

## 地下ダムの源流と島嶼圏での展開

黒 沼 善 博\*

### The Origin of Underground Dam and Construction Examples in Islands.

KURONUMA Yoshihiro

#### 要 旨

地下水の貯水技術である地下ダムの歴史は古い。その源流は、アフリカや中近東における灌漑排水のための古来の貯水技術に遡る。さらに地下ダムの近代技術は、沖縄を中心としたわが国の島嶼圏において発展してきた。それは農業用水など、水資源の安定的な確保を望む地域に適用すべく、技術改良が行われてきた進化の歴史でもあった。

キーワード：地下ダム、地下水、止水壁、島嶼建設技術、灌漑排水

**Keywords** : underground dam, groundwater, cut-off wall, construction technology for islands, irrigation drainage.

#### 1 地下ダムとは何か

「地下ダム」という言葉を聞いて、どのようなダムをイメージするだろうか。

最近では、沖縄の島嶼圏を中心として、地下ダムの建設事例が増えてきているため、その構造や効果について知る人々が多くなっているかもしれない。地上にあるダムはすぐイメージできるのだが、地下にあるダムとはどのようなダムなのか、地下ダムの実際の施工にあたった筆者は、これまでによく質問を受けることがあったのである。

地下ダムを一言で表現すると、「地下水の流れを堰き止める壁及びその附帯施設」ということになる。地下ダムの止水壁（図1）は、地中に建設される構造体であり施工後は埋め戻されるため、完成形として視認できず一般的にはイメージされにくい。

緑資源機構（2004）第2章では、水資源開発において施工される貯留施設の形状・設置方法を次のように規定している。

\* 沖縄大学地域研究所特別研究員、株式会社大林組 kuronuma@m4.kcn.ne.jp

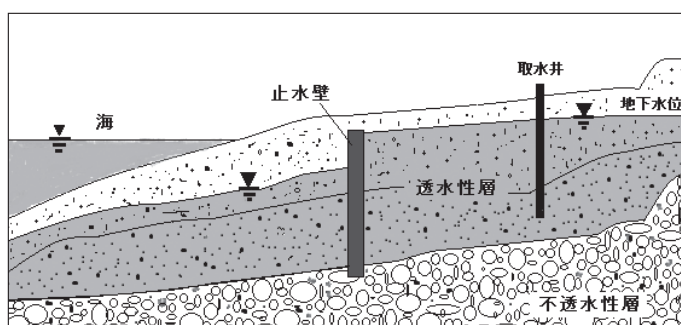


図1 地下ダムの構造

地上ダム：河川（谷）の両脇にある斜面を活かし、「堤体」を設けて谷を締め切る。締め切り断面積と貯留量との関係を勘案し、より効率的な場所に設置される。

遊水地：河川敷または河川からそう遠くない周囲の地盤を掘りこんで造る。河川の流れを遮る構造物はない。設置場所は沖積平野など緩傾斜地に限られる。

地下ダム：地下に堤体を設けて、地下谷（透水性の低い地質の上に空隙の多い地質が覆う構造の所で、その水理基盤が谷状を呈している部分のこと）を締め切る。

筆者が宮古島の砂川地下ダム、沖縄本島の米須地下ダムの建設実務に従事した1990年代頃には、地下ダムはまだ一般に認知されているとは言い難かった。しかし、島嶼圏での地下ダム建設が増え、灌漑排水事業での効果がはっきり現れるようになった今では、地下水の貯水技術として定着した感がある。宮古島市には地下ダム資料館が建設され、海外からの視察も増えた。今後も農業用水などの水資源の確保に悩む国々、地域での技術展開が期待される。また、プラント技術との複合によって、大規模な飲料水の供給の可能性についても検討されている。地下ダム本体となる止水壁は、地中連続壁という単純構造であるが、他の建設技術との複合によって地下水資源の活用は多様化し、その持続可能性は広がりをもせることになる。水資源の安定的な確保は、生命の維持と経済活動に必要な不可欠な要素である。そのため地下ダムは、水資源の永続性に技術面で大きな役割を果たしてきたといえよう。

現代の地下ダム施工には、先進した重機が用いられるが、古来の止水技術ではそのような重機が使用できたわけではない。また、海外での地下ダム施工、例えばアフリカなど乾燥地帯での止水壁の施工は、現代においても、必ずしも大型の建設重機が用いられるわけではない。建設地の共同体によって、人海で施工にあたることが多いのである。

地下水の流れを堰き止める技術は、施工対象となる構造体の規模の違いはあるが、水源の安定確保という施工目的の本質は同じである。その地下ダムの源流を国内外に探し求めるとき、地下水の止水壁・遮水壁の歴史は古い。国内では、1805（文化2）年に岡山県和気町で、また1934（昭和9）年には愛知県春日井市で、地下水の流れを堰き止める堰堤の工事が行われている。それらの堰堤は農業用水を畑地へ供給するための土木工事である。海外では、中近東のカナートは紀元前にまで遡り、アフリカの地下水の止水壁には古代土木技術で作られ

た例がある<sup>1)</sup>。

筆者はこれまでに経済学分野において、島嶼圏での経済二主体である農業と家計へ、地下ダム建設がもたらす効用分析を行ってきた<sup>2)</sup>。その一方で、諸外国にも灌漑排水や生活用水のために地下水を止水・遮水する技術が、様々なかたちで展開されていることに触れてきた。古来の地下ダムには、地下水に生活や農業の水源を求めた人々の叡智が、活かされているのである。

本研究ノートでは、近年、島嶼建設技術として数多く展開されている「地下ダム」の源流について述べる。また、沖縄島嶼圏を中心とした地下ダムの歴史的な流れと建設事例を取り上げる。

## 2. 地下ダムの定義

地下ダムの概念・定義については本節で詳しくみていくこととするが、そもそも地下ダムが建設される地域にはどのような環境的・歴史的背景があるのか。

地下ダムはこれまでに、国内では沖縄の島嶼圏を中心に、海外では乾燥地帯に数多くの建設が行われてきた。それらの地域に共通しているのは、地上に水源が乏しく、生活用水や農業用水の確保を目的として、地下水や涸れ川の伏流水を汲み上げるための止水壁が構築されてきたということである。

沖縄県宮古島では、河川や湖沼がなく、比較的降雨量が多いにもかかわらず、農業用水の確保に悩まされてきた。これまでの大干ばつで基幹農作物であるサトウキビの生産量が激減し、農業は壊滅的な被害を経験している。このため、地下水資源開発への本格的な取り組みに向けた調査が行われ、実験地下ダムの施工を経て、今日複数の地下ダムが建設されるに至った。

宮古島の地層は上層から、大野越粘土層、琉球石灰岩層、島尻層の三層から成り立っている。雨水は、表層部である大野越粘土層から浸透して、透水性の高い琉球石灰岩層を伝い、不透水性層の島尻層に到達すると地下水となる。地下谷を潤沢に流れる地下水は海洋へと流出してしまう。海洋へ流出する前に地下水の流れを堰き止めて、止水壁の川上側に貯留する。貯留した地下水は、取水施設によって汲み上げられ、一旦、ファームポンドとよばれる貯水タンクに蓄えられ、さらに畑地へと給水される（図2）。地下ダムは、地下谷の形状を利用して地下水を貯留するため、本来自然に失われる地下水を、有効に活用する循環機能をもつこ

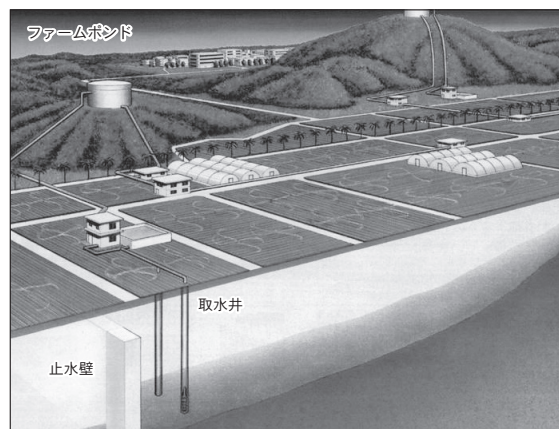


図2 地下ダム灌漑排水システム  
内閣府沖縄総合事務局ホームページ（2007年8月）

とになるのである。

地下ダムの貯水は地中になるため、蒸発量は地上ダムに比べて非常に少なく、日射に伴う有効貯水量の自然減は生じない。また、地上ダムは環境によっては、寄生虫や病原菌の発生など衛生面での懸念があるが、地中に貯水する地下ダムは水質が良好であるという利点を持つのである。

「地下ダム」を呼称するとき、その定義は専門家・研究者によって諸説あるようであるが、日本国内においては、「地下水の流れを堰き止める目的で、地下に構築された堤体及び堰き止めた地下水を利用、管理するための施設の総称」（農林水産省構造改善局計画部資源課（1993）「地下ダム計画・設計技術指針（第3次案）」とするのが妥当なようである。地中の止水壁本体のみを指して「地下ダム」とよぶ専門家もいるが、灌漑排水事業においては、止水壁から畑地へ供給する散水設備<sup>3)</sup>までのシステム全体を一体的に「地下ダム」とよぶことが一般的になっている。

筆者も、地下ダム建設に従事したときに、事業者・施工者など関係者の間では、止水壁本体のみならず、取水設備、エアチェンバ、ファームポンド、導水管、スプリンクラーなど地下貯水から農用地への散水に至る施設・設備を総称して「地下ダム」とよんでいた。地上の貯水池だけで、地中の止水壁を伴わない場合も地下ダムに含めるようなことがあるが、地下水を堰き止めるための止水壁を有する施設だけを地下ダムに定義することが妥当であろう<sup>4)</sup>。

さて、「地下ダム」ということばは、英語表記ではどのように扱われているのだろうか。

海外の地下ダムに関する諸論文には、「地下ダム」を表すことばに、underground dam、subsurface dam、groundwater damなど複数の単語が存在し、学術的に統一されていないというのが現状のようである。

インタープレス対訳センター編（1998）の「地下ダム」の項目では、underground damとなっている。このunderground damの「地下」部を表す‘underground’について、Stevenson and Lindberg（2010）によると、beneath the surface of the groundとある。一方、比較的多くの文献・論文で用いられているsubsurface damの、‘subsurface’の項目について、同書では、the stratum or strata below the earth’s surfaceとある。つまり、undergroundは「地表面の下」、subsurfaceは「地上の表面下にある地層または層」ということになる。

わが国で「地下ダム」の技術的構想を最初に示した可知貫一博士（京都帝国大学教授）は、その著書『農業水文学』<sup>5)</sup>のなかで、「準地表水（Subsurface water）の状にある地下水は土壌孔隙内で支持されながら空気と混在し、徐ろに移動し、或は準備の状にあるから、これを特に吊支水（Suspended water）と称しているものがある。又空気が孔隙中に水と混土する関係から、之を気泡地下水圏（Zone of aeration）ともいう。この気泡地下水圏の下部、地下水面に達する中間で僅の厚ではあるが毛管誘導水の占める位置のことを地下水文学の方面ではこの部が完全に毛管水で飽和している関係から、毛管飽和圏（Zone of Complete Capillary Saturation）と名づける部分があり、其の下部が地下水面（Zone of

Saturation) である。(中略) 不透水層が一定の厚みがあつて相当広い面積を地下で占めてみると、其の上層には前に述べた準地表水から續いてゐる地下水の飽和層のあることは勿論であるが、不透水層の下面にも地下水で飽和してゐる層があつて不透水層のために上部の地下水とは隔絶せられ、特別の内圧作用を受けてゐる状態の場合が多い制壓下局限された状態にあるから、被壓地下水 (Confined ground water) とでも唱へるがよいと思ふ。之に對して上部の制限を受けない地下水を自由な地下水 (Free ground water) ととなへて區別することがある。」としている。可知博士のこの定義にしたがえば、要するに地下水の範囲は、地表面に近い地下水をsubsurface water、地表面からさらに深層部の地下水全般をground waterと扱うことになる。浅層部の地下水と深層部の広い地下水全般との区別に、subsurface waterとground waterがニュアンス的に相違して用いられている。

「地下ダム」を題材に取り扱っている海外の文献をみてみよう。

Hansen and Nilsson (1986) やNilsson (1988) では、地下ダムをground-water damとしている。さらに、ground-water damを細分化して、subsurface damとsand storage damとして取り扱っている。この区分は、Prinz (2002) やNishigaki, et al. (2004), Onder and Yilmiz (2005) においても同様に引用されている。

また、Zarkesh, et al. (2012) では、地下ダムをunderground damとし、underground damを、subsurface damとsand damに細分化して取り扱っている。

ここで、sand storage damやsand damとは、アフリカのワジ (涸れ川) などで施工され、止水壁によって流砂を堆積させて砂中に水を蓄えるダムのことである (図3)。

海外での文献・論文で一般的に取り扱われている「地下ダム」の単語の内容をまとめると、underground damやgroundwater damは、地下に止水壁が構築される広義の地下ダムを指し、subsurface damとsand storage damもしくはsand damを総括した一般的な地下ダムを呼称するとき用いられている。

そして、地中の止水壁について、地下水の流れを堰き止めるために止水壁を構築して地下水を川上側に滞留させ汲み上げるタイプはsubsurface dam、不透水の川床が露出した河川に堰を構築して流砂を留め上げ、砂中に滞留した水を汲み上げるタイプはsand storage dam、sand damとして取り扱われている。

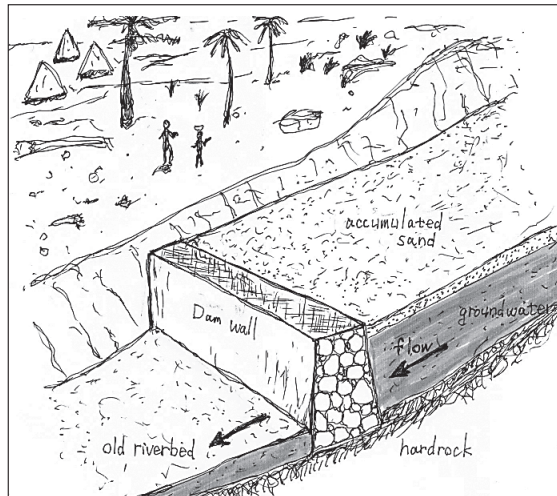


図3 サンドダムの構造



地中の止水壁を伴う地下ダムは、ほぼこれら二つのタイプに規定される。

さらに、地中の止水壁を構築する技術という観点からは、「その他の地下ダム」core wall technology of other underground waterとして、河川の土堆積部をオープンカットしてアースダム式の堤体を構築する、アフリカ・ブルキナファソ国の止水壁の事例などが挙げられる（環境省・海外環境協力センター（2004））。

以上より、「地下ダム」のタイプは、次のとおり種別することができる。

広義の地下ダム …… underground dam, groundwater dam

狭義の地下ダム ……

サブサーフェイスダム (subsurface dam)

サンドダム (sand dam, sand storage dam)

その他の地下ダム

アフリカなどにおける簡易な貯水技術として、Nissen（2006）では、サブサーフェイスダムやサンドダムと同様に、Charco dam, Hillside dam, Valley damが紹介されている。

Charco damは、タンザニアの半乾燥地帯にみられる貯水技術で、地上に比較的浅い貯水池を開削し、勾配を利用して表流水を貯水池に自然集水させる土壌のダムである。貯水池の周囲には土の盛土が設けられ、散水を防ぐ。

Hillside damは、丘の中腹や傾斜地に比較的浅い円形の貯水池を開削して、池の最背面に止水部分となる盛土が設けられた土壌のダムである。満水状態になった水を流すため、両脇には石積みで余水路が設けられている。

Valley damは、Charco damやHillside damよりさらに簡易に造られるダムで、谷の形状を利用して、水深10m程度の貯水池を設けるダムである。溪谷の流水を堰き止める止水壁は粘土質土壌で構築される。

これらの簡易なダムは、いずれも地中の止水壁を伴っていないため、地下ダムの形状からは除外される。

### 3. 海外における地下ダムの源流

乾燥地帯・半乾燥地帯では、大規模な灌漑農業を行うための経済力がある国は少ない。そのため貯水技術の財源に乏しい国・地域では、これまでより安価に排水事業を行うかが大きな課題とされてきた。伝来した伝統技術を継承して、いかに効率的に雨水を集めるかが重要であった。地中に止水壁を構築し貯水するのも一つの手法であったのである。

北アフリカ・チュニジアでみられるジェスール（Jessour）は、ワジにおいて堰が配置されたテラスに、果樹などを植える灌漑排水施設である（図4）。

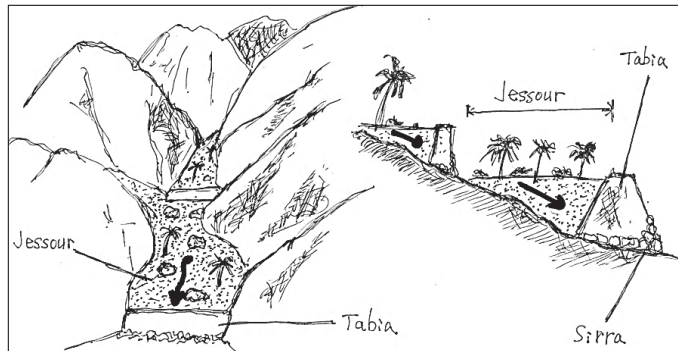


図4 ジェスールの構造

ジェスールには、‘sirra’という石垣によって補強された‘tabia’（土防壁）が設けられており、より詳細に言えば、ジェスールは農園となるフィールド部分を指す。斜面を利用して土中に水流を蓄え、表面のテラスに開拓された農園を潤す構造となっている。その構造から判断して、ジェスールに設けられたtabiaは、サンドダム同様に川下側は壁面が露出した状態であるが、川上側は土中にある止水壁とみることができる。したがって、地下ダムとなる古代の止水技術であるとみなして差支えない。世界の地下ダムの建設事例として、古代文明の技術が展開されたものが北アフリカに散在するといわれる<sup>6)</sup>が、このジェスールがそれに該当することになる。

ジェスール同様に、北アフリカに伝播した古代ローマ帝国時代の灌漑排水技術として、メスカート（Meskat）がある。メスカートの排水システムは、500m<sup>2</sup>ほどの‘meskat’とよばれるインプルヴィウム（長方形の池）と、250m<sup>2</sup>ほどの作付エリア、‘mankaa’で成り立っている。meskatとmankaaの面積の比率は、ほぼ2:1である。すべて20cm程度の高さのある縁によって囲われ、meskatに蓄えられた水が、斜面を利用して地表の筋を伝いながらmankaaへ流れ込む仕組みになっている（Prinz（1996））。

メスカートはスース地域（Sousse, チュニジア北部）でみられ、ジェスールはマトマタ地域（Matmata, チュニジア南部の都市）でみられる。

ジェスールもメスカートも古来の灌漑排水システムであるが、ジェスールは地中に止水壁が構築されるのに対し、メスカートは地上面での構造体であり、地中に構築物がないため、地下ダムの形状からは除外される。

海外には、また地下空間を利用した様々な貯水技術が存在する。北アフリカのフォガラ、イランなど中近東のカナート、アフガニスタンや中国・新疆ウイグル自治区のカレーズは地下水路であり、古くからの貯水・送水技術である。

イランのメイメイ（Meymeh）市に所在するヴァズヴァンカナート（Vazvan Qanat）は、カナートの地下水路のなかに止水壁が設けられた、地下ダムの古代技術といえる存在である（Ghorbani（2007））。

このカナートは、Tar-e-karという乾燥ゾーンとKhesk-e-karという温水ゾーンに分けられ、その間に止水壁が築造されている。止水壁には縦列に穴が開けられており、農業用水が必要でない冬季にはカナート内に水が貯留され、水が必要となる春季にダムが開かれる仕組みになっている。止水壁には7つの開口部があり、最上部の穴は4月20日に、以降10日ごとに開かれ、7つ目の開口部は6月20日に開かれるという。



図5 イラン・メイメイ市

Ghorbani (2007) によれば、ヴァズヴァンカナートは建造後3,000年以上経過しているものと伝えられ、毎年11月20日から翌4月20日までの間に貯水され、現在も灌漑排水設備として活用されているという。

ヴァズヴァンカナートの概要は、次のとおりである。

表1 ヴァズヴァンカナートの概要

長 さ	1,800m	灌 漑 面 積	300ha
井 戸 の 数	72	排 水 容 量	300ℓ/秒
井戸間の距離	25m	頂上からの深度	7m
地下ダム位置	井戸No.40に出現	主な井戸の深さ	12.5m

\*出典：Ghorbani (2007)。

ヴァズヴァンカナートは、地下ダムの源流を知る上で現存する、貴重な古代施設である。

#### 4. 地下ダム建設技術

前節では海外の古来の貯水技術をみてきたが、本節では国内における現代の地下水の止水壁構築技術をみていくこととしよう。

地下ダム本体となる止水壁の建設には、様々な工法がある。堤体の設計には、ダムサイトの地質条件や規模に応じて、堤高、壁厚、透水係数などが設定される。さらに、施工深度、地下水位、地盤の土質、施工条件や経済性などが勘案され、堤体の工法が選定されることになる（岸・森（1998））。

地下ダムの堤体の近代的な建設工法は、主に次の4つに大別される。

##### ① 開削工法

北アフリカのワジなどにおいて、砂礫層を不透水層の基盤までオープンカットし、粘



土などの不透水性材を用いて堤体を構築して埋め戻す工法である。ダムサイトは、地層の空隙率が高く、伏流水が存在する地点が選定される。ブルキナファソ・ナレ村に、日本の建設企業によって建設された地下ダムは、この工法を採用している。乾燥・半乾燥地帯において、比較的小規模の地下ダムの堤体を施工するのに用いられる。

## ② 地盤改良工法

施工対象となる地盤の空隙に、グラウトやセメントスラリーを注入して凝固させ、遮水性を確保する工法である。国内では、長崎県の樺島地下ダム、沖縄県宮古島の皆福実験地下ダムで用いられた。

## ③ 既成遮水材建込工法

遮水材となる既成の鋼矢板など不透水性工材を連続的に地中に打ち込む工法である。鋼矢板などの工材継ぎ目箇所の漏水対策が別途必要となる場合がある。沖縄県伊是名島の千原地下ダムでは、地下貯留部の施工に用いられた。

## ④ 地中連続壁工法

掘削重機を用いて地盤を開削し、セメントミルクを注入して固化させ、地中に連続壁を築造する工法である。もともと都市土木で地下の構造体を施工するのに用いられてきた工法であり、止水技術の向上とともに発展してきた。島嶼系地下ダムの施工を中心に、近年では最も多く用いられる工法である。石灰岩層の島嶼では、破碎した石灰岩とセメントを原位置で攪拌混合して止水壁を施工する。これは柱列式原位置攪拌工法（SMW（Soil Mixing Wall）工法）とよばれるもので、地中連続壁の築造に多く採用される。沖縄本島の与勝地下ダム、宮古島の砂川地下ダム、福里地下ダムなど数多くの建設事例がある。

これらの地下ダムの堤体工法には、すべて建設重機が伴う。地下貯水の大量確保を目的とした止水壁の築造を効率的に行うための、日本で発展してきた近代的な建設技術である。こうした建設重機を用いる施工方法とは対照的に、アフリカなどでは財政の制限もあって大規模な地下ダム建設はほとんど行われておらず、渇水対策など貯水の緊急を要する地域で、サンドダムなど簡易的な施工方法が採られてきた。

サンドダムの施工は、住民参加型の施工であり、基本的には大型の建設重機を使用することなく、経験則に基づいて改良を施しながら建設される。経済性を勘案した場合に簡易に実施できるサンドダムは、生命の維持と生計の安定に関わる地域の問題を解消できる、合理的な方法であるといえるのである。

一方、国内で建設重機が用いられた初めての地下ダム施工は、長崎県の樺島地下ダムである。

樺島は長崎半島の南端、天草灘に位置し、現在は半島と樺島大橋で結ばれている。樺島大橋が開通したのは1986（昭和61）年であるため、地下ダムが完成した1974（昭和49）年は、未だ離島環境にあった。

樺島は面積が約2.3km<sup>2</sup>、周囲約8 kmの小島であるが、高低差が大きく傾斜が急な地形となっ

ている。降雨による表流水はほとんどなく、生活用水は取水制限のかかる数少ない井戸から賄われていたため、この頃居た約400戸、1,600人余りの島民は、日常の水源に悩まされていたという<sup>7)</sup>。

樺島が属していた野母崎町<sup>8)</sup>では、当時、京都大学教授であった松尾新一郎博士が提唱していた地下ダム構想を知り、博士の指導を受ける形で地下ダムの建設を前提とした調査を実施することとなった。

樺島地下ダムで用いられたグラウト工法とは、岩盤の空隙にベントナイトなどの薬剤を注入して固化させることで、地中の水流を止める工法である。表2に建設概要を示す。

表2 樺島地下ダムの建設概要

所在地	長崎市野母崎樺島町地内	総貯水量	20,000m <sup>3</sup>
事業主体	建設省、野母崎町	給水対象	水道用水
施工形式	地盤改良（グラウト工法）	日取水量	300m <sup>3</sup>
堤高	24.8m	建設期間	1972～1974年
堤長	59m	改良工事	1979～1980年

\*石崎（1979）、棚橋他（1996）、岸・森（1998）を参考に作成した。

樺島地下ダムでは、グラウトの注入工法が用いられているが、当初の施工においてグラウト壁が不均一であったために、後に追加工事が実施された。また、止水壁の範囲をさらに拡張するために、1979（昭和54）年7月から翌1980（昭和55）年2月にかけて、グラウト壁の改良が施された。

そして、改良工事实施後にその建設効果が解析されている。解析は、地下ダムが建設された場合とされなかった場合のシミュレートにより、被圧地下水位の変動が分析対象となった。棚橋他（1996）・棚橋他（1997）によれば、分析の結果、地下ダム有のグラウト壁付近には有効に地下水が貯留されたのに対し、地下ダム無の箇所にはほとんど貯留されていないことが判明し、地下ダムの建設効果が認められている。

樺島地下ダムに続いて、沖縄の島嶼圏を中心とした地下ダムが本格的に建設することになったのは、宮古島での皆福実験地下ダムでの成功を受けてのことである。皆福実験地下ダムについては、次節で詳述する。

樺島・皆福に続いて同時期に施工された地下ダムは、1984（昭和59）年に福井県三方町に竣工した常神地下ダム<sup>9)</sup>である。樺島・皆福の両地下ダムがグラウト工法を採用したのに対し、常神地下ダムは地中連続壁工法を採用した最初の事例である<sup>10)</sup>。これら3つの地下ダムが、1974（昭和49）年から1984（昭和59）年の10年の間に完成したことにより、地下ダムは「構想の時代から実用化の時代へ」入っていったといわれる<sup>11)</sup>。

海岸沿いの地下水位が低くなる箇所では、海水が帯水層へ浸入してくるのを防ぐ塩水阻止型の地下ダムがある（岸・森（1998））。上記の常神地下ダムや、沖縄本島の米須地下ダムな

どがその施工例として挙げられる。

地下ダムの技術は、このように地理的・地質的環境に対応するために、改良が行われ進化していくのである。

## 5. 島嶼技術としての地下ダム —宮古列島の例—

本節では、宮古島で地下ダムが着工されるに至った歴史的経緯と黎明期の地下ダム事業、さらに、新たな地下ダム技術について述べる。

地下ダムが建設される以前の宮古島は、飲料水は井戸（ガー）に、生活用水や農業用水は降雨による自然水に依存してきた。すなわち、雨水が地下に浸透して蓄えられる地下水に、生活の糧を依存してきたことになる。地下水は空隙の多い琉球石灰岩を通して地下谷を流れ、海洋へと流出してしまうために、宮古島は比較的雨量が多いにもかかわらず、農業用水などの水資源が乏しい島といわれてきた<sup>12)</sup>。いわば、農業を含めた島民の生活・経済は、地下水量を決定づける降雨量に大きな影響を受けてきたともいえよう。

1971（昭和46）年に宮古島を襲った大干ばつは、農業の基幹作物であるサトウキビの生産量を激減させ、離農者を大量に生むことになった。大干ばつを契機として、こうした「水なし農業」からの脱却を目指し、抜本的な灌漑排水対策を求める声が一層強くなっていったのである<sup>13)</sup>。

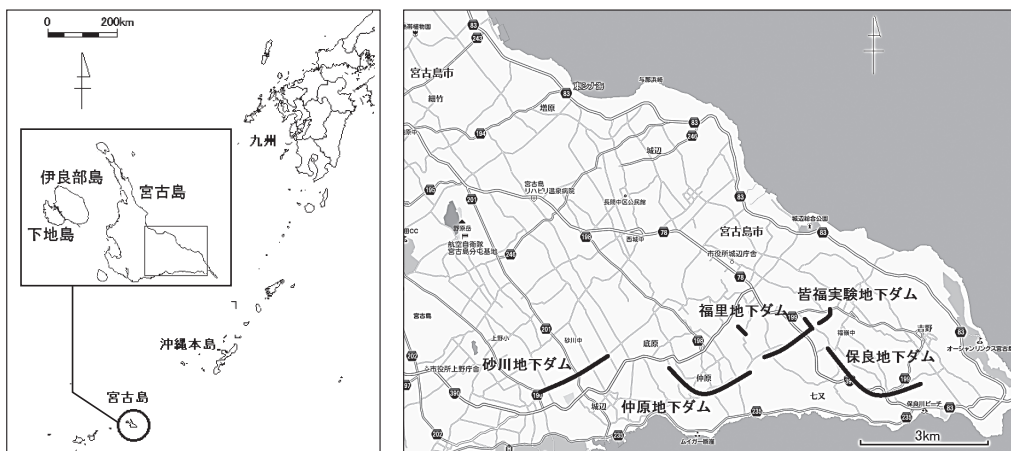


図6 宮古島・地下ダム位置図

宮古島では過去、1962（昭和37）年から1963（昭和38）年にかけても、2年に亘る大干ばつに見舞われているが、琉球政府はこの時期に地下水探査事業に着手している。また、同じ1963（昭和38）年に製糖会社の招待で来島した、米国・ホノルル市水道局のジョン・F・ミンク水利地質技師が地下水の調査を行った。「ミンクレポート」とよばれる調査報告書は、後の宮古島の水道や畑地灌漑総合計画の基礎資料として活用されることになる（小川（1990））。このミンクレポートは、宮古島の地質特性を踏まえ、将来の地下水資源開発の可

能性を示唆する重要な内容であったとされる。

1972（昭和47）年の本土復帰以前から実施されていた予備調査をもとに、地質構造の分析がなされ、地下ダムによる地下水資源開発の提案が行われた。この時期以降の宮古島の地下ダム開発について、富田他（1985）では、以下の6期に区分している。地下ダム黎明期ともいえる宮古島での地下ダム事業の推移である。

- 第1期（1972～1973年度） 地下ダムによる地下水資源開発構想の提案
- 第2期（1974～1976年度） 実験地下ダムのダムサイトを皆福に選定、ダム諸元確定
- 第3期（1977～1978年度） 皆福実験地下ダム施工
- 第4期（1979～1980年度） 皆福実験地下ダムの取水実験実施
- 第5期（1981～1983年度） 島内5か所（皆福含む）の地下ダム計画策定
- 第6期（1984年度以降） 新たな4地下ダムの実施設計開始

島の基幹産業である農業の基盤を整備すべく着工したのが、皆福実験地下ダムである。地下ダムの施工は沖縄県外において、これまでに数例試行されているが、農用地の緊急保全対策事業としての本格的な取り組みは、皆福実験地下ダムが最初であった。皆福実験地下ダムはわが国最初の本格的な地下ダムということで、関係者の高い関心が寄せられたといわれる。

皆福実験地下ダムでは、琉球石灰岩における地下ダム止水壁の工法として、グラウト工法が採用され、試験的な施工に城辺町皆福地点がダムサイトに選ばれた。この皆福実験地下ダムの成功を受けて、砂川・福里・保良・仲原の各地下ダムが後に建設されることになるのである。

皆福実験地下ダムの建設概要は、表3のとおりである。

表3 皆福実験地下ダムの建設概要

所在地	宮古島市城辺地内	堤長	500m
事業主体	沖縄総合事務局	堤幅	5m
施工形式	地盤改良（グラウト工法）	総貯水量	700,000m <sup>3</sup>
天端堤高	16.5m	有効貯水量	510,000m <sup>3</sup>
天端標高	33m	建設期間	1977～1979年

\*工藤他（1984）、今泉他（1988）、岸・森（1998）など参考に作成した。

止水壁となる堤体の築造には、断続的に掘削したボーリング孔から地盤内にモルタルを注入していく。地中のモルタルの注入には凝固時間の採り方や、隣接する注入孔でのボーリングに注意が払われており、また遮水性能の判定は、特に関係者の関心が集中したところであった。

地下ダムの止水壁を築造する際、地下水が満杯状態となったときに、天端を越流させるべく、地表面から一定の深さで天端を完成させなければならない。これは、異常降雨などによって急激に水位が上昇し地表面に洪水がもたらされるのを防ぐためである。皆福実験地下ダムは、天端堤高が16.5mである。つまり、止水壁の基礎地盤から16.5mの高さで地下水位が満水となるよう止水壁の天端がとられている。地表面からみれば、最低限8m深度のところに

位置するように止水壁の天端が設けられた（工藤他（1984））。

こうして、皆福実験地下ダムは1979（昭和54）年に完成して、当初の想定以上の貯水効果を発揮（相場他（1983））し、地下ダム基礎技術の確立に大きく貢献することとなったのである。

宮古島では、皆福実験地下ダムの成功を受けて、さらなる農業用水の安定供給を目指し、砂川地下ダム・福里地下ダムの施工が行われる<sup>14)</sup>（表4）。

表4 砂川地下ダム・福里地下ダム建設概要

	砂川地下ダム	福里地下ダム
所在地	宮古島市城辺地内	宮古島市城辺地内
事業主体	農用地整備公団	農用地整備公団
施工形式	地中連続壁工法	地中連続壁工法
天端堤高	50m	27m
堤長	1,677m	1,790m
有効貯水量	7,259,000 m <sup>3</sup>	8,000,000 m <sup>3</sup>
建設期間	1988～1994年	1994～1998年

\* 出典：黒沼（2013a）。

砂川・福里の両地下ダムでは、地中連続壁工法が採られた。両地下ダムとも、柱列式原位置攪拌工法であり、近接する皆福実験地下ダムよりも貯水量の規模が大きいため、福井県の常神地下ダムなどの地中連続壁工法を、さらに経験実証的に発展させたものである。

柱列式原位置攪拌工法の施工を概略すると、以下のとおりとなる。

まず、ダムサイトの作業ヤードとなる範囲の表土を剥ぎ取り、プラント・作業床・ガイドウォールを造成する。掘削重機により、ケーシング内に挿入されたオーガーによって、深さ20m程度まで、孔間は90cm程度の間隔で掘削排土する。先行削孔とよばれる次工程では深度20m以深を、不透水性地盤まで固化性のない注入液を用い掘削する（図7①）。

その後、ケーシング削孔の孔間に残った地山を20m深度まで切り崩し、越流部を開削する（図7②）。止水壁の主工程となる三軸削孔では、三軸オーガーで未掘削部分を掘削しながら、オーガー先端部から固化性の注入液を吐出し、破碎した琉球石灰岩と攪拌混合する（図7③）。最終的に止水

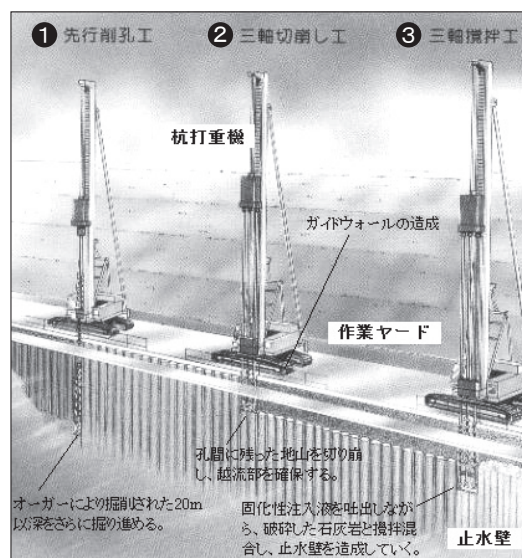


図7 原位置攪拌工法施工概念図  
うるま市与那城饒青年会ホームページ  
（2015年5月）をもとに加筆した。



壁の不連続部分の調整杭を打設して調整を行い、止水壁の延伸を行っていく<sup>15)</sup>。

砂川地下ダム施工(図8)では、止水壁の施工箇所は民有地を避け、公道の地下部となるように選定された。止水壁の延長はおよそ1.7kmに及び、施工深度は地下谷の形状によって止水壁を締め切る高さが異なる。

また、琉球石灰岩には大規模な空洞が存在することがあるため、福里地下ダムでは施工途中、止水壁の締め切り部に鍾乳洞の存在が明らかとなり、空洞処理工として掘削した排土を空洞部に投入したことが報告されている<sup>16)</sup>。

地下ダムは、地上の構築とは異なり目に見えないところでの施工となるために、このように予期せぬ偶発的な障害が生じることがある。したがって、施工精度を高めるため、過去の障害に際した経験・対応に基づいた判断も重要となるのである。

砂川・福里地下ダムが完成した宮古島では、これまでに農業生産はサトウキビに依存していたものが、マンゴーなど果樹や野菜といった採算品目へとシフトしていった<sup>17)</sup>。これは、天候により左右されてきた農業用水が、地下ダムの貯水によって安定的に供給できたことによる成果ともいえよう。また、地下ダムで貯留された地下水は、宮古島の周辺に位置する池間島・来間島へも、架橋に添加される送水管で供給されるようになった。

宮古島の北西部には、さらに、伊良部島・下地島が位置する。伊良部島と下地島は隣接しており往来には支障がないが、宮古島と伊良部島・下地島は約4km離れているため、これまで生活の往来は船舶に拠り離島の不便を強いられてきた。しかしながら、2015(平成27)年1月に伊良部大橋が架橋されることで、モビリティの障害は解消したのである。また、灌漑排水事業では、現在宮古島で追加施工中の保良・仲原地下ダムで貯留される地下水が、伊良部島へ供給されることとなった。

保良・仲原の両地下ダムは、砂川・仲原地下ダム同様に地中連続壁工法を採っている(表5)。

伊良部島には、一定数の農業人口があるものの、そもそも自島内に地下ダムを建設できないのは、その地質事情によるためである。

伊良部島は宮古島とは異なり、海洋沿岸部では海面水位が地下水位面よりも高位にあるため、海水が石灰岩層へと浸入してくる。そのため、石灰岩層内では、海水によって淡水である地下水が押し上げられた状態となる。その形状はレンズ状になるため、伊良部島の「淡水レンズ」とよばれる。淡水レンズ状の地下水を一度に大量に取水すると、下層部にある塩水



図8 砂川地下ダム施工現場

出典：大林組ホームページ(2015年5月)

表5 保良地下ダム・仲原地下ダム建設概要

	保良地下ダム	仲原地下ダム
所在地	宮古島市城辺地内	宮古島市城辺地内
事業主体	沖縄総合事務局	沖縄総合事務局
施工形式	地中連続壁工法	地中連続壁工法
天端堤高	26m	55m
堤長	2,600m	2,350m
有効貯水量	1,600,000m <sup>3</sup>	9,200,000m <sup>3</sup>
事業期間	2009～2020年	

\*出典：黒沼（2013a）。

を引き込んでしまうアップコーニングの問題が生じる（図9）。

したがって、伊良部大橋の施工を機に、送水管を伊良部大橋に添架して、宮古島で増設される保良地下ダム、仲原地下ダムから地下水を送水することが計画されたのである。国営灌漑排水事業として実施される「宮古伊良部地区」では、地下ダム・送水管とともに副貯水池、ファームpondなどが追加増設・整備されることになる<sup>18)</sup>。

これによって、宮古島の周辺の島々は、地下ダムで貯留される地下水が行渡ることになり、農業の水源は安定化に向かうことになるだろう。

宮古列島には、伊良部島と同じく淡水レンズの構造を持つ島に、多良間島がある。多良間島は宮古島周辺の島々のように、地下水の送水連携ができる島がない孤絶環境のため、地下水の大量の利用にあたっては、島単体で適用可能な地下ダムの建設技術を検討しなければならない。

近年、研究が進められている「フローティング型地下ダム」は、淡水レンズの両端部に止水壁を構築して、淡水レンズの厚みを増す技術である<sup>19)</sup>（図10）。

多良間島は地下水量が豊富にあるために、これまでに飲料水が大きく枯渇するようなことはなかった。しかしながら、島民の生活も農業もすべて地下水に依存する孤絶環境において、今後、長期の干ばつに備えた水資源の安

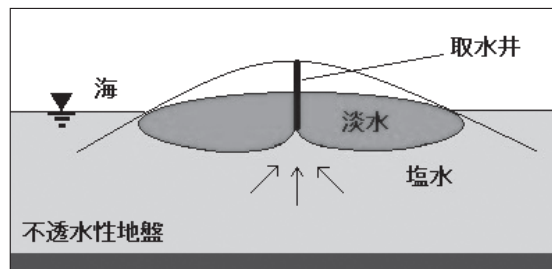


図9 淡水レンズのアップコーニング

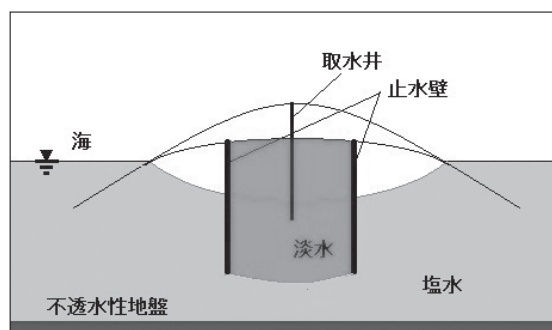


図10 フローティング型地下ダム概念図

定的な確保のために、地下ダム技術は適用に向け改良していかなければならない。

## 6. 島嶼技術としての地下ダム ー沖縄の島嶼での展開ー

海洋沿岸部でのダムサイトの位置によっては、地下水の貯留とともに、塩水浸入の阻止を図る目的の地下ダムが導入されている。沖縄本島で施工された米須地下ダムは、その一例である<sup>20)</sup>。

米須地下ダムでは、施工前の既存地下水にある程度の塩水が浸入・分布しているため、堤体の施工にあたっては、塩水排除ができるように施工区間を分けて、施工順序を決定した。堤体施工後の残留塩水については、除去用井戸からの揚水によって、塩水が排除された。事業主体は沖縄総合事務局で、施工形式は地中連続壁工法が採られている。堤高69.4m、堤長2,345m、有効貯水量1,810,000m<sup>3</sup>である。

1992（平成4）年度から2005（平成17）年度までに、米須地下ダムとともに沖縄本島南部地区での灌漑排水事業として、慶座地下ダムが施工されている。事業主体、施工形式ともに同じで、堤高53m、堤長970m、有効貯水量210,000m<sup>3</sup>である<sup>21)</sup>。

このほか、沖縄県ではこれまでに複数の地下ダムが施工されている（図11）。

沖繩本島中部のうるま市は与勝半島に位置し、サトウキビを基幹作物とする畑作地帯である。与勝地区は地表水が乏しく、農業用水の恒常的な確保が困難な地形であるため、これまでに干ばつの被害に見舞われてきた。一方で、勝連城跡の南側の地形は、急傾斜に囲まれた台地上の形状を有し、透水性の高い琉球石灰岩層の下にある地盤は島尻泥岩層となっているため、地下ダムの施工に適した地質形状であることが判明した。

与勝地下ダムは、沖縄県・うるま市を事業主体に、1997（平成9）年から2007（平成19）



図11 沖縄県の地下ダム分布図

内閣府沖縄総合事務局ホームページ（2015年5月a）などを参考に作成した。

年まで建設された。施工形式は地中連続壁工法であり、柱列式原位置攪拌工法が採用されている。堤高67.6m、堤長721.8m、総貯水量3,963,000 $\text{m}^3$ 、有効貯水量1,382,000 $\text{m}^3$ である。供給対象は農業用水であり、宮古島同様に建設完了後の灌漑排水整備では、これまでのサトウキビを中心とした作物から、野菜や花きなど採算品目への転換が期待されている<sup>22)</sup>。

宮古列島以外の島嶼圏では、伊是名島に千原地下ダム、伊江島に伊江地下ダム、久米島にカンジン地下ダムが建設されている。

伊是名島の千原地下ダムは、地表部の貯水池と地下部の地下ダムが複合となった水源整備である。地上部と地下部の有効貯水量はそれぞれ、513,000 $\text{m}^3$ 、240,000 $\text{m}^3$ となっており、およそ2：1の割合である。事業主体は沖縄総合事務局、建設期間は1999（平成11）年度から2008（平成20）年度、供給対象は農業用水である。地下ダムの止水壁は、堤高14m、堤長479mとなる鋼矢板の打ち込みにより施工されている。この灌漑排水整備によって、他地区同様に、サトウキビの単収向上に加え、生産品目の多様化に期待が寄せられているようだ<sup>23)</sup>。

伊江島の伊江地下ダム、久米島のカンジン地下ダムはともに地中連続壁工法に、柱列式原位置攪拌工法を採用している。

伊江地下ダムは、事業主体が沖縄総合事務局、建設期間が2004（平成16）年度から2015（平成27）年度、供給対象が農業用水である。堤高55.9m、堤長2,612m、有効貯水量は754,000 $\text{m}^3$ となっている。柱列式原位置攪拌工法においては、地盤の状況や止水壁の深度が深くなる箇所では、孔曲がりが生じ、調整杭の打設本数が増える可能性がある。伊江地下ダムの施工では、杭の基盤岩への根入れが不十分な箇所や、基底部層中に杭が高止まりした箇所には、グラウト注入によって遮水性を確保する工夫が採られた<sup>24)</sup>。

カンジン地下ダムも千原地下ダム同様、地上部の貯水池と地下ダムの複合によって、灌漑排水を行うシステムである。事業主体は沖縄県、建設期間は水源工事の対象となる地下ダム施工（1期工事）で1995（平成7）年度から2005（平成17）年度、供給対象が農業用水である。止水壁の堤高は57.6m、堤長は1,070mである。有効貯水量は、地上部が1,370,000 $\text{m}^3$ で、地下部140,000 $\text{m}^3$ のほぼ10倍の規模である<sup>25)</sup>。カンジン貯水池の特徴は、自然にできた凸状の池の下流側を地下の連続止水壁で締め切り、上流側に滞留させて地上の貯水池から水資源を汲み上げることにある。これは、地上の貯水池が地下水を浸透できる浸透池であるために、実現可能な灌漑排水システムであるといえよう。いわば、地下ダムと地上の貯水池を融合させた相乗効果の創出といっても過言ではなからう。

## 7. むすびにかえて

1929（昭和4）年から1943（昭和18）年まで、栃木県北東部の那須野ヶ原での水源ダムの計画にあたって、栃木県は当時京都帝国大学の教授であった可知貫一博士に、現地の技術判定を依頼している。可知博士は那須野ヶ原全体を巨大なダムに見立てて、地下水路を通じ、地下水の涵養を行うことを提案した。これが、『可知構想』とよばれるわが国最初の地下ダ

ムの技術的構想である。

この地下ダム構想は結局、実現することはなかった。もともと豊富な表流水が存在したために地上ダムの建設によって水源が確保できたこと、当時、「地下ダム」という奇抜な発想に具体的な技術展開としては馴染まなかったことが、実現に至らなかった大きな理由であるといわれる。

続いて、地下ダム施工の技術指針を明確に示したのは、樺島地下ダムが建設されるきっかけとなった松尾新一郎博士の地下ダム構想である。事業主体である野母崎町が松尾博士に現地調査を依頼したのは、博士らが1964（昭和39）年に技術論を発表<sup>26)</sup>してからずいぶんと歳月が流れてからのことである。

今では沖縄の島嶼圏を中心として、数多くの建設が行われているが、かつては壮大な空想のごとく映った地下ダムの構想が実現するのには、環境がもたらす水源確保の緊急性に後押しされてのことであった。策を通すように地下水が海洋に流出する地質事情ゆえに、水資源に悩んでいた島嶼圏では、皮肉なことにその透水性の高い地質を利用した建設技術によって水源が確保されることになったのである。

地下ダム技術の萌芽に、可知博士や松尾博士が果たした役割は大きい。両博士の地下ダム構想と現在の地下ダムとの関わりについては、別稿を期したい。

## 注

- 1) Hansen and Nilsson (1986) 参照。
- 2) 黒沼 (2008)、(2013a)、(2013b)、(2015) を参照。
- 3) 地下ダムの散水設備など附帯設備については、鈴木他 (2002) を参照されたい。
- 4) 石崎 (1979) 参照。
- 5) 可知 (1948) 第8章。
- 6) Hansen and Nilsson (1986)、緑資源機構 (2004) 第1章など。
- 7) 石崎 (1979) 参照。
- 8) 野母崎町は、もともと長崎県西彼杵郡にあり、2005（平成17）年1月の合併によって長崎市に編入され、長崎市野母崎樺島町に改めた。
- 9) 止水壁の堤長202m、堤高18.5m、堤幅50cm、総貯水量73,000m<sup>3</sup>、施工形式は地中連続壁工法。事業主体は三方町・福井県・水産庁、給水対象は水道用水である。ロッド式クラムシェル掘削機が用いられた。止水壁が海岸線から30mの位置にあり、塩水の浸入を阻止するための地下ダムである（大林組 (1997)）。
- 10) 工藤他 (1984) 参照。
- 11) 富田他 (1985) 参照。
- 12) 宮古島の水分地質と地下水流の関係については、今泉他 (1988) が詳しい。
- 13) 宮古島のサトウキビ生産と灌漑排水事業の歴史的推移は、廣瀬他 (2010) を参照。



- 14) 筆者は、1991（平成3）年から工事完成までの1994（平成6）年まで、砂川地下ダム建設工事の施工を担当したわけであるが、砂川地下ダムの施工詳細や当時の施工風景については、黒沼（2014）を参照されたい。
- 15) 詳細は、緑資源機構（2004）第6章を参照されたい。
- 16) 緑資源機構（2004）第6章。
- 17) 宮古島市企画政策部・宮古島市水道局（2009）pp.19-20参照。
- 18) 内閣府沖縄総合事務局（2015）参照。
- 19) フローティング型地下ダムについては、白旗・喜多（2007）、増岡他（2010）、増岡他（2012）、増岡他（2013）など、島嶼単体での地下水強化に向けた技術開発が進められている。
- 20) 緑資源機構（2004）第6章参照。
- 21) 以上、内閣府沖縄総合事務局ホームページ（2015年5月b）参照。
- 22) 沖縄県農林水産部中部土木事務所・うるま市与勝地下ダム土地改良区（2005）参照。
- 23) 内閣府沖縄総合事務局ホームページ（2015年5月c）参照。
- 24) 細川（2014）参照。
- 25) 島袋・大城（2005）参照。
- 26) 松尾・河野（1964）参照。

## 参考文献

- Ghorbani,B. (2007). "A glance at historical Qanats in Iran with an emphasis on Vazvan Qanat in Isfahan." *IRNCID-ICID*, pp165-172.
- Hanson,G. and Nilsson,A. (1986). "Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries." *Ground Water*, Vol.24 No.4, pp.497-506.
- Nilsson,A. (1988). "Groundwater Dams for Small-scale Water Supply." *Intermediate Technology Publications*.
- Nishigaki,M., Kankam-Y,K. and Komatsu, M. (2004). "Underground dam technology in some parts of the world." 『地下水学会誌』第46巻第2号、pp.113-130.
- Nissen-P.,E. (2006). "Water from Small Dams." Danish International Development Assistance (Danida).
- Onder,H and Yilmaz,M. (2005). "Underground Dams *A Tool of Sustainable Development and Management of Groundwater Resources*." EWRA *European Water* 11/12, pp.35-45.
- Prinz.D. (1996). "Water Harvesting : Past and Future." Pereira, L.S. (ed.), *Sustainability of Irrigated Agriculture*, pp.135-144.
- Prinz,D. (2002). "The Role of Water Harvesting in Alleviating Water Scarcity in Arid Areas," In Keynote Lecture, Proceeding, International Conference on Water Resources Management in Arid Regions, *Kuwait Institute for Scientific Research*, Vol.Ⅲ, pp107-122.

- Stevenson,A and Lindberg,C,A. (2010). 'New *Oxford American Dictionary* THIRD EDITION'. OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- Zarkesh,M.M.K., Ata,D. and Jamshidi,A. (2012). "Performance of Underground Dams for Sustainable Management of Drought." *Journal of Biourbanism* II, pp.35-45.
- 相場瑞夫・黒川睦生・永田聡・細谷裕士・吉川満 (1983).「宮古島における地下ダムの水文挙動」『土木技術資料』第21巻第3号、17-23頁。
- 廣瀬孝・野田崇広・前門晃 (2010).「地下ダム事業による農業用水の安定供給と宮古島サトウキビ生産」『沖縄地理』第10号、19-24頁。
- 細川悟 (2014).「完成迫る「伊江地下ダム」」『土地改良』284号、64-65頁。
- 今泉真之・前川統一郎・長田実也・富田友幸 (1988).「宮古島地下ダム計画の水理計算シミュレーションについて」『地下水学会誌』第30巻第1号、11-23頁。
- インタープレス対訳センター編 (1998).『インタープレス版学術用語・JIS用語に基づく英和・和英建築・土木5万語中辞典』、アルファベータブックス。
- 石崎勝義 (1979).『地下水ハンドブック』第14章、建設産業調査会。
- 可知貫一 (1948).『農業水利学』第8章、第一出版。
- 環境省・社団法人海外環境協力センター (2004).「平成15年度環境省委託事業 砂漠化防止対策モデル事業地下ダム技術報告書」。
- 岸智・森一司 (1998).『改訂地下水ハンドブック』第13章、建設物価調査会。
- 工藤浩・粕倉克幹・四方哲雄 (1984).「グラウチングの基礎知識 (その11)ーグラウチングの実施例 (Ⅱ)ー」『農業土木学会誌』第53巻第2号、159-167頁。
- 黒沼善博 (2008).「建設技術が及ぼす有限資源の配分様式ー地下ダム建設効果と地下水資源の持続可能性ー」『大阪経大論集』第58巻第6号、229-244頁。
- 黒沼善博 (2013a).「建設技術の複合による島嶼の総効用についてー沖縄県宮古島圏域の地下ダム建設効果を例にー」『島嶼研究』第13号、7-22頁。
- 黒沼善博 (2013b).「島嶼の有限資源と建設技術の応用ー沖縄県多良間島の地下ダム建設の検討にあたってー」『島嶼研究』第14号、1-19頁。
- 黒沼善博 (2014).「島の地下水と建設技術ー沖縄県宮古諸島からー」『地域総合研究』第41巻第2号、115-138頁。
- 黒沼善博 (2015).「島嶼圏の全体最適と建設技術ー沖縄県伊良部島の架橋効果ー」『島嶼研究』第16号、1-23頁。
- 増岡健太郎・山本肇・青木智幸 (2010).「浮き型地下ダムにおける効率的淡水取水方法と塩淡水境界挙動に関する研究」『大成建設技術センター報』第43号、56-1-56-8頁。
- 増岡健太郎・山本肇・今村聡 (2012).「フローティング型地下ダムの課題とその対策方法について」『地下水技術』第54巻第2号、1-11頁。
- 増岡健太郎・山本肇・青木智幸 (2013).「フローティング型地下ダムにおける淡水貯蓄シミュレーション

- ン」『大成建設技術センター報』第46号、52-1-52-8頁。
- 松尾新一郎・河野伊一郎（1964）。「地中ダム化による地下水規制」『土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集第6回』、105-106頁。
- 緑資源機構（2004）。「地下水有効開発技術マニュアル」。
- 宮古島市企画政策部・宮古島市水道局（2009）。「平成19年度宮古島地下水水質保全調査報告書」。
- 内閣府沖縄総合事務局（2015）。「地下水を活かした豊かな美ぎ島 ―地下ダムで潤う宮古島農業―」平成27年2月版。
- 農林水産省構造改善局計画部資源課（1993）。「地下ダム計画・設計技術指針（第3次案）」。
- 大林組（1997）。「広報パンフレット『地下の水資源の有効利用 地下ダム』」。
- 小川竹一（1990）。「地下水保全思想と宮古島地下水保護管理条例」『沖大法学』（10）、143-200頁。
- 沖縄県農林水産部中部農林土木事務所・うるま市与勝地下ダム土地改良区（2005）。「県営灌漑排水事業 与勝地区の概要 ―未来を開く地下ダムの水「黄金水」―」。
- 島袋進・大城厚司（2005）。「カンジン地下ダムの概要について」『農業土木学会誌』Vol.73（2005）No.11、1021-1022頁。
- 白旗克志・喜多正人（2007）。「地下ダム技術の最先端、淡水レンズを強化利用する水源開発」『しまたてい』No.43、20-23頁。
- 鈴木光春・山本好克・川井康・柴田康男（2002）。「地下ダムの取水ポンプ設備（宮古島・喜界島）」『エバラ時報』No.194、30-35頁。
- 棚橋由彦・濱崎正一・西垣誠（1996）。「長崎県野母崎町樺島地下ダムの地下水変動および効果判定解析」『長崎大学工学部研究報告』第26巻第47号、295-300頁。
- 棚橋由彦・濱崎正一・西垣誠（1997）。「長崎県樺島地下ダム改修工事の準三次元地下水変動解析による効果判定」『地下水技術』第39巻第6号、17-22頁。
- 富田友幸・今泉真之・細谷裕士・永田聡・黒川睦生（1985）。「沖縄県宮古島における地下ダム開発計画」『応用地質』第26巻第4号、24-30頁。

## ホームページ・イラスト

内閣府沖縄総合事務局ホームページ

([http://ogb.go.jp/nousui/kannai-link/honto\\_nanbu/index.html](http://ogb.go.jp/nousui/kannai-link/honto_nanbu/index.html)) 2007年8月

(<http://ogb.go.jp/nousui/nns/c2/page1-2.htm>) 2015年5月a

(<http://ogb.go.jp/nousui/nns/totikairyuu/p4-5.htm#s1>) 2015年5月b

(<http://ogb.go.jp/nousui/nns/totikairyuu/p4-6.htm#s1>) 2015年5月c

うるま市与那城饒辺青年会ホームページ

(<http://www.nohen.sakura.ne.jp/tikadamu-4.htm>) 2015年5月

大林組ホームページ

(<http://www.obayashi.co.jp/chronicle/100yrs/t3c5s99.html>) 2015年5月

イラストは注釈無き限り、すべて筆者が作成した。