components
in Water

第5-4-3表 表流水化学分析結果一覧表

Table 5-4-3 Chemical Analysis of Surface Water

第5-4-4表 微流速測定結果一覧表

Table 5-4-4 Micro Flow Measurement Data

第5-4-5表 帯水層の諸元

Table 5-4-5 Characteristic of Aquifer

第5-4-6表 地下水化学分析結果一覧表

Table 5-4-6 Chemical Analysis of Groundwater

第5-4-7表 透水係数測定結果一覧表

Table 5-4-7 Permeability Coefficient Data

第5-4-8表 透水係数と間隙率のモデル

Table 5-4-8 Permeability and Porosity Model

第5-5-1表 土壌化学分析結果一覧表

Table 5-5-1 Chemical Analysis of Soil

第5-6-1表 土質試験数量一覧表

Table 5-6-2 Soil Test Quantity

第5-6-2表 土質試験結果一覧表

Table 5-6-2 Soil Test Data

第5-6-3表 自然含水比と湿潤密度の関係

Table 5-6-3 Natural Moisture Content and Wet Density

第5-8-1表 堆積場安定計算結果

Table 5-8-1 - A Result of Tailing Dam Stability Analysis

第5-8-2表 日確率降水量計算表

Table 5-8-2 Day Probability Precipitation

1. 序 言

1. 序 言

1990年 7月メキシコ政府は鉱業政策基本方針の一環として、「メキシコ合衆国における鉱業活動、主として廃さい堆積場（ダム）の、周辺環境におよぼす影響とその改善のための調査」をわが国へ要請して来た。この要請に基づき、同年 8月にはメキシコ政府と国際協力事業団（JICA）との間で、調査の作業範囲（S/W）について合意・署名が行われ、調査実施の運びとなった。

本調査の目的は、「メキシコ合衆国鉱山公害対策計画調査業務指示書－1990年12月、JICA」に記載されたとおり、同国鉱業振興公社（CFM）の所有する主要選鉱場の堆積場等を対象に、

- （1）堆積場の崩壊、堆積物の流出による環境汚染の現状調査
- （2）選鉱廃水等による周辺河川水および地下水の汚染状況調査
- （3）有害物質の飛散による環境汚染の現状調査

を実施して、その対策を立案・策定することにある。また、本件調査を通して、メキシコ側カウンターパートに対し技術移転を行うことも含まれる。

本報告は、上記 S/Wならびに指示書に基づき、前後 2 回にわたる現地作業、各種集中調査の総合結果から得られた環境汚染の現状と、その対策を記述したものである。

2. 現 地 調 査 の 概 要

2. 現地調査の概要

現地調査は乾期、雨期の二期に分けて実施することとし、乾期調査は、1991年1月21日（月）から3月27日（水）までの66日間、雨期調査は同年7月15日（月）から9月18日（水）までの同じく66日間にわたって行った。調査対象地域はS/Wに基づき、下記の3地域とした（第2-1図、第2-2図）。

- 1) サカテカス（Zacatecas）州エルボテ（El Bote）堆積場周辺（以下エルボテ）
- 2) チワワ（Chihuahua）州パラル（Parral）堆積場周辺（以下パラル）
- 3) シナロア（Sinaloa）州エルココ（El Coco）選鉱場新設予定地（以下新エルココ）

現地調査は、基本的には次の各項目について実施した。

- a. 地形、地質、気象、選鉱場、堆積場関係各種資料の収集
- b. 調査地域の地質踏査
- c. 電気探査法による地質ならびに地下水状況調査
- d. ボーリングによる地質ならびに地下水状況調査
- e. 地表水、地下水の流量ならびに流速調査
- f. 地表水、地下水の水質調査
- g. 既設堆積場構造物の土質調査
- h. 新設堆積場予定地の土質調査
- i. 周辺地域土壌に含まれる重金属等の化学成分調査
- j. 堆積場から発生する粉塵の飛散状況調査

これらの調査結果から下記事項について総合解析ならびに考察を行った。

1. 周辺地表水、地下水を含む総合的水理調査（a. b. c. d. e. f）
2. 堆積場からの浸透水の周辺河川および地下水への影響（a. b. c. d. e. f. i）
3. 既設堆積場の安定性評価（g）
4. 新設堆積場予定地の適性評価（h）
5. 堆積場から発生する粉塵飛散の周辺地域への影響（j）

以上の調査項目は、三地域にほぼ共通したものであるが、実施にあたっては事前にメキシコ鉱業振興公社（CFM）と十分協議を行い、各地域の現況を勘案しつつ、CFMの要望も出来るかぎり取り入れて計画した。また、日程的にも限度

があったので、地域毎に若干の調整も行った。

電気探査、ボーリング工事は、現地においてそれぞれの施工業者と契約を結び、作業を委託した。電気探査測線、ボーリング孔位置の選定については、JICA事前調査団の提言を十分考慮した上で、本調査団が地形条件等を勘案して最終的に決定した。

土質調査についても、各種物性試験を現地業者に委託した。

地表水、地下水、土壌、粉塵等のサンプルの化学分析については、CFMテカマチャルコ(Tecamachalco)研究所に依頼した。

現地調査ならびに各種作業の工程実績は第2-3図及び第2-4図に、また作業地域別の電気探査、ボーリング工事の数量は第2-1表に示すとおりである。なお、河川ボーリングは地下水調査を主目的としたもので、かならずしも河川近傍ではない。一方堆積場ボーリングは、土質調査を主目的として堆積場内部に掘削した。

現地調査により得られた資料ならびに解析結果は、次章以下に、作業地域別に詳細に記述する。

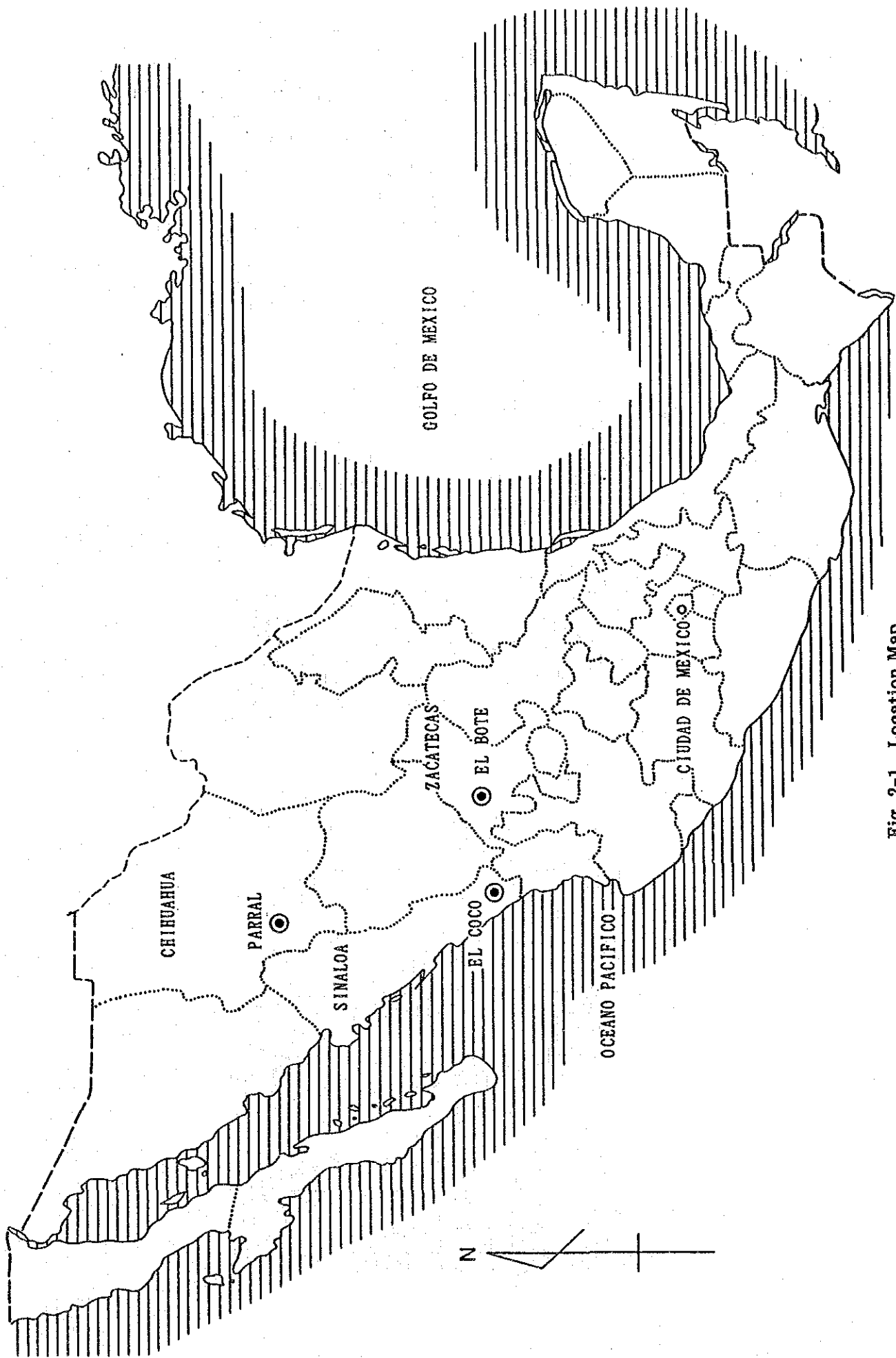


Fig. 2-1 Location Map



Fig. 2-2 Photographs of Survey Area (El Bote Tailing Dam) (1)



Fig. 2-2 Photographs of Survey Area (Parral Tailing Dam) (2)

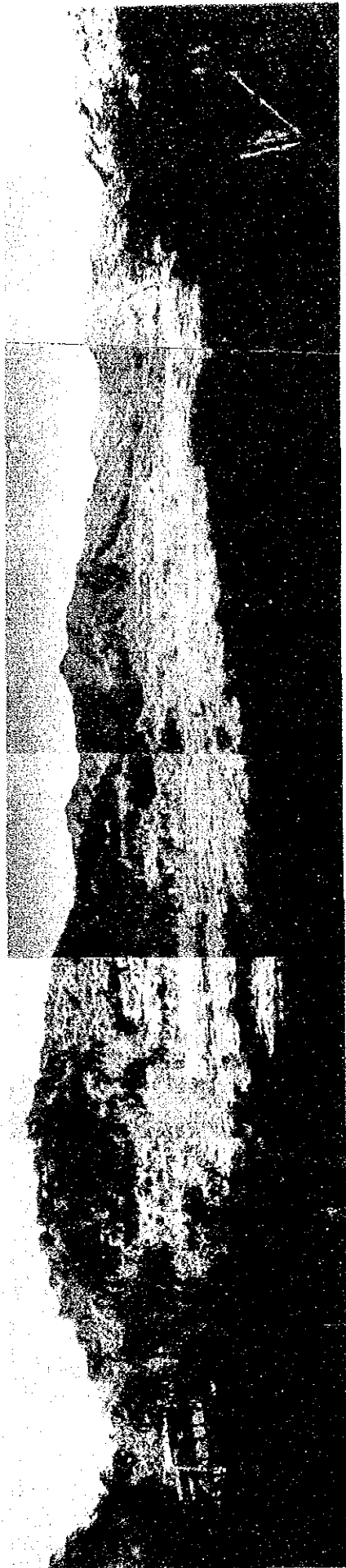


Fig. 2-2 Photographs of Survey Area (New El Coco Planned Tailing Dam Site) (3)

	January, 1991				February			March		
	2nd decade	3rd	1st decade	2nd	3rd	1st decade	2nd	3rd		
Data Collection. Discussion etc.		—	—	—	—	—	—	—		
Elec. Exploration El Bote Parral New El Coco			—	—	—	—	—	—		
Boring Works El Bote Parral New El Coco			—	—	—	—	—	—		
Geo. Observation El Bote Parral New El Coco		—	—	—	—	—	—	—		
Measurements El Bote Parral New El Coco										
Remarks	1/21 Arrival in Mexico				3/6 Customs Cleared (Apparatus)			3/26 Leaving Mexico		

Fig. 2-3 Progress in the Field Investigation (Dry Season)

	J u l y , 1 9 9 1		A u g u s t			S e p t e m b e r		
	2nd decade	3rd	1st decade	2nd	3rd	1st decade	2nd	3rd
Data Collection. Discussion etc.	—			—		—	—	
Clearing of Boring Hole El Bote Parral New El Coco		—	—		—			
Leveling El Bote Parral New El Coco		—		—	—	—		
Boring Works El Bote Parral New El Coco		—		—	—	—		
Geo. Observation El Bote Parral New El Coco		—		—	—	—	—	
Measurements El Bote Parral New El Coco		—	—	—	—	—	—	
Remarks	7/15 Arrival in Mexico					9/17 Leaving Mexico		

Fig. 2-4 Progress in the Field Investigation (Rainy Season)

Table 2-1 Total Amount of Electric Exploration and Boring Works

Survey Area	El Bote	Parral	New El Coco
Elec. Exploration (Dry Season)	49 stations	60 stations	26 stations
Boring Works (Dry Season)	No. Depth(m) Riverside B-1 10 B-2 30 B-3 20 3 60 Damsite D-1 29 D-2 19 D-3 15 3 63 Sub Total 6holes 123m	No. Depth(m) Riverside B-1 10 B-2 15 B-3 40 3 65 Damsite D-1 17 D-2 12 2 29 Sub Total 5holes 94m	No. Depth(m) Riverside B-1 50 B-2 105 B-3 20 B-4 30 B-5 14 B-6 10 B-7 14 B-8 14 8 257 Sub Total 8holes 257m
(Rainy Season)	NONE	Riverside B-4 15 Damsite D-3 17 Sub Total 2holes 32m	Riverside B- 9 20 B-10 15 B-11 15 B-12 15 B-13 10 5 75 Sub Total 5holes 75m
TOTAL	6holes 123m	7holes 126m	13holes 332m

Remarks: Riverside borings were aimed at ground water movement but not always located in the vicinity of a river, while damsite borings were drilled in a tailing dam to study the property of soil. Refer to Location of the Drill Holes.

3. エルボテ地域調査結果と対策

3. エルボテ地域調査結果と対策

3-1 一般概況

3-1-1 位置・地形・気候

調査地域のエルボテ (El Bote) 鉱山は、メキシコ中部サカテカス (Zacatecas) 州の州都サカテカス市の北西約 2 km、標高約 2,400m に位置する。当地域の気候はステップ気候で、年平均気温は 14℃ である。5 月～9 月の 5 ヶ月間が雨期、10～4 月が乾期にあたる。年間降雨量は平均約 400mm である (第 3-1-1 図)。乾期には強い南西の季節風が吹く。

植生は、カクタス (サボテン) のほかにモレロス (桑) などの灌木がみられる。鉱山下流は扇状地を呈し、下流域には放牧地及び農地がありトウモロコシ、豆、チレ (トウガラシ) 等を栽培している。また、鉱山より北西 10～15km 地域には、サカテカス市の生活用水を供給する井戸が数ヶ所あり、これらは市当局の管理下におかれている。

3-1-2 鉱山沿革・概要

エルボテ鉱山は、19 世紀後半より金・銀・鉛鉱山として、個人鉱山主により採掘されていたが、1912 年より Bote Mining Co. が、1924 年には米国の Pittsburg Mining Co. が、さらに 1935 年には Carnegie Mining Co. が引き続いて経営にあたった。1972 年以降は C F M が採鉱部門と選鉱部門とを統合し、Unidad Minero Metalurgica El Bote として操業にあたっている。

エルボテ鉱山の 1989 年度の粗鉱生産量は 166,000t であり、粗鉱品位は最近の実績によると、金 0.8g/t、銀 110g/t、鉛 0.5%、亜鉛 1% となっている。選鉱場処理能力は、650t/day で C F M の所有する金属選鉱場中最大である。1987 年までは、鉛及び亜鉛精鉱を採取する優先浮選を行っていたが、その後 4 年間は、粗鉱中の鉛、亜鉛品位の低下により優先浮選を中止し、硫化物混合精鉱を採取する総合浮選に切り換えている。最近では、粗鉱品位の高い場合に、一時的に優先浮選を行うことがある。優先浮選の場合には、鉱害と関連のある青化ソーダ (NaCN) を月間約 600kg 使用する。総合浮選の場合は全く使用しない。精鉱の品位は、総合浮選の場合、金 20g/t、銀 3,000g/t、鉛 6%、亜鉛 12% 前後である。選鉱用水使用量は一日あたり約 1,400m³ で、このうち 1,000m³ は同鉱山の坑内水を、不足分 400m³ は堆積場よりの放流水を回収して利用している。排水は一般河川にそのまま放流しており、水処理は行っていない。

堆積場は選鉱場の谷向いの山腹南西部に、内盛式で堆積している。その形態は平均法面勾配45度、堆積高さ約40m以上である。堆積場の北西部は堆積を終了しており、現在は南西部に堆積中である。選鉱尾鉱は選鉱場から水管橋を経由して、堆積場外縁に送泥管を設置し、堆積場の堤頂レベルをほぼ一定に保ちつつ、サイクロンにて粗・中粒砂で築堤しながら中心部に水及び細砂を堆積している。中心部の水は簡易尺八（斜樋）により堆積場外に排出している。

堆積場の法面には雨裂が見られ、一部法肩から堆積物が流出した形跡があり、雨期の集中豪雨時には、これらの危険性が大きいと思われる。

3-2 地質

3-2-1 地質概説

調査地域のエルボテ鉱山は、サカテカス州の州都サカテカス市の西隣にあり、西シエラマドレ山脈の西側山麓斜面に位置している。サカテカスの南方には大規模なカルデラ構造が認められ、その北端は東西方向のラカンテラ断層によって区切られている。調査地域はこのラカンテラ断層の北方にあり、中央部にはNW-SE方向性のラカンテラ鉱脈が走っている。

調査地域の基盤は三畳紀のピミエンタ(Pimienta)変堆積岩類で構成され、これを第三紀始新世の安山岩が覆っている。さらに、これらを貫く流紋岩岩脈及びラカンテラ鉱脈が存在する。ラカンテラ鉱脈は、漸新世以後に生じたカルデラ形成の初期のアーチングに伴う引張性破断によって出現し、その後の重力断層の運動によって再生、拡大したものと考えられている。

ラカンテラ鉱脈は調査地域において最も大規模で、経済的にも重要な鉱脈であり、銀を多量に含んでいる。第四紀更新世になると西シエラマドレ山脈の侵食が進み、西側山裾に扇状地が発達し、更に現世になってこれを侵食しながら、河川沿いに河岸段丘を形成している。

3-2-2 地質及び地質構造

調査地域については写真判読、現地踏査、ボーリング調査を実施して、地質状況の把握に努めた。その結果、調査地域の基盤は三畳紀に属するピミエンタ変堆積岩類であり、その分布は全面積の約60%を占めていることが判った（第3-2-1図、第3-2-2図、第3-2-3図）。このピミエンタ変堆積岩類は、同層中に認められる複雑な褶曲構造によって走向・傾斜が一定しないが、調査地域西端付近を除いては、地層の傾斜が概ねNE～E～SE方向を示し、西方へ向かうに従い下部層が、東方へ向かうに従い上部層が分布していると考えられる。この基盤岩は変堆積岩類と呼称

されているように、低変成作用を受けている場合が多く、調査地域の北半部と中央部は千枚岩を主とする変成岩が広く分布している。

調査地域の南東部一帯には、第三紀始新世に属する安山岩が基盤岩を不整合に覆って分布している。この安山岩中に認められる面構造より、その走向はNE-SE方向、傾斜はNE方向が卓越しているようである。後始新世に属する流紋岩岩脈、及びそれと密接な関係があるラカンテラ鉱脈に代表される鉱脈群は、主にNW-SEの走向方向を示し、エルボテ堆積場の北方を横切って帯状に分布している。第四紀の旧扇状地堆積物が、調査地域北西部及び中央部に緩傾斜の平坦面を形成して分布し、これを開析して現世の段丘堆積物が河川沿いに発達している。

構造的には、基盤を成しているピミエント変堆積岩が褶曲作用を受けており、ボーリング孔B-1（第3-2-4図）付近を頂部とする、NE-SW方向の背斜軸が潜在している可能性が高く、B-1孔付近を境として、その東西で走向・傾斜が著しく変化しているようである（第3-2-1図、第3-2-2図、第3-2-5図）。

断裂系調査位置を第3-2-6図に、また断裂の方向をウルフネットに表したものを第3-2-7図に示す。これによると、断裂には異なる3方向のものがある。ひとつはNW-SE系の断裂で、ラカンテラ鉱脈に平行であり、概要でも述べた南方にあるカルデラの形成に関連して生じた引張性の断層であると推定される。残りのふたつはほぼNE-SW、ENE-WSWの方向性を示し、鉱脈を切るような断層である。これらふたつの断層は基盤岩の走向にほぼ平行な断層である。

（1）三疊系（ピミエント変堆積岩類）

調査地域の三疊系は千枚岩、絹雲母片岩、石灰岩、珪岩、粘板岩より構成されるピミエント変堆積岩類である。

①千枚岩

千枚岩は灰白色を呈し、風化が著しく脆弱である。面構造が発達し、板状～薄層状に剥離し易い性質がある。分布は三疊系中最も広く、調査地域の北半部及び中央部を占めている。全体に褶曲が著しいため走向・傾斜は一定しない。

②絹雲母片岩

本地域の絹雲母片岩は、千枚岩が更に変質して少量の絹雲母を生じたものであり白～灰白色を呈し、著しく脆弱である。エルボテ選鉱場の北方に分布し、局部的には鉱脈に沿ってわずかに認められる。

③ 石灰岩

石灰岩は、暗灰色を呈し、堅硬緻密であるが、泥質分を含み、層理も発達している場合が多い。選鉱場の南西部に、二層準にわたって帯状分布しており、南西部の小高い丘陵山腹には石灰岩を採掘した跡が残っている。

④ 珪岩

珪岩は、選鉱場の南東方にあり、概ねN-S方向の帯状分布を示している。千枚岩と同様の変成作用によって、砂質岩が変質したものと考えられる。

⑤ 粘板岩

粘板岩は、調査地域に分布する三疊系の最上部と下部に存在し、選鉱場の南東部と西方に分布している。特に西方では分布が広く、背斜軸の西方に位置する地下水観測用のボーリング孔3本でも確認された。ボーリングコアの観察によれば、粘板岩は比較的新鮮な部分では黒色を呈するが、風化部は灰～褐色を呈している。また、葉理が著しく発達しており、これに沿って方解石脈を生じていることが多い。この葉理面より割れ易くなっている。

粘板岩の走向・傾斜は小褶曲（層内褶曲）が著しい部分があり一様ではないが、ボーリング孔B-1孔付近を境とし、西側では概ね走向N45°～55°W、傾斜W10～40°NE、東側では概ね走向N40°～70°E、傾斜20°～40°SEを示している。従ってB-1孔付近に背斜軸が存在していると考えられる。

（2）第三系

第三系は始新統の安山岩、後始新統の流紋岩岩脈及び鉍脈によって構成されている。これらはボーリング調査では認められないが、地表及び坑内の地質調査によって確かめられた。

① 安山岩

暗灰～暗緑灰色を呈する変質した安山岩であり、調査地域の南東部に分布しており、基盤を不整合に覆っている。

また、後述する流紋岩岩脈が貫入している。

② 流紋岩岩脈

流紋岩岩脈は堅硬緻密な灰白～淡黄白色の流紋岩によって構成されており基盤の三疊系及び始新世の安山岩を貫き、調査地域の中央をWNW-ESE方向に走る岩脈群

から成り立っている。これは空中写真によっても明瞭に認められ、選鉱場の北方に位置する丘陵頂部付近に突出して畝状を呈している。

③ 鉱脈

鉱脈形態図は鉱山によって作成されている。鉱脈の形成時期についてはすでに述べたとおりであるが、南方にあるカルデラの形成過程において生じた鉱床の累帯配列傾向より判断すると、鉱床の鉱脈群は、カルデラを中心とした同心円状あるいは外周性の鉱脈系であり、走向 $N45^{\circ} \sim 85^{\circ} W$ 、 $50^{\circ} \sim 70^{\circ} SW$ または $75^{\circ} NE$ を示している。この鉱脈はAgを主とし、Pb, Zn, Cu, Auを伴う脈であり、サカテカス周辺でも最大規模の、経済的に重要なものである。

(3) 第四系

第四系は更新世の旧扇状地堆積物、現世の段丘堆積物及び現河川堆積物によって構成されている。

① 旧扇状地堆積物

調査地域の中央部及び北西部に緩傾斜の平坦面を形成しており、主にピミエンタ変堆積岩類及び流紋岩の角礫を多量に含む、淘汰の悪い砂礫によって構成されている。

② 段丘堆積物

現河川沿いに分布しており、地下水観測用のボーリングB-1, B-2, B-3孔の3孔全部に存在が確認されている。上流のB-1孔では、地表下2.80~8.60mに存在し、下位より礫層、細粒砂層、中流砂層、中~粗粒砂層で構成されている。中流のB-2孔では地表下2.00~8.00mに存在し、下位より礫層、細粒砂層、極細粒砂層で構成されている。下流のB-3孔では地表下0.20~5.10mに存在し、礫混じりシルト層によって構成されている。これらボーリングにより、下流に行くに従って淘汰の良い砂層が発達していることがあきらかになった。

③ 現河川堆積物

現河川の河床部に堆積している砂礫であり、基盤岩、酸性岩、安山岩等の円~亜角礫を伴っている。

3-3 電気探査

3-3-1 探査方法

地下の比抵抗状態を明らかにするため、乾期に電気探査を実施した。電気探査にはシュランベルジャー法を用いた。シュランベルジャー法(Schlumberger's Electrode Array)とは比抵抗法垂直探査において、対称型4極配置をとる測定法である。測定装置はSchinterx Model IPC7 (2.5KW)で、A M N B電極系の最大A B間隔は400mである。測定は20測線に合計49測点を配置して実施した。この測点配置図を第3-3-1図に示す。測定されたデータは、RESIX PLUS DCという解析ソフトウェアを用い、解析比抵抗値に変換した。

3-3-2 探査結果

解析比抵抗値は次の4グループに区分し、第3-3-2図に示した。

S帯：数10～数1, 000 $\Omega \cdot m$

L帯：100 $\Omega \cdot m$ 以下

M帯：100～200 $\Omega \cdot m$

H帯：200 $\Omega \cdot m$ 以上

L帯は低比抵抗帯、M帯は中比抵抗帯、H帯は高比抵抗帯、S帯は低・高比抵抗複合帯を表している。

S帯は表層部分を形成している。厚さは5m～45mで、平均20mである。S帯の地質は現世(第四紀完新世)の段丘堆積物、旧扇状地堆積物や、三疊系千枚岩・粘板岩・石灰岩の風化土層よりなる。

L帯は9-39-27測線より西側の、S帯の下部を形成している。この測線より西側は、M帯やH帯を伴うことが少なく、S帯の下部に深さ150m以上にわたって、L帯(低比抵抗帯)が形成されている。このL帯の地質は三疊系千枚岩・石灰岩よりなる。L帯中の部分的なH帯やM帯は石灰岩挟在部と対応する。地質構造上、このL帯は南北方向の背斜構造(ドーム構造)の西翼部にあたる。

M帯及びH帯は9-39-27測線より東側の、S帯の下部を形成している。この測線より東側は、L帯をとまなうことが少なく、S帯の下部に深度150m以上、M帯(中比抵抗帯)またはH帯(高比抵抗帯)が形成されている。このM帯とH帯の地質は三疊系千枚岩・石灰岩よりなる。H帯の大部分は石灰岩挟在部と対応する。地質構造上このM帯、H帯は南北方向の背斜構造(ドーム構造)の軸部及び東翼部にあたる。

ボーリングによる地下水調査では、S帯及びL帯で地下水の流動が観測されている。このことより、S帯及びL帯が帯水層であり、M帯が半帯水層、H帯が難

透水層または不透水層と判断される。

3-4 水理

調査域の水系は第3-1-1図に示すとおりであり、川がCFMの選鉱場南方を、東南東より西北西へ流下している。本調査は、堆積場よりの排水が、表流水及び地下水へどのような影響を及ぼしているかを把握することを目的としており、乾期と雨期の2回にわたって第3-4-1図に示す各地点で流量、水質などの調査を実施した。

3-4-1 表流水

調査地域の河川は、年間を通じて流量が少なく、特に乾期には支川の河床がほとんど干上がっていた。本調査では乾期・雨期各々次の地点において流量・水質調査を実施した。

(乾期) 流量調査地点 No.1~No.6

水質調査地点 B-D1及びB-R1~R5

(雨期) 流量調査地点 No.0~No.6

水質調査地点 B-D1,B-W1及びB-R1~B-R7

(1) 表流水の流量

本調査ではNo.0~No.6地点において、プライス電気式回転流速計を使用し、流速を計測すると共に、その流水断面積(流積)を求め、流量を算定した。その結果は第3-4-1表に示すとおりである。

これらを乾期・雨期別に模式化すると第3-4-2図のようになる。

第3-4-2図を検討してみると、乾期にはNo.1~No.4地点間、No.4~No.5地点間、No.5~No.6地点間の3区間、雨期にはNo.0~No.1地点間、No.5~No.6地点間の2区間で流量の変化が大きいことがわかる。これらの変化は各々次のような原因と考えられる。

① 乾期における流量の変化

i) No.1~No.4 地点間の流量増加

この区間では、タラマンテス川にあるNo.1地点の $880.4\text{m}^3/\text{day}$ と、エルボテ川本流よりの流量が合わさり、No.4地点で $1,213.1\text{m}^3/\text{day}$ となっているものと考えられる。従って、エルボテ川本流よりの流量は、おおよそ $330\text{m}^3/\text{day}$ と推定される。この区間でCFM選鉱場よりの排水が流入している。

ii) No. 4～No. 5 地点間の流量減少

この区間では、No. 4地点で $1,213.1\text{m}^3/\text{day}$ の流量が、No. 5 地点で $572.0\text{m}^3/\text{day}$ と半減し、約 $640\text{m}^3/\text{day}$ が消失している。両地点ともに河岸に基盤の風化した粘板岩が露出しており、河川堆積物の厚さはそれ程違わない。区間距離がおおよそ 0.5km しかないので、蒸発作用の影響も少ない。また、この区間には人家が2軒あるだけで特に揚水の影響も考えられない。以上のことより、約 $640\text{m}^3/\text{day}$ もの流量がおおよそ 0.5km の区間で消失している現象には、単なる河川堆積物中への伏流だけでなく、更に地下への急速な浸透を考える必要がある。地質構造及び電気探査結果より検討すれば、No. 4地点付近は背斜軸部に相当し、河川はこれを横切って西傾斜の地層に従い西方へ流下している（第3-3-1図）。また、 $100\Omega \cdot \text{m}$ 以下の低比抵抗帯も、No. 4付近を境として西方へ行くに従い深部にまで達している。これらの事実、表流水がNo. 4地点付近を境として、西方では地下へ浸透し易いことを意味しており、その可能性が高いと考えられる。

iii) No. 5～No. 6 地点間の流量減少

この区間は、 $160\text{m}^3/\text{day}$ 程度の流量減少しか生じていない。この区間もNo. 4地点より下流と同一地質条件にあるので、地下への浸透作用が主に働いていると考えられる。上流の区間より浸透量が少なくなっているのは、褶曲軸より離れるにつれ、地層の変形に伴う割れ目が少なくなっているからであろうと推定される。

② 雨期における流量の変化

i) No. 0～No. 1地点間の流量増加

この区間には大きな支川があり、またプリシマ(Purísima)鉱床よりの排水が流入しているため、これらの流量が加わって、No. 1地点で $447.3\text{m}^3/\text{day}$ となっているものと考えられる。

ii) No. 5～No. 6地点間の流量減少

この区間ではNo. 5地点で $1,212.3\text{m}^3/\text{day}$ の流量がNo. 6地点で $464.2\text{m}^3/\text{day}$ となり、約 $750\text{m}^3/\text{day}$ が消失している。この区間は乾期においても流量減少区間であり、褶曲運動に伴う割れ目が発達していることが原因していると考えられる。

③ 乾期及び雨期における流量変動とその性質

流量の季節による変動は、全体として少なく、下流のNo. 4、No. 6地点等では乾

期・雨期共にほぼ同流量を示している。

先ず上流の地点より乾期・雨期のデータと比較してみることとする。No. 1地点における流量は見掛け上乾期の値の方が2倍に近く、矛盾しているように見える。しかし、この地点とNo. 0地点の間に鉱山よりの排水が 29,000t/month 流入しており、季節的变化の影響よりも、鉱山よりの排水量の変動及び流量測定時間と排水時間帯との関係等によって左右されていると考えられる。No. 2, No. 3地点では蒸発量の差、即ち季節的变化が明らかに流量変動に反映している。No. 4地点では乾期、雨期共に流量が一致しており、この地点まで下って来ると季節的变化の影響は認められなくなっている。No. 5地点の流量は季節的变化が反映されており、雨期には乾期の約2倍の流量（No. 4地点とほぼ同量）を示している。

No. 6地点では若干の差はあるが、ほぼ同流量が観測された。この中で特に注目すべき点は、No. 4～No. 6地点間の乾期・雨期における流量変動である。乾期にはNo. 4～No. 5地点間で流量が激減したにも関わらず、雨期には流量が変化していない。さらにNo. 5～No. 6地点間では乾期より雨期の方が流量減少が著しく、最終的には乾期・雨期共にほぼ同流量となっている。この原因は、地下水の挙動に起因しており、地質及び地下水調査結果より次のような原因が考えられる。

i) No. 4～No. 5地点間の流量変化

雨期には地下水位が約60cmほど高くなっているが、地下水の深部への浸透量が少ない。これは背斜構造に密接な関係があり、上流よりの地下水の供給量が雨期に急増するため、雨期の前半に地下深部への浸透量が増加し、雨期中頃になるとすでに浸透水量が平衡状態に近くなっていると考えられるからである。従って、この区間では表流水の流量変化のパターンが乾期と雨期では異なる結果となるのであろう。

ii) No. 5～No. 6地点間の流量変化

地下水位が約60～80cm程高くなっており、地下水の流動も著しくなっている。この区間は、表流水の量（No. 5地点の流量）が多い程、No. 6地点（B-3孔）付近の地下水の流量が増加する傾向を示し、No. 4～No. 5地点間のように地下深部への浸透はほとんどなく、浅所への浸透・流出が主体であると考えられる。

（2）表流水の水質

本調査では、B-D1, B-W1, B-R1～B-R7の9箇所（第3-4-1図）で表流水を採取し、pHを測定すると共に第3-4-2表に示す10成分の化学分析を行った。B-D1試料は堆積

場で、B-W1試料は選鉱排水、B-R1～B-R7試料は河川からそれぞれ採取した。

その結果は第3-4-3表のとおりであり、 Cr^{6+} 及び CN^- については検出されなかった。なお、第3-4-2表の基準値(Water Supply Ceiling)を基に各物質による汚染状況を第3-4-3図に示す。

①バックグラウンドの汚染状況

調査地域ではB-R6地点が最上流に位置し、この上流はCFM選鉱場だけでなく、民間の鉱山の影響も受けていない。しかしながら調査地域及び周辺地域が広域的に鉱化作用を受けているため、表流水中にCu, Pb, Zn, Fe, Cd, Asを含んでいる。即ち、選鉱場の存在に関係なくバックグラウンドは汚染されている。特にFe, Cdは基準上限値を越えており、この傾向が調査地域全体に及んでいるため、河川水は飲料水として不適である。B-R7地点についてもAsを除けば似た傾向を示している。

②B-R2地点の汚染状況

B-R2地点の分析値は他の地点の値と比較しても著しく高く、Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Total Cr, As共に異常値を示している。

この地点は、CFMの廃滓堆積場よりやや上流の支川に位置し、鉱脈の分布地域に相当する。また、上流には民間の鉱山も存在し、河床には金属鉱石を伴う転石が多く堆積している。雨期には河川水が少量流れているが、乾期には黄橙色を呈する水が停滞し、流水はほとんどなく、河床や河岸には硫酸塩鉱物が晶出していた。これは雨期と乾期の分析値を比較しても明らかなように、乾期になると降雨がほとんどなく、蒸発量が増大する為、表流水が激減して汚染物質が濃縮されることを示している。これらの事実より考察すると、B-R2地点における河川水の著しい汚染は、鉱脈が地表付近に存在していることが主原因と考えられ、上流にある民間の鉱山よりの廃滓・排水の影響はわずかであろうと考えられる。

③CFM選鉱場付近の汚染状況

B-W1地点のサンプルはCFM選鉱場より沈澱池へ排出している選鉱排水であり、その分析値は第3-4-3表に示すとおりPb, Fe, Cd, Total Crが基準上限値を越えている。この選鉱排水が流入している沈澱池は廃滓堆積場の直下流にあり、エルボテ川を利用して設けられたものである。ここのB-D1地点における分析値はPb, Zn, Fe, Cd, Total Crが季節に関係なく基準上限値を越えている。この事実は、少なくともZnについては、汚染の主原因が選鉱排水以外で、しかもバックグラウンド

を越えているものが上流より供給されていることを暗示している。これに関しては、地下水の項で後述するB-M2地点のサンバルトロ(San Bartolo)鉱床よりの坑内水が沈澱池直上流に排出されていることが原因となっていることは明かである。即ちB-M2地点の分析値ではPb, Zn, Fe, Cdが基準上限値を越え、特にZnは140ppmというB-R2地点に次ぐ異常な値を示しているからである。

④ B-R6よりB-R1地点間の汚染状況

B-R1地点はB-R6地点の下流に位置するが、CFM選鉱場より上流にあり、その影響は受けていない。この地点の表流水の分析によれば乾期にはFe, Cdが基準上限値を越えているが、雨期にはFe, Cdに加えてPbも基準上限値を越えていた。これはB-R6地点とB-R1地点との間に位置するプリシマ鉱床よりの排水の流入が密接に関係している。プリシマ鉱床(B-M1地点)の坑内水の分析によればPb, Fe, Cdが基準上限値を越えており、Pbに関しては鉱山よりの排水が明らかに影響している。

B-R1地点は表流水の流量の項で述べたNo. 1地点と同一であり、その流量変動は季節的変化の影響よりも、鉱山よりの排水量の変動と流量測定時間との関係によって左右されていると考えられる。従って、水質についてもこの地点においては、鉱山よりの排水量と上流よりの河川水量の比率の変動、及び分析試料の採水時刻によって、影響されることが考えられる。

⑤ B-R3よりB-R5地点間の汚染状況

B-R3～B-R5地点間では、乾期にはPb, Zn, Fe, Cdが基準上限値を越えており、雨期にはFe, Cdだけが基準上限値を越えている。これは第3-4-3表に示した総べてのサンプルの分析結果よりも明かなとおり、バックグラウンドのFe, Cdが基準上限値を越えていることを考慮すれば、雨期には流域全体としては降水による影響により、局所的な影響が消されて広域的な汚染の状況を示し、乾期には降水量の激減と蒸発散量の増加に伴って汚染物質の濃縮を生じ、局所的な汚染を反映してPb, Zn等が基準上限値を越えているものと推定される。

⑥ まとめ

以上のことから明らかなように、調査地域における汚染源としてはB-R2地点付近の鉱化帯、CFM選鉱場の沈澱池、プリシマ鉱床からの排水口の3箇所が考えらる。しかし、プリシマ鉱床の坑内水はZnが1.7ppmしか含まれておらず、調査地域内の河川水(B-R1～B-R7地点)の値より少なく、下流のZn汚染にはほとんど関与していない。従って最大の汚染源はB-R2地点付近の鉱化帯であり、この上流の鉱山か

らの廃滓及び排水も若干関与しているものと考えられる。また、沈澱池からの浸透水も影響している可能性はあるが、微々たるものと考えられる。

pH値に関しては選鉱排水、河川水を含めB-R2地点を除けば7.50～8.20の範囲にあり弱アルカリ性であるが、B-R2地点だけは約2.55の酸性を示し、著しく汚染された箇所であることが明らかである。電気伝導度もB-R2地点のものが高い。

3-4-2 地下水

CFM選鉱場及び廃滓堆積場から流出する排水が、どの程度地下水に影響を及ぼしているかを検討するために、電気探査、観測孔による流量（流速）の測定及び観測孔と鉱山における水質調査を実施した。

(1) 地下水の流量

本調査では、廃滓堆積場直下流のエルボテ川本川に沿ってB-1からB-3の3本の観測孔を掘り、内径50mmの塩化ビニール製ストレーナーを挿入し、微流速計を用いて地下水の位置とその流速を求めた。その結果は第3-4-4表、第3-4-4図、及び第3-4-6図に示すとおりであり、B-1孔では測定数が少なく、流速も微弱なために帯水層が特定できない。B-2孔では少なくとも標高2,308～2,310m付近と標高2,315～2,320m付近の2層準に帯水層が認められ、B-3孔では標高2,302～2,314mに帯水層が存在している。標高2,310m及び標高2,320mの解析比抵抗値を用いた等比抵抗値平面図を作成すると第3-4-5図に示すようになり、B-1、B-2孔ともに100 $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯に位置していることが判る。また、150 $\Omega \cdot m$ 及び200 $\Omega \cdot m$ 等値線の形状からは断層の存在が推定され、断層に沿って地下水が存在していることも予想される。帯水層の存在する岩層は粘板岩であり、後述するパラルの頁岩とは若干条件が異なるかも知れないが、パラル地域では少なくとも150 $\Omega \cdot m$ 以下の値で帯水層が存在している。従って本調査地域でも150 $\Omega \cdot m$ 以下の部分を帯水層の存在範囲とし、地下水の流動方向は、低比抵抗帯に沿ってWNW方向であると推定される。以上の結果をまとめると第3-4-5表のようになる。

第3-4-5表によれば、B-2孔における下位の帯水層の流量は約430,000～560,000 m^3/day 、上位の帯水量の流量は約170,000～310,000 m^3/day となっている。しかし、B-2孔における測定値は、第3-4-6図に示すとおり、低比抵抗帯のやや端にあるため、低比抵抗帯全体を流れる地下水の平均流量よりは少ない値となっている可能性が高い。これは下流のB-3孔における坑内流量がB-2孔の値よりはるかに大きいことから推定できる。また、全体としては、地下水流速が雨期になると増加していることは明かであ

り、地下水位も雨期になると乾期に比べてB-1孔、B-2孔で約0.6m、B-3孔で約0.8m上昇している。従って、エルボテ川本川沿いの浅所に存在する地下水の流量が、季節変化していることがわかる。

(2) 地下水の水質

本調査では、B-B1～B-B3及びB-M1～B-M3の6箇所（第3-4-1図）で地下水を採取し、pHを測定すると共に第3-4-6表に示す10項目についての化学分析を行った。B-B1～B-B3試料はボーリング孔から、B-M1～B-M3試料は坑内(EL. 2,250m)からそれぞれ採取した。

第3-4-6表を検討してみると、鉱化帯付近に存在するB-M1～B-M3地点の地下水と鉱化帯から離れ、河川沿いの浅所に存在するB-B1～B-B3地点の地下水とは若干性質が異なっている。B-M1～B-M3地点の坑内水はPb, Fe, Cdが基準上限値を越えているが、B-B1～B-B3地点ではCdが減少し、基準上限値を全体として上回っているのはPb, Feとなっている。また、河川沿いのB-B2～B-B3地点においては乾期にはCu, Pb, Total Crが増加し、雨期にはZn, Cd, Hg等が検出されている。これは地下水位及び流量の変動によって生じた垂直的あるいは水平的な流路の変化によって生じたものと考えられ、地下水の透水層が雨期と乾期では若干異なるためではないかと推定される。

従って、少なくとも河川沿いの浅所にある地下水は、季節的变化の影響を受けて、流量だけでなく水質も変動することが判った。

また、サンバルトロ鉱床の坑内水であるB-M2地点のサンプルは、ほとんどの物質が他の地下水サンプルより多く、特にZnは140ppmという異常値を示した。さらにpH値についても他と異なり最も低く、ほぼ中性を示している。電気伝導度も他より高い値を示している。

CFM選鉱場及び廃滓堆積場から流出する排水はそのほとんどが直下の沈澱池に流入しており、沈澱池であるB-D1地点では、Pb, Zn, Fe, Cd, Total Crが基準値を超えている。しかし、その下流にあるB-B1～B-B3地点ではPb, Feしか基準上限値を超えておらず、沈澱池からの浸透水が下流の地下水を汚染している主原因とは考えられない。

3-4-3 地下水流動シミュレーション

気象、地質、水文、ボーリング、揚水調査及び土質試験結果を総合的に解析することにより、最適な地下構造モデル及び水理モデルを作成し、鉱山周辺地域の地下水流動シミュレーションを実施した。このシミュレーションにより、地下水

位面や地下水の流れの方向、速度を明らかにし、地下水の有効利用、鉱山排水のリサイクル、鉱山から発生する溶存物質の分布・拡散予測などに資した。

(1) シミュレーション方法

東京大学工学部登坂博行博士により開発されたシミュレーターGWS3D2Pを使用した。シミュレーション方法は付録Aの「地下水流動シミュレーション法」で詳しく述べた。この数値解析法ではダルーシーの法則と質量保存の法則を有限要素法で3次元的に解析している。

(2) シミュレーションモデル

① ブロックモデル

解析範囲は北西方向に15km、北東方向に12kmの矩形を呈する(第3-4-8図)。解析範囲の東南端にはエルボテ鉱山が位置し、北西端にはサカテカス市の水道水源が位置する。エルボテ鉱山の鉱脈や断裂系は北西の走向方向が卓越すること、及び市水道水源への汚染物質の拡散予測を行うため、上記の方向及び範囲に設定した。解析深度は、市水道水源が地表下200mから、またエルボテ鉱山が地表下150mの坑内から揚水しているため、海拔1800mまでとした。

地域の分割は北西方向に30ブロック、北東方向に31ブロックとし、エルボテ鉱山周辺では1ブロックが200m×200mと小さく、縁辺では最大1.2km×1.2kmと大きく分割した。図面では北西方向をX軸、北東方向をY軸とし、北西端を(X1,Y1)、北東端を(X30,X31)とした。深度方向には9層に分割し、最上位に空気層を加え計10層とし、図面上では最上位層をZ1とした。水理状況の明かな表層付近は10~20mと薄く、深部では200mと厚く分割した。各ブロックの標高はブロックの中心の標高で代表した(第3-4-9図)。

② 透水係数及び間隙率モデル

各ブロックに対応する透水係数や間隙率は地質、地質構造、鉱床、電気探査、ボーリングの各調査や土質試験結果を総合して決定した。

地質調査の結果、エルボテ鉱山の位置する山体部では、三疊系や第三系の透水性の悪い緻密な岩石が分布し、平野部では透水性のよい沖積層が厚く堆積する。平野部に向かうに従って、より深部に第三系が分布するため、市水源付近の三疊系の深度を海拔1900m以深とした。断裂系はNW系とNE系が発達し、エルボテ鉱山の鉱脈群の走向方向もNW系が卓越し、この方向に透水性がよい。また山体部はN-S方向に相対的に隆起しており、この方向の断裂系も平野部との境界では発達してい

る。

電気探査とボーリング調査の結果、表層の高・低比抵抗複合帯と低比抵抗帯が帯水層、中比抵抗帯が半帯水層、高比抵抗が難透水層や不透水層に対応している。地質及び地質構造から、この帯水層は第四系の扇状地堆積物分布域、三疊系と段丘堆積物の境界部付近や断層部に、半帯水層は表層風化帯や断層周辺部に、難透水層は表土や粘土層を挟む段丘堆積物分布域に、また不透水層は山体部の三疊系分布域に対応している。

粒度試験から求めた透水係数は、第3-4-7表に示すように、砂質の扇状地堆積物(BR-1,2)は 10^{-2} cm/sec, 粘土質の段丘堆積物(BR-3,4,5)は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/secのオーダーである。従って、砂・粘土からなる扇状地堆積物などの帯水層は透水係数 5×10^{-4} cm/sec, 難透水層は 1×10^{-6} cm/secとした。また、半透水層は 1×10^{-4} cm/sec, 不透水層は 1×10^{-7} cm/secに設定した。なお、エルボテ鉱山には走向方向に3km, 幅400mにわたって、複数の鉱脈が発達している。この鉱脈はすでに地表下200mまでは採掘されており、空洞化している。この部分は大規模な断層相当の透水係数を有すると考え 1×10^{-8} cm/secを与えた。

間隙率は鉱脈や帯水層には30%, 半帯水層には20%, 難透水層には15%, 不透水層には5%と、代表的な数値を与えた。

これら透水係数と間隙率の一覧を第3-4-8表に、これに基づく岩石物性区分図を第3-4-9図に示す。平面図(X-Y CROSS SECTIONAL VIEW)では左下端が(X1,Y1), 上右端が(X30,Y31)である。断面図(Y-Z CROSS SECTIONAL VIEW)では左端がY31, 右端がY1である。第3-4-8表のLegend No. が第3-4-9図のLegend No. に対応している。

③水理モデル

エルボテ鉱山近くをNW方向に流下するエルボテ川は、鉱山より下流のNo.4地点(第3-4-1図)では、雨期・乾期とも流量が一定であるが、これより上流では河川が分岐しかつ流量も安定していないので、河川流量はNo.4地点で観測値の $1,200 \text{ m}^3/\text{day}$ を与えた。

地下水位は観測井で得られた深度を初期条件として与え、空気層も含め上から第3層の上面になるように設定した。ただし、エルボテ鉱山では地表下200mから揚水しているため、地下水位を第7層の上面に設定した。

④気象モデル

既存資料から年間降水量は平均400mmである。降水量の95%は雨期の5~9月に集中するため、5~9月の5ヵ月間に380mm, その他の7ヵ月間に20mmの降水量を与え

た。蒸発量は新エルココの現地調査で $0.35 \sim 0.84 \text{ mm/day}$ を得ているのでこれを用いた。降水量から蒸発量を引いたものが、天水のかん養量となるので、乾期のかん養量を 0 mm/day 、雨期のかん養量を 2 mm/day に設定した。

⑤ 揚水・排水モデル

エルボテ鉱山は地表下 200 m で $1,200 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水を行っている。市水源は地表下 200 m で $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水を行っている。エルボテ鉱山は選鉱場付近で $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ の鉱山排水を河川に放流している。従って、(X1, Y29)地点及び(X26, Y12)において、それぞれ $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ および $1,200 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水を行い、(X24, Y11)には地表流 $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ を与えた。

(3) シミュレーション結果

地下水飽和図を第3-4-10図の平面図に示す。雨期飽和図は雨期最終日である150日目めの、乾期飽和図は乾期最終日である360日めの地下水の飽和状態を示している。青色は地下水に飽和され、黄色に向かうに従って飽和度が低くなる。この飽和度とは自由水（重力水）と定義する。

図面の左側の沖積層分布域（図面A地区）では、雨期飽和図の方が乾期飽和図に比べ、表層の飽和度が高い傾向にある。一方、図面右側の山体部（B地区）は雨期飽和図、乾期飽和図ともほぼ同じ部分が飽和されている。つまり地下水位にあまり変動はないが、水位面より上部の飽和度に違いがみられる。この飽和度の違いは雨期と乾期の微細な地下水位変動に起因すると考えられる。地下水位が変動する場合、新たに混入した水は地下水位面上を流動することが知られており、浅層部に汚染物質の蓄積することが懸念される。

一方、飽和帯はエルボテ鉱山の位置する図面右下（B地区）より、山体部の分布面積の広い図面右上（C, D地区）で浅所に広く分布している。なお、図面右側の山体部にある不飽和帯にはエルボテ鉱山（E地点）が位置し、ここから揚水している。

エルボテ鉱山近くを西に流下するエルボテ川の浸透影響は乾期に、図面下の中央部（G地点）の第2層から第3層まで鮮明に認められ、第4層にもその影響が認められる。その影響範囲はエルボテ鉱山より西に 7 km の長さで、幅 2.5 km 、深さ 80 m に及ぶ。

現在、エルボテ鉱山の排水量は $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 、エルボテ川の流量は $1,200 \text{ m}^3/\text{day}$ で、かなりの流量が鉱山排水からなっている。河川水や地下水の分析から、エルボテ鉱山排水より周辺の鉱化帯や他鉱山排水の影響が強いと考えられるが、いず

れにしても、鉾山排水が沖積層分布域まで浸透するので、今後も汚染物質を含む鉾山排水を多量に河川に放流しないように、汚染物質の除去や排水のリサイクルを実施すべきである。

地下水流速図を第3-4-11図に示す。雨期飽和図は雨期最終日である150日目めの、乾期飽和図は乾期最終日である360日目めの地下水の流速を平面図と断面図に示している。地下水の流速はX成分（北西成分）、Y成分（北東成分）、Z成分（垂直成分）で表し、線分の大きさは流速の大きさに比例する。雨期の第7層平面図で見ると、エルボテ鉾山周辺（E地点）では坑内に向かう地下水の流れが認められる。鉾山下流の沖積層分布域（A地区）ではY成分の速度が大きく、X成分の速度が小さい。流れの向きはX成分とY成分を合成すると、図面下方に流れることになる。これは図面右上を山体部が占めているため、このポテンシャルにより、この方向のながれが現れるものと判断される。乾期のものも、流速に違いはあるが、流れの向きは同じ傾向にある。

サカテカス市の水道水源は図面左上の（F地点）に位置するが、エルボテ鉾山から、この水道水源に向かう流れの方向は認められない。これは、図面右上が山体部となり、このポテンシャル勾配により鉾山から水道水源に向かう流れがを妨げていることに起因している。従って、エルボテ鉾山から市の水道水源への直接の影響は認められないものと判断される。

しかし、今後サカテカス市の水道使用量が増加し、現ポテンシャル勾配を保持できなくなるほどの揚水を行った場合、山体部からの地下水流動量は、現在の平野部へ向かうものより大きな流れとして揚水域へ向かうと考えられる。このとき汚染物質の移動速度は現在と較べものにならないほど大きなものとなり、サカテカス市水道水源に向かうことが懸念される。今後は、地下水位のモニタリングに細心の注意を払い、地下水の流動と汚染物質の移動を観測すべきであろう。

流速の断面図ではエルボテ鉾山（E地点）の坑内周辺の浅所では下向きの大きな流速が、深所では下向きの流速が、また坑内から離れるに従って、坑内に向かう水平な流れが現れ、特に浅所の流速が大きい。

3-5 土壌

鉾業活動に伴って環境中に放出される有害金属元素は、河川や降水または地下水などの液体に溶存しているイオンまたは懸濁物として移動するものや、廃滓として流出するもの、浮遊粒子状物質（粉塵）となり大気中を経由して移動するものなどが挙げられる。この何れの元素の移動も土壌中への有害金属元素の蓄積の要因と成る。

このような現状に鑑み、エルボテ鉱山に起因する土壤汚染を明らかにするために、鉱山周辺の土壤サンプルを採取し化学分析を行った。

土壤化学成分の測定項目はCu, Pb, Zn, Fe, Cd, Sb, Cr, As, およびHgの9成分である。

3-5-1 土壤分析結果

エルボテ鉱山地域土壤採取位置図を第3-5-1図に示す。エルボテ鉱山堆積場を中心に14箇所から土壤試料を採取した。重金属汚染の現状を知るために土壤試料は、採取地点地域の一般的な特徴を反映するような(B層)から採取した。

これらの化学分析値を第3-5-1表に示す。また各測定元素別の水平分布を第3-5-1図に示す。

① Cu

BS-2, BS-3ではCu含有量が220ppm, 470ppmと高濃度を示している。これらの採取地点はCFM堆積場に最も近く、この地域を起点として南東方向のBS-1, BS-B1, BS-B3, BS-B5に於いても100ppm以上の高濃度を示す。また堆積場から西方に位置するBS-B8, BS-4, BS-B7では37ppm, 33ppm, 88ppmと低濃度であった。

② Pb

BS-2, BS-B2, BS-B4ではPb含有量が1400ppm, 1000ppm, 5300ppmと高濃度を示す。さらにBS-B1, BS-1, BS-2に於いても840ppm, 740ppm, 560ppmと高濃度を示し、堆積場周辺での高濃度域を形成している。

③ Zn

BS-1, BS-2, BS-3, BS-B1, BS-B2, BS-B4ではZn含有量がそれぞれ1900ppm, 3200ppm, 940ppm, 4200ppm, 1900ppm, 740ppmと高い濃度を示し、堆積場を中心として高濃度域を形成している。それ以外の測定地域では、おおむね100~300ppmのあいだで変化している。

④ Fe

BS-B3, BS-B5, BS-B6では7.5wt.%, 6.7wt.%と高濃度を示すが、それ以外の場所では5.0wt.%以下と低濃度を示している。

⑤ Cd

BS-B1ではCd含有量が最も高く44ppmであった。周辺のBS-2, BS-B2においても

26ppm, 19ppmと高濃度を示すが他の化学成分に比べて顕著な高濃度域は形成されていない。

⑥ S b

すべての測定点で20~70ppmの範囲に入る。BS-4, BS-B6, BS-B7で高い濃度を示す傾向がある。最高値はBS-B6の68ppm, 最低値はBS-1の20ppmであった。

⑦ C r

BS-B2, BS-B3, BS-B5, BS-B6の測定点において100ppm以上の高濃度域を形成している。堆積場側のBS-1, BS-2, BS-3ではCu, Pb, Znのような異常値は見いだされなかった。

⑧ A s

BS-1, BS-2では120ppm, 190ppmと高濃度を示すが、それ以外の場所では74~7ppmの範囲で変動している。堆積場周辺の地域では高濃度域が形成されているがCu, Pb, Znのように顕著ではない。

⑨ H g

BS-B1, では3.4ppmと最も高い値を示した。

3-5-2 土壌解析結果

エルボテ鉱山堆積場を中心として土壌の化学分析をした結果Fe及びCrを除く全ての測定元素について異常値があることが確認された。とくにCu, Pb, Znの堆積場周辺にみられる高濃度異常は顕著である。また、この高濃度域における各測定点のCu:Zn:Pbが一定でなく、その原因の多様性を表していると考えられる。つまりこの高濃度域の形成が堆積場からの粉塵の降下によってのみ形成されているとするならば1000ppmのPbの異常に対する説明は難しい。また逆に、Znのすべてが粉塵により供給されているとするならば、Cuの濃度はもっと高濃度に見積る事が出来るのである。よってこれらの重金属元素の濃度異常は、地質学的な現象を含めた当地の一般的特徴と、粉塵や鉱山排水等の複合汚染があいまった結果であると考えられる。

またBS-4, BS-B7, BS-B8にあたる堆積場西部は比較的どの元素も低濃度をしめす。この地域は鉱山活動に起因する鉱害や、鉱化帯、変質帯などの地質的な影響も無いため、第四紀現世堆積物の平均的な化学成分濃度を表していると考えられる。

3-6 堆積場

3-6-1 調査目的

堆積場の調査目的は、次のとおりである。

- (1) 降雨時の堆積場の排水状況を把握し、現状に即した排水対策を検討する。
- (2) 乾期及び雨期における堆積場の盛土材料の土質試験を実施しその性状を明らかにすると共に、そのデータを基に堆積場の安定性評価を行う。
- (3) 降雨時に発生すると予想される、土砂流出の状況を把握し、適切な対策を検討する。

3-6-2 調査実施内容

(1) 堆積場の現状調査

① 降雨時の排水状況

② 降雨時の土砂流出状況

(2) 水位観測（堆積場浸潤水位の測定）

(3) 不攪乱試料サンプリング

(4) 室内土質試験

(5) 堆積場断面測量

(6) 水準測量

(7) 環境調査

気象データ（降雨量、風向、風速等）の収集

3-6-3 調査結果

(1) 堆積場の現状

エルボテ堆積場は現在使用されていないため、通常のスライムによる上澄水はみられない。

雨水は現在のところ、その一部は堆積場内部に浸透し、残りは表面水となって流下している。表面水の流下経路を、第3-6-1図に示す。この図からわかるように、第一堆積場の表面水は中央部に出来た大きな雨裂から第二堆積場に流出し、第二堆積場の表面水と合流して、南側の崩壊部法面より外部に流出している。この雨裂は、降雨の度にさらに洗掘が進むと考えられる。また、堆積場周辺には過去に流出したと思われるスライムが数センチメートル堆積しており、降雨時に法面からも堆積物が外部へ流出している事がわかる。

(2) 間隙水圧測定

堆積場の浸潤線推定のため、各ボーリング孔において掘削深度ごとの水位を観測し、停止水面と測定実施深度との水頭差を計算して、その地点の間隙水圧とした。また、最終深度における間隙水圧はボーリング掘削孔にストレーナー管を挿入し、その後も継続して観測できるようにした。

その結果、孔内水位はBD-1孔が乾期にGL.-21.0m、雨期にはGL.-20.8m、BD-2孔が乾期にGL.-14.4m、雨期にはGL.-14.2mと、乾期・雨期ともにほぼ同一レベルであった。この結果から、降水量の多い雨期においても、乾期に比較して特に間隙水圧の上昇はないものと判断される。

(3) サンプルング及び室内土質試験

シンウオールサンプラーにより、かん止堤付近及び場内堆積物の不攪乱試料を採取し、室内土質試験を実施した。

① サンプルング位置を第3-6-2図に示す。また、サンプルング数量を第3-6-1表に示す。

② 室内土質試験の項目を以下に示す。

- i) 含水量試験
- ii) 比重試験
- iii) 粒度試験
- iv) 密度試験
- v) 液性限界試験
- vi) 塑性限界試験
- vii) 三軸圧縮試験
- viii) 透水試験

③ 室内土質試験結果を第3-6-2表に示す。

④ 土質試験結果

i) 比重試験

土粒子の比重は、かん止堤で2.59から2.62で平均2.61である。また、堆積物の比重は2.61から2.64で平均2.63である。これは、一般的な沖積粘土(2.6~2.8)とほぼ同じ値であり、平均的な粒子の集合体であるといえる。

ii) 含水比, 密度試験

湿潤密度 (ρ_t) と, 自然含水比 (W) は密接な関係があるので, 一緒に示す事とする。 ρ_t と W のかん止堤及び場内堆積物のそれぞれの平均値を示すと, 第3-6-3表のとおりである。かん止堤と場内堆積物を比較すると, 自然含水比は場内堆積物の方が高く, 湿潤密度も若干高い。一般的な沖積層における ρ_t は, 砂の場合 $1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.80\text{g/cm}^3$ である。従って, これと比較しても適当に締まった状態にあるといえる。

iii) 粒度試験

かん止堤及び場内堆積物の粒径加積曲線を第3-6-3図に示す。図より, 粒度分布の範囲が 0.005mm から 0.425mm の間にあり, かなり均等な粒度であることがわかる。

均等係数 (U_c) と曲率係数 (U'_c) の関係をみると

$U_c \geq 10, 1 < U'_c \leq \sqrt{U_c}$ (粒度が悪い) ; 0

$U_c < 10$, (均等粒度, 粒度が悪い) ; 4試料

$U_c \geq 10, U'_c \leq 1$ 又は $U'_c > \sqrt{U_c}$ (階段粒度, 粒度が悪い) ; 0

となった。粒度から見た土の安定面において「粒度が悪い」と判定される。

iv) 液性限界, 塑性限界試験

かん止堤と場内堆積物の各値の平均値はそれぞれ, 第3-6-4表の値となった。この表において, かん止堤と場内堆積物を比較すると, 場内堆積物の方が塑性指数が大きい。これは, 場内堆積物の方がシルト分, 粘土分が多く, 粘着力がある事を意味する。しかし, 土の安定度を表すコンシステンシー指数 (I_c) は, かん止堤 ; $I_c = 2.2 > 1$ 堆積物 ; $I_c = 0.4 < 1$ であり, かん止堤の方が安定した状態である事を表わしている。

v) 透水試験

かん止堤と場内堆積物の透水係数の平均値はそれぞれ, 下記の値となった。

a) かん止堤 $k = 3.95 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$

b) 場内堆積物 $k = 9.82 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$

かん止堤は, ほぼ一般的な砂～シルトの透水係数の値となったが, 場内堆積物の方はかなり浸透しにくい状態である。

vi) 土質試験結果のまとめ

以上の土質試験結果を要約すると, 当堆積場の土質材料は概ね, 次のような性

質をもっていることが推察される。

(かん止堤)

- a) 粒度分布は均等な粒径が多く、土の安定上悪い粒度分布である。
- b) 密度は高い値を示し、比較的良く締まっている。
- c) 細粒分の土粒子間のつながりは、比較的安定した状態である。
- d) 透水係数は、通常のシルト～砂の値である。

(場内堆積物)

- e) 比重・粒土はかん止堤と似通った値であるが、シルト分が多く混入する。
- f) 土の安定度においては、かん止堤に比べて悪い。
- g) 透水係数が小さい。

(4) 堆積場の推定断面

堆積場の断面測量及びボーリング調査結果より、堆積場の推定地質断面を、第3-6-4図のようにした。かん止堤と場内堆積物の境界線は、ボーリング調査や土質試験のデータ、及び従来の盛土方法に着目して、第3-6-5図の方法で決定した。浸潤水位は、ボーリングデータ及び堆積場法面の湧水位置より決定した。

(5) 堆積場の安定性検討

① 安定計算式

以下資料より、円形滑り面法により当堆積場の現状の安定解析を行なう。なお、今後の安定解析及び各検討については、「捨石、鉋さい堆積場建設基準及び解説」(通商産業省立地公害局)に従って実施する。

i) 安定計算式

堆積場の安全率は、以下の計算式により求める。

$$F_s = \frac{\sum R(C' \cdot l + \{(W - U' \cdot b) \cos \alpha - K_h \cdot W \cdot \sin \alpha\} \tan \phi')}{\sum (R \cdot W \sin \alpha + K_h \cdot W \cdot h)}$$

ここで、

F_s : 安全率

R : 滑り面の半径(m)

W : 各スライスの単位長さ重量(t/m)

U' : 各スライスのすべり面上に働く静的な間げき水圧(t/m²)

K_h : 設計震度

b : スライスの幅(m)

α : 滑り面の中点と滑り面を円弧とする円の中心とを結ぶ直線が鉛直線となす角度($^{\circ}$)

h : 滑り面を円弧とする面の中心と各スライスの重心との鉛直距離(m)

l : 滑り面の長さ(m)

ϕ', C' : 有効応力により求めた内部摩擦角及び粘着力($^{\circ}$, tf/m²)

ii) 浸潤水位

堆積場を設計する場合、場内堆積物の浸潤水位は最高場内水位と等しいものとする。かん止堤の浸潤水位は場内堆積物の浸潤水位及び基礎堤、暗きょ、遮泥層等の水理的構造を基に推定するものとする。

また、堆積中及び堆積終了後における堆積場の浸潤水位は、実測により求めるものとする。

② 安定解析断面

かん止堤の安定解析に用いる断面は、「たい積場建設基準」で“浸潤水位の位置が最も高い断面とする”こととなっている。当堆積場の場合、すでに使用完了しているため放流されたスライムによる上澄水は通常存在しない。従って、今回使用する断面は当堆積場において最も「有効高さ」が高く、かつ「法面の平均勾配」が急な西側部分の斜面とする。

安定解析は、電子計算機システムを使用した。安定解析プログラムは、MINE/F S-1979を使用し、断面形状は第3-6-6図に示すとおりモデル化した。

③ 土質定数

堆積場の安定計算に必要な各ゾーンの土質定数は、室内土質試験より決定した。ただし、 G_s は比重、 W は自然含水比、 ρ_t は湿潤密度、 ρ_d は乾燥密度、 e は間隙比、 S_r は飽和度、 ρ_{sat} は飽和密度、 ϕ はせん断抵抗力、 c は粘着力を表す。なお、特に異常と思われるデータは削除した。

i) 堆積物-1 (Zone-①)

サイクロンで分級された粗粒部分の堆積物である。その土質定数は次のとおりとする。

$$G_s = 2.61, W = 14.8\%, \rho_t = 1.736 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_d = \rho_t / \left(1 + \frac{W}{100}\right) = 1.736 / \left(1 + \frac{14.8}{100}\right) = 1.512 \text{ g/cm}^3$$

$$e = (G_s / \rho_d) - 1 = (2.61 / 1.512) - 1 = 0.727$$

$$S_r = \frac{W \cdot G_s}{e} = \frac{14.8 \times 2.61}{0.727} = 53.1\%$$

上記値より、飽和時 ($S_r = 100\%$) の密度、含水比を推定する。

$$\begin{aligned} \rho_{sat} &= (\text{土の重量}) + (\text{間隙水の重量}) \\ &= \rho_d + (1 - \rho_d / G_s) \\ &= 1.512 + (1 - 1.512 / 2.61) \\ &= 1.933 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

せん断強さは下記の値とする。

$$\phi = 30.0^\circ$$

$$c = 0.00 \text{ tf/m}^2$$

ii) 堆積物 - 2 (Zone-②)

$$G_s = 2.63, W = 35.7\%, \rho_t = 1.774 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_d = \rho_t / (1 + \frac{W}{100}) = 1.774 / (1 + \frac{35.7}{100}) = 1.307 \text{ g/cm}^3$$

$$e = (G_s / \rho_d) - 1 = (2.63 / 1.307) - 1 = 1.012$$

$$S_r = \frac{W \cdot G_s}{e} = \frac{35.7 \times 2.63}{1.012} = 92.78\%$$

$$\begin{aligned} \rho_{sat} &= \rho_d + (1 - \rho_d / G_s) \\ &= 1.307 + (1 - 1.307 / 2.63) \\ &= 1.810 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

せん断強さは下記の値とする。

$$\phi = 23.0^\circ$$

$$c = 1.00 \text{ tf/m}^2$$

④ その他の条件

i) 震度

「堆積場建設基準」によると「強震地帯」の場合、地震時水平震度を $K_h = 0.15$ と定めている。今回、安定計算においても同様の値を採用することとした。

ii) 円弧の中心

円弧の中心は、次の範囲に設定した。

Point A (X = 50.0, Y = 2388.0)

Point B (X = 110.0, Y = 2419.0)

Point C (X = 110.0, Y = 2479.0)

Point D (X = 50.0, Y = 2448.0)

上記の範囲内を10m×10mに分割し、その各格子点に円弧の中心を設定し安定計算を行った。

iii) 円弧の増分

円弧の増分は、 $\Delta R = 1.0\text{m}$ とした。

⑤ 計算結果

第3-6-6図に示した解析モデルの計算結果は、第3-6-5表のとおりである。なお、常時 ($K_h = 0.00$) における安定計算結果の詳細、及びその時の各距離での最小安全率となる円弧を第3-6-7図、第3-6-8図、地震時 ($K_h = 0.15$) の計算結果の詳細を第3-6-9図、第3-6-10図に示す。

以上の結果から当堆積場の最小安全率は常時、地震時共に1.0以下であることが判明した。また、その他の滑り面においても地震時の安全率はほとんどが1.0以下であるという結果となった。

従って、当堆積場の崩壊に対する安定性は、計算上非常に悪い状態である。

その理由として、主に次の二点が考えられる。

- i) かん止堤の断面が過小であり、抑止力に欠ける。
- ii) 下流側法面の勾配が急である。

以上の事から、当堆積場は上記不安定要因に対する対策が必要である。

⑥ 液状化による危険性の判定

本堆積場の主要材が「砂」の為、地震時に堆積場が液状化するおそれがある。従って、その場合堆積場の危険性について判定をする。

液状化の有無を判定する基準には、N値、粒度分布、均等係数を用いる簡易的な方法があり、これによって液状化が堆積場に及ぼす影響について判定し、その結果によって詳細検討を行うのが一般的である。「堆積場建設基準」によると、通常液状化により堆積場に影響を及ぼす位置は次のとおりとされている。

- i) 堆積場の表面下20m以内の部分
- ii) 浸潤線以下の部分
- iii) N値が20未満の部分

これらの条件を当堆積場に当てはめると、第3-6-11図のようになる。図中①の部分上記i), ii)に該当するが、上記iii)のN値はいずれも20以上であり、当堆積場の液状化による危険性は“ない”と判断される。

3-7 粉 塵

エルボテ鉱山堆積場から発生する粉塵により鉱山構内及び周辺集落の生活活動にも影響を及ぼしている可能性が示唆された。粉塵の飛散による環境汚染の現状を把握するために、気象観測装置、ダストジャー、ローボリュウムエアースンプラー(LVS)、デジタル粉塵計を用い各種調査を進めるとともに、関係各種資料と併せて粉塵の飛散状況及び粉塵成分を解析した。

3-7-1 調査内容

- (1) 気象観測装置及び自記風向風速計を用いた気象状況調査
- (2) LVSによる大気中粉塵濃度測定
- (3) ダストジャーによる粉塵採取及びその化学分析
- (4) デジタル粉塵計による長期間定点観測
- (5) 既存気象データの収集

3-7-2 結果概要

エルボテ鉱山一帯の各種関係調査は1991暦年の乾期ならび雨期の二回にわたって実施した。以下に各種調査の結果概要について述べる。

(1) 気象観測装置

気象観測装置の設置地点図を第3-7-1図に示す。自記記録式風向風速計による記録結果を第3-7-1表に、風向測定結果及び風速測定結果を第3-7-2表、第3-7-3表にそれぞれ示す。

自記記録式風向風速計は堆積場から東方に約300mはなれた鉱山施設の最頂部に設置し、測定は3/15～3/21、4/17～5/1、5/19～6/11、7/19～7/25の4回にわたり実施した。乾期にあたる3/15～3/21までの測定結果は平均風速7.5m/sec、最大風速16.0m/sec、最小風速1.5m/secであった。風向はほとんどS～SW方向であることがわかる。

雨期における測定結果は平均風速1.2m/sec, 最大風速12.0m/sec, 最小風速0.0m/secであった。風向はS~SE方向である。乾期と違って雨期においては8時から20時頃まで無風状態に近くなる傾向がある。

(2) ダストジャー

ダストジャーは口径4インチのガラス製容器を地上2~3m付近に設置し、その地点に降下する降下粉塵をすべて捕集する装置である。捕集された粉塵は総量、水不溶製物質、水不溶製物質強熱減分、水不溶性物質灰分、水溶製物質、水溶製物質強熱減分、水溶性物質灰分およびpH等について分析を行うが捕集量が少なく分析が困難な時は分析項目の一部について行う。降下粉塵の化学分析については、調査目的に応じて対象元素を決定する。今回の測定では鉱山からの影響を見積るため重金属元素を中心として行った。

ダストジャーの設置地点図を第3-7-2図に、測定結果を第3-7-4表に示す。測定は3月15日から21日の7日間にわたって行った。

BD-1 堆積場東端50m, エルボテ鉱山事務所屋上

BD-2 堆積場西300m, 農地内

BD-3 堆積場南方, 丘陵地

BD-4 堆積場東方100m, 砂防ダム上

BD-5 堆積場北西200m, 砂防ダム上

BD-6 サカテカス市街地西端, 家屋屋上

BD-1は堆積場東端から50m地点のエルボテ鉱山事務所の屋上である。この地点では風が脈打つように吹くときに堆積場からの粉塵が舞うようである。デジタル粉塵計による測定も、これを示している。

BD-2は堆積場西300m付近の農地である。この場所は扇状地が広がり始める地点であり、特に日中は扇状地側から堆積場に風が吹いている。この地点は捕集期間中常に風上になっていた。

BD-3は堆積場南方の丘陵地である。ここは、堆積場に対して常に風上に位置しており堆積場からの影響は皆無であると考えられる。

BD-4は堆積場の東方100m地点の砂防ダム上である。この地点は風向の変化によって微少な影響を受けているようである。

BD-5は堆積場の北西方向・選鉱場の北西200m地点の砂防ダム上である。

BD-6はサカテカス市街地の西端にある住宅地で、道路は未舗装であり周辺の地

表は草木もなく赤褐色の地肌が見える荒廃地である。

採取した試料の化学分析結果は第3-7-5表に示すとおりである。

これら試料の化学分析結果からBD-1, BD-4, BD-5, の試料にCu, Pb, Znが地殻存在量にくらべ高濃度で含まれていることが確認された。BD-2, BD-3, BD-6では粉塵の採取量が少量のため化学分析を行ったが確認できなかった。

(3) ローボリュームエアサンプラー (LVS)

LVSは大気中粉塵濃度を測定するために用いる装置である。装置の構成は分粒装置付き炉紙ホルダー、流量測定部、ポンプ、ホルダー保持用三脚、連結ホースからなり、大気を長期間にわたり一定流速で吸引し、浮遊粉塵を採取する。

15 l/minで大気を吸引すると分粒装置により $7.07\mu\text{m}$ 以上の粒子を除く事が出来る。分粒後の粉塵はグラスファイバーフィルター上に採取される。大気中浮遊粉塵濃度は吸引量と採取量から求める。浮遊粉塵が人体に与える影響は長期間にわたりどれだけ粉塵に曝露したかが重要な問題となってくるため、大気中の粉塵濃度をLVSを用いて測定するには、長期間の連続補集によってその地域の平均的な粉塵濃度を求めるなくてはならない。

LVSの設置地点図を第3-7-3図に示す。測定条件及び測定結果はそれぞれ第3-7-6表、第3-7-7表に示すとおりである。

LVSによる測定期間は、1991年1月18日の10:45から、20日の17:00まで、合計54.6時間である。採取したサンプル量は2.0mg、大気中の粒子状物質濃度は $0.041\text{mg}/\text{m}^3$ であった。

(4) デジタル粉塵計

デジタル粉塵計は、浮遊粒子上物質に光を照射すると散乱光の強さは粒子状物質の量に比例する現象を利用して相対重量濃度を測定するものである。

デジタル粉塵計による定点観測は3月15日～21日の7日間に36地点でおこなった。デジタル粉塵計の定点観測地点図を第3-7-4図に、測定結果を第3-7-8(2)表に示す。

平均値は25cpm、最大値は85cpm最小値は18cpmであった。またLVSから求めたF値を用い測定結果を相対濃度に換算した値を第3-7-8(1)表に示す。

第3-7-5図にデジタル粉塵計による測定結果をもちいた粉塵飛散状況の分布図を示す。第3-7-5図から明かなとおりエルボテ堆積場を中心としてNE方向に数値が高くなる傾向がある。

3-7-3 エルボテ地域における粉塵の飛散状況

エルボテ鉱山堆積場では、風速15m/sec以上の風が吹くと堆積場の法肩から粉塵が飛散する。特に瞬間最大風速が20m/secを越えるような強風下での歩行は、飛散する粉塵のため防塵眼鏡を必要とするほどである。また堆積場北東斜面ではこの粉塵が堆積し植物の生育を著しく阻害するなど多大の影響をあたえている。

堆積場から発生する粉塵の飛散量は気象条件に大きく支配され、雨期においては地表面が湿潤し粉塵の飛散は著しく抑制されている。しかも乾期より比較的弱風になるため、仮に地表面が乾燥していたとしても粉塵飛散量は僅かであるといえる。さらに一度飛散した粉塵も降雨によって速やかに大気中から除去される。したがって雨期における粉塵の飛散は問題視するほどのものではないと判断できる。

一方乾期には、ほぼ定常的に14時をピークとして風速10m/sec、最大瞬間風速20m/sec以上、S~SW方向の強風が発生する。そのため堆積場から粉塵が大気中に多量に供給されている事を確認した。従って、乾期における粉塵の挙動を解明することにより粉塵被害の上限を判断することが出来る。

粉塵の飛散状況を定性的に把握するために、デジタル粉塵計による定点観測の結果を水平分布図に示した(第3-7-5図)。堆積場を中心としN~NE方向の狭い範囲に同心円状に粉塵が飛散している状況が明らかである。とくに幅100m、長さ3kmにわたり高濃度域が確認できる。このような粉塵分布は、粉塵が発生源である堆積場から水平方向にはあまり拡散せず、風下に向かい直線的に運ばれることを示すと考えられる。従ってサカテカス市街地に向かって風速15m/sec以上、NW方向の風が発生した場合、粉塵は途中拡散、除去されずにサカテカス市内に降下してくる可能性もあると考えられる。

前述のように粉塵の飛散は、気象状況に大きく依存する。そこでサカテカス市街地の公共機関であるCNA(Comision Nacional del Agua)における過去1985~1990年の6年間のサカテカス市内及びラブハ観測地の気象データを入手し解析した。過去6年間にわたる観測結果からは、前述のサカテカス市内にまで粉塵を運ぶような風の発生は確認できないため、堆積場からの粉塵が直接サカテカス市街地や堆積場周辺の村落に降下し影響を及ぼすことはない結論できる。

ダストジャーによるサカテカス市街地西部(BD-6)での粉塵降下量は第3-7-4表から2.0(g/m²/month)と見積もる事ができる。またLVSの測定結果より、空気中には浮遊性の粒子状物質が1m³あたり0.041mg含まれている事が明らかになった。LVSにより捕収した粉塵は黒褐色を呈し、大部分がサカテカス市街地内の商工業活動に起因するものと考えられる。

一方、ダストジャーにより採取した堆積場周辺の粉塵を化学分析した結果、重金属元素を多量に含んでいることが明らかになった。各分析成分の標準地殻存在量に対する濃縮率は、化学的に安定でしかも大陸起源物質であるAlを基準としてCu, Pb, Zn, Cdでそれぞれ、35～75倍、250～920倍、130～360倍、600～1220倍となっている（第3-7-5表）。この重金属の濃縮は鉱山の廃滓中の閃亜鉛鉱や方鉛鉱に起因していると考えられる。したがって、極めて微量であれサカテカス市街地に堆積場起源の粉塵が降下したと仮定すると、そのために起こる重金属汚染は、降下量が少ない割に汚染の度合いが大きくなる恐れがある。堆積場からの粉塵がサカテカス市街地へ降下しているかどうかは、市内で測定したデジタル粉塵計測定値のバックグラウンドが高いことや、LVSによる粉塵捕収が微量であるため、直接的な確証を得るまでには至らなかった。

これまでの観測結果及びそこから予測される事象を総合すると、エルボテ鉱山堆積場から発生する粉塵は直接サカテカス市街地及び西部地区の農業地域に大量に降下する危険性は低く風下側（NE方向）に大部分が堆積すると判断される。しかし粒径の小さい粉塵の降下によって引き起こされる長期間にわたる緩慢な重金属汚染の可能性を完全に否定することは出来ない。堆積場に粉塵対策を施した後も、ひきつづき粉塵飛散のチェックを行うことが望ましい。

3-8 調査結果要約

この地域の地質は三畳紀に属するピミエンタ堆積岩類が基盤を形成する。選鉱場南方をエルボテ川が、東南東から西北西へ流下している。調査結果から、地下水の流れもエルボテ川に沿っているものと推定される。雨期には地下水位が0.6～0.8m上昇すると共に流速も増加している。

この地域は広く鉱化作用を受けているため、CFM堆積場との相対位置に関わりなく、付近の表流水と土壌には重金属が相当程度に濃縮している。特に土壌中にはCu, Pb, Zn, Fe, Cd, As, Hgなどの重金属が、いずれも高い水準で含まれており、地表水でもPb, Fe, Cdは多くの地点で基準値を上回っている。B-R2地点の表流水はpHが低い上に、重金属の含有が異常に高くなっている。この地点はCFM堆積場よりはやや上流の支川であるため、堆積物の影響よりは周辺の鉱化帯によるものが大きいと判断される。また、さらに上流の他鉱山の排水の影響も、幾分受けていると考えられる。

地下水は、表流水に比べると汚染の程度は低いですが、Pb, Feが上限値を上回っている地点が多く、Cdも上限値に近い。

シアンは乾期、雨期を通じ、表流水、地下水いずれからも検出されていない。

堆積場は、すでに一部の堤体で崩壊を起こしており、緊急対策が必要な状態にある。土質試験結果を用いて行った解析からも、堆積場の安定性は非常に悪いという結論を得ている。また、降雨時には堆積場の表面を雨水が流れて侵食を起こし、場外へ土砂が流出する危険性がある。この対策としては排水施設を設け、表面水を集排水する必要がある。

堆積場から発生する粉塵の影響については、雨期には殆ど認められないが、乾期の観測では、常にSW～S～SE方向からの風のため、北東部の谷間に向かう烈しい砂あらしが発生し、付近に大きな被害をもたらしている。しかし、風向きがほぼ一定しているため、サカテカス市街地並びに堆積場西方の農地には、全く影響が無いと判断される。ただし、現在のところは直接の被害はなくとも、粉塵粒子にはPb、Znなどの重金属が含まれているので、さらに長期にわたる測定と人体への影響を調査する必要がある。また、この結果如何に関わらず、堆積場における発生源対策は早急に実施すべきである。

3-9 鉱害防止対策

3-9-1 堆積場の崩壊防止対策

(1) 対策工法の選定

「3-6 堆積場」の項で記したように、当堆積場の安定性が非常に悪い状態であるのは以下の理由による。

①法面が急勾配

②かん止堤部分の抑止力が弱い

従って、これらを第一に考慮した対策工法の検討をする。

上記原因を取り除くための一般的な対策工法は次のとおりである。

①排土工；上部の土砂を排土し、土塊の荷重を軽減する。

②押え盛土工；法面の法じり部に盛土し、その抵抗力を増大させる。

③排土工；押え盛土の併用

④抑止工；くい打工やアンカー工により、土のせん断抵抗を増大させる。

(2) 最適と考えられる対策工法

当堆積場の現状は、次の理由から押え盛土工を提案する。

①堆積場のかん止堤部分は比較的良く締まっているが、場内堆積物は軟弱な部分も多く残っているため、排土工は施工困難である。

②現状の法面はかなりの固結状態を呈しており、これによって多少の粉塵発生
の抑止、雨水の浸透の抑止、法面洗掘の抑止力となっている。従って、出来るだけ
現状堆積場の形状をそのままにして、施工した方が良い。

③押え盛土工で全体を覆土する事によって、堆積場の安定性が向上すると同時に、
粉塵や水質汚染の鉱害防止対策に非常に有効な工法である。

④盛土材料が近くにあり、工事費が安い。

(3) 押え盛土工のモデル断面

押え盛土工の断面を第3-9-1図に示す。法面の安定性を考慮した結果、法勾配は
40%、高さ10mごとに、幅5mのステップを設ける事とした。また、現状堆積場の法
じり部より湧水している地下水は、盲排水工を設けて堆積場外へ排水する。盛土
材料は、現在計画の中の新堆積場ヤード付近の岩盤を破碎し、使用する。また、こ
れにより新堆積場の貯泥量も大きくする事となる。

ただし、この断面における盛土部分の断面積は約950m²、第一堆積場西側斜面だ
けでも延長約350mとなり、盛土量約33万m³と、莫大な量となる。従って、下から
順次、計画的に盛土する必要がある。

(4) 安定性の検定

押え盛土実施後の安定度は、安全率 ≥ 1.2 を目標とした。安定解析に用いた計算
式、及び電算機プログラム等は「現状安定性」の解析の時と同じ条件で実施した。

また、安定解析用断面を第3-9-2図に示す。

①土質定数及びその他の条件

第3-9-2図に示した各ゾーンの土質定数は、堆積物についてはそれぞれ「3-6
堆積場」の項で使用した定数と同じ値とした。また、押え盛土に使用する礫土は、
実測データがないため、「堆積場建設基準」及び他の文献を参考にし、以下のよ
うに決定した。

$$\rho_d = 1.800 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{sat}} = 1.912 \text{ g/cm}^3$$

$$c = 0.00 \text{ tf/m}^2$$

$$\phi = 37.0^\circ$$

地震時水平震度 ($K_h=0.15$) 及び円弧の増分 ($\Delta R=1.0\text{m}$) はそれぞれ「3-6 堆

積場」の項と同じ値とした。

円弧の中心は、次の範囲に設定した。

Point A	(x= 10.0	Y=2395.0)
Point B	(x=100.0	Y=2435.0)
Point C	(x=100.0	Y=2525.0)
Point D	(x= 10.0	Y=2485.0)

② 計算結果

第3-9-2図に示した解析モデルによる計算結果は、第3-9-1表のとおり。なお常時 ($K_h=0.00$) における安定計算結果の詳細、及びその時の各距離での最小安全率となる円弧を第3-9-3図、第3-9-4図に示す。また地震時 ($K_h=0.15$) の計算結果の詳細を第3-9-5図、第3-9-6図に示す。

第3-9-1表から、最小安全率が目標の1.2以上を満足している。従って、当該押え盛土工法の安定性は、第3-9-1図に示したモデル断面であれば「問題ない」と判断出来る。

3-9-2 堆積場の排水対策

現状調査の結果、降雨時には堆積場の表面を雨水が流れ、これが表面を侵食し、堆積場外への土砂流出となっている。この対策としては、排水施設を設けて表面水を集排水する方法が良い。ただし、当堆積場の場合はすでに堆積を完了しているので、今後汚染水が発生しないような恒久的対策を講じなければならない。即ち堆積場に降った雨が、有害成分を含む堆積物と直接接触しないように、堆積場上面を汚染されていない土砂で覆土し、その後排水路を設置する必要がある。

排水対策の仕様について以下に述べる。

(1) 覆土工

覆土する土砂は、堆積場南西部・現在堆積中の仮設堆積場対岸付近の礫混り粘性土を使用する。覆土厚は30cm~50cm程度とするが、排水路方向に向けて2%程度の勾配をつけて覆土する。

(2) 排水工

通常、堆積場の排水施設として場外水排水路、場内水排水路、非常用排水路を設ける事となっている。しかし、堆積場外の集水面積がほとんど無視出来る程度の面積のため、場外水排水施設は設けないこととする。また、堆積場の集水面積

が 0.03km^2 と小さいため、非常排水設備は設けず、常用設備のみとする。場内水排水路は、堆積面上に布設する事になるため、沈下や横移動に比較的強いコルゲートU字フリュームを使用する。コルゲートU字フリュームにより場外へ排水した水は、流末までの区間をポリエチレンパイプにより排水する。

第3-9-7図に排水工平面図を示す。

(3) 排水能力の決定

場内水の排水能力は、100年確率降水量（100年に一度あると考えられる最大降水量）によって、堆積面上に流入する雨水量を算出し、決定する。

① 日確率降水量

ラプファ観測所における1981年～1991年の日最大降水量の観測記録を順に並べると第3-9-2表のようになる。第3-9-2表を対数確率紙にプロットすると第3-9-8図のようになる。この図より、100年確率降水量(R_{24})は、

$R_{24} = 100\text{mm/day}$ となる

② 集水面積

$A_1 = 0.03\text{km}^2$ (第一堆積場内)

$A_2 = 0.02\text{km}^2$ (第二堆積場内)

③ 流達時間

$$\begin{aligned} T_1 &= 1.67 \times 10^{-3} (L/\sqrt{S})^{0.7} \\ &= 1.67 \times 10^{-3} (200/\sqrt{1/50})^{0.7} \\ &= 0.27(\text{h}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 &= 1.67 \times 10^{-3} (50/\sqrt{1/50})^{0.7} \\ &= 0.10(\text{h}) \end{aligned}$$

ここで T ; 流達時間 (h)

L ; 流域最遠点までの流路長 (m)

④ 最大平均雨量強度

$$R_1 = \frac{R_{24}}{24} \times \left(\frac{24}{T} \right)^{2/3}$$

$$= \frac{100}{24} \times \left(\frac{24}{0.27} \right)^{2/3}$$

$$= 83 \text{ mm/h}$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_{24}}{24} \times \left(\frac{24}{T} \right)^{2/3} \\ &= \frac{100}{24} \times \left(\frac{24}{0.10} \right)^{2/3} \\ &= 161 \text{ mm/h} \end{aligned}$$

ここで R ; 最大平均雨量強度 (mm/h)

R_{24} ; 計画日雨量 (mm/day)

⑤ 計画洪水流量

降雨による流量の算定は、次の式を用いる

$$Q_p = \frac{1}{3.6} \times f \times R \times A$$

ここで Q_p ; 最大洪水流量 (m^3/sec)

f ; 流出係数 (草地及び林地 = 0.8)

従って、第一堆積場・第二堆積場の最大流量はそれぞれ

$$\begin{aligned} Q_{p1} &= \frac{1}{3.6} \times 0.8 \times 83 \times 0.03 \\ &= 0.55 \text{ m}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{p2} &= \frac{1}{3.6} \times 0.8 \times 161 \times 0.02 \\ &= 0.72 \text{ m}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

(4) 排水路断面の決定

場内の排水工は、コルゲートU字フリュームを使用することとした。

次に、コルゲートU字フリュームの大きさを決定する。計算は、次式を用いる。

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$Q = VA = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

ここで Q ; 流量 (m^3/sec)

V ; 流速 (m/sec)

A ; 流量断面積 (m^2)

R ; 径深 = $\frac{A}{L}$ (m)

L ; 潤辺 (m)

I ; 動水勾配(%)

n ; 粗度係数 (n = 0.022)

第3-9-9図の断面を仮定すると

$$A = 0.469 \text{ m}^2$$

$$R^{2/3} = 0.400$$

$$I = 0.02$$

$$n = 0.022$$

上式に代入すると,

$$Q = \frac{1}{0.022} \times 0.469 \times 0.400 \times 0.02^{1/2} \\ = 1.206 \text{ m}^3/\text{sec}$$

第一堆積場, 第二堆積場の計画洪水量と比較すると

$$\cdot Q = 1.206 \text{ m}^3/\text{sec} > Q_{p1} = 0.55 \text{ m}^3/\text{sec} \dots\dots\dots 0. \text{ K}$$

$$\cdot Q = 1.206 \text{ m}^3/\text{sec} > Q_{p2} = 0.72 \text{ m}^3/\text{sec} \dots\dots\dots 0. \text{ K}$$

従って, 第3-9-9図の断面に示すコルゲートU字フリュームを使用する。

コルゲートU字フリュームからの排水は, ポリエチレンパイプφ400mmに接続し流末に排水する。

3-9-3 粉塵防止対策

乾期には堆積場の表面が乾燥して粉塵が発生する。粉塵を防ぐ工法としては,

- (1)散水工法: スプリンクラーにより, 水を散水する。
- (2)表面固結工法: 薬剤を散布し, 表面を固結させる。
- (3)植生工法: 種子吹付, 張芝等で植生させる。
- (4)覆土工法: 表面を土砂で覆土する。

等の工法があるが, 当堆積場の場合はすでに堆積を完了しており, 永久的な対策が必要である。また, 粉塵防止対策と同時に崩壊防止対策や排水対策も講じる必要がある。以上のことを考慮して検討した結果, 覆土工法が最も適した粉塵防止対策であると考える。

覆土方法に関しては, 「3-9-1 堆積場の崩壊防止対策」及び「3-9-2 排水対策」の項で述べたとおり, 法面の押え盛土工や堆積場上面の覆土工を実施する。

3-9-4 地下水汚染対策

水文観測によれば, 堆積場より下流では河川水が地下へ浸透しているとともに, 河川水や地下水中の溶存イオン濃度のバックグラウンドは, 周辺鉱化帯や鉱山の

影響を受けて、平均値より高いが、現在の堆積場排水の浸透による地下水汚染は観測されていない。

しかし、3-4-3の水理調査で述べたように、

①地下水への新規混入汚染水は表層部を流れやすいこと

②現在の地下水ポテンシャル分布はサカテカス市の水道使用量が小さいためにこのような分布状態が形成されていることを考慮すると

①乾期が長く続いた場合や

②サカテカス市の人工増加や産業増加が起こった場合

汚染物質は容易に水道水源井に向かうことが懸念される。今後地下水位のモニタリングを定期的に行い、水道水源井の水質管理を十分に行うべきであろう

堆積場周辺の対策としては、堆積を完了した堆積場であれば覆土工法により、雨水による堆積物質の溶解を低減し、使用中の堆積場であれば、堆積面をなるべく平坦にし、排水の蒸発面積を大きくしたり、排水のリサイクルを行うことにより、下流側への汚染物質の地下水への浸透を極力避けるべきである。

3-9-5 工事工程及び工事費

各鉱害防止対策工事における概略の工期および工事費を試算する。

(1) 工事工程

工事工程は次表のようになる。

工 種	数 量	5month	10month	15month	20month
押え盛土工	580,000 m ³		22 month		
覆 土 工	20,000 m ³	2.2month			
場内排水工	290 m	0.8month			
場外排水工	450 m	0.2month			

(2) 工事費

メキシコの建設事情を調査した結果、工事費の概算は次表のようになる。

工 事 名	数 量	単価(\$us)	金額(\$us)
①崩壊・粉塵防止対策			
押え盛土工	580,000 m ³	6.3	3,654,000
覆土工	20,000 m ³	4.0	80,000
(小 計)			(3,734,000)
②排水対策			
場内排水工	290 m	120.0	35,000
場外排水工	450 m	113.3	51,000
(小 計)			(86,000)
合 計			3,820,000

(3) 工事仕様

前述した工事工程および工事費を算定するための主要工程の工事仕様は次表の通りである。

工 程	機 種	作業能力 (1日当り)	セット 台数
①押え盛土工			
土取場岩盤掘削	リッパ付フルト-ザー 32t級	53 m ³ /h	3
破 砕 岩 積 込	バックホー 1.0m ³ 級	51 "	3
破 砕 岩 運 搬	ダンプトラック 11t積	17 "	9
敷 均 し 転 圧	フルト-ザー 21t級	64 "	3
土 取 場 伐 開	人力		
②覆土工			
粘性土掘削・積込	バックホー 0.6m ³ 級	41 m ³ /h	1
粘 性 土 運 搬	ダンプトラック 11t積	18 "	3
敷 均 し 転 圧	フルト-ザー 11t級	41 "	1

註) 1. 押え盛土工における運搬距離は1kmとした。

2. 覆土工における運搬距離は0.7kmとした。

3. 稼働率時間・稼働日数はそれぞれ7hours/day, 25day/monthとした。



Fig. 3-1-1 Hydrologic and Meteorologic Map



Fig. 3-2-1 Geological Plane Map (El Bote)