

近代日本におけるバットレスダムの変遷

樋口輝久¹・馬場俊介²

¹正会員 工修 岡山大学助手 環境理工部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)
E-mail:higuchi@cc.okayama-u.ac.jp

²正会員 工博 岡山大学教授 環境理工部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)
E-mail:baba@cc.okayama-u.ac.jp

本論文は、わずか四半世紀の間に、導入・発展・衰退の過程を辿ったわが国のバットレスダムの変遷を明らかにしようとするものである。薄い遮水壁と控え壁（バットレス）で構成されるバットレスダムは、笹流ダムで初めてわが国に導入され、物部長穂の耐震理論によって発展を遂げたが、国際大ダム会議で凍害が報告された直後の三滝ダムが最後とされてきた。本論文では、希少性と形態上の特異性からわが国のダム史上における特徴の一つになっているバットレスダムについて、ダム技術史上における位置付けを明確に示すとともに、大正～昭和初期にかけてこの形式が積極的に採択された理由、そして、その後すぐに採択されなくなった理由の双方を明らかにすることで、近代日本におけるバットレスダムの技術史の構築を目指す。

Key Words : modern Japan, buttress dam, history of dam engineering

1. はじめに

2002年度の土木学会選奨土木遺産に三滝ダム（鳥取、1937年）が認定された。これは前年度の笹流ダム（北海道、1923年）、丸沼ダム（群馬、1931年）の認定に続くもので、結果的に現存するアンバーセン式バットレスダム6基のうち半数の3基が授賞対象となったことを意味している（授賞したその他の形式のダムは、河内ダム、大湊第一水源地堰堤、小牧ダム、大橋ダムであった）。このような状況は、バットレスダムの技術的優秀さを示すというよりは、希少性を称えての判断かもしれないが、いずれにせよこれらのバットレスダムが、大正末期から昭和戦前の一時期に集中するという時代性を有し、そこに近代日本のダム技術史上の大きな特徴を見出せることは間違いない。

笹流ダムを嚆矢とするわが国のバットレスダムは、物部長穂（1888-1941）が耐震性を考慮した設計理論を確立したことによって、その有利性が高く評価され一時脚光を浴びるが、三滝ダム以降見向きもされなくなる。では、どうしてダム形式の区分において、土堰堤、

重力ダム、アーチダムとならび、その一翼を担っているはずのバットレスダムが、戦前の一時期だけに集中して、しかも、築造数が少なかったのであろうか？

わが国のダム技術の発展に関しては、『水力技術百年史』¹⁾等でもその概要を捉えることができるが、ダム史上で特異な地位を占めるバットレスダムに関してこれまで詳細に論じられたことはなかった。また、ダム分野における土木史研究もこれまでは個々の構造物が中心で、一次資料に基づいた技術史が確立されてこなかったため、筆者らはダム技術史構築の第一弾として、ダム形式の選択を中心にコンクリートダム技術の変遷を明らかにしてきたが、それはダム技術者に着目して技術史を捉えようとしたものであった²⁾。

そこで、本論文では近代日本におけるバットレスダムの技術史を確立することを目的に、ダム技術の発達の背景とそれに対する評価に着目して、当時の学協会誌や教科書・技術参考書、工事報告書などに基づき、導入の経緯、形式選択の要因、物部による耐震設計理論、衰退の要因などについて詳細に分析し、バットレスダムの変遷を明らかにしようとする。それは、平

成 13～14 年度における土木学会の土木史研究委員会において、今後の最大目標のひとつとして議論された「土木技術史の確立」の一翼を担うものである。

以下、本論に入る前にバットレスダムについて大まかな流れを示しておこう。

(1) 世界の流れ

日本では、バットレスダムと言えば昭和初期に一度だけ脚光を浴びた鉄筋コンクリート (RC) スラブ式のダムを指すことが多い。しかし、バットレスダムは人類に古くから知られたダムの形式の一つであり、その起源は少なくとも紀元前 3 世紀に遡る³⁾。古代のダムの多くは石積みの重力ダムであったが、ダムの製作者が何らかの理由で安全性に不安を抱いたとき、安全性を保障・補強する役割を期待して、アーチ構造やバットレス構造が導入されたものと考えられる。前者の場合、当時大量に造られていた石造アーチ橋がヒントになって、ダムを弧状にすることに思い至ったのであろう。また、後者については、背の高い建築物の壁を支える控え壁 (バットレス) がヒントになって、ダムにところどころ控え壁を入れればより安全になると考えたのであろう。特に、谷の幅が広く、長い壁のようなダムを造る場合に、バットレス構造が有利であった。本論文では、こうした形式のダムを、バットレスで補強された重力ダムと位置付ける。20 世紀になって RC が登場し、かつ、構造力学的な計算法が確立されるまでは、バットレスダムと言えばそのほとんどすべてがこのタイプであった。

20 世紀初頭に、それまでと全く違ったタイプのバットレスダムが登場する。それらは、軽量の遮水壁で水を貯め、同じく軽量の控え壁で遮水壁が倒れないように支える、という完全分業スタイルの構造物であった。ここで、遮水壁に平板を用いたのがノルウェー出身のアンピエルンセン (Nils F. Ambjørnsen, 1876-不明)、遮水壁を薄肉円筒シェルにしたのがイーストウッド (John S. Eastwood, 1857-1924) である。前者は、わが国では「扶壁式」と呼ばれ、第二次世界大戦以前に 8 基が造られ、冒頭で述べたように、バットレスダムと言えば一般にこの形式を指していた。後者は、いわゆるマルチプルアーチダムで、わが国では戦前に 2 基、戦後に 1 基の実施例がある。

20 世紀初頭にバットレスダムが大量生産されるようになったのは、重力ダムに比べてコンクリートの使用量が格段に少なく、結果として、建設費用が安く、資材運搬も楽で、基礎地盤にもそれほど配慮する必要はない、と考えられていたからである。しかし、人件費が上昇し、複雑で精密さを要する施工が建設費用の安価さを帳消しするようになると⁴⁾、こうした評価は徐々

に薄れていく。その後は、寒冷地でのコンクリートの剥落、地盤の陥没・地震・爆撃などの突然の危機的事象に対する脆弱さ、洪水時の溢流水の処理の難しさなどがマイナス要因となって形式選択の第一選択肢から外されるようになり、現在ではほとんど建設されることもなくなった。

(2) 日本の動き

わが国のバットレスダムは、第二次世界大戦以前に、アンバーセン式が 8 基、その他のフラットスラブが 1 基、マルチプルアーチが 2 基、戦後は、フラットスラブが 1 基、マルチプルアーチが 1 基、コンティギユアス (接続) タイプが 13 基築造されている (図-1 にそれぞれの模式図を示した)。

これら各種のバットレスダムはわが国ではどう呼ばれていたのであろう。戦前は、バットレス形式のダムを総称して「扶壁式」「支壁式」「中空式」堰堤、あるいは、「ホロー」ダムと称していた。重力ダムなどと違い RC が用いられていることから、単に「鉄筋混泥土」堰堤と言えばバットレスダムを指すことも多かった。また、フラットスラブは、「平版式」「平板式」「床版式」、あるいは、より正しく「アンバーセン式 (または型)」と書かれていた。また、前出の「扶壁式」「中空式」という表現も、バットレス全般というよりはアンバーセン式を特定することが多かった。物部長穂はアンバーセン式ダムの耐震設計法を提案したが、それに準じて造られたダムは「耐震扶壁堰堤」「耐震池壁」であった。一方、マルチプルアーチは「複拱式」「多拱式」と呼ばれていた。

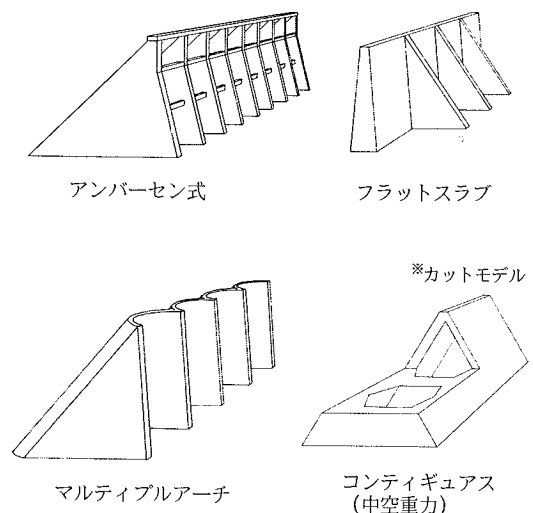


図-1 各種バットレスダムの模式図 (著者作成)

戦後わが国でもコンティギュアス・タイプのバットレスダムが造られるようになったが、それらも「中空重力ダム」と呼ばれた（戦前の“中空”とは同名異種）。

わが国におけるこうした建設の推移は、「黎明期」「発展期」「衰退期」「復活期」の4期に分けることができる。3章では、個々のダムの技術的な紹介を中心にしてバットレスダム史を概述する。ただ、わが国のバットレスダムは、世界に比べてより“短命”に終わってしまう。導入時はかなり積極的だったが、見放されるのも早かった。表-1は、1917～58年の間に執筆された各種の論文・書籍の中でバットレスダムがどう評価されていたかをまとめたものである。バットレスダムに肯定的な見方はA～Gであり、工費の安さ、工期の短さ、資材運搬の容易さ、転倒に対する安定性の高さ、操作・点検の容易さ、基礎掘削量の少なさ、コンクリート水和熱の放散の容易さなどがメリットとして紹介されている。H～Jはバットレスダムが場合によって得意とする分野で、地盤の適合性、地形上の適合性、調整池ダム・水道用ダムの適合性の3つがそれに該当する。

バットレスダムに否定的な因子はK～Oの5件で、設計計算の複雑さ、施工の複雑さ（工費の相対的上昇）、頑健性に対する危惧、凍害による耐久性の低下、漏水処理の難しさなどの問題が指摘されている。

なお、表-1では各項目について、強い肯定意見(◎)、肯定意見(○)、否定意見(△)、強い否定意見(×)の4段階で評価してある。評価の判定基準は、文章表現から判断するものとし、類似した内容が繰り返し紹介されている場合（基準①）や、「甚だ」、「特に」などの言葉を用いて強調されている場合（基準②）は、強い意見とみなした。例えば、「工費及工程を節約し得べきのみならず、其の構造中空なる爲、完成後に於ても、堰堤内部を容易に検査し得られ、工作物の維持、修繕上甚だ有利なり」¹³⁾の場合では、前半部分については、特に強調されているわけではないので、工費の安さ、工期の短さの項目でいずれも肯定意見(○)、後半部分については、操作・点検の容易さの項目について、そのメリットが列挙してあることに加え（基準①）、「甚だ」と有利性が強調されているため（基準②）、強い肯定意見(◎)と判断した。また、否定意見の例として、「其の缺點としては(1)型枠工事の面倒なる事。(2)施工の煩雑なる事。(3)應力計算が比較的面倒なる事。等である」²⁰⁾の場合では、(1)(2)はいずれも施工の複雑さに関する類似した内容が述べられているので（基準①）、強い否定意見(×)とみなし、(3)については設計計算の複雑さに関して、1回のみ登場し、強調もされていないので、否定意見(△)と判定した。

表-1から、資材運搬のように常に一定の評価を得ているものもあるが、工期や操作・点検のように1935

(昭和10)年頃からメリットとして認識されなくなった項目のあることが分かる。中でも工費に関しては、否定評価が大半を占めるようになっている。また、施工性（構造の複雑さを含む）については、この時期からマイナス評価が強まっている。これらを整理し、バットレスダムが採択に至った経緯については4章で、バットレスダムの評価が次第に下がっていった過程については5章で分析する。

表-1 論文・書籍におけるバットレスダムの評価

| 出版年 | メリット | | | | | | | 適合性 | | | | | デメリット | | | | | 出典 |
|------|------|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|-------|---|---|---|----|----|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | | | |
| 1917 | | | | ○ | ◎ | | | | | | | | | | | | 5 | |
| 1920 | | | | | | | | | | | | | | | × | | 6 | |
| 1921 | ○ | | ○ | | | | | | | | | | △ | | | | 7 | |
| 1924 | ◎ | ◎ | | ◎ | | | | | | | | | | | | | 8 | |
| 1924 | | | | | ◎ | | | | ○ | | | | | | | | 9 | |
| 1924 | | | | ○ | | | | | | | | | △ | | | | 10 | |
| 1926 | ○ | | ◎ | | | | | ○ | | | | | | | | | 11 | |
| 1928 | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 | |
| 1928 | ○ | ○ | | | ◎ | | | ○ | | | | | | | | | 13 | |
| 1928 | | ○ | ○ | | ○ | | | ○ | | | | | | | | | 14 | |
| 1928 | ◎ | ◎ | ○ | ○ | | | | | | | | △ | △ | | | | 15 | |
| 1928 | ◎ | ◎ | | | | | | ○ | | | | | | | | | 16 | |
| 1928 | | | | | | | | | | | | | | | × | | 17 | |
| 1929 | ○ | | | ◎ | | | | | | | | | | | | | 18 | |
| 1929 | | | | | | | | △ | △ | | | △ | △ | | | | 19 | |
| 1929 | ○ | ○ | | ◎ | ○ | | | ○ | ○ | | | △ | × | | | | 20 | |
| 1930 | ○ | ○ | | ◎ | | | | ○ | | | | ○ | | | | | 21 | |
| 1930 | ○ | ○ | | ◎ | ○ | | | ○ | | | | △ | × | | | | 22 | |
| 1932 | ◎ | | | | | | | △ | ○ | | | | | | | | 23 | |
| 1932 | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | △ | △ | 24 | |
| 1932 | ○ | ○ | | ◎ | ○ | | | ○ | | | | | | | | | 25 | |
| 1933 | | | | | | | | | | | | | | | | △ | 26 | |
| 1934 | △ | | | | | | | | | | | | × | | | | 27 | |
| 1935 | | | | △ | | | | | | | | | | | | | 28 | |
| 1935 | | | ○ | ○ | | | | ○ | | | | × | | | | | 29 | |
| 1935 | ◎ | | | ○ | | | | | | | | | | | | | 30 | |
| 1936 | △ | ○ | ○ | | | | | ○ | ○ | △ | × | × | | | | | 31 | |
| 1937 | | | ○ | | | | | ○ | | △ | △ | △ | | | | | 32 | |
| 1938 | △ | | | | | | | | | | | | △ | | | | 33 | |
| 1942 | △ | | ○ | | | | | ○ | | | | △ | △ | | | | 34 | |
| 1944 | △ | | ○ | | | | | ○ | | △ | △ | △ | | | | × | 35 | |
| 1947 | ○ | ○ | ○ | | | | | ○ | ◎ | △ | × | | | | | △ | 36 | |
| 1949 | △ | | | | | | | ○ | | | × | × | | | | | 37 | |
| 1949 | △ | | ○ | ○ | | | | | | | | △ | × | △ | △ | | 38 | |
| 1950 | | | | ○ | | | | ○ | | | | | | △ | △ | △ | 39 | |
| 1954 | | | | | | | | × | | | | | △ | | | | 40 | |
| 1958 | ○ | ○ | ○ | | | | | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | | | | △ | 41 | |

※ 各評価項目は以下のとおり。

- A: 工費の安さ, B: 工期の短さ, C: 資材運搬の容易さ,
- D: 転倒に対する安定性の高さ, E: 操作・点検の容易さ,
- F: 基礎掘削量の少なさ, G: コンクリート水和熱の放散の容易さ,
- H: 地盤の適合性, I: 地形上の適合性,
- J: 調整池ダム・水道用ダムの適合性, K: 設計計算の複雑さ,
- L: 施工の複雑さ, M: 頑健性に対する危惧,
- N: 凍害による耐久性の低下, O: 漏水処理の難しさ

※ “出典”の番号は、参考文献の番号と対応している。

2. 世界のバットレスダム

前述したように近世以前のバットレスダムのほとんどは石積による“バットレスで補強された重力ダム”であったが、20世紀初頭には当時実用化されたRCを用いて、それまでとは全く異なるきわめて力学的に合理的な構造形式のバットレスダムが生み出された。そして、バットレスダムの歴史がなかったわが国に初めて登場したのもこのタイプであった。従って本章では、近代以降、わが国に導入されたバットレスダム、すなわち、RCフラットスラブ・バットレスダム (flat-slab buttress)、RCマルチプルアーチダム (multiple-arch)、RCコンティギュアス・バットレスダム (contiguous buttress) の3形式について、20世紀前半の世界の動きを簡潔にまとめた。

(1) アンバーセン式

フラットスラブは、前述のアンピエルンセンが当時欧米で多く見られた水車用の木組み堰にヒントを得て考案したもので⁴²⁾、自らアンバーセン水力建設会社 (Ambursen Hydraulic Construction Co.) を設立し、1910年までだけで60基⁴³⁾、1920年代の終わりまでには200基以上を建造した⁴⁴⁾。通常、アンバーセン式と略称されるこのバットレスダムの最も定番的なスタイルは、薄肉のフラットスラブ (平版) でできた遮水壁を薄肉のバットレス群とそれを横方向に連結する多数の水平材の集合体で支えるというもので、巨大な水圧の支持機構は全面的にバットレス部に依存している。そういう意味では、それまでのバットレスダムのほとんどが重力ダムに付加的な強度を与える程度のものであったのに対し、革新的・抜本的な変化をもたらすものであったと言える。

RCフラットスラブ・バットレスダムの第1号はテレサ・ダム (Theresa, 1903年、堤高3m) であったが⁴⁵⁾、水平材を有する本格的なアンバーセン式の第1号は高さが3倍のスカイラーヴィル・ダム (Schuylerville, 1904年、堤高9m) となる⁴⁶⁾。同形式のダムで世界最高の堤体をもつものは、アルゼンチンのエスカバ・ダム (Escaba, 1948年、堤高83m) である⁴⁾。

(2) マルチプルアーチ

一方のRCマルチプルアーチダムは、先述のイーストウッドが“安さ”を追求した結果、材料費を節約できる最善の形態として誕生した。1907年の恐慌の陰でRCマルチプルアーチダムの第1号はヒューム湖ダム (Hume Lake, 1909年、堤高19.5m) となったが⁴⁶⁾、このダムのコンクリート使用量は普通の重力ダムの10分の1で済み経済性が立証された⁴⁷⁾。イースト

ウッドのダムの特徴、すなわち、選択の要件はこの“安さ”であった。たとえば、マウンテン・デル・ダム (Mountain Dell, 1917年、当初堤高33.5m)⁴⁸⁾の設計コンペでは、アンバーセン式の20万ドル以上に対し、イーストウッドの設計は14万ドル以下となっていて⁴⁸⁾、RCマルチプルアーチダムが最も安価な選択肢であったことが伺われる (アンバーセン式に比べてバットレス間隔を広くとれるのがその理由)。ただし、この“安さ”が生まれるためアーチ構造は極限まで薄くなっており、ナヴィエ (Claude Louis Marie Henri Navier, 1785-1836) の「円筒公式 (cylindrical formula)」のような単純なモデルで計算することにイーストウッドは常にためらいを感じていた⁴⁹⁾。そこで彼は2次応力の影響を減らすべく、深いアーチ、3ヒンジアーチ (マウンテン・デル・ダムもこの一例⁴⁸⁾) などいろいろと試行するが、最後は浅い固定アーチに落ち着いた⁵⁰⁾。

RCマルチプルアーチダムはこのように当時の力学では未解決の問題を含んでいたため、提案者のイーストウッドだけでなく、いろいろなダム技術者が独自の提案を重ね、改良が加えられていった。例えば、ホッジス・ダム (Hodges, 1918年、堤高41m) では⁵¹⁾、アーチダムの設計者として知られるヨルゲンセン (Lars R. Jorgensen, 1876-1938) やネーツリ (Fred A. Noetzli, 1887-1933) が設計に加わった⁵¹⁾。マルチプルアーチと言うよりはマルチプルドームと言うべきクーリッジ・ダム (Coolidge, 1928年、堤高75.9m) は⁵²⁾、前出のネーツリとオルバーグ (C. R. Olberg) の設計である⁵³⁾。なお、3次元曲面のドーム型アーチを初めてダムに採用したのはウィリアム (Gardener S. Williams, 1866-1931) であった⁵⁴⁾。

(3) コンティギュアス・タイプ

近代的バットレスダムは、20世紀の前半にもう一度新たな発展を見せた。すなわち、アンバーセン式の遮水スラブと薄肉バットレスを一体化させて強化させ、耐久性の向上とともにバットレス間隔をマルチプルアーチ並みに広げることを意図して、ネーツリが強化遮水壁タイプを発案したのである⁵⁵⁾。その第1号となったのは、カランサ・ダム (Carranza, 1928年、堤高35m) であった⁵⁶⁾。その後、バットレス先端 (上流側) はスラブと固結されて肥大化し、かつ、バットレス末端 (下流側) も厚みを増して隣接するバットレス同士が接続 (contiguous) されることで、バットレスダムは中空重力 (hollow gravity) ダムへと変容する⁵⁷⁾。すなわち、外観上は重力ダムのように見えても、内部には大きな空間が存在し、上流側の厚い遮水壁と下流側の接続壁を等間隔に配置された内部バットレスで支持するという構造である。コンクリートの使用量が少なく、

揚圧力を回避できるという点ではバットレスダムだが、外見は重力ダムという中間的な存在である。20世紀前半におけるコンティギュアス・バットレスダムの記録は、スイスのディクス・ダム（Dixence, 1935年、堤高87m）である⁸⁷⁾。

3. わが国のバットレスダム

わが国の第二次世界大戦前後のバットレスダムを、それぞれ、表-2、表-3に示す。

わが国のバットレスダムの発達史は、時代によって大きく4つに区分することができる。①最初にアンバーセン式が導入された大正期から、1928（昭和3）年に物部長徳が耐震理論を確立する前までの“黎明期”，②物部の理論によって耐震性を考慮したアンバーセン式が集中的に造られた昭和ひと桁代の“発展期”，③バットレスダムの築造がほとんどなくなった昭和10年代の“衰退期”，④コンティギュアス・タイプや2連のアーチが登場する戦後の“復活期”の4つであり、①～④は、それぞれ、次の(1)～(4)に対応している。

(1) 黎明期

わが国では、1900（明治33）年に最初のコンクリートダムが導入されるまでは、狭山池（大阪、7世紀）⁸⁵⁾や満濃池（香川、8世紀）に代表されるように古代から土堰堤方式でダムを築いてきた⁸⁶⁾。底幅の広い土堰堤では、石を積み上げて築く薄肉のダムと違って、ダムの安全性を保証するためにバットレスを入れる必要がなかった。従って、わが国におけるバットレスダムの歴史は、RCを用いるアンバーセン式ダムが導入される大正期から突如始まることになる。

a) 手井ダム

わが国最初のバットレスダムは、1923（大正12）年完成の笹流ダム（函館市水道局）とされている。しかし、“わが国”を当時の“日本の領土”にまで拡張すれば、笹流ダムより古いバットレスダムが存在する。それは南樺太の手井ダムで、設計者は不明だが、樺太工業（株）によって1918（大正7）年に築造されたものである⁸⁷⁾。本論文の目的である“技術史”とは外れるが、存在がほとんど知られていないダムなので、背景を少し紹介しておこう。1905（明治38）年の日露講和条約（ポーツマス条約）により日本の領土となった南樺太では、豊富な森林資源を目標に幾つかの製紙会社が設立されていた⁸⁸⁾。1913（大正2）年に設立された樺太工業もその一つで、創業者・大川平三郎（1862-1936）が自ら現地踏査を行ってダム地点を選定し、第二工場となる真岡（現・ホルムスク, Kholmusk）

への給水用に手井ダムを築造させたと言われている⁸⁷⁾。

手井ダムに関する唯一の手がかりといえる『大川平三郎君伝』⁸⁷⁾には、それがアンバーセン式であったことを含め、形式選択の理由などは一切述べられていない。樺太工業の社長であった大川平三郎は、製紙技術の習得・視察のために何度も欧米へ渡航しており、どこかでアンバーセン式のことを知ったのであろう。ライバルの王子製紙との競争下にあったことを考慮すれば、短期間に低コストで設備を造り、生産を軌道に乗せるためには、アンバーセン式は有利な選択だったことは疑いないと思われるが、史料的な裏付けは得られていない。

手井ダムの存在が、日本のダム史上から忘れ去られたのは、それが電力会社や水道施設と違い樺太工業という一私企業によって築造されたこと（樺太工業は、その後、王子製紙と合併して会社そのものが消滅）、敗戦により南樺太がソ連領となったことによるところが大きいと思われる。著者らがそれを“発見”したのも、1928（昭和3）年12月発行の『土木建築工事書報』⁶⁹⁾の写真に偶然気が付いたからである。従って、手井ダムが、その後の日本のアンバーセン式ダムにどのような影響を与えたのかは全く不明である。

b) 笹流ダム

実質的なわが国第1号のバットレスダムである笹流ダムは、1919（大正8）年8月に東京市の水道技師から招聘されて函館市水道拡張事務所長になった小野基樹（1886-1976）により設計・建設された⁸⁹⁾。そして、アンバーセン式を普及させる目的で、『土木學會誌』（1924年）に「函館市水道貯水池に築造せる中空式鉄筋混泥土堰堤」⁶¹⁾と題する報告を執筆し、この形式のダムが他と比較にならないほど工費が安く、工期も短いため、アメリカで好評を博していることを紹介している⁹⁰⁾。この2点（工費、工期）こそが、笹流ダムでアンバーセン式が採択された理由であった⁹¹⁾。この点に関して詳しい分析は、4(1・2)に示す。

なお、この報告の冒頭、「鉄筋コンクリート造のホロー・ダムの本邦内地に於ける最初の試みにして」⁹²⁾と述べているが、この文面だけでは小野が手井ダムのことを知っていたのかどうかまではわからない。

c) 現存しない2つのダム

笹流ダム完成後も、物部理論の登場によって耐震安全性の問題が解決されるまでは、バットレスダムに対する評価は教条的なものであったと言える（笹流ダムの成功が反映されなかった）。例えば、ダム完成の5年後に刊行された『水利と土木』の「水利発電事業者に望む」（1928年）でも、バットレスダムを「基礎地盤の支持力不足する場合……工費及工程を節約し得……堰堤内部を容易に検査……唯、之を耐震構造と爲すこ

表-2 戦前のバットレストダム (外地を含む)

| ダム名 | 竣工年 | 形式 | 所在地 | 当初の所管 | 現在の所管 | 堤高(m) H | 堤長(m) L | L/H | 扶壁厚 (cm) | 支間長 (m) | 遮水壁厚 (cm) | 径間数 | コンクリート の容積(m ³) | 設計者 | 工事主任者 | 出典 |
|-------------|------|-------|------------|-----------------|---------------|------------|------------|-------|-------------|------------|-------------------------|-----|--------------------------------|---------------|---------------|----------|
| 手井 | 1918 | FS(A) | サハリン | 樺太工業 | | 21.21 | 145.44 | 6.86 | | | | | | | | 60 |
| 笹流 | 1923 | FS(A) | 北海道 | 函館市水道課 | 函館市水道局 | 21.58 | 199.39 | 9.24 | 30~121 | 5.45 | 30~117 | 24 | 15,800 | 小野基樹 | 小野基樹 | 61,62 |
| 高野山 | 1924 | FS(A) | 新潟 | 信越電力 | | 20.51 | 124.06 | 6.05 | 33~64 | 5.45 | 42~93 | 20 | 6,305 | 山口直樹 | 大島満一 | 63,64 |
| 神戸 | 1927 | MA | 島根 | 鏡川郡神西村 他六村組合 | 出雲市 | 1.80 | 94.55 | 52.53 | | 9.09 | | 8 | | 木村邦次 | | 65,66 |
| 小瀬 | 1927 | FS(A) | 長野 | 東信電気 | | 15.15 | 94.54 | 6.24 | 30~91 | 3.64 | 30~76 | 26 | | | 鈴木長治 | 67,68 |
| 恩原 | 1928 | FS(A) | 岡山 | 中国合同電気 | 中国電力 | 23.03 | 93.63 | 4.07 | 41~94 | 6.06 | 67~149 | 12 | 25,680 | 物部長穂 | 吉山 盛 | 69 |
| 真立 | 1929 | FS(A) | 富山 | 日本海電気 | 北陸電力 | 21.21 | 61.21 | 2.89 | 42~85 | 6.06 | 46~103 | 7 | 3,508 | 物部長穂 | | 70,71 |
| 豊登池 | 1929 | MA | 香川 | 大園耕地 整理組合 | 豊登池 土地改良区 | 30.30 | 145.40 | 4.80 | 484.8 | 14.54 | 181.8 212.1 242.4 | 5 | 21,201 | 木村真五郎 | 小谷龟市 | 72,73 |
| 真川 | 1930 | FS(A) | 富山 | 富山県電気局 | 北陸電力 | 16.97 | 104.00 | 6.13 | 41~72 | 6.13 | 39~96 | 12 | 8,080 | 物部長穂 | 松田文次 | 74,75 |
| 丸沼 | 1931 | FS(A) | 群馬 | 上毛電気 | 東京電力 | 32.88 | 88.23 | 2.68 | 50~120 | 6.06 | 55~88 | 11 | 12,300 | 物部長穂, 岩本常次 | 浅見重三, 岩本常次 | 76,77,78 |
| 三滝 | 1937 | FS(A) | 鳥取 | 山陽水力電気 | 中国電力 | 25.00 | 82.50 | 3.30 | 40~80 | 6.00 | 47~137 | 9 | 8,520 | | 宮川正雄 | 79 |
| 坂浦 1940頃 | | FS | 東京 (父島) | 海軍 | 小笠原村 建設水道課 | 約 10 | 25.20 | 2.52 | 50~100 | | 50~86 | 4 | | | | 80,81 |

表-3 戦後のバットレストダム (後からバットレストを付加したものを含む)

| ダム名 | 竣工年 | 形式 | 所在地 | ダム事業者 | 堤高(m) | 堤長(m) | 出典 |
|------|-------|------|-----|---------|-------|-------|----|
| 柿原第二 | 1951* | G(B) | 愛媛 | 愛媛県 | 15.0 | 56.0 | 82 |
| 井川 | 1957 | HG | 静岡 | 中部電力 | 103.6 | 243.0 | 83 |
| 大森川 | 1959 | HG | 高知 | 四国電力 | 73.2 | 191.0 | 83 |
| 木地山 | 1960 | HG | 山形 | 山形県 | 46.0 | 168.2 | 83 |
| 大倉 | 1961 | MA | 宮城 | 東北地方建設局 | 82.0 | 323.0 | 83 |
| 畑薙第二 | 1961 | HG | 静岡 | 中部電力 | 69.0 | 171.0 | 83 |
| 諸塚 | 1961 | HG | 宮崎 | 九州電力 | 59.0 | 149.5 | 83 |
| 畑薙第一 | 1962 | HG | 静岡 | 中部電力 | 125.0 | 275.0 | 83 |
| 穴内川 | 1963 | HG | 高知 | 四国電力 | 66.6 | 251.9 | 83 |
| 横山 | 1964 | HG | 岐阜 | 中部地方建設局 | 80.8 | 220.0 | 83 |
| 河本 | 1964 | HG | 岡山 | 岡山県 | 60.0 | 258.6 | 83 |
| 金山 | 1967 | HG | 北海道 | 北海道開発局 | 57.3 | 288.5 | 83 |
| 高根第二 | 1968 | HG | 岐阜 | 中部電力 | 69.0 | 232.0 | 83 |
| 蔵王 | 1970 | HG | 山形 | 山形県 | 66.0 | 273.8 | 83 |
| 内の倉 | 1972 | HG | 新潟 | 北陸農政局 | 82.5 | 166.0 | 83 |

※ 各種数値は、竣工当時のもの。
 ※ 影付きの行は、現存しないダム。
 ※ 形式は以下のとおり(表-2、表-3 共通)。
 FS: フラットスラブ
 FS(A): フラットスラブ (アンバーセン式)
 MA: マルティプルアーチ
 HG: 中空重力ダム (コンティキュアス式)
 G(B): 重力ダム (バットレス付加)
 ※ “出典”の番号は、参考文献の番号と対応している。
 ※ 空欄は、“不明”を意味する。

* 柿原第二ダム(表-3)にバットレスが付加されたのは昭和30年代⁸⁴⁾。

とに於て尚相當研究の餘地を存し¹³⁾と記述するに留めている。

笹流ダムの翌年、信越電力・中津川第一発電所の調整池として高野山ダム（新潟）が完成する（1924年9月）。高野山ダムの着工時期（1923年4月）は、笹流ダムの完成時期（1923年12月）より古いので、笹流ダムの影響を受けて計画・建設されたものではないようにも思われるが、具体的な証拠はない。高野山ダムの設計・施工を担当したのは、1920年に信越電力に入社した山口直樹（1895-1973）で、「土木技術の職人的才能の持主」⁶⁴⁾と評される程の技術者であった。しかし、残念ながら山口は、小野のように形式選択から設計・工事に至るまでの経緯を記していない。また、戦後に著した技術参考書『発電水力実務要覧』⁴¹⁾や『土木工事管理・見積・仕様・技術基準と実例』⁹³⁾でも、高野山ダムについて何も述べていない。なお、1971年下流側に新フィルダムが完成し、旧バットレスダムは廃止された。

黎明期の最後に、もう一つ、現存していないバットレスダムが造られた（1927年10月）。東信電気・小諸発電所の第一調整池、小諸ダム（長野）である。小諸ダムは、完成して1年も経たない1928年8月29日に崩壊し、死者5名、流失家屋5戸（後年の東京電力の資料によると死者7名、流失家屋9戸⁹⁴⁾）の被害を発生させた⁹⁵⁾。原因は地盤の火山灰層によるもので、構造上、施工上の問題はなかったとされているが⁹⁵⁾、心理的影響は大きかったのではないかと（5(1)参照）。

なお、この時期に造られた小規模堰堤のなかに、“構造的にはバットレスダムではないが、バットレスダムのように見える”ものがある。それは1910（明治43）年、王子製紙によって造られた千歳第一取水堰堤（北海道）で、バットレス状に見えるものには力学的な機能がなく、ゲートを支えるピア（厚さ1.2m）が、堤高が低いために露出していた。

(2) 発展期

a) 物部長穂の「耐震池壁理論」

わが国にバットレスダムが導入される以前から、その耐震性に対する不安が『土木學會誌』等で指摘されていた⁶⁾。そして、笹流ダムが竣工する前に起こった関東大震災（1923年9月）によって、それは一層強いものとなった⁹⁶⁾。そこで、すでに地震力を考慮した重力ダムの設計理論を確立していた物部長穂は、1928年、わが国に適したバットレスダムの設計理論を「支壁式鉄筋混凝土堰堤の耐震法に就て」¹⁵⁾として発表する。そしてその中で、彼は「在來の鐵筋混凝土堰堤は、大地震の災厄を経験せざる歐米諸國に於て發達せるものにして、其の設計法を視るも何等耐震上の考慮を爲さ

ず……我國の如き地震國に於ては、耐震上特別の改良を施さざるに於ては其の築造は極めて危険なりと云はざるべからず」⁹⁷⁾と語っている。

アンバーセン式ダムは、堤軸に直角な方向、すなわち控え壁と同方向の力に対しては大きな抵抗力を有しているが、堤軸に平行な力には弱い。それは、細い水平材はもっぱら水圧による控え壁のわん曲を防ぐ目的で挿入されているため、もし地震力によって控え壁に曲げモーメントが発生すると、それを支えきれなくなる可能性があるからである。物部はこのダム軸方向の地震力に対抗する手段として2つを挙げている⁹⁷⁾。すなわち、(a)「建築構造の如く構造物の各部分に作用する水平力を構造主體の内力として直下の地盤に傳達する」方法、および、(b)「支壁を連続して特別の水平支材を設け構造主體に作用する水平力を水平に兩岸の岩盤に傳達する」方法の2つである。

このうち(a)については、水平材を床版状に補強する方法が考えられるが、そうすると経済性が失われるばかりでなく、控え壁上部の変形が過大となって継ぎ手から漏水や破損が発生する可能性があるため現実的でないとしている⁹⁷⁾。

物部は、現実的な解決策として(b)を具体化するために、「堤長に平行なる水平分力を水平支材に依りて兩岸に傳達する方法」⁹⁸⁾を提案し、水平方向の地震力は水平材によって一直線に兩岸に伝達させる、水平材は確実に兩岸に固定する、控え壁の下部は微小な角変位が可能なヒンジ構造とする、などの対策を推奨した⁹⁸⁾。

すなわち、物部の理論では水平材が耐震性向上の要と考えられたため、すべての水平材が左岸側から右岸側まで1本の連続した線になっている必要があったし、従来以上の太さも要求されるようになった。表-4は、物部以前と以後で水平材にどの程度の変化が生じたかを分析するための表である。右から3番目の欄の「A/H」は、水平材の総断面積（m²）と堤高（m）の比を求めたもので、堤体の高さによる水平材の変動を少しでも補正しようとして設けたパラメーターである（数値はあくまで相対的なもので、それ自身に明確な意味があるわけではない）。この「A/H」とその右にある「水平材1本当たりの平均断面積」の数値をダムごとと比較することにより、耐震設計法の影響をつかむことができる。すなわち、小諸以前と恩原以後とを比べると（表-4中、太い実線で上下に分けてある）、後者の方が、「A/H」の数値にして2~3倍、「水平材1本当たりの平均断面積」にして20~90%程度大きくなっている。

また、控え壁の下部をヒンジ構造とする件に関しては、図-2のように基部で主鉄筋をX字型に交差させ、左右から「ヒンジ・プレート」を挟み込むことで「壁

表-4 アンバーセン式ダムの水平材の諸元

| ダム名 | 竣工年 | <中間水平材> 高さ×幅@本数 (尺, 三滝のみ cm) | <頂部水平材> 高さ×幅@本数 (同左) | 合計 本数 | 総断面積 (m ²) A | A/H | 1本当たりの 平均断面積 (cm ²) | 出典 |
|-----|------|---|----------------------------|----------|--------------------------------|-------|---------------------------------------|-----|
| 笹流 | 1923 | 2.4×1.6@6 | なし | 6 | 2.16 | 0.100 | 35.3 | 61 |
| 高野山 | 1924 | 2×2@4, 2.5×2@2 | 1×1@1 | 7 | 2.48 | 0.121 | 35.4 | 63 |
| 小諸 | 1927 | 2×2@6 | なし | 6 | 2.20 | 0.145 | 36.7 | 99 |
| 恩原 | 1928 | 3×2.5@5, 3×2@9 | 2×1.5@1, 2×1@1 | 16 | 8.86 | 0.385 | 55.4 | 100 |
| 真立 | 1929 | 3×2.5@5, 3×2@4 | 2×1.5@2 | 11 | 6.20 | 0.292 | 56.3 | 71 |
| 真川 | 1930 | 2.5×2.5@3, 2.5×2@6 | 2×1.6@1, 2×1@1 | 11 | 4.95 | 0.292 | 45.0 | 75 |
| 丸沼 | 1931 | 3×3@5, 3×2.5@3, 3×2@6 | なし | 14 | 9.50 | 0.289 | 67.9 | 101 |
| 三滝 | 1937 | 70×100@2, 70×90@1, 70×80@1, 70×60@10 | 60×60@2 | 16 | 7.51 | 0.300 | 46.9 | 102 |

(参考文献 61), 63), 71), 75), 99), 100), 101), 102) の図面などをもとに著者作成)

※ 寸法はすべて、竣工時のもの。

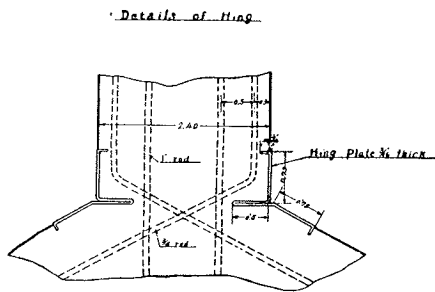


図-2 物部式のヒンジ構造(真川ダム)
(参考文献 75)「附圖第十三」の部分

底に於て微小の角變位を爲し得る」⁹⁸⁾ようにした。

さて、物部の「耐震池壁理論」の前後で表-4 のように構造が明確な変化を見せているということは、彼の理論が全面的に受け入れられた結果とみることができる。物部理論を適用した第1号のアンバーセン式ダムとなった恩原ダムの工事報告には、「工学博士物部長穂氏の研究に依つて、耐震池壁(博士は之を斯う稱してある……)が考案されたので、此の理想的なホローダムを、耐震的に築造する事が可能になり、斯界に於ける多年の宿望が達せられ、容易に實用化し得る事となつた」¹⁰³⁾と貢献度の大きさが明言されている。

b) 恩原以降の一群のダム

恩原ダム(岡山, 1928年)に始まり、真立(富山, 1929年)、真川(富山, 1930年)、丸沼(群馬, 1931年)と計4基のダムが立て続けに物部の設計あるいは設計指導によって建設されていった。恩原ダムの完成(1928年5月)は物部理論の発表(1928年8月)より以前だが、物部長穂の署名入りの手書き設計書「Design of Onbara Reinforced Concrete Dam」¹⁰⁰⁾(1927年7月)

が存在することから、恩原ダムが100%物部の設計であったことがわかる。真立、真川の両ダムも、着工時期が1927年代のため、設計に物部の関与があったと推測できる。4基目の丸沼ダムの設計者は、物部の弟子で、1927年に上毛電気に入社した岩本常次(1903-1993)であり⁶⁴⁾、「物部」パトレスダムの典型と言ってもよい。丸沼ダムはわが国のパトレスダムで最も背が高い(堤高32.88m)ことでも知られている。なお、丸沼ダムを建設した上毛電気の社長は、わが国で初めてパトレスダムを手がけた樺太工業の社長・大川平三郎であり¹⁰⁴⁾、そこに何らかの因果関係を読み取ることができれば「歴史のロマン」を感じられるが、実際には何の証拠も残っていない。

c) 三滝ダム

丸沼ダムの着工(1928年)以降7年間、アンバーセン式の着工は見合わされた。後述するように、これが意図的な原因に基づいていた可能性はあるが、アンバーセン式に固有の地形的・気象的要件に合致する事例がなかっただけなのかもしれない。いずれにせよ、発展期最後の事例は、1935年着工、1937年完成の三滝ダム(鳥取)となった。物部理論が採用されていることは設計式から明白であるが、設計者は不明である(工事責任者・宮川正雄が設計を担当した可能性もある)。

d) 神戸堰

アンバーセン式が水道と電力分野の技術者の手で推進されていったのに対し、この時代に登場したもう一つのパトレスダムであるマルチプルアーチは農業土木の技術者によって主導された。その第1号となったのは、堤高わずか1.8mとごく小規模ではあるが、落水の美しさでAランクの土木遺産に認定されている神戸堰(農業用取水堰、島根, 1927年)である¹⁰⁵⁾。

神戸堰は、建設地点の表層は礫混じりの硬質地盤だ

ったが、1mほど掘削したところで粘土の混ざった軟弱地盤となったため、アーチ型の RC 堰堤としたと記録されている⁶⁵⁾。その後の影響は不明だが、設計を指導した牧隆泰（農林省技師兼東大講師）は、その後農業土木の分野でアンバーセン式の紹介者となっていく²¹⁾。

e) 豊稔池ダム

戦前のマルチプルアーチとして有名な豊稔池ダム（香川、1929年）は、当初、重力ダムとして計画されたが地盤の都合で設計変更され結果的にマルチプルアーチとなった（4(6)参照）。同じバットレスでもアンバーセン式とならなかった理由は、恐らく、豊稔池ダムの“粗石コンクリート造の厚肉アーチ”という構造にあるのではないと思われる。すなわち、①当初予定されていた重力ダムは、当時の技術では“粗石コンクリート”構造であったこと、②顧問として招かれていた佐野藤次郎（1869-1929）は“粗石コンクリート”造の水道用重力ダムの権威であったことから、同じ材料のまま直線ダムから多重アーチダムに移行したと考えるのが最も自然である。豊稔池ダムは、下流側の表層には整形されたコンクリートブロックが使われているが¹⁰⁶⁾、上流側は佐野の手になる布引、鳥原ダムと同様の間知石布積で用いられており、両者の類似性は高い。『豊稔池の築造—豊稔池改修事業竣工記念誌』では、マルチプルアーチの採用は佐野の経験と学識によるところが大きいとしているが¹⁰⁷⁾、著者らも、上記の理由でそれが正鵠を得た解釈だと思っている。なお、ダムの設計に関与した人物として、他に農林省技師の杉浦翠（指導）、香川県技師の木村真五郎（設計）の名前が残っている⁷³⁾。

豊稔池ダム完成後のマルチプルアーチは、特に農業土木界において好評であった。1932（昭和7）年の『農業土木研究』に発表された「多拱式堰堤の理論と設計」では、「現今築造される石造高堰堤の中で堰堤の各部が最も有効に働き且つ最も経済的であるのは先づ此の多拱式堰堤であると断定しても差支へない」²³⁾と絶賛されている。

なお、実現はしなかったが、完成していたらわが国初のマルチプルアーチとなっていたダムが外地にあった。日本統治下の台湾では、1919（大正8）年に日月潭（湖）の水位を嵩上げて発電用水にしようとする大業が始まったが¹⁰⁸⁾、その際に縮切用に計画されたのがマルチプルアーチ形式の水社ダムであった。しかし、堤高が38m弱から30.3mに縮小されたことで、材料調達のため有利な土堰堤に変更された¹⁰⁹⁾。

(3) 衰退期

1936（昭和11）年、ワシントン（Washington D.C.）で開催された第2回国際大ダム会議で、凍害によるコ

ンクリートダムの被害状況がノルウェーから報告された¹¹⁰⁾。この会議に出席した小野基樹はその内容に衝撃を受け、函館市に笹流ダムの調査を指示する。その結果、笹流ダムでも凍害が進行していることが確認された。この間の事情については前報²⁾でも触れたが、結果的に、当時建設中だった三滝ダムを最後にわが国でアンバーセン式のダムが造られなくなったことから、何らかの影響があったものと推測される。

なお、アンバーセン式でないフラットスラブの最後は、海軍が小笠原諸島父島に築いた境浦ダム（東京、1940年頃）である⁸⁰⁾。厚さ50~86cm、高さ5.2mの遮水壁を厚さ50~100cmのバットレス3基で支える構造であった（堤高は約10mだが下半分は重力ダム）⁸¹⁾。

(4) 復活期

本論文の目的は、近代（~昭和戦前）のバットレスダムの技術を論じることにあるので、戦後の状況は簡単に紹介するに留めよう。

フラットスラブは一例、重力ダムをバットレスで補強したタイプが知られている。宇和島水道他に使われている柿原第二ダム（愛媛）がそれで、当初、堤高25mの重力ダムとして計画されていたものを、まず、地盤不良のため堤高15mに縮小して完成（1951年）⁸²⁾。その後、昭和30年代になって、補強のためにバットレスが付加されたものである⁸⁴⁾。

マルチプルアーチも一例のみ存在する。多目的ダムとして建設省によって造られた大倉ダム（宮城、1961年）である。スパン100mを超す2連のアーチダムを、底幅が50m以上もある巨大な中央バットレスで支持するという形態は、マルチプルアーチというよりは、単一のアーチダムを2つ並べたという感じである（設計の上でも、2つのアーチは独立で、中央バットレスは不動の“固定端”として取り扱われている）¹¹¹⁾。

近代的バットレスダムの3番目の形態であるコンティギュアス・タイプがわが国に登場したのもこの時期である。わが国での呼称は、前述のように「中空重力ダム」という表現が一般的だが、翻訳文では例外的に「円頭型扶壁ダム」「マッシュ・ヘッド・バットレスダム」と表現されることもあった¹¹²⁾。なぜ“中空”という表現が使われたかについては、わが国で初めて井川ダムにこの形式を導入した中部電力の報告書に「従来わが国には殆んど紹介されていなかったホロー・グラビティー」¹¹³⁾という記述があることからすれば、アンバーセン式を指すときに時折使われていた「中空式」という戦前の語法がそのまま転嫁したとは考えにくい。すなわち、アンバーセン式の中空ダムを造っているという認識はなく、むしろ、重力ダムのコアを中空にした新機軸のダムを目指していたと考えるのが普通であ

る(ここでは, gravity dam が solid gravity と hollow gravity に二分される). 井川ダムは, コンティギュアス・ダム(前出)の記念碑的存在であるディクサンス・ダムに習って, 下部のバットレス開口部を“Fillet”で塞いだり, ダム底面(空洞の下面)に揚水圧を逃がすための穴まで設けられている¹¹⁴⁾. そういう意味では典型的なコンティギュアス・ダムなのだが, 当時の技術者には新型のバットレスダムを造っているという認識はなかったようである. 日本でどうしてこのような“ズレ”が生じてしまったのかはよくわからない. ここでは, 1957~72年の間に13基の「中空重力ダム」が造られた, と記すに留めよう.

4. バットレスダムの採択要因

3章では, 個々のダムについて, 形式選択の理由を含めて紹介してきた. また, 1章の末尾に掲載した表-1は, わが国でバットレスダムがどのように受け止められていたかを示すものであった. 本章ではそれらを合体し, バットレスダムという形式が選択されるに至った理由を, プラス要因としての「工費の安さ」「工期の短さ」「資材運搬の容易さ」「転倒に対する安定性の高さ」「操作・点検の容易さ」の5点と, 「地盤の適合性」「地形上の適合性」「調整池ダム・水道用ダムへの適合性」という3つの適合性要因から分析する.

(1) 工費の安さ

バットレスダムが採用される最大の要因は, 世界でも日本でも工費の安さであった. 工費を低く抑えられる理由は, バットレスダムのコンクリート打設量が少ない(一般に1/3~2/3程度と言われる)からである. しかし, この状況は, 施工の困難さを打ち消せるだけの「安価な労働力」が期待できなくなった段階で消滅する. ちなみに, 工費は, わが国の黎明期と発展期(3(1)・2)においては重要な要因であったが, 衰退期(3(3))では重要性を失う. 表-1によれば, 1934年からマイナス評価が始まっていることがわかる.

現在までのところ, 工費が形式選択の理由になったことが明白なのは, 笹流ダム, 神戸堰, 豊稔池ダムの3つである.

まず笹流ダムについてであるが, 設計者である小野は, 後年, 建設を振り返って「財政上の理由から財源の余裕にも乏しく, 最低限度の工費をもって貯水池を築造しなければならない破目になった」¹¹⁵⁾と述懐している. 小野は, 笹流ダムの形式選定にあたり, アンバーセン式ダム, 重力ダム, 土堰堤の三者について, 建設費を比較・検討している⁹¹⁾. すなわち, 堤高83.5尺

(25.3m)の重力ダムを, 大正期前半の主流設計法の1つであったウェグマン(Wegmann)の方法(Practical Profile No.2型)で計算するとき, 中央部の1間(1.818m)当たりのコンクリート量をアンバーセン式ダムの「約2.1倍に該当す」⁹¹⁾とみなしている. そして, 鉄筋や型枠工などによる増加分を考慮しても, 重力ダムはアンバーセン式ダムの「約6割増工費を要する」⁹¹⁾と結論付けている(換算すれば, アンバーセン式ダムの工費は重力ダムの60~65%). ただ, この数値には, アンバーセン式を志向していた小野の過大な期待が反映されているかもしれない. というのは, ほぼ同時期に物部長穂が「工費も著しく廉にして, 重力式の70%乃至80%を超えず」¹¹⁶⁾と述べているのが, 当時の標準的な見方であったと思われるからである. また, 土堰堤との比較では, 土堰堤がアンバーセン式ダムに対し, 「数量に於て13.0倍単價に於ては1/8.6なるを以て, 結局工費に於て概算約5割増と云ふ計算に到達するなり」⁹¹⁾と記している(換算すれば, アンバーセン式ダムの工費は土堰堤の65~70%).

2番目の神戸堰については, 当時の輯覧に「極度ノ工費節約」⁶⁵⁾と地盤の悪さが形式選択の理由であったと明記されている. また, 3番目の豊稔池ダムの場合, 辻論文¹¹⁷⁾によれば, 工費が20%削減できるという理由で重力ダムからマルチプルアーチに変更された. とここで, 一般論としてのマルチプルアーチの経済的優位性については, 当時の農業土木関連の技術雑誌に, 「多くの場合石造高堰堤より経済的である. 乃ち此種の堰堤は同一断面位置に築造せられたる標準断面の重力式堰堤に要する混凝土の25~50%位で済む」と書かれている²³⁾.

以上3つのダムについては「工費の安さ」が形式選択の要因となったことが確定しているが, 他のダムではどうだったのであろう. 表-5はバットレスダムの工費を示したものである. 表中の「C/HL」は, 工費と堤体の大きさ(堤高×堤長)の比を求めたもので,

表-5 バットレスダムの工費

| ダム名 | 竣工年 | 工費(円) C | C/HL | 出典 |
|-----|------|------------|------|-----|
| 手井 | 1918 | *500,000 | 162 | 60 |
| 笹流 | 1923 | 629,928 | 146 | 118 |
| 高野山 | 1924 | 438,979 | 173 | 63 |
| 神戸 | 1927 | 44,339 | 261 | 65 |
| 小諸 | 1927 | *500,000 | 349 | 67 |
| 豊稔池 | 1929 | 363,778 | 83 | 119 |
| 丸沼 | 1931 | *500,000 | 172 | 120 |
| 三滝 | 1937 | **281,000 | 136 | 121 |

(“出典”の参考文献をもとに著者作成)

* は工費の概算を, ** は見積額を示す.

堤体の規模による工費の変動を補正する目的で導入したパラメーターである（数値はあくまで相対的なもので、それ自身に明確な意味があるわけではない）。この「C/HL」の数値をダムごとに比較することで、工費が“安価”であったかどうかを大まかに判定できるであろう。なお、同時期の重力ダムの「C/HL」の最頻値は150~250程度であった¹²²⁾。結果として、工費が判明しているダム8基の中で、手井、笹流、高野山、豊稔池、丸沼、三滝の6基が相対的に“安価”であると判定できた。記録上“安価”となっていた神戸堰の数値が高いのは、神戸堰が堤高1.8mの低堰堤であり、単純な比較ができないためであろう。また、小諸ダムについては同サイズの重力ダムに比べて明らかに“高価”であり、他の要因でバットレス形式が採択されたことをうかがわせている。

(2) 工期の短さ

バットレスダムは、(1)と同様に、コンクリート打設量が少ないため、工期を大幅に短縮することができる。表-1によれば「工費の安さ」と違ってマイナス評価こそないが、1937以降「工期の短さ」での評価が途絶えていることから、昭和10年代の衰退期(3(3))以降は工期面がメリットとして認識されなくなった可能性を示唆している。

現時点で、「工期の短さ」が形式選択の理由として明記されているのは笹流ダム1基である。笹流ダムでは、設計者の小野が、工期を短くすべき理由として、函館市の水道が「給水状態も極端に窮乏し、二十四時間中わずかに十二時間の給水の状態に陥¹¹⁵⁾る」といった状況にあったと述べている。こうした緊急事態に加え、「1箇年の内約半歳は積雪に埋もれ冬眠の景況に在り……彼地3箇年の工期は内地開発の1箇年程に匹敵するものと思はる」という気象条件もあり¹²³⁾、短期間で施工可能なアンバーセン式が採択された。

これ以外のダムについて、「工期の短さ」が形式選択の理由であったとは明記されていないが、施工可能期間が短い寒冷地や多雪地帯では“プラス要因”とみなされていたであろうことは想像に難くない。恩原ダムの場合、アンバーセン式を採択した結果として、「昭和2年5月に起工し、寒中には混凝土の工事を休止したにも拘はらず、3年5月には竣功してしまつた。重力堰堤に較べて工期が大部節約された¹⁰³⁾」とプラスの評価が下されている。積雪地帯のダムはいずれも工期が重要課題であり、現に、真川ダムでは12月から翌年の5月まで積雪によりダム工事ができなかつたし¹²⁴⁾、三滝ダムでも12月から4月までは積雪により工事がほとんどできず、実質的には1936年7~12月で全体の55%、残りを翌年の4~7月末までに完成させている¹²⁵⁾。表

表-6 バットレスダムの着工・竣工年月と工期

| ダム名 | 着工年月 | 竣工年月 | 工期 (月数) | 実質の工期 (月数) | 出典 |
|-----|---------|---------|------------|---------------|--------|
| 笹流 | 1921.12 | 1923.12 | 25 | 12~13 | 62,123 |
| 高野山 | 1923.4 | 1924.9 | 18 | 12前後? | 63,126 |
| 神戸 | 1924.11 | 1927.6 | 8 | 8? | 65 |
| 小諸 | 1926.3 | 1927.10 | 20 | 12~14? | 127 |
| 恩原 | 1927.5 | 1928.5 | 13 | 10前後 | 103 |
| 真立 | 1927.9 | 1929.4 | 20 | 10前後? | 70 |
| 豊稔池 | 1926.2 | 1929.12 | 47 | 47 | 72 |
| 真川 | 1927.6 | 1930.1 | 32 | 18 | 74,124 |
| 丸沼 | 1928.9 | 1931.10 | 36 | 20前後? | 120 |
| 三滝 | 1935.12 | 1937.7 | 20 | 12 | 125 |

(“出典”の参考文献をもとに著者作成)

※“実質の工期”で、“?”は推測値を示す(なお、“?”のないものは参考文献中の記述をもとに算出している)。

-6には、工事報告などをもとにして算出した“実際の工期”を示しているが、寒冷地では全工期の50~60%程度しか施工できていない。

小笠原諸島の境浦ダムは、艦艇に給水する目的で海軍によって築造されたものである⁸⁰⁾。はっきりした経緯は不明だが、太平洋戦争が間近に迫りつつあった時期に砲台や飛行場など軍事施設の建設を急ピッチで進める中、バットレス形式が選択された可能性がある。

(3) 資材運搬の容易さ

重力ダムや土堰堤では、大量の築堤材料を建設現場まで運搬しなくてはならなかったが、総体積が小さくて済むバットレスダムでは運搬の手間を大幅に軽減できた。バットレスダムのこうしたメリットは、大正中期の土木学会講演で、マルチプルアーチについて「材料ノ節約ハ謂フカク一割乃至二割五分ニ及ヒマセウ從テ山間僻地材料運搬ニ費用ヲ要スル地方ニ於テハ經濟トナル」⁷⁾と紹介されたのを嚆矢として、昭和初期に物部が「使用材料少量なるを以て、材料の運搬に不便なる遠隔高地に有利¹¹⁶⁾と指摘するなど、戦前戦後を通じた共通認識となっていたようである。

ただし、資材運搬の簡便さが形式選択の理由として明記されていることが確認できたのは、今までのところ恩原ダムのみである。すなわち、当時の紹介記事に、「殊に山奥のため材料の運搬に不便……重力堰堤に依らず此の新式工法に依つた¹⁰³⁾と記されている。その他、高野山では「インクライン」¹²⁸⁾、真立では「索道」¹²⁹⁾、真川では「捲揚軌道」と「索道」¹³⁰⁾が使われており、資材運搬能力に制約があることから、それがバットレスダムの選択要因になったように見えなくはない。しかし、一方では、建設地点まで鉄道を敷設した笹流ダムでも「工事施工の地たるや草莽生ひ茂れる未開の深

山にして、交通の不便なる」¹²⁾という記述があることから、「資材運搬の容易さ」を形式選択の強い要因と捉える必要はないように思われる。

(4) 転倒に対する安定性の高さ

アンバーセン式ダムでは遮水壁の勾配が45度前後(わが国の事例)となっているが、それにより、「遮水壁上に載っている水の重量が、堤體に對して横に押し倒そうとする水壓作用を緩和して、上から下に押しえつけることにより、かえつて安定度を増すに役立つ」³⁸⁾と考えられていた。また、傾斜していることは、「氷の膨脹力を斜面に添はせて、上方へ働かせ得る」²¹⁾効果も期待でき、氷圧に対しても有利と思われていた。ただ、これらのメリットがアンバーセン式の形式選択の原因となった旨が明確に示されている例は発見できなかった。

もう一点、アンバーセン式ダムの特徴は重力ダムと違って揚圧力がないことにもあった。揚圧力は重力ダムを不安定にする要因だったからである。笹流ダムの設計者・小野は、アンバーセン式の有利さの一つが、「浮力に對し顧慮を要せざる事(但し地盤軟弱の個所にして連続せる床版を基礎工と爲したる場合を除く)」にある¹²⁾、と明確に記している。類似の記述が他のアンバーセン式ダムで見られないのは、下記(6)で示すように、わが国では底部に“床版”を設けることが常態化していたからであろう。

(5) 操作・点検の容易さ

アンバーセン式ダムの長所の一つは“操作性”にあると考えられていた。当時のダム技術書には、「中空なるため……堰堤内部の検査に便なること、諸種の附屬設備を内部より容易に動かし得ること……堰堤内部に通路を作り得ること等の得点あり」⁹⁾、「中空なる爲、完成後に於ても、堰堤内部を容易に検査し得られ、工作物の維持、修繕上甚だ有利なり」¹³⁾のような記述が時折見られる。これらの特徴は重要かもしれないが、それが現実に形式選択の要因となったかどうかは不明である。

(6) 地盤の適合性

バットレスダムは重力ダムに比べて躯体が小さく重量が軽いことから、一般論からいえば、地盤に与える影響も軽減されるはずである。しかし、その成否はダムの底面形状にかかっている。もし、笹流ダムのように、遮水壁と控え壁の部分のみが接地しているとすれば、接地部分に作用する単位面積当たり荷重は重力ダムよりかなり大きくなる。一方、恩原ダムのように、ダム底面が厚い“床版”状になっていれば、接地面積

は広く、地盤に与える影響も重力ダムよりかなり軽減される。表-1の中で、「地盤の適合性」は執筆者による評価が一定していない項目となっているが、それはダムの底面構造によって状況が大きく変わるにもかかわらず、その違いに目を向けることなく“評価”が下されてしまっているからである。以下、2つの例を紹介しよう。「堤體の底幅廣く且之に作用する力の合力は扶壁の中央近くに在つて、荷重を基礎地盤に平等に分布し得る故に、重力堰堤の如く大なる壓力を地盤に及ぼさざること、扶壁は其の厚き小にして揚壓力の影響小なること等の理由から、重力堰堤に必要なが如き強固なる基礎を要しない」²⁴⁾。これは、ダム底部が床版状になっているタイプを念頭においたプラス評価である。「扶壁式堰堤では特に外力の作用が面積の小さい扶壁の基礎に集中する關係上地盤はきわめて堅固なることを要する」⁴⁰⁾。こちらは、ダム底部が床版状になってないタイプを念頭においたマイナス評価である。地盤が形式選択の理由になるようなケースでは、当然前者、すなわち、ダム底部が床版状になっているタイプが対象となる。

地盤が形式選択の理由になったと明確に示されているダムは、今までのところ神戸堰、恩原ダム、真川ダムの3ダムである。神戸堰については、3(2d)で紹介したので省略する。恩原ダムは、「現場は地盤が割合軟弱で堤の支持力に乏し」いため¹⁰⁾アンバーセン式が選ばれた、と紹介されている。実際に設計図を見ても、ダム底面に厚いコンクリートが打たれていることから、接地面積を広くとった上で中空化による重量軽減効果を期待しようとしていたことがわかる。真川ダムでも、「右岸半分は黒雲母片麻岩にして剥離性あり、左岸は火山泥流にして暗青灰色凝灰質にして石目無きも粗鬆にして水を滲透する性あり……火山泥流の深さは少なくとも7,80尺~100尺に及ぶもの、如くなるを以て重力式堰堤築造は不適當と認め物部式耐震構造のホロゲムを採用すること、し」¹³¹⁾と記されている。そして、ダム底面は厚さ60cmの床版状となっている。

豊稔池ダムは“地盤の都合”でバットレスダムに設計変更されたとしたが(3(2e))、その内容は上記の要件とは若干異なるものであった。すなわち、「岩盤の掘鑿工事進捗するに従ひ岩層は漸次緻密の度を加へたが、豫期した如き程度には容易に至らず、こゝに於て掘鑿岩盤の現況に鑑み、揚壓係数を3/4に採つて堰堤断面を改めて計算したところ當初設計の重力型石堰堤に比し築堤材料に於て約5割の増加を要することになり、種々差支あるを以て多拱式に設計が變更された」¹³²⁾とあるように、重力ダムにできないことはなかったが、それだと工費がかさむのでマルチプルアーチにしたとされる。地盤要件が間接的に効いた例と言えよう。

これら以外には、真立ダムでは、ダムの両岸部分が裂け目の多い岩質であったこと¹²⁹⁾、丸沼ダムでは、石英粗面岩で風化の著しい部分があったこと⁷⁶⁾がわかっている。そして、真立ダムでは厚さ 60cm の床版、丸沼ダムでは厚さ平均 3m の基礎工が用いられていることを考えれば、これらのダムで地盤が形式選択に影響を与えていたと類推できる。

ただし、“床版”があるからといって万全なわけではない。5(1)で後述するように、小諸ダムは、地盤の一部が極端に脆弱だったため、厚さ 60cm の RC 床版でも崩壊を喰い止めることはできなかった。

一方、地盤が形式選択の理由にならなかったのが笹流ダムであろう。笹流ダムの建設地点の一軸圧縮強度は最弱部でも 22MPa (かなりの硬岩) だったことから⁶²⁾、ダム底面に床版を有しない構造となっている。このタイプのダムには、他に高野山ダムがある。

(7) 地形上の適合性

バットレスダムが築造された地形として、特にアメリカでは“広く浅い”谷が多い。それは、アンバーセン式にせよマルチプルアーチにせよ、谷が広く浅ければ同一パターンのはり一柱やアーチを多数連結させていだけで簡単に長いダムを造ることができたからであろう。これに対し、V 字形の谷では重力ダムが、特に谷が深くて地盤が強固であれば単独のアーチダムが適していると考えられていた。わが国でも、手井、笹流、高野山などのダムは、堤高約 20m に対して堤長は 100m を超えており、“広く浅い”に対応しているかのように見える。

この“広く浅い”の目安は、堤長と堤高の比「L/H」で換算して 6 以上と言われる¹³³⁾。しかし、わが国のバットレスダムの実績値は、表-2 によれば 12 基中 6 基と半分のみで、薄肉アーチに適性のある 3 以下も 3 基 (真立、丸沼、境浦) ある。このことは、わが国のバットレスダムの多くが地形的な要因から選ばれたものではないことを示している。逆に、L/H 値が 6 を超えたバットレス適地でも重力ダムが造られた例は非常に多い。その好例が L/H=9.3 の鹿瀬ダム (新潟、1928 年) で、ダム地点における最大洪水量 7040.0m³/sec、年平均流量 318.0m³/sec¹³⁴⁾ という巨大な洪水流量をさばくため大型のテンターゲート 20 連が並んでいる。

(8) 調整池ダム・水道用ダムへの適合性

こうした日本特有の“ピーク値の高い流量”は、バットレスダムの普及にとって大きなブレーキとなった。国土面積の差があっても、アメリカでアンバーセン式ダムが 200 基以上造られたのに、わが国では 9 基しか造られなかった背景には、この問題が大きく介在して

表-7 バットレスダム建設地点の流量

| ダム名 | 既往最大洪水量 (m ³ /sec) | 年平均流量 (m ³ /sec) | 出典 |
|-----|----------------------------------|--------------------------------|----|
| 笹流 | (22.0) | 0.7 | 62 |
| 恩原 | 61.8 (70.0) | | 69 |
| 豊稔池 | 77.0 | | 72 |
| 丸沼 | 3.4 | 0.88 | 76 |
| 三滝 | 93.6 (114.0) | 1.22 | 79 |

※ () 内は、計画洪水量を示す。

※ “出典”の番号は、参考文献の番号と対応している。

いたと思われる。

表-7 に、わが国のバットレスダムの建設地点における既往最大洪水量と年平均流量 (いずれも建設当時の数値) を示す。これらは、いずれも堤高 20m 以上、堤長 100~200m 級のダムなのに、最大洪水量 (カッコ内は年平均流量) は、最大の三滝ダムでも 93.6 m³/sec (1.22 m³/sec) と極端に少ない (鹿瀬ダムの 1/75)。そして、三滝以外の調整池ダムはこれらの数値がほぼゼロである。つまり、わが国のバットレスダムの大半は、洪水調節など無用な調整池ダムと、洪水の心配がほとんど要らない小河川に設けられた水道用 (工業用水を含む) のダムに二分されていた。

このように、バットレスダムの用途が極めて限定された理由は、洪水吐の機能に疑問符が付けられていたからであろう。当時の文献には「床版式、多拱式何れの場合に於ても非溢流型とするを理想とする」³⁶⁾、「扶壁堰堤では堤頂の溢流は絶対に許されない」³²⁾などの文言が並んでいる。

ここで、わが国のバットレスダムの溢水処理の方式について触れておこう。皮肉なことに、一番本格的な洪水吐きが造られたのは、最古の手井ダムであった。ダム完成後の写真には細い支柱で支えられた滑り台のような洪水吐きが写っているが (写真-1)、情報が乏しく詳細は不明である。手井以外のダムで、はっきり識別できる洪水吐きを持つのは、最晩年の三滝ダムである。ただ、それはダム本体に組み込まれているので

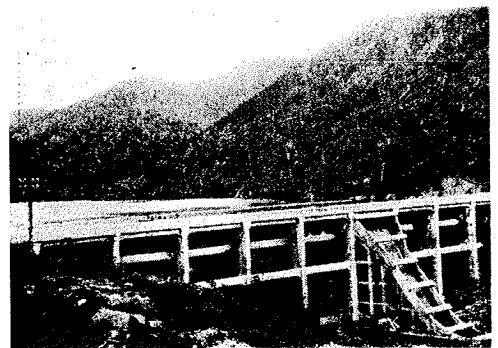


写真-1 手井ダム (参考文献 60) より

はなく、ダム両端の岩盤上に付けられた溢流部でしかない（高さが低いため重力ダムとの連結構造とは言い難い）。真川ダムでは片側の岩盤上に簡単な溢流部が設けられている。豊稔池ダムでは、各ピアに設けられた5ヶ所の余水吐からサイフォンの原理で放水する他、通常的水位調節にはダム下部の排水口も用いられている。こうした排水口は、真立、真川、丸沼、三滝ダムにも見られる。ダム本体から離れた所で放水するのは、笹流ダム（水路トンネル方式）と恩原ダム（開水路方式）である。

5. バットレスダムの衰退要因

物部理論の登場で一時もてはやされた観のあるアンバーセン式ダムも、昭和10年代になると築造数が一気に減少する。その背景としては、①小諸ダム崩壊の影響、②凍害による耐久性の低下、③施工の複雑さ（工費の相対的上昇）、④頑健性に対する危惧、⑤世界恐慌による電力需要の激減の5点が想定できる。また、前節でアンバーセン式の適合性が高いと記した調整池ダムと水道用ダムについて、昭和10年代に何らかの意識の変化があったかどうかについても検証を試みる。

(1) 小諸ダム崩壊の影響

3(1c)で触れたように、1928年に小諸ダムの崩壊事故が発生したが、それは物部の「耐震池壁理論」が発表され、かつ、その理論を用いたアンバーセン式ダムの建設が集中していた時期（完成直後1、施工中2、着工目前1）に相当していた。施工中のものは別として、着工前のダムに何らかの影響はなかったのだろうか？

崩壊の原因については当時どう考えられていたかに関する資料は少ないが、事故直後には「セメントより価格も安いため火山灰を使用したらしく」これが原因とされたり¹³⁵⁾、「水を入れし最初から洩し八寸の土管が入り居れり、先月見たる処土管が一板あふれ居れり」という噂が立った¹³⁶⁾ものの、すぐにダム本体には欠陥がなかったと主張されるようになった¹³⁷⁾。事故から4日後に地元の「小諸電話」の通信員が電力会社重役とインタビューしたときの問答によれば、重役は事故原因に対して「皆同じような意見」である述べ、その意見とは「設計施行構造には少しの欠陥も認められない地盤の欠点が原因であろう」「構造に欠陥ありとしたならば当然水圧の高い東隅の方が決壊する等……若し壁堤のセメントが足りなかったり工事が不完全であったなら陥落の際壁堤は滅茶苦茶に崩れてしまうのが当然あるところが原型を其のまゝにドカンと陥落しているのを見れば壁堤工事は完全に出来ていたも

のと見なければならぬ」というものであった¹³⁷⁾。事故から1ヶ月後に出された『土木建築工事書報』の記事でも「破壊ヶ所を精細調査するに工作物の施工には、何等の欠陥を認めず」⁹⁵⁾と報じられている。すなわち、事故原因は、火山灰層の深部に存在していた地下水の「貯水袋」に降雨のため軟化した表面地層が陥没したためで、構造そのものには問題がなかったとみなされていた⁹⁵⁾。このことが、事故からわずか2週間で丸沼ダムの着工に踏み切った理由だと思われる。

このように事故直後に丸沼ダムが着工されたことで、小諸ダムの崩壊の影響は皆無だったようにも見えるが、結果として以後7年間アンバーセン式ダムは1基も着工されることはなかった。崩壊事故を引き起こした形式ということで、マイナスイメージが付きまとった可能性は否定できない。例えば、事故調査に訪れた東京市水道技師の佐藤志郎は、報告書の冒頭で「軌近水道並に水力電気工事に於て貯水池堰堤として扶壁式鉄筋混凝土堰堤の築造を相常見受けられるやうになつて来た。然し未だ發達の途上にあり設計並に施工上尚幾多の研究を要するものがあるやうに思はれる。殊に同堰堤が如何なる程度の地質と地形に築造すべきか、其の利用し得る範囲又耐震的には如何なる構造を必要とするか等に関しては今後と雖も相當考究の餘地ある問題と思ふ」¹³⁸⁾と述べている。

(2) 凍害による耐久性の低下

バットレスダムの凍害に関する国内の第一報は、早くも1928年、標高2700mの高所に造られたアメリカのマルチプルアーチダムの被害報告であった。そこには、「氷は単に表面のみでなく、薄い層ではあるが、或る深さ迄堰堤面に於て結氷して居ることが分つた即ち損害は唯表面に張詰めた氷のみではなく、分解は中高迄も達し、冬凍透水がコンクリート内に凝結して生じた」¹⁷⁾と紹介されている。

しかし、わが国で凍害が現実の問題として注目されるのは、3(3)の冒頭で触れたように、1936年の国際大ダム会議以降のことである。会議に出席していた小野は、凍害（実際には酸性水による石灰質の分解も要因の一つ¹¹⁰⁾）を受けてダム改築工事が行われたノルウェーの状況を知って、函館市に笹流ダムの調査を指示した¹¹⁵⁾。1940年に実施された市の調査によれば、控え壁には最大4cmの深さまで凍害が及んでいることが判明した。しかし、戦時中でセメントなどの資材の入手が困難なため改修工事を実施できなかった¹³⁹⁾。戦後行われた再調査で凍害が深さ16cmに達していることが判明し、直ちに風化防止工事が実施された（1948～49年）¹³⁹⁾。それでも1960年代になると、凍結融解による風化が一段と進行し、コンクリートの剝離が目立つよ

うになった¹⁴⁰⁾。小野はこうした状況を踏まえて、「極寒地における老化は年とともに止まることを知らず、ことにこのダムのごとき薄手の構造に対しては影響するところが甚だ大きいと心配されるのである。著者が“昔の建設の責任者”として考えれば、ダムに万一の事故を惹起しない以前に更に万全の策をたて、この際思いきって扶壁、床版ともそれぞれ二重の厚さに補強するぐらいの決断をなし以てダム崩壊の災害を防止するべきだと思う……当初の責任者として心配の余り取てこの際慎重なる注意を喚起して止まない」¹⁴¹⁾と述懐している。若い頃に思い切って採用したアンバーセン式ダムが心配でしよがなかつたに違いない。結局、1983～85年に行われた笹流ダムの全面改修工事では、既設の遮水壁と控え壁に力学的な機能を期待することは止め、新たに下流側に設けた遮水壁と、ほぼ倍の太さに巻き立てた控え壁と水平材によって全荷重を支えるという構造に変更された¹⁴¹⁾(小野の言葉通りになった)。

他のアンバーセン式ダムではどのような状況にあったであろう。表-8に主要ダムの建設地点での年最低気温を示す。これらの数値から、笹流ダム以外にもアンバーセン式ダムの多くが凍害を受けていた可能性が浮かび上がる。実際、恩原ダムでは、1948年以降、数年おきに遮水壁の補強工事を行い、1965年には上流側に厚さ90～145cmの新遮水壁を設置している。その際、控え壁と水平材に厚さ15cmのコンクリートを巻き足したが、それでもコンクリートの剝離は止まらず、継続的に補修が行われていると聞く¹⁴²⁾。丸沼ダムでは、コンクリートの劣化と漏水がひどくなったため、1952年に詳細な調査が行われ、その報告を踏まえて¹⁴³⁾、遮水壁の改修とグラウト注入が実施された。1960年代に入ると、凍害の繰り返しによるコンクリートの劣化が深刻化し、最終的に1969年になってPC造の新遮水壁を施工するに至った。また、控え壁と水平材は鉄筋のかぶり量が少ないため凍害を受けやすく、コンクリートの剝離箇所の補修が毎年のように行われている¹⁴⁴⁾。三滝ダムでは、1960年代に入って何度も遮水壁のモルタル補修が行われた他、1980～81年には控え壁と水平

材に厚さ15cmのコンクリートを巻き足した¹⁴²⁾。

以上まとめると、寒冷地における凍害問題は、小野が危機感を抱いた1936年以降、アンバーセン式ダムに対して何らかのマイナス要因となった可能性は否定できない。ただし、凍害による決定的なマイナスイメージが定着するのは戦後になってからで、昭和10年代にまでその影響を週及させるのには無理がある。

(3) 施工の複雑さ(工費の相対的上昇)

昭和10年代になってアンバーセン式ダムが造られなくなった大きな要因は、施工の複雑さとそれに伴う見積価格の増大にあった。大正～昭和初期の導入・発展期においては、コンクリートダムを骨組み化することでコンクリートの使用量を大幅に減らせるという点が大きなメリットとみなされていた。しかし、セメントの価格が下がる一方、社会情勢の変化により労働コストが上昇すると、重力ダムとアンバーセン式ダムの経済性は逆転するようになる。日本より事態が早く進んでいたアメリカでは、第一次世界大戦以降アンバーセン式ダム(正確には、マルチプルアーチ以外のバットレスダム)のシェアが大幅に落ち込んでいった(1910年代の11%から、20年代の6%、30年代の4%、40年代の2%と減少していった)⁴⁾。

1938年、当時コンクリートダムの権威と目されていた石井頌一郎(1885-1972)は、バットレスダムは工費と併せ施工の面からも今後広まらないであろうと、次のように予測している。「重力式は体積が多いから工費を減する目的でバットレス式が用いられることがある。地質の関係からも此式が採られることがあるが、此式はそう高いものは出来ないからバットレス堰堤の高さ位ならば重力式でも多少の缺點ある地質でも造れるだろう。だから重力式にするかバットレス式にするかは結局金の問題となろう。後者は前者のコンクリート量の大体2/3位で済む。然しプレーンコンクリートの代りに鉄筋コンクリートにしなければならぬし、やつて見ると始め思たより多額の工費を要する。そして其成績は餘り香ばしくない。此故にバットレス式は將來餘り行はれまいと思ふ」³³⁾。事実、軍事目的の境浦ダムは別として、彼の言葉通り、前年(1937年)に完成した三滝ダム以降、バットレスダムは造られていない。

ちなみに、戦後導入された中空重力ダムも、同じ理由で採用されなくなっている。第1号となった井川ダム(1957年)の場合、基礎の掘削量が27%、型枠の数量が30%増大しても、ダム関連の工費が全体で16%低減できたことが導入の理由であった¹⁴⁵⁾。それが後年になると、①人件費の高騰、②コンクリートの機械化打設に対応できない、③アーチダムほどコンクリート量が減らせないなどの理由で¹⁴⁶⁾、1970年代の2基を最

表-8 バットレスダム建設地点の年最低気温

| ダム名 | 所在地 | 年最低気温(°C) | 出典 |
|-----|-----|-----------|----|
| 笹流 | 北海道 | -15 | 62 |
| 高野山 | 新潟 | -15 | 63 |
| 恩原 | 岡山 | -15 | 69 |
| 真川 | 富山 | -15 | 74 |
| 丸沼 | 群馬 | -19 | 76 |
| 三滝 | 鳥取 | -11 | 79 |

※“出典”の番号は、参考文献の番号と対応している。

後に造られなくなった（表-3 参照）。

施工上の不備が原因で完成直後に崩壊したイタリアのグレノ・ダム事故（Gleno, 1923年）に対し、日本でも「マルテキブル、アーチなどは仕事の性質が細かいものであるからそれだけの注意を拂って作らなければ安全を期し難い」¹⁴⁷⁾という反応があった。まだ1基もマルチプルアーチが造られていない段階でこうした評論は、チャレンジしようとする技術者にとって大きなプレッシャーとなったであろうことは想像に難くない。豊稔池ダムは、“やむをえず”にマルチプルアーチに変更したケースだが、結果的に、傾斜した遮水アーチの施工に苦勞することになった¹⁰⁶⁾。豊稔池ダムの後に後継者が続かなかつた理由も、この点にあるのかもしれない。

(4) 頑健性に対する危惧

先に前節(3)で、バットレスダムに対する否定的意見を引用した石井穎一郎は、物部長穂の耐震設計に関しても、次のような鋭い批判を述べている。「殊に耐震的理由で、わが国では扶壁の根元を土臺に固定しないで、多少自由のきくような工法がとられているが、著者はダム本来の性質からそういう工法に疑いを持つものである。ダムはどこまでもがつしりした、如何なる場合にも、決して決潰の心配のないものでなければならぬと思概う」³⁸⁾（3(2a)参照）。この一文が掲載された『ダムの話』は戦直後の1949年に刊行された一般向けの啓蒙書であり、戦前の日本ダム界の“意志”をある程度汲み取った内容だと思われる。

(5) 世界恐慌による電力需要の激減

以上(1)~(4)の工学的な要因とは異なるが、当時の経済的要因も影響を及ぼしている可能性が高い。すなわち、1929~33年の間世界の資本主義国家を襲った大恐慌の煽りを受けて、わが国でも経済は停滞し、電力需要も大幅に減少する^{148), 149)}。その結果、表-9に見られるように、1931~35年の5年間の新規発電所の運開件数は極端に落ち込んだ。バットレスダムの着工が最も期待されてしかるべきこの時期に需要が一気になくなったことは、この形式のダムの命脈を昭和初期で絶つ大きな要因となったであろう。

(6) 調整池ダムと水道用ダムを巡る建設事情の変化

わが国の水力発電史の概説を読むと、明治・大正期の水路式発電が、昭和期に入るとダム建設技術の発展に伴いダム水路式もしくはダム式に発展的に変化していったという記述が多く見られる¹⁵¹⁾。その文脈に従うと、水路式発電の需要が減少し、それとともに調整池ダムの需要も減り、結果として、調整池ダムに適した

表-9 発電方式ごとの運開件数の推移

| 運開年 | 水路式 | | ダム | 合計 | |
|---------|------|-----|-----|----|-----|
| | 調整池式 | 水路式 | ダム式 | | |
| ~1900 | 17 | | | 17 | |
| 1901~05 | 3 | | | 3 | |
| 1906~10 | 30 | 2 | | 30 | |
| 1911~15 | 34 | 5 | 1 | 35 | |
| 1916~20 | 39 | 1 | 2 | 3 | 44 |
| 1921~25 | 83 | 8 | 10 | 1 | 94 |
| 1926~30 | 58 | 16 | 12 | 2 | 72 |
| 1931~35 | 18 | 5 | 5 | 1 | 24 |
| 1936~40 | 42 | 9 | 24 | 4 | 70 |
| 1941~45 | 27 | 1 | 13 | 4 | 44 |
| 1946~55 | 37 | 8 | 34 | 23 | 94 |
| 1956~65 | 50 | 5 | 84 | 44 | 178 |
| 1966~75 | 11 | 1 | 47 | 26 | 84 |
| 1976~85 | 31 | | 31 | 25 | 87 |
| 1986~90 | 15 | 1 | 13 | 10 | 38 |

※ 1946~85年は10年ごと。

（『水力技術百年史』の「資料-15 発電所一覧表」¹⁵⁰⁾をもとに著者作成）

構造形式であるアンバーセン式ダムが建設される機会もなくなった、という風に解釈できなくもない。実際はどうだったのであろうか。

(5)節の表-9によれば、水路式発電は1921~25年に83件（同時期に造られた発電所の88%）とピークを迎えるものの、1936~40年でも42件（60%）と過半数を超え、1946~1990年の戦後全体でも30%と一定の比率を維持している。水路式発電に占める調整池付き施設の比率も1926~30年の28%に対して1936~40年で21%と漸減するに留まっている。“昭和10年代に入ると調整池ダムの需要がなくなった”とはとても言えない状況にある。

アンバーセン式が選択されていてもおかしくない1931~1937年の間に完成した代表的な調整池ダムは、女子畑第二（大分）、戸花（群馬）、仁淀川（高知）、大佐川（広島）、来見野（鳥取）、佐賀（高知）の各ダムであるが、これらはいずれも重力ダムであった¹⁵⁰⁾。そこには何らかの意図的な重力ダム志向が感じられる。

水道用ダムでも状況は類似している。調整池ダムと同様に適性があったことから、もし水道用ダムが一定の頻度で造られ続けていたのであれば、アンバーセン式ダムの需要も確保されていたはずである。

大正末期~昭和戦前期にかけて造られた代表的な水道用ダムは、青下第一~第三（宮城）、村山上、村山下、山口（東京）、片田（三重）、猪鼻（兵庫）、久山田、三永（広島）、頂吉、曲淵（福岡）、転石、菰田、小ヶ倉（長崎）の各県に造られた15基のダムである⁵⁹⁾。もしこれらの中でバットレスダムが意図的に“忌避”され

たとしたら、それは1928～34年の間に他形式で着工されたダムである可能性が高い(1928年は小諸ダム崩壊の年、1935年以降は重力ダムに対するバットレスダムの経済的優位さが減少する)。この期間に該当するのは、青下第一～第三(建設期間1931～34年)¹⁵²⁾、猪鼻(1932～34年)¹⁵³⁾、頂吉(1935～39年)¹⁵⁴⁾、菰田(1935～40年)¹⁵⁵⁾の6基である。

仙台市の水道ダムであった青下第一～第三は、『仙臺市水道誌』¹⁵⁶⁾を見る限り重力ダム以外の選択肢は考えられていなかったようである。兵庫県洲本市の猪鼻ダムは、神戸の布引ダムの流れを汲んだ重力ダムである(兵庫県には他にも鳥原、千苺、上田池、山田池など堰堤表面が切石布積になったダムが多い)。北九州市の頂吉ダムについては、『門司市水道史』¹⁵⁷⁾を見る限り“最初から重力ダムとして設計されていた”と思われる。佐世保市の菰田ダムについては、佐世保市水道局に問い合わせたが当時の資料は残っていなかった。このように水道用ダムについても、調整池ダム同様に何らかの意図的な重力ダム志向が感じられる結果となった。

6. 結論

わが国のダム史上で特異な地位を占めるバットレスダムについて、ダム技術史上における位置付けを明確に示すとともに、大正～昭和初期にかけてこの形式が積極的に採択された理由、そして、その後すぐに採択されなくなってしまった理由の双方を明らかにしようとした。まず、技術史上における位置付けについては、

- ①黎明期 ②発展期
- ③衰退期 ④復活期

の4期に分けて、わが国のバットレスダムの盛衰を個々のダムを中心にまとめた。この中で、手井ダムの存在を示し、これまで一般に笹流ダムから始まるとされていたわが国のバットレスダムの歴史を塗り替えた。また、取水堰堤のためダムとして分類されていなかった神戸堰を豊稔池ダムと合わせて捉えることによって、マルチプルアーチが農業土木主導であったことを提唱した。この他にも、図面や論文の分析をもとに、バットレスダムの設計法が物部の耐震理論に完全に移行したことなどを立証した。

次いで、バットレス形式の選択要因として、次の8点をあげ、詳細に分析した。

- ①工費の安さ
- ②工期の短さ
- ③資材運搬の容易さ
- ④転倒に対する安定性の高さ
- ⑤操作・点検の容易さ

- ⑥地盤の適合性
- ⑦地形上の適合性
- ⑧調整池ダム・水道用ダムへの適合性

ここでは、一般に言われている工費や工期などがバットレスダムの選択要因であったことを実証した他、洪水処理能力の点で調整池ダム・水道用ダムに適していたことを指摘した。また、地盤への適合性に関しては、“床版”の有無によって、揚圧力の影響も含めてその状況が異なっていたことを指摘した。

最後に、バットレス形式の衰退要因として、次の6点をあげ、詳細に分析した。

- ①小諸ダム崩壊の影響
- ②凍害による耐久性の低下
- ③施工の複雑さ(工費の相対的上昇)
- ④頑健性に対する危惧
- ⑤世界恐慌による電力需要の激減
- ⑥調整池ダムと水道用ダムを巡る建設事情の変化

この分析をもとに、これまで言われていた施工の複雑さに加え、小諸ダム崩壊の影響や世界恐慌の影響、重力ダム志向もバットレスダム衰退の一因として挙げた。一方、凍害の影響を衰退要因として、戦前まで遡及させるには無理があることを提唱した。

以上の分析により、わが国のバットレスダム開発史を、既発表論文の記述を中心にしてではあるが、ある程度明快にまとめることができた。

謝辞：土木資料探索舎を主宰される藤井肇男氏には、資料の収集において貴重なご教示をいただきました。東京電力(株)工務部工務土木グループ 中沢慎一氏、同群馬支店設備部土木グループ 吉田一義氏、元・東京電力(株)で現・東京電設サービス(株)の池田氏、北陸電力(株)土木部 高木利之氏、中国電力(株)土木部水力担当 木村光良氏、同鳥取支社土木建築担当 浜本房二氏、同 清重直氏也、小笠原村教育委員会 島田絹子氏、同建設水道課 石川氏、愛媛県土木部宇和島土木事務所 名越氏、宇和島市教育委員会 菊池俊彦氏、佐世保市水道局水源対策室には、資料の提供、ヒヤリング調査にご協力いただきました。心から感謝の意を表します。なお、本研究は学術振興会 平成15年度科学研究費補助金(基盤研究B(1)「近代日本における欧米の先進土木技術の導入状況に関する実証的研究」)を受けて行われたものである。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 水力技術百年史編纂委員会: 水力技術百年史, 電力土木技術協会, 1992.

- 2) 樋口輝久, 三木美和, 馬場俊介: 近代日本におけるコンクリートダム技術の変遷—ダム技術者の発言から, 土木史研究講演集, Vol.23, pp.251-262, 2003.
- 3) Schnitter,N.J.: A History of Dams, Balkema, p.4, 1994.
- 4) 前掲 3), p.190.
- 5) 高谷武助: 最近水力電気, p.179, 博文館, 1917.
- 6) 岡崎文吉: 北米合衆國最近ノ水力, 土木學會誌, 6.1, p.27, 1920.
- 7) 森 忠藏: 歐米ノ水力工事, 土木學會誌, 7.2, p.188, 1921.
- 8) 小野基樹: 函館市水道貯水池に築造せる中空式鐵筋混凝土堰堤, 土木學會誌, 10.4, pp.741-742,761, 1924.
- 9) 溢流堰に就て (二), 工學研究, 7冊, p.17, 1924.
- 10) 伊太利グレノ堰堤の破壊 (一〜三), 工學研究, 11〜13冊, 1924.
- 11) 高橋三郎: 水力電気, p.119, 日本工人俱樂部, 1926.
- 12) 永田 年: 堰堤の設計に就て [一], 水利と土木, 1.2, pp.27-28, 1928.
- 13) 萩原俊一: 水利發電事業者に望む, 水利と土木, 1.3, p.8, 1928.
- 14) 中國合同電気株式會社恩原貯水地, 水利と土木, 1.4, p.81, 1928.
- 15) 物部長穂: 支壁式鐵筋混凝土堰堤の耐震法に就て, 地震研究所彙報, 5號, pp.122-141, 1928.
- 16) 山田陽清: 發電水力 第二編 堰堤及導水工事, pp.75,82-84, 丸善, 1928.
- 17) 多拱堰堤に就て, 工學研究, 50冊, p.33, 1928.
- 18) 相澤時正: 堰堤と擁壁, pp.216-219, 淀屋書店出版部, 1929.
- 19) 佐藤志郎: 小諸堰堤の崩壊に就て, 水道, 32號, p.188, 1929.
- 20) 上野英治: 堰堤の設計, pp.208-209, 1929.
- 21) 牧 隆泰: アムバーセン型鐵筋混凝土造堰堤に就て, 農業土木研究, 2.1, pp.41-42, 1930.
- 22) 木村久満: 中空式鐵筋混凝土堰堤の理論と設計, 農業土木研究, 2.3, p.250, 1930.
- 23) 木村久満: 多拱式堰堤の理論と設計, 農業土木研究, 4.1, p.49, 1932.
- 24) 萩原俊一: 發電水力工學, p.128, 常磐書房, 1932.
- 25) 良本正勝: コンクリート堰堤, pp.97-98, 淀屋書店出版部, 1932.
- 26) 松澤太郎: アンバーセン型中空式堰堤計算, 工學, 21.11, p.21, 1933.
- 27) 山里尚行: 發電水力之設計竝實例, p.137, 1934.
- 28) 岡村雅夫: 發電水力土木設備と設計, p.162, 鐵道圖書局, 1935.
- 29) 高橋三郎: 發電水力, p.97, 岩波書店, 1935.
- 30) 鶴見一之, 草間倂: 土木施工法, pp.263-264, 丸善, 1935.
- 31) 野口 誠: 發電水力工作物, pp.16-19, コロナ社, 1936.
- 32) 菊地英彦: 發電水力學, p.162, アルス発行所, 1937.
- 33) 石井穎一郎: 堰堤を主としたるコンクリート工法の趨勢に就て, セメント界彙報, 364號, p.326, 1938.
- 34) 遠山 繁: 發電水力大意, pp.69-70, 工業圖書, 1942.
- 35) 高畑政信: 堰堤, pp.141-144, 常磐書房, 1944.
- 36) 伊藤令二: 堰堤工學, pp.219-220, アルス, 1947.
- 37) 岡崎三吉: 發電水力, pp.77-78, 共立出版, 1949.
- 38) 石井穎一郎: ダムの話, pp.57-60, 朝日新聞社, 1949.
- 39) 新井義輔: 發電水力 (下) 高堰堤, pp.176-177, 佐々木図書出版, 1950.
- 40) 大橋喜与司: 上水道, p.36, 理工図書, 1954.
- 41) 山口直樹, 小林純夫: 發電水力実務要覽 設備編, pp.18-22, 理工図書, 1958.
- 42) Schnitter,N.J.: The evolution of the buttress dam Part Two, *International Water Power and Dam Construction*, 36, July, p.20, 1984.*
- 43) 前掲 3), pp.187-188.
- 44) 前掲 3), p.189.
- 45) 前掲 3), p.188.
- 46) Jackson,D.C.: Considering the multiple arch dam: theory, practice and the ethics of safety in a case of innovative hydraulic engineering, *Construction History*, 10, p.87, 1994.*
- 47) 前掲 3), pp.184-185.
- 48) Jackson,D.C.: Great American Bridges and Dams, The Preservation Press, p.310, 1988.
- 49) 前掲 46), pp.89-90.
- 50) 前掲 46), pp.90-94.
- 51) 前掲 3), pp.185-186.
- 52) 前掲 48), pp.243-244.
- 53) <http://www.structurae.de/en/structures/data/str03644.php>
- 54) 前掲 3), p.186, p.199.
- 55) 前掲 3), pp.190-191.
- 56) 前掲 3), p.191.
- 57) 前掲 3), pp.191-192.
- 58) 前掲 3), p.192.
- 59) 土木学会土木史研究委員会: 日本の近代土木遺産—現存する重要な土木構造物 2000選, 土木学会, 2001.
- 60) 豊眞線寫眞狀況, 土木建築工事畫報, 4.12, pp.16-17, 1928.
- 61) 前掲 8), pp.739-761.
- 62) 大堰堤國際委員會日本國內委員會 (編): 日本大堰堤臺帳, pp.293-296, 1936.
- 63) 通商産業省公益事業局水力課 (編): 日本發電用高堰堤要覽, pp.313-314, 發電水力協会, 1954.
- 64) 電力土木人物銘々伝—9章 東京電力 (第1部) 一, 電力土木, No.228, p.95, 1990.
- 65) 農業土木學會: 日本取入堰堤誌, 農業土木學會, 1942.
- 66) 国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所, 第2回神戸堰構造検討委員會資料, 2003.

- 67) 前掲 19), p.190.
- 68) 昭和 3 年 8 月 30 日新聞記事?.**
- 69) 前掲 63), pp.323-324.
- 70) 前掲 63), pp.319-320.
- 71) 土屋祥三: 日本海電気小口川発電工事報告, 土木學會誌, 17.8, pp.691-711, 1931.
- 72) 前掲 62), pp.301-304.
- 73) 豊稔池土地改良区: 豊稔池の築造—豊稔池改修事業竣工記念誌, pp.73,75-77, 1994.
- 74) 前掲 63), pp.317-318.
- 75) 松田文次: 真川発電所工事報告, 土木學會誌, 16.5, pp.171-184, 1930.
- 76) 前掲 62), pp.297-300.
- 77) 前掲 63), pp.315-316.
- 78) 電力土木人物銘々伝—2 章 北海道電力—, 電力土木, No.127, p.160, 1988.
- 79) 前掲 63), pp.321-322.
- 80) 小笠原村教育委員会: 小笠原村戦跡調査報告書, 2002.
- 81) 境浦ダム修復及び導水管敷設工事竣工功図, 小笠原村建設水道課, 1960.
- 82) 宇和島市水道局: 宇和島市水道史, p.8, 1972.
- 83) <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jdt/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 84) 愛媛県土木部宇和島土木事務所 名越氏へのヒヤリング調査
- 85) <http://www.sayamaikehaku.osakasayama.osaka.jp/>
- 86) 前掲 1), p.181.
- 87) 竹越三叉: 大川平三郎君伝, pp.140-141, 図書出版社, 1990 (原典は 1936) .
- 88) <http://homepage2.nifty.com/itayan2/histj04.htm>
- 89) 近代水道百人選考委員会: 近代水道百人, pp.72-73, 水道新聞社, 1988.
- 90) 前掲 8), p.741.
- 91) 前掲 8), p.760.
- 92) 前掲 8), p.739.
- 93) 山口直樹: 土木工事管理・見積・仕様・技術基準と実例, 理工図書, 1963.
- 94) 水力発電所の事故例(水路工作物), 昭和 60 年度電気工作物検査官(水力)研修資料, 1985.**
- 95) 小諸堰堤の崩壊に就て—先づ事故發生の經過報告, 土木建築工事畫報, 4.10, pp.3-4, 1928.
- 96) 例えば, 前掲 12), p.27. など.
- 97) 前掲 15), pp.125-127.
- 98) 前掲 15), pp.131-133.
- 99) 前掲 19), pp.188-202.
- 100) 物部長穂: Design of Onbara Reinforced Concrete Dam, 1927.
- 101) 東京電力株式会社工務部水路課: 一之瀬発電所 丸沼中空堰堤經過説明書, 1954
- 102) 前掲 32), p.164-165.
- 103) 中國合同電氣會社恩原貯水池に就て, 土木建築工事畫報, 5.8, pp.14-16, 1929.
- 104) 前掲 87), p.168.
- 105) 前掲 59), pp.198-199.
- 106) 翠黙: 香川縣三豊郡大野原村外四ヶ村用排水改良事業概要, 農業土木研究, 9.2, p.244, 1937.
- 107) 前掲 73), p.75.
- 108) 日本土木史編集委員会: 日本土木史—大正元年~昭和 15 年, pp.1156-1157, 土木学会, 1965.
- 109) 新井栄吉: 日月潭淨水電工事, 土木建築工事畫報, 10.7, pp.40-41, 1934.
- 110) Basslrud, Friis: Fifty Year's Experience of Concrete in Norwegian Dams, Transactions of the Second International Congress on Large Dams, Vol.3, pp.149-157, 1936.
- 111) 富所強哉, 金子晃: 大倉ダム, 発電水力, No.46, pp.21-22, 1960.
- 112) クリーガー, W.P., ジャスティン, J.D., ハイNZ, J.: コンクリートダム, 村 幸雄 (訳), p.347, 1955.
- 113) 藤本 得: 井川ホローグラビティダムの計画ならびに工事について, 発電水力, No.23, p.3, 1956.
- 114) 前掲 113), pp.5-6.
- 115) 小野基樹: 水到渠成—東京の水源・多摩川と共に六十年, pp.104-106, 新公論社, 1973.
- 116) 前掲 15), pp.124-125.
- 117) 辻幸和: 我が国で最初のマルチプルアーチダム豊稔池の建設, 日本土木史研究, Vol.6, p.44, 1986.
- 118) 前掲 8), p.759.
- 119) 前掲 73), p.65.
- 120) 中空堰堤(丸沼貯水池堰堤), 水利と土木, 4.12, 口繪, 1931.
- 121) 山陽水力電氣株式会社: 昭和 11 年 4 月 三瀧調整池堰堤實地設計変更説明書, 1936.
- 122) 通商産業省公益事業局水力課(編): 日本発電用高堰堤要覽, 発電水力協会, 1954. に掲載された重力ダムのうち, 工費が判明しているダム(15 基)の最頻値.
- 123) 前掲 8), p.742.
- 124) 前掲 75), p.174.
- 125) 宮川正雄: 日本電力蘆津発電所建設工事概要, 水力, 1.2, p.76, 1938.
- 126) 日本動力協會(編): 日本の発電所 東部日本篇, p.60, 工業調査協會, 1937.
- 127) 前掲 19), p.189.
- 128) 信越電力株式会社水力工事, 土木建築工事畫報, 1.2, pp.6-10, 1925.
- 129) 前掲 71), pp.692-693.
- 130) 打林清一: 富山縣營真川発電所工事概要, 土木建築工事畫報, 6.8, pp.16-17, 1930.

- 131) 前掲 75), p.181.
- 132) 農業土木學會: 本邦灌漑排水工事圖譜, p.16, 1933.
- 133) http://www.metu.edu.tr/~vedat/chapter3/chapter3_5.htm
- 134) 前掲 63), pp.21-24.
- 135) 昭和3年8月31日新聞記事?.**
- 136) 昭和3年9月4日小諸町町議会議事録.**
- 137) 「小諸電話」の通信員による東信電気株式会社重役とのインタビュー記録.**
- 138) 前掲 19), p.198.
- 139) 函館市水道局: 函館市水道百年史, pp.360-361, 第一法規出版, 1989.
- 140) 前掲 139), p.365.
- 141) 前掲 139), pp.367-368.
- 142) 中国電力(株) 土木部水力担当 木村光良氏へのヒヤリング調査.
- 143) 電力中央研究所: 丸沼中空堰堤調査報告書, 1955.
- 144) 東京電力(株)群馬支店設備部土木グループ 吉田一義氏へのヒヤリング調査.
- 145) 前掲 108), p.1551.
- 146) 飯田隆一(著), 土木学会(編): 新体系土木工学 75 ダム設計, p.64, 技報堂出版, 1980.
- 147) 伊太利グレノ堰堤の破壊(一), 工學研究, 11 冊, p.16, 1924.
- 148) 前掲 1), pp.38-39.
- 149) 前掲 108), p.1135.
- 150) 前掲 1), pp.1065-1137.
- 151) 例えば, 前掲 1), p.203. や前掲 108), p.1136. など.
- 152) 日本水道協会: 日本水道史 各論 I (北海道・東北・関東), p.277, 1967.
- 153) 前掲 62), p.105.
- 154) 門司市水道史編さん委員会: 門司市水道史, pp.404-405, 門司市水道局, 1963.
- 155) 日本水道協会: 日本水道史 各論 III (中国・四国・九州), pp.671-672, 1967.
- 156) 仙臺市役所: 仙臺市水道誌, pp.388-391, 1935.
- 157) 前掲 154), pp.106-107.
- (備考)
- * 42), 46) は, “Studies in the History of Civil Engineering - vol.4, Dams”, Ashgate, 1997. に収録.
- ** 68), 94), 135), 136), 137) は, 東京電力千曲川電力所土木建築課: 「東信電気株式会社小諸調整池事故資料」, 1990. に収録.

(2003. 7. 19 受付)

DEVELOPMENT OF BUTTRESS DAMS IN THE MODERNIZED ERA IN JAPAN

Teruhisa HIGUCHI and Shunsuke BABA

The purpose of this work is establishing the historical review of buttress dams in the modernized era in Japan, making free use of technical papers and textbooks of those days. This type of dams was introduced in this country as the reservoir of the city water supply, also as the intermediate regulating reservoir of the conduit type hydraulic plant in the first stage. Although the reliability for the type was increased after the establishment of the earthquake-resistant design proposed by Dr.Momonobe; in a short time, the buttress type became unpopular. In this paper, how this type of dams was accepted in Japan and evaded soon after, is tried to analyze and clarify.