

1963年 バイオントダム の災害

豊崎の△を△△

つらこはまぢアめ湖は谷、> 葉アめ湖はま、> 高つめ湖は岩泉、お麓部△△イくもトハ

。あまう前△麓界世よアじ嶽さ嶽麓全、ダ大嶽界世おひ△ママア

家突前半代るすは△嶽基嶽の嶽き面曲△嶽嶽、△まき嶽嶽の谷嶽めまき、△麓嶽の嶽嶽

平野 吉彦*

1. はじめに

Vaiont (バイオント) ダムは、イタリア北部Veneto (ベネト) 地方のPiave (ピアベ) 峡谷に1960年に完成した発電用のアーチダムである。

このダムの貯水池では、1963年10月9日 (今から40年前)、左岸側で体積にして約3億 m^3 にもおよぶ岩盤すべりが発生し、ダムを越流した洪水により、2,600人の死者を出した技術史上最大の貯水池地すべり災害である。地すべりの発生原因は、ダムの貯水によるものであり、日本でもダム建設にあたっては教訓とされてきた事例である。

今回の研究発表では、新潟大学からお借りした「プロジェクトV」という、2001年にイタリアで製作された映画の一部を紹介する。自分が当事の応用地質技術者であった場合、「どのように行動したか」、「どのように行動すべきか」を考えさせられる映画である。また、わたしは、10年前にバイオントダムを訪れる機会に恵まれたことから、当時集めた文献と現地で撮影した写真をもとに、ダムの概要・地すべり発生に関わる機構・地すべり発生までの経緯をまとめた。

巻頭言でも述べられているように、本研究会に集う仲間が、技術研鑽の場として、そして技術者倫理について意見交換していただけるように、参考事例として紹介する。

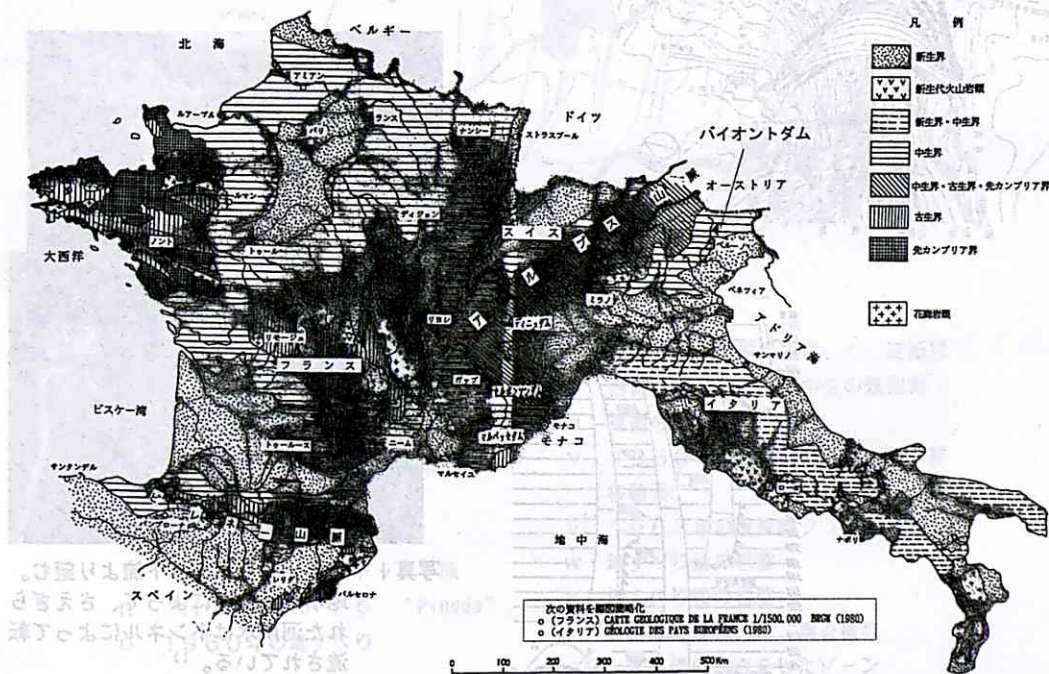


図1 バイオントダムの位置図

*株式会社キタック

2. ダムの概要

バイオントダムの特徴は、堤体が極めて高く、また極めて薄く、谷が極めてせまいことである。ダム高は薄肉アーチダムでは世界最大で、全種類を通じて世界第2位である。

堤体の形状は、せまい峡谷の地形を生かし、複雑な曲面を使い構造物に対する力学的安定を計っている(図-2、3)。また、アバットの部分には、延長10万 m^3 に及ぶグラウトと大量のタイロッドによる岩盤締め付けが施工されており、漏水防止と基礎の安定を計っている。このタイロッドを施工したことにより、岩盤すべり発生の際にダムが持ちこたえられたと言われている。

ダムの概要

- | | |
|--------|--|
| ・ダム形式 | : ドーム型薄肉アーチダム(天端厚 3.4m, 底盤厚 22.7m) |
| ・完成年 | : 1960年 |
| ・施主 | : アドリア電力会社 |
| ・ダム高 | : 265.5m(天端標高 725.5m, 底盤標高 460m) |
| ・堤頂長 | : 169m |
| ・総貯水容量 | : $15 \times 10^7 m^3$ (1億5,000万 m^3) |
| ・満水位標高 | : 722.5m |
| ・基礎地質 | : 中生代白亜紀の石灰岩 |

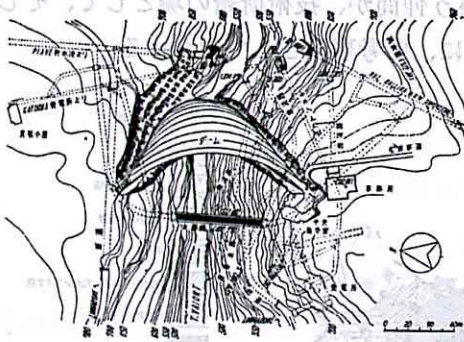


図2 Vaiontダム平面図²⁾

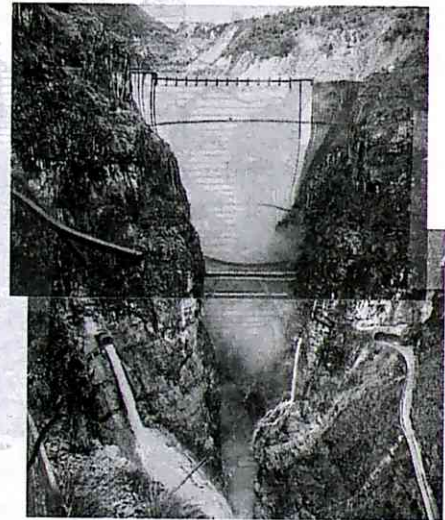


写真1 バイオントダムを下流より望む。地すべり土塊によって、さえぎられた河川水はトンネルによって転流されている。¹⁾

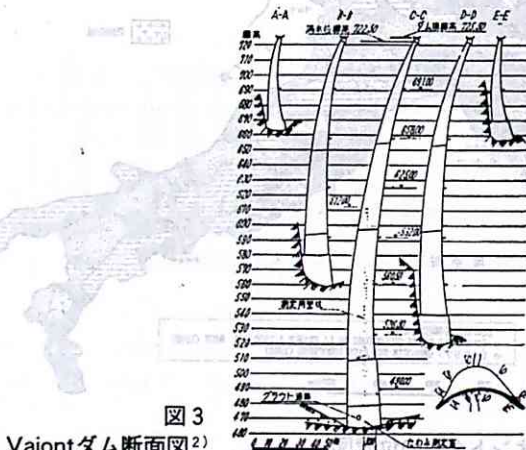
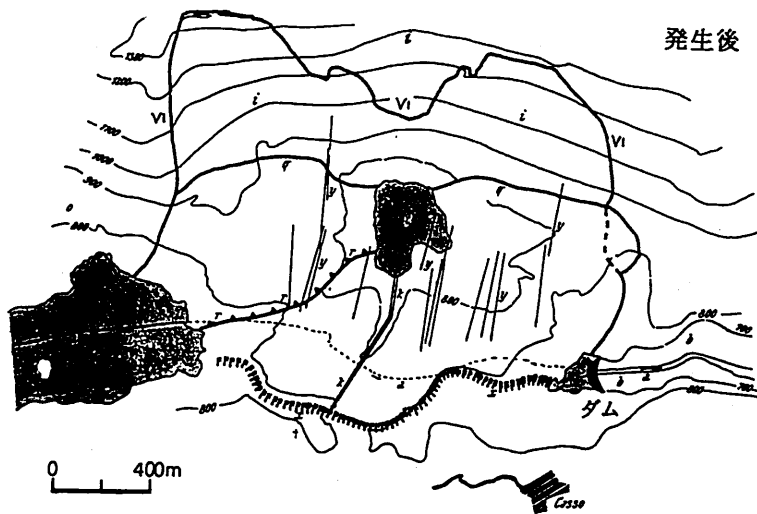
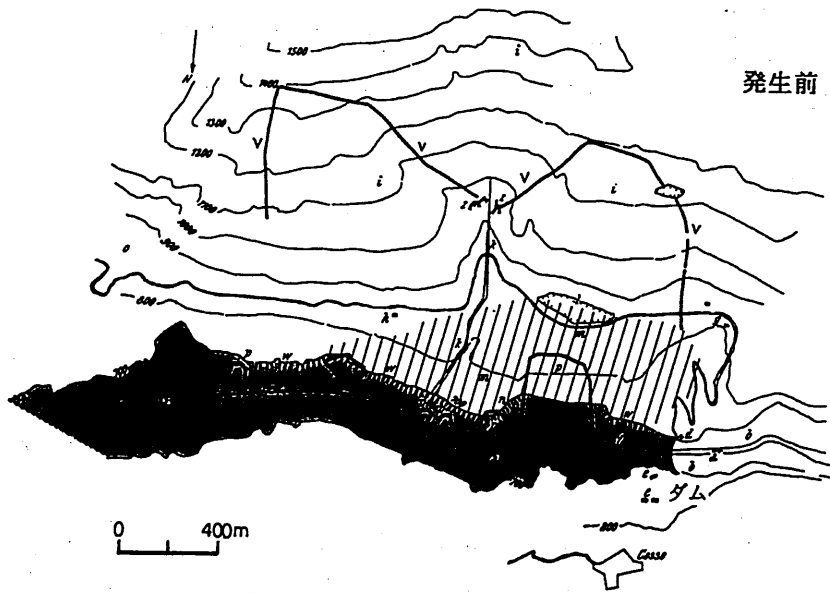


図3

Vaiontダム断面図²⁾



- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| a バイオント川, b バイオント峡谷 | q 地すべりの南側境界線, r 逆断層 |
| c ダム, d コントロール室 | s 西側の残留湖, t 中央の残留湖 |
| e 事務所やホテル, f Colomber橋 | u 東側の残留湖 |
| g Nelve 集落, h Pierin 集落 | v 1960年の周縁クラック・割目群 |
| トック山斜面 | 移動面 |
| k Hassalezza排水溝 | v ¹ 1963年の境界線クラック |
| l "La Pozza", m トック平原 | w 地すべり前の岩壁 |
| n "Il Pinnacolo", o "Pineda" | x 地すべり後の岩壁 |
| p 1960年の地すべり | y 観測点の変位, z 調査横坑 |
| | //// 氷河様の動きをしたゾーン |

図4 Vaiontダム地すべり発生前と発生後の地形図 (L.Müller, 1964) ³⁾

3. 岩盤すべりによる被害

岩盤すべりは、湛水開始の1960年からクリープ変動をしていた地域が、1963年急激に滑動した。その速度は約25m/secと極めて急激であったと言われている。

崩壊の規模は、幅約1.6km、長さ約1.8km、体積約3億 m^3 と莫大であり、斜面距離にして300~500mも移動した(図-4)。

移動岩体は、深さ100mほどの峡谷(貯水池)を埋め、さらに対岸の斜面を140mの高さまで登った(図-6)。このとき、満水状態の2/3ほど湛水していた貯水池の水(標高700m、水深最大約235m、この時の貯水容量約1.15億 m^3)は峡谷から高さ250m近く押し上げられ、右岸側斜面にあったCasso村(標高700m)を襲った。さらにダム天端より100mの高さまで越流し、ダム近辺にあったEnelの売店や事務所・ホテル・管理棟を洗いながし、ダム下流のPiave峡谷の水位を河床から70~90mもの高さまで上げ、洪水となって下流数10kmにもわたる村々を全滅させた。

洪水により水没した村は本流のPiave川沿いにあった、Longarone, Pirago, Viranoba, Rivalta, Faeの村々で、死者は2,000人とも3,000人とも言われている(写真-6)。

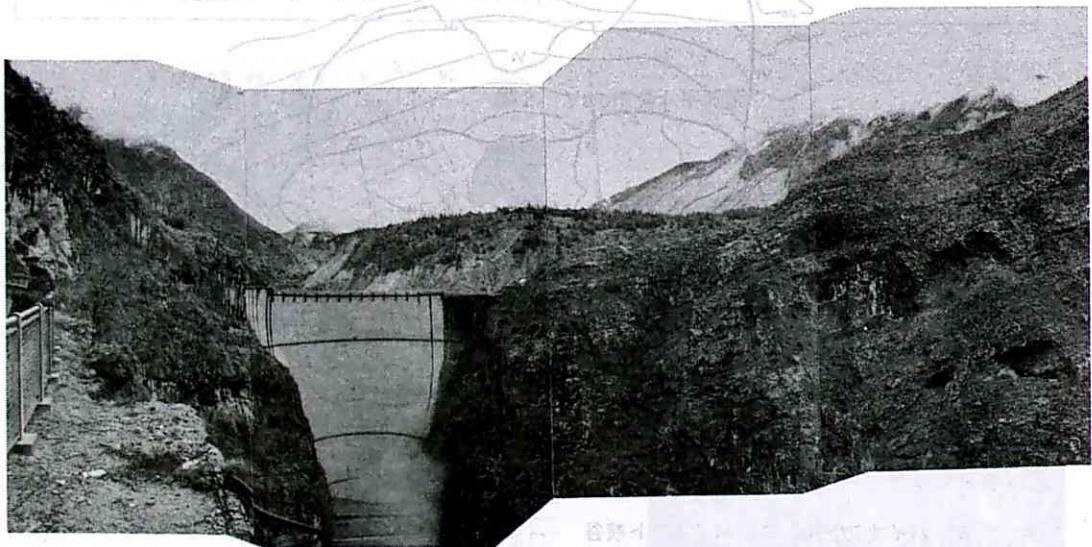


写真2 Vaiontダム(下流側から撮影)。

写真中央の平坦部はすべり出した山体。写真右側に見える面が滑落崖。

岩盤すべりと地質

岩盤すべり周辺の地質は「下位からソレワキトローグ」であることが、自由系の石炭層からなる。この層は、構造が複雑であり、その構造を研究して、岩盤すべりが発生する原因が明らかになった。また、この地質は、岩盤すべりによって、地盤が陥没し、地盤すべりが発生した。この地質は、岩盤すべりによって、地盤が陥没し、地盤すべりが発生した。この地質は、岩盤すべりによって、地盤が陥没し、地盤すべりが発生した。

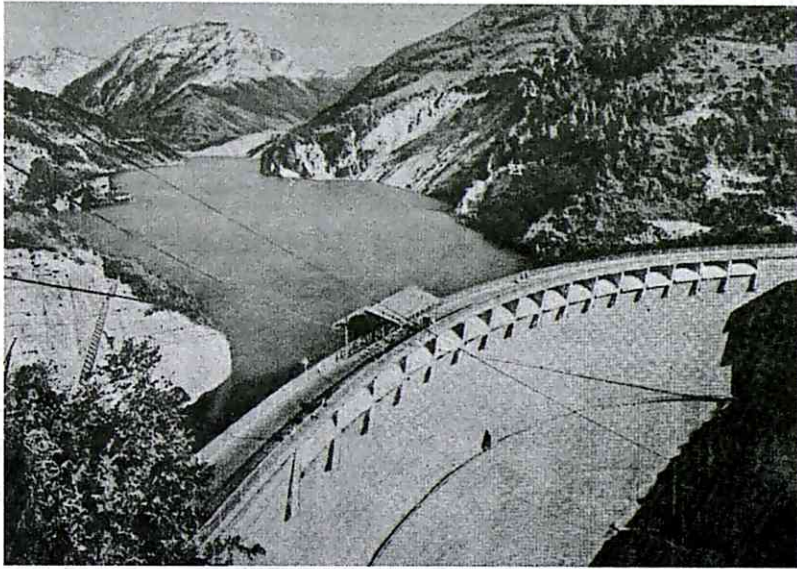


写真3 岩盤すべり発生前の状況（絵葉書）。



写真4 岩盤すべり発生後の状況（絵葉書）。

尾根すべりによる被害

尾根すべりは、湯水湖岸の1979年からシリーズで発生していた地域が、1981年急激に発生した。その被害は約500mに及んだと推定されている。

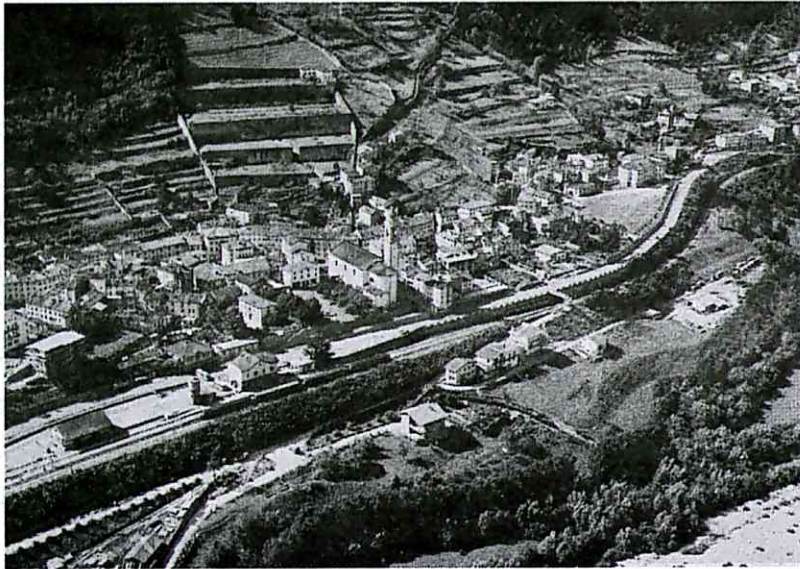


写真5 Longarone村被災前の状況（絵葉書）。

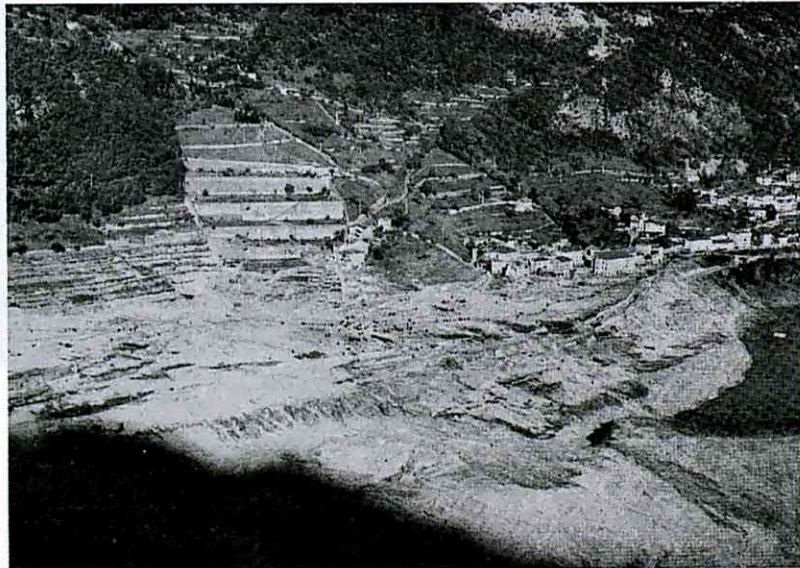


写真6 Longarone村被災後の状況（絵葉書）。

4. 岩盤すべりと地質

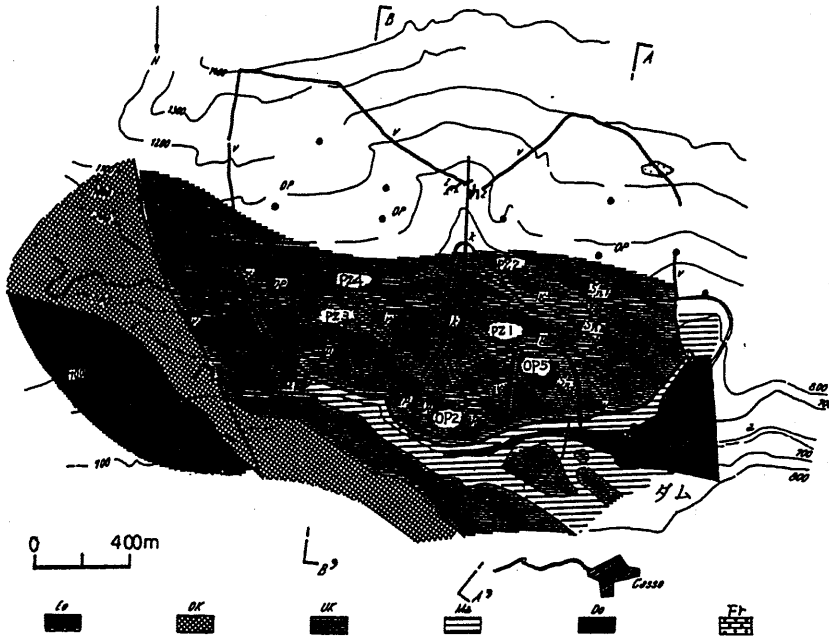
岩盤すべり周辺の地層は、下位からジュラ紀ドッガー統、マルム統および白亜系の石灰岩類からなる(写真-7)。これらは、層理面が発達しており、Piave峡谷よりも左岸側では峡谷に向かって傾斜し、峡谷から右岸側がほぼ水平な地質構造となっており、地すべりが発生しやすい地質構造である(図-6)。岩盤すべりは、この構造に沿って生じた層間すべりで、マルム統の中～下部の岩盤に発生した。

この移動岩体は、ダム工事着手後になってから実施された貯水池の精査によって、有史以前にすべった地すべり岩体であることが分かっていたが、重大な問題にはされていなかった。

岩盤すべり発生の引き金は、貯水位上昇に伴う移動岩体中の間隙水圧の増大が主体と考えられている。湛水を開始して約3年6か月後の岩盤すべり発生の瞬間までクリープ変動が続いた。これは、クリープ変動が数mに達した時、地すべり下端斜面から破壊が始まり、除々に地盤破壊が進行し、抵抗力が極限に達したとき「急激な滑動」に移行したものとして考えられている³⁾。

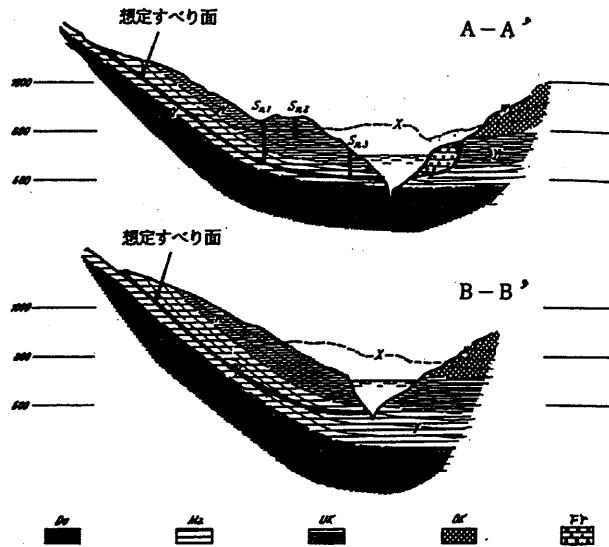


写真7 ダム右岸側に見られるマルム統の石灰岩。泥灰質で層理が発達している。



Eo 始新統 (フリッシュ), OK 上部白亜系, UK 下部白亜系,
 Ma マルム統, Do ドッガー統, Fr 古期岩盤すべり, Op ● 観測点
 Sn ○ 調査ボーリング孔, Pz ◯ ピエソメーター, a バイアント川,
 k Hassalezza排水溝, p 1960年の地すべり v 1960年の周縁クラック・割れ目群・移動面

図5 Vaiontダム地すべりの地質平面図 (L.Müller, 1964)²⁾



W 地すべり前の地表面, X 地すべり後の地表面, Sn 調査ボーリング孔
 Y 地層のアウトライン, Fr 古期岩盤すべり, Do ドッガー統
 Ma マルム統, UK 下部白亜系, OK 上部白亜系

図6 Vaiontダム地すべりの地質断面図 (L.Müller, 1964に加筆)³⁾

8. 遊覧までの記録

ヴァイアントダムでは、1960年2月に洪水が開始された。洪水が流れてくると、ダムが壊れて、水が溢れ出す。

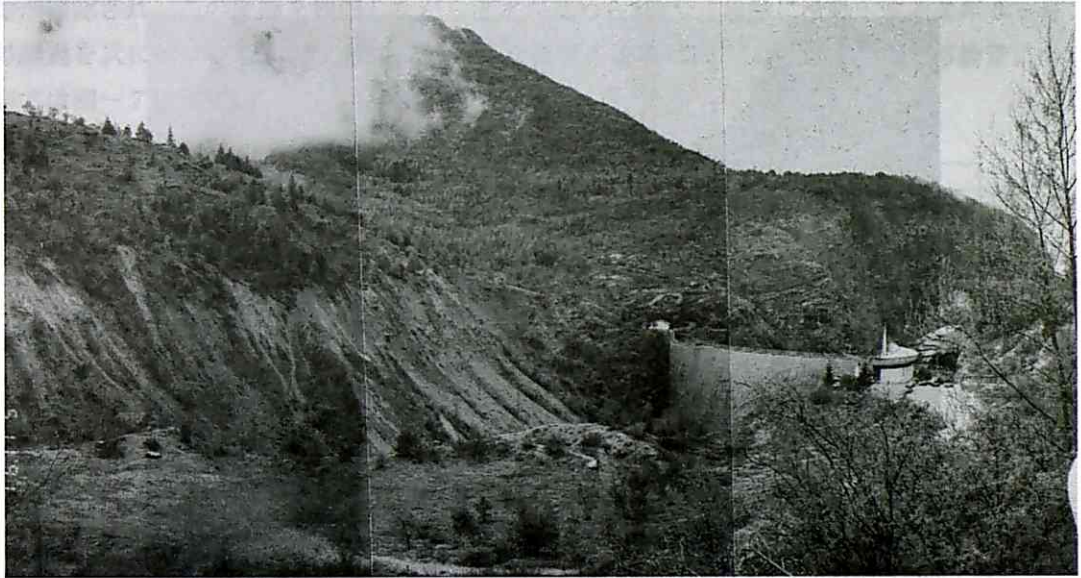


写真8 Vaiontダム上流部側。写真左側の平坦部はすべり出した山体。この末端の急崖部には、破碎された土砂状の岩盤が露出しており、所々崩壊している。



写真9 ダム上流右岸側。左岸側からすべり出した土砂が右岸まで達している。

このように、ダムの上流側には、洪水が流れてくると、ダムが壊れて、水が溢れ出す。

図1 Vaiontダム崩壊 - 洪水後 - 洪水が流れてくると、ダムが壊れて、水が溢れ出す (L. Mader, 1961)



写真10 地すべり山体の上流部に見られる移動岩盤。ほとんど破碎されていない。
写真奥側に傾斜した層理面が見えるが、本来の傾斜は逆である。

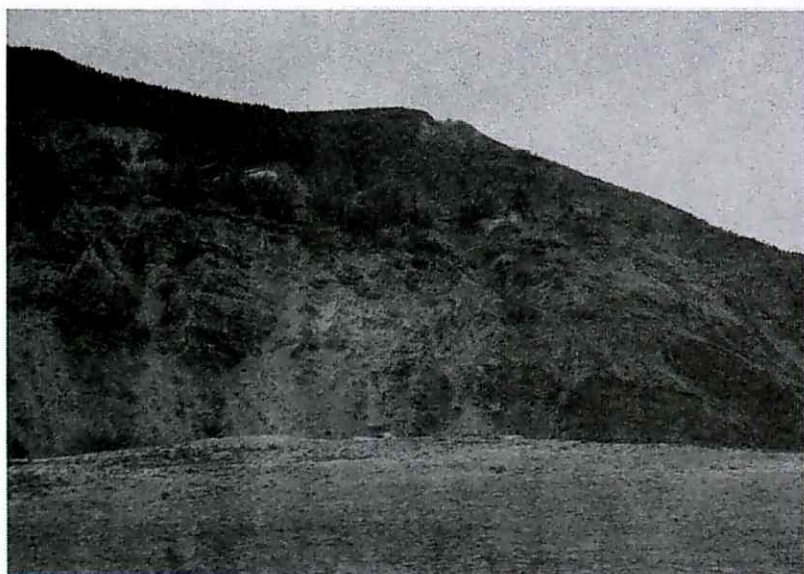
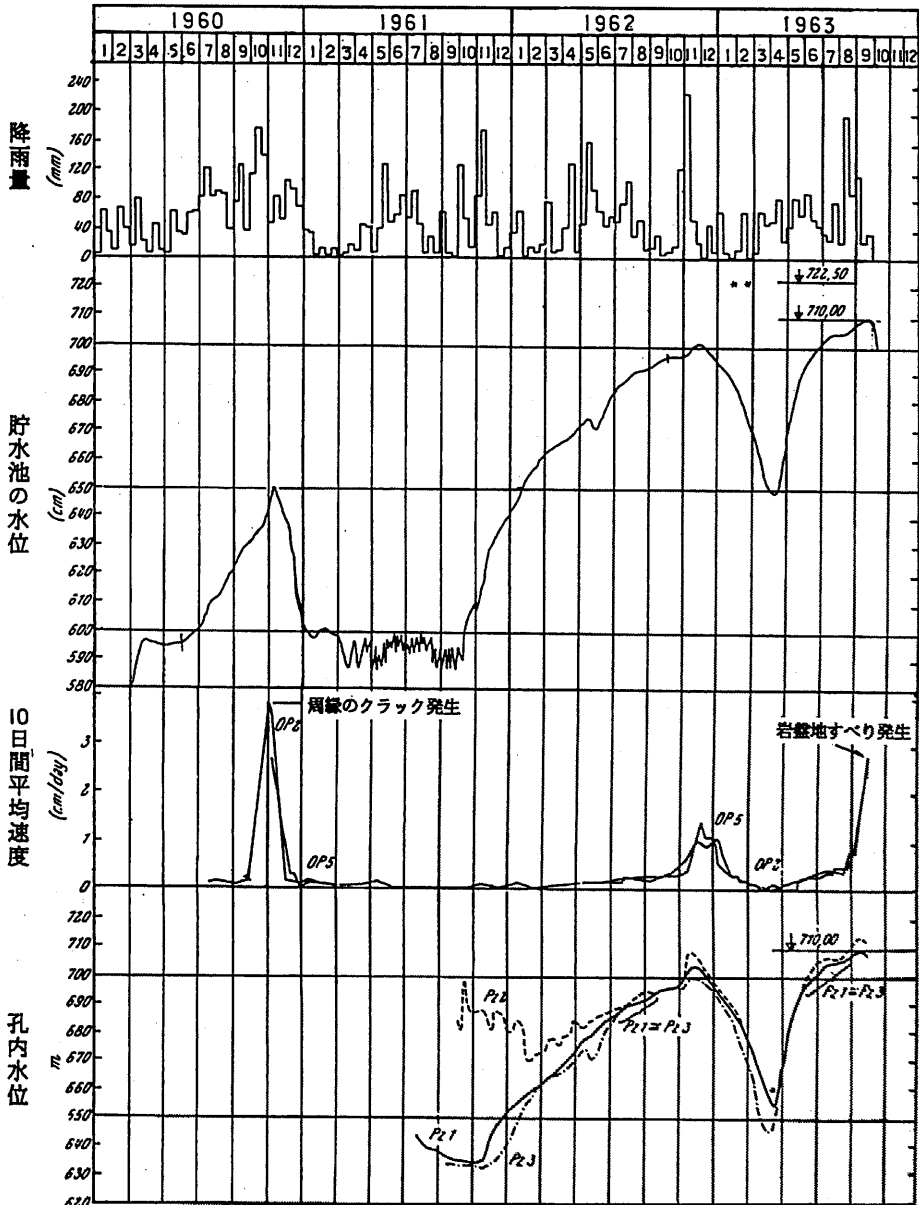


写真11 地すべり山体の下流部に見られる移動岩盤。
あまり破碎されていない岩盤が所々に残留している。

5. 被災までの経過

バイオントダムでは、1960年2月に湛水が開始された。湛水直後に左岸側でクリープ変動が確認され、この変動を観測しながら湛水が進められた。「急激に滑動」する3年6ヶ月の経過を次に示す。なお、文章中に使用した位置の説明は図-4に、貯水位と移動量については図-7に示す。



OP2, OP5 ; 地すべりの重要観測点 (図-3.26 参照)
 Pz ; ピエゾメーター孔 (図-3.26 参照)
 ** 最高貯水位 * Pz3の読みの中断

図7 Vaiontダム降雨・貯水位・地すべりの移動速度・孔内水位 (L.Müller, 1964)³⁾

○1920年代……………予備調査 貯水池の岩盤すべりについては指摘されていなかった。

○1956年……………工事着手

(工事期間中) この期間、貯水池の精査が実施された。この結果、貯水池の左岸側の山体は、有史以前にToc山からすべり出した地すべり岩体であることが明らかになった。しかし、十分に安定しているもので、貯水池に対して重大な問題にならないであろうとされていた。

○一回目の貯水位上昇

・1960年2月初旬……………湛水開始 (工事はおおよそ完成していた)

1960年9月 ダム完成

(貯水位上昇) この期間、Pierin集落下方岩壁 (移動岩体末端の崖) で、小規模な岩盤の分離が生じた。

・1960年5月末……………貯水位595m (河床から約130m)

移動の状況を観測するために、Massalezza排水溝の両側に数100mにわたって移動観測点が設置された。

(貯水位維持) 観測は毎日実施され、左岸側の岩体の移動が緩慢になり地域が小範囲に限られることが明らかになった。

・1960年6月初旬……………貯水位595m (河床から約130m)

(貯水位上昇) この期間、Massalezza排水溝の西側 (下流側) の岩壁が極めてゆっくりであるが移動していた。

・1960年10月初旬……………貯水位635m (河床から約170m)

(貯水位上昇) いくつかの観測点が、突然に加速度的に移動し、しだいに観測地域全体が移動し始めた。移動岩体の端にシャープな割れ目が発生し、2km以上もつながった。

○一回目の貯水位降下

・1960年11月4日……………貯水位645m (河床から約180m)

この日、Pozza平原の下方 (移動岩体末端の崖) で幅約300mの地すべりが発生し、約70万 m^3 の土砂が貯水池に落ちた。

・1960年12月末……………貯水位600m (河床から約135m)

(貯水位維持) この期間、すでに分離していた末端の岩盤が崩落した程度で、移動岩体は停止していた。

○二回目の貯水位上昇

・1961年9月末……………貯水位590m (河床から約125m)

(貯水位上昇) この期間の最大平均移動量は0.1cm/日で、極めて少ない移動量であった。

・1962年1月末……………貯水位650m (河床から約185m)

左岸側の移動岩体がはじめて湛水する標高。

(貯水位上昇) この期間の最大平均移動量は0.1cm / 日で、極めて少ない移動量であった。

- ・1962年10月初旬……貯水位695m (河床から約230m)

(貯水位上昇) この期間は多量の降雨の影響もあり、移動量が増加。
最大平均移動量は1.2cm / 日。

○二回目の貯水位降下

- ・1962年11月末……貯水位700m (河床から約235m)

(貯水位降下) この期間の最大移動量は、1.4cm / 日まで増加。

- ・1962年12月末……貯水位695m (河床から約230m)

(貯水位降下) この期間移動量はしだいに小さくなり、最終的には停止した。

- ・1963年4月初旬……貯水位650m (河床から約185m)

ここまでの移動観測の結果では、移動速度は、初めて湛水した時は速かったが、2回目に同じ高さまで湛水した時は極めて遅かった。この結果から、移動岩体の速度は、貯水位の操作によって制御できるものと考えられた。したがって、移動岩体を徐々に安定させるためには、貯水位上昇と降下を繰り返しながら貯水位を上げていけば、最後には均衡状態に達するであろうし、少なくともゆっくりとした動きを続け、重大な問題は発生しないであろうと判断され湛水が再開された。

○三回目の貯水位上昇

- ・1963年4月初旬……貯水位650m (河床から約185m)

(貯水位上昇) この期間の移動はなし。

- ・1963年5月末……貯水位700m (河床から約235m)

(貯水位上昇) 左岸側の移動岩体をはじめて湛水する標高。

この期間の最大平均移動量は0.5cm / 日以下。

- ・1963年7月末……貯水位705m (河床から約240m)

(貯水位維持) この期間の最大平均移動量0.8cm / 日に増加。

- ・1963年8月中旬……貯水位705m (河床から約240m)

(貯水位上昇) この期間の最大平均移動量は3.5cm / 日に増加。

○三回目の貯水位降下

- ・1963年9月末……貯水位710m (河床から約245m)

(貯水位降下) 10月はじめの数日間で、移動速度は加速度的に増加した。
最大平均移動量は20cm / 日。

- ・1963年10月9日……貯水位700m (河床から約235m)

22時8分、大規模岩盤すべりが急激に滑動。

移動岩盤は、貯水池に段波を発生させ対岸にまで達した。

6. おわりに
 ダムは、越流と静水圧から400万tもの力を受けたとされているが、たいした損害も受けずに現在も残っている。ダム下流の集落は復興され、これらの集落では、歴史に残るダムとして観光資源に利用されている。

しかし、現在、バイオントダムは高さ265mの巨大な砂防ダムと化しており、自然の微妙なバランスを人為的な作用で狂わせてしまった結末として我々に示しているかのようである。また、大量の土砂を抱えたダムが老朽化した時、技術者たちはどのように対処するのか残された課題である。



写真12 Longaroneの村からVaiont 峡谷を見る。正面にVaiont ダムが見える。
 Longaroneの村からVaiont ダムまでは、2 km ほどしか離れていない。

参考文献

- 1) 日本応用地質学会 (1991) : ヨーロッパのダム (I). 第1回海外応用地質学関連サイト調査団報告
- 2) 電源開発(株)土木設計課 (1964) : Vaiontダムの災害. 応用地質, 第5巻 第1号
- 3) レオポルド・ミュラー著 : バイオント峡谷の岩盤地すべり. (株)キタック社内技術資料
- 4) ロバートB. ヤンセン (1983) : ダムと公共の安全 (世界の重大事故例と教訓). 東海大学出版会