

浮き型地下ダムにおける効率的淡水取水方法と 塩淡境界挙動に関する研究

増岡 健太郎^{*1}・山本 肇^{*1}・青木 智幸^{*1}*Keywords : Freshwater lens, Underground dam, Freshwater/saltwater boundary, Pumping well, Atoll island*

淡水レンズ, 地下ダム, 塩淡境界, 揚水井, 環礁島

1. はじめに

ツバルやモルジブなどに代表されるサンゴ礁の低平な島々では、安定した淡水資源を確保できるような地表水は一般的に存在しない。それは、これらの島の地盤が、浸透性の非常に高い風化石灰岩で形成されているためである^{1), 2)}。雨水の一部は一時的に形成される河川により海へ速やかに流出し、一部は地盤に浸透する。そして、地表からの涵養と海への流出が平衡し、さらに海水と淡水の密度差の影響により、淡水は、図-1のように島の下側の海水の上部でレンズ状に浮かんだ状態で貯まる（淡水レンズ）。淡水レンズは、Ghyben-Herzbergの式で表現されるように、島の中央では最も層厚が大きく、海岸へ近づくにつれて薄くなっている。

表-1に、主な島嶼国における淡水源の一覧を示す³⁾。表中のすべての国において、淡水源として地下水が利用されており、島嶼国においては地下水が非常に重要なことがわかる。海水淡化化プラントも一部の国で利用されているが、設置、維持管理に高額の費用が必要であることから（生産と配水のコストはUS\$1.07~1.60/m³であるとされる⁴⁾），高級リゾートや緊急時用に限定されている。したがって、島嶼における主な淡水

源は、雨水を容器に直接貯留するか、地下水に限られているのが現状であり、恒常に水不足が発生しやすい状態である。これに加え、これらの国や地域では、今後、気候変動の影響により、さらに水不足が発生すると考えられている。国立環境研究所は、海面上昇による淡水レンズの縮小と気候変動による降雨パターンの変化が重なると、ツバルやマーシャル諸島といったサンゴ礁からなる島嶼国の水資源は致命的な影響を受けると報告している^{5), 6)}。またIPCC（気候変動に関する政府間パネル）第4次報告書では、21世紀中頃までに、気候変動が原因でカリブ海と太平洋の小さな島嶼では乾季における水不足が深刻化すると報告している⁷⁾。したがって、これら大洋の島嶼における安定淡水源確保のための技術開発は急務であるといえる。

表-1 主な島嶼国における淡水源³⁾

Table 1 Freshwater resources in some small island states

国名	主な淡水源	人口に対する安全な水の利用率（%）	人口に対する水供給率（%）
クック諸島	SW, GW, RW	95	100
ミクロネシア	SW, GW, RW	44	—
斐ジー	SW, GW, RW, D (リゾートのみ)	77	47
キリバス	GW, RW, D (限定)	76	47
マーシャル諸島	RW, GW, D (緊急時)	82	—
ナウル	D (常用), RW, GW (限定)	100	—
ニウエ	GW, RW	100	100
パラオ	SW, GW, RW	86	79
バブアニューギニア	SW, GW, RW	24	42
サモア	SW, GW, RW	100	99
ソロモン諸島	SW, GW, RW	64	71
トンガ	GW, RW	95	100
ツバル	RW (主), GW (限定), D (緊急)	85	100
バヌアツ	SW, GW, RW	87	88

SW=地表水, GW=地下水, RW=雨水, D=海水淡化化



図-1 淡水レンズ
Fig.1 Freshwater lens

* 1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

2. 浮き型地下ダム

近年、環礁などにおける安定した淡水源の確保を目的とした、淡水レンズ強化技術として、『浮き型地下ダム』が注目されている⁸⁾。図-2に、従来型の地下ダムと浮き型地下ダムの違いを示す。従来型の地下ダムは、日本の宮古島などで見られるように、海面より上に不透水層で形成された地下谷に止水壁を構築し、地下水を堰き止めることで地下水を貯めるものである。しかし、一部のサンゴ礁の低平な島では、基盤となる不透水層の位置が深い、あるいは地下水位が浅い場合には、従来型の地下ダム建設も不適となる。一方、本研究で対象とする浮き型地下ダムは、島の地下に周状に止水壁を構築することで淡水の海への流出を防止し、止水壁内側の塩水の上の淡水貯留量を増大させる技術である。淡水は、止水壁内側の塩水を押し出しながら、塩水上に浮かんだ形で貯留されるため、不透水層の位置が深く、地下水位が浅い従来型地下ダムの不適地にも建設が可能である。

このような浮き型地下ダムの課題として、地盤中における淡水／塩水挙動の理解（塩水中に淡水が流入した時の残留塩分の問題など）、効率的な淡水取水方法の確立、建設による周辺環境への影響評価、さらに、地表部の土地利用形態などによっては硝酸性窒素汚染による問題などが考えられる。

本研究では、そのうち、貯留した淡水の効率的な取

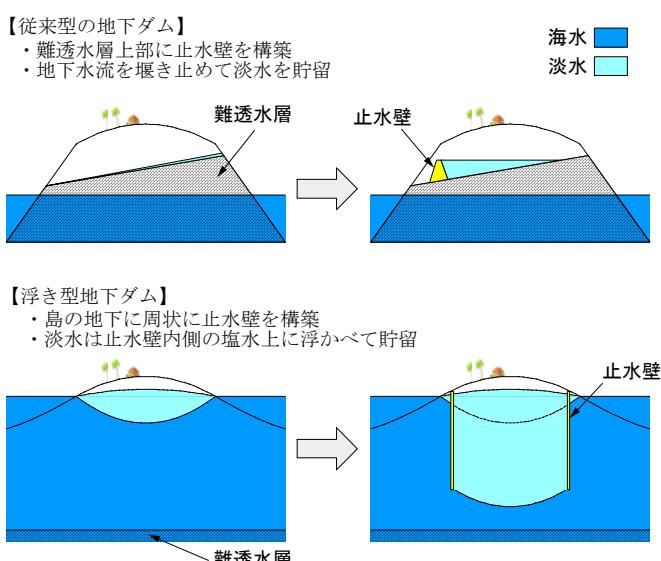


図-2 従来型の地下ダムと浮き型地下ダムの違い
Fig.2 Comparsion of traditional underground dam and floating underground dam

水方法に関し、鉛直二重揚水法を提案し、その適用性を室内試験と数値解析により検討した。また、浮き型地下ダム構築後の淡水／塩水挙動の理解に関して、淡水貯留シミュレーションを実施し、ダムの構築が既存の淡水レンズ形状や塩淡境界挙動に与える影響についての検討を行ったので、以下に報告する。

3. 鉛直二重揚水法の適用検討

3.1 鉛直二重揚水法

浮き型地下ダムでは、淡水レンズが塩水上に浮かんだ状態で存在しているため、通常の井戸により淡水取水を行うと、図-3のように、取水井戸に向かう地下水流れによって、深部の塩水を引き込むアップコーニングの問題が発生する。今後、地球温暖化によって海面が上昇すると、淡水レンズの厚さが薄くなることが予測されており、アップコーニングの問題はさらに発生し易くなると考えられる。図-4のように、集水管を水平方向に放射状に配置することで平面的に淡水を採取し、塩淡境界付近でアップコーニングの発生をしにくくした満州井戸形式も提案されているが、マクロ的に塩淡境界挙動を考えれば従来の井戸と同様にアップコーニングは発生する。実際、マーシャル諸島共和国では、満州井戸方式であっても、過剰揚水によりアップコーニングの発生が報告されている¹⁾。また、井戸設置対象地盤は風化石灰岩層が主であるため透水性

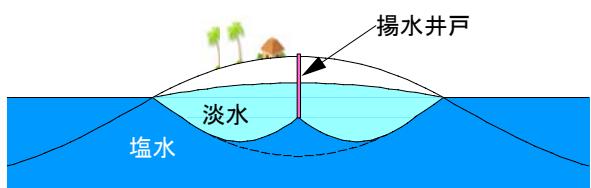


図-3 塩水のアップコーニング
Fig.3 Up-corning of saline water caused by freshwater extraction

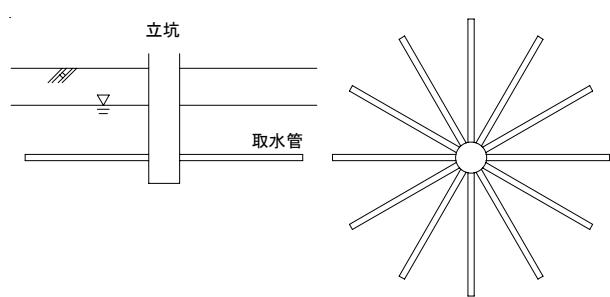


図-4 満州井戸の概要
Fig.4 Conceptual model of radial well

が高く、満州井戸の施工には、非常に大きな労力と時間を費やすと考えられる。ここでは、塩淡境界付近における淡水取水において、塩水の混入を回避する技術として考案した『鉛直二重揚水法』についての検討をおこなった。

鉛直二重揚水法の原理を以下に説明する。図-5は、二次元場における一点での揚水と二点での揚水の浸透流解析による流れの違いを示す。均質地盤における単一揚水では、揚水箇所を中心として全方向から均等に揚水点へ向かう流れが生じている。一方、同流量を二点で揚水した場合、二点の垂直二等分線上で二点を結

ぶ方向の流速ベクトルは相殺され、流速場は二点の間に止水壁を設けた場合と同じ状態となり、二点間方向の流れが消滅していることがわかる。

鉛直二重揚水法ではこの原理を利用して、図-6に示すように、二本の井戸のうち一本の揚水点は淡水側、もう一方は塩水側とし、塩淡境界がそれぞれの揚水点の垂直二等分線となるように井戸を設置する。そして、淡水側で揚水すると同時に塩水側でも同量揚水することにより、塩淡境界付近における井戸方向への流れを相殺し、淡水側への局所的な塩水混入を防止することが可能となる。浮き型地下ダム構築時の淡水取水方法として鉛直二重揚水法を適用すれば、貯留した淡水を効率的に揚水することが可能になると考えられる。

3.2 室内試験

3.2.1 試験方法

本研究での試験装置全体の概略を図-7に示す。試験装置は、鉛直二次元アクリル水槽（奥行き100mm）、淡水貯留タンク、塩水貯留タンク、定流量ポンプ、涵養装置（多孔塩ビ管）、越流タンクから構成される。鉛直二次元アクリル水槽の内部（図-7中ABCD）は試料充填エリアとし、表-2に示す物性のサンゴ砂を充填して島嶼の地盤を模擬し、水槽前面の中央には揚水孔を縦に並べて設けた。充填エリアの外側は水位濃度固定エリアとし、下側から定流量ポンプにより塩水を少量ずつ供給してエリア内の塩水濃度を一定に保った。試験に用いた塩水はフルオレイセンナトリウム（ $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ ）で黄色に着色し、目視による塩淡境界の判断を行い易くした。アクリル水槽内に試料を充填後、水槽内を塩水で満たし、涵養装置を用いて淡水を水槽上部から試料充填エリアへ浸透させ、浮き型地下ダムを構築した際の淡水貯留状態を作成した。塩淡境

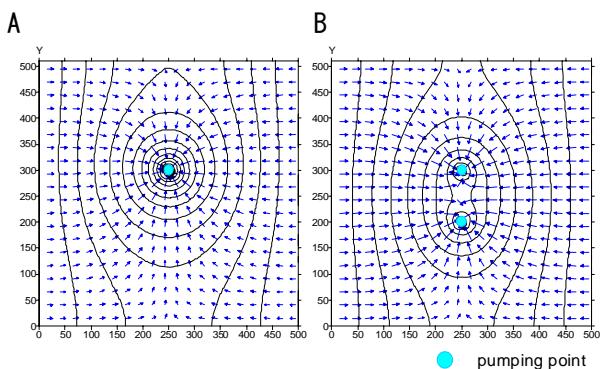


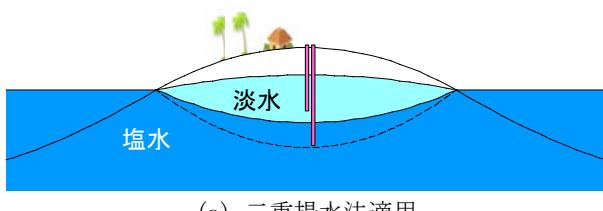
図-5 浸透流解析による流れの比較

A: 単一揚水, B:二点揚水

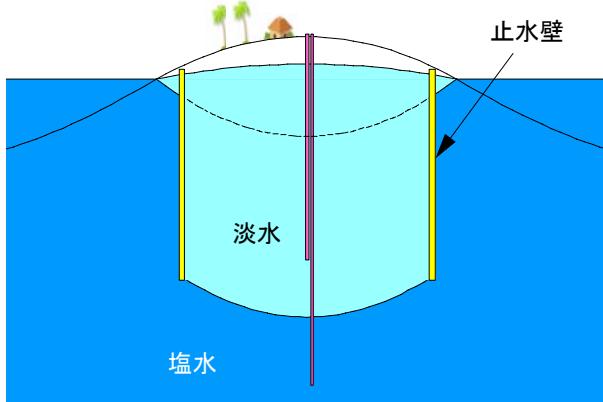
Fig.5 Comparison of flow patterns

A: Single pumping well

B: Double pumping wells



(a) 二重揚水法適用



(b) 浮き型地下ダム+二重揚水法適用

図-6 鉛直二重揚水の概念

Fig.6 Concept of the floating underground dam with the double pumping system

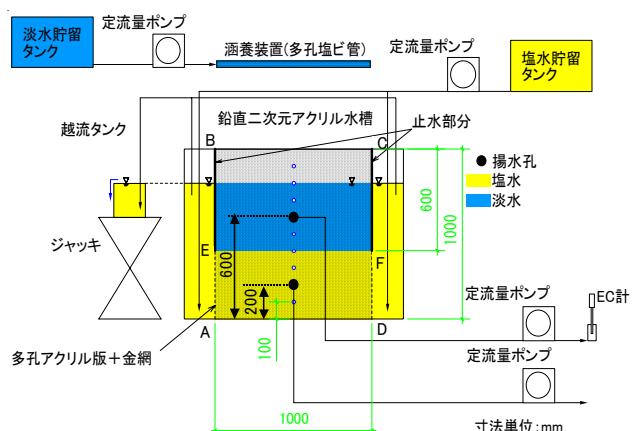


図-7 試験装置概略

Fig.7 Schematic diagram of the test apparatus.

表-2 材料物性
Table 2 Material properties

項目	値
土粒子の密度(g/cm^3)	2.826
均等係数	1.62
曲率係数	1.06
D_{50} (mm)	0.42
塩水重量濃度(%)	3.0
試料充填密度(g/cm^3)	1.50
間隙率(-)	0.47

表-3 試験ケース一覧
Table 3 Experimental cases

ケース	淡水側（上部） 平均揚水量 (ml/min)	塩水側（下部） 平均揚水量 (ml/min)
1	133	なし
2	134	141
3	135	239

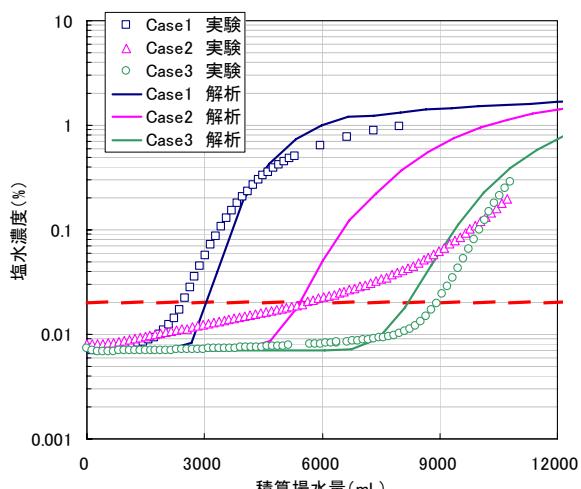


図-8 積算揚水量と塩水濃度の関係

Fig.8 Time evolution of salinity concentration with pumped water volume

界の位置が、AB面またはCD面の止水部分の下端まで到達した時点で涵養を止め、水槽下端から200mmおよび600mmの位置に設けた孔から同時に揚水し、揚水した水の電気伝導度を測定して塩分濃度の経時変化を調べた。試験ケース一覧を表-3に示す。ケース1は、淡水側（上部）のみで揚水して従来の井戸による揚水を模擬した場合で、平均揚水量は133(ml/min)である。ケース2は、塩水側と淡水側で同時に同程度の量を揚水した場合で、淡水の平均揚水量は134(ml/min)、塩水の平均揚水量は141(ml/min)である。ケース3は、ケース2より塩水側の揚水量を大きくした場合で、淡水の平均揚水量が135(ml/min)、塩水の平均揚水量が

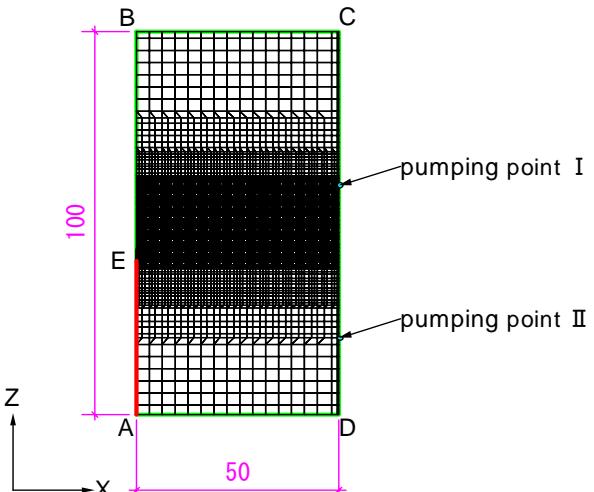


図-9 解析モデル
Fig.9 Model of numerical analysis

表-4 解析パラメータ

Table 4 Analysis parameter

項目	値
透水係数 (cm/s)	2.55×10^{-2}
塩水密度 (g/cm^3)	1.03
縦分散長 (cm)	0.3
横分散長 (cm)	0.03
拡散係数 (m^2/s)	20×10^{-10}
間隙率 (-)	0.352
屈曲率 (-)	0.5

239(ml/min)とした場合である。ケース1～3について、飲料水の塩分基準である0.02%の塩水が揚水されるまでの淡水揚水量について比較した。

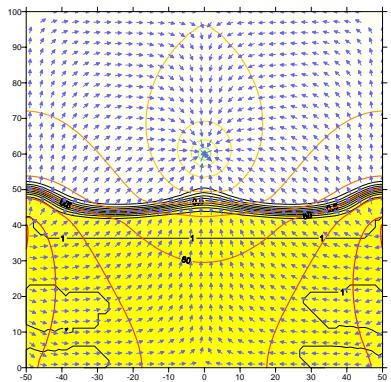
3.2.2 試験結果

試験結果を図-8に示す。図より、塩水側（水槽下側）と淡水側（水槽上側）の両方で同時に揚水を行ったケース2、3の方が、淡水側のみで揚水を行ったケース1よりも、図中に点線で示した塩分濃度0.02%の水質に達するまでの淡水揚水量が多くなった。ケース2ではケース1の約2倍、ケース3ではケース1の約3.5倍となり、鉛直二重揚水法が単一井戸で揚水を行う場合よりも、塩水混入を抑制できる可能性が高いことがわかった。図-10～12に室内試験時の観察結果を示す。ケース1では水槽中央が盛り上がるようなアップコーニングが発生したが、ケース2およびケース3では観察されなかった。

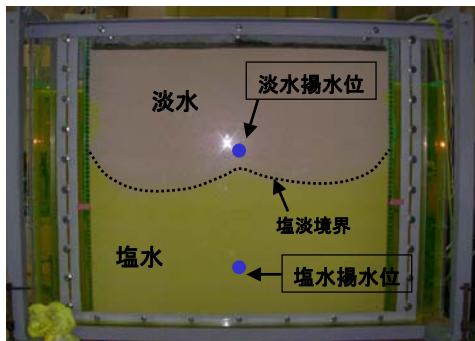
3.3 数値解析

3.3.1 解析方法

本試験結果をモデル化して、Dtrans2D-EL〔オイラリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流・移流・分散解析プログラム〕（岡山大学）により数値解析を行



(a) 解析結果



(b) 実験結果

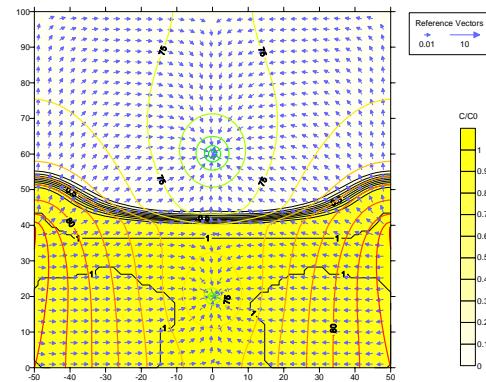
図-10 ケース1室内試験および解析結果（20分）

Fig.10 Salinity distribution of Case 1 (at 20 minutes;
upper: experiment, lower: simulation)

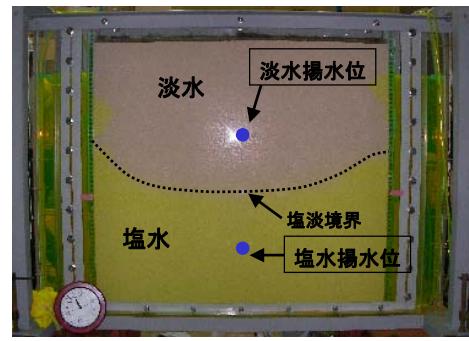
った。試験水槽は左右対称であるため、解析では鉛直二次元の軸対称として扱った。解析モデルを図-9に示す。図中 AE 部分は、試験での塩水領域との境界に相当するため定濃度・定水頭境界を与える、AD, DC, CB, BE 部分は不透水境界とした。また、CD 部分は実験水槽の中央に相当し、実験と同じ位置に揚水点を二箇所設けた。総節点数は 9842, 総要素数は 9855 である。計算に使用したパラメータを表-4に示す。

3.3.2 解析結果

室内試験のケース 1, ケース 2, およびケース 3（いずれも排水開始 20 分後）に相当する解析結果と室内試験結果を図-10～12 に示す。解析結果には塩分濃度（黄色濃淡）、等ポテンシャル線、流速ベクトルを示す。比較のため、実験における同時刻の様子をそれぞれ示す。解析結果より、淡水側のみで揚水を行ったケース 1 の場合、塩淡境界でアップコーニングが生じることが解析結果および室内試験結果の両方から確認できる。一方、淡水側と塩水側で同程度の量を揚水したケース 2 の場合には、図-11 に示すように、アップコーニングの発生が抑制されていることがわかる。そして、図-8 より、飲料基準である 0.02%に到達するまでの揚水量は、淡水側のみで揚水した場合よりも多くなっている。



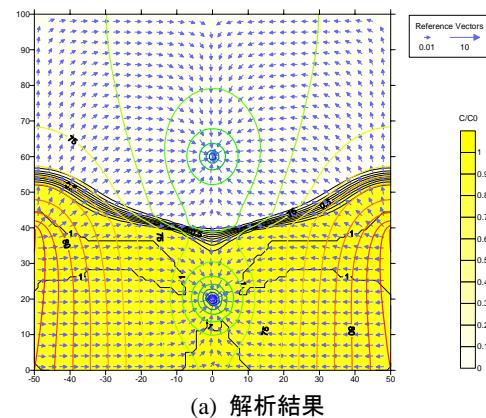
(a) 解析結果



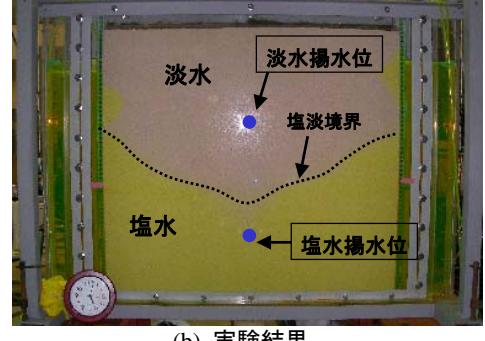
(b) 実験結果

図-11 ケース2室内試験および解析結果（20分）

Fig.11 Salinity distribution of Case 2 (at 20 minutes;
upper: experiment, lower: simulation)



(a) 解析結果



(b) 実験結果

図-12 ケース3室内試験および解析結果（20分）

Fig.12 Salinity distribution of Case 3 (at 20 minutes;
upper: experiment, lower: simulation)

る。さらに、ケース2より塩水側の揚水量を多くしたケース3の場合、実験および解析とも、塩水のアップコーニングは発生しなかったが、反対に淡水が塩水側に入り込むダウンコーニングが発生しており、塩水側の揚水量が大きすぎたことがわかる。

3.4 考察

試験結果と解析結果は概ね同じ傾向を示し、鉛直二重揚水法を適用すると淡水側の塩水混入を遅らせることが可能であることがわかった。しかし、塩水のアップコーニングに関しては、塩水側で揚水を行っても淡水の取水に伴って塩淡境界が上昇し、淡水側の揚水点の影響圏に入ってしまうために、次第にアップコーニングが発生するといえる。また、塩水側の揚水量が淡水側と比べて大きい場合には、反対に塩水側の影響圏に淡水が入るため、淡水のダウンコーニングが発生すると考えられる。したがって、鉛直二重揚水を実際に適用する場合には、塩淡境界の位置に追従した揚水量や揚水点の調整が必要となることが考えられる。

4. 淡水貯留シミュレーション

4.1 解析条件

4.1.1 解析モデル

ここでは、島を直径4kmの円柱で模擬し、図-13に示すような2次元軸対称モデルを作成した。地層は、浮き型地下ダムの構築に適すると考えられる沖縄県の島嶼を想定し、琉球石灰岩($EL+10\sim-60m$ 、透水係数 $K=1\times10^{-1} \text{ cm/s}$)と、その下位層として島尻層群($K=1\times10^{-5} \text{ cm/s}$)を設定した⁹⁾。地表面標高は $EL+10m$ とし、琉球石灰岩の有効空隙率は10%、年間降雨量は沖縄県の平均降雨量から2000mmと仮定した^{10), 11)}。

数値解析は、多成分・多相系の地下流体解析コードTOUGH2 (Pruessら, 1999) を用いた。塩水と淡水の密

度差によって生じる塩水密度流や地下水面変動を考慮するため、3成分(H_2O , $NaCl$, 空気)2相(液相、気相)流体解析を行うこととした。

境界条件として、側面境界は、海面($EL\pm0m$)より上側を大気圧、海面以下を静水圧で各々固定し、海面以下の塩分濃度を4%で固定した。底面は不透水境界とした。地表面境界は、次に述べる地下水涵養量による一定流量境界とし、涵養地下水の塩分濃度は $1\times10^{-3}\%$ とした。

淡水レンズは地表面の降雨が地下に浸透することにより形成される。降雨から蒸発、地表面流出する水量を差し引いたものが地下水涵養量と呼ばれ、地域によることが多い。我が国では年間降雨量の20%~40%程度であることが多い。さらに涵養された地下水のうち、ある割合は表層の高浸透性の地層を通じて海へ直接流出する可能性があり、淡水レンズとして地下に貯留される割合はさらに少ないと考えられる。

本研究では、仮に、年間降雨量のうち淡水レンズと

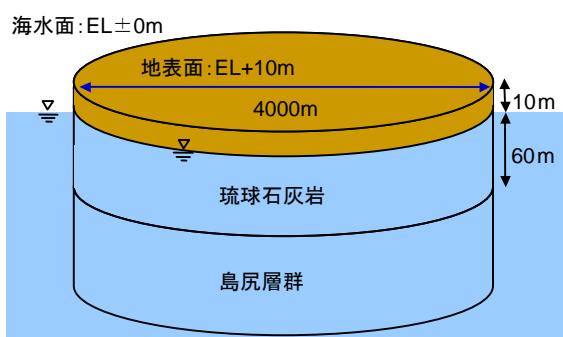


図-13 解析条件

Fig.13 Conceptual model of an atoll island

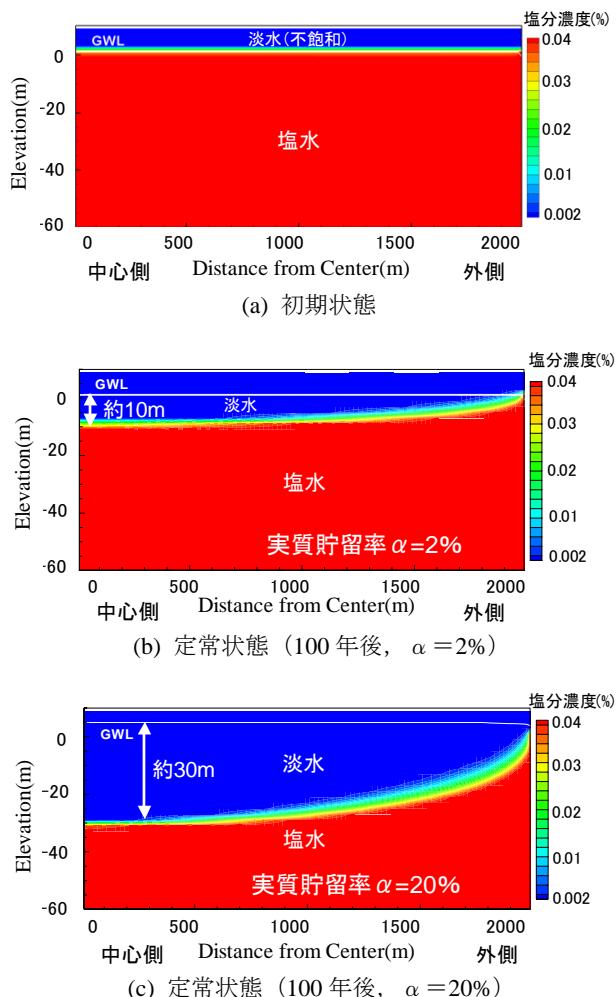


図-14 解析結果（地下ダム構築前）

Fig.14 Simulated results of freshwater/saltwater boundary before dam construction

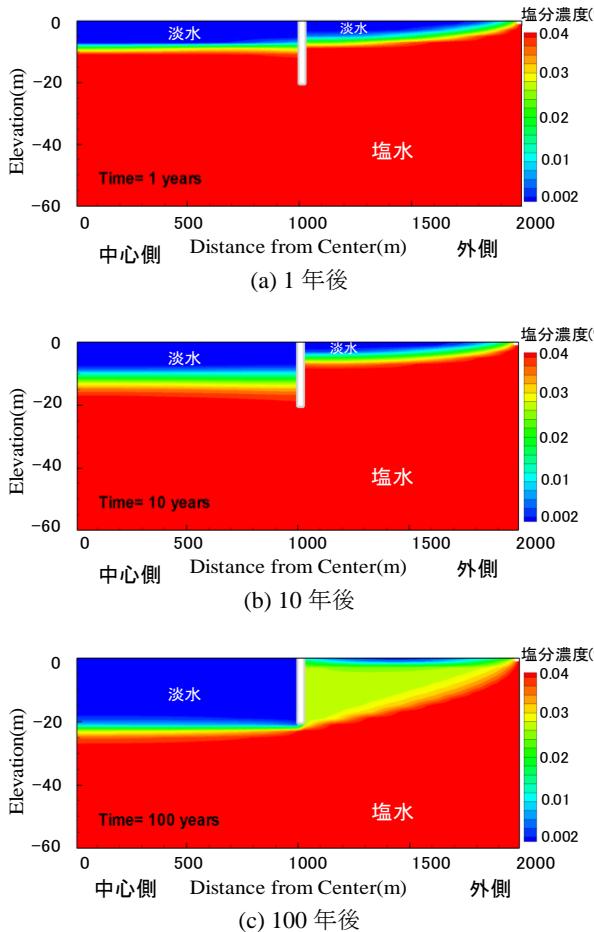


図-15 解析結果（地下ダム構築後、実質貯留率2%）
Fig.15 Time evolution of freshwater/saltwater boundary for floating dam condition ($\alpha=2\%$)

して貯留される水の割合を実質貯留率 α （地下水涵養量 = 年間降水量 × 実質貯留率 α ）と呼ぶ。淡水レンズの厚さは、地表面からの淡水涵養と海への淡水流出のバランスで決まるため、 α が大きいほど淡水レンズの層厚は増すことになる。

4.1.2 自然状態の淡水レンズ

地下ダム構築前の自然状態を設定するため、淡水レンズを解析した。図-14(a)に示すように、海面以下を塩水で満たした状態を初期状態として地表面から淡水の地下水涵養を続けると、淡水レンズが形成される。実質貯留率 α が 2% および 20% のケースについて解析し、淡水レンズの層厚について検討した。ここで、実質貯留率が 2% の場合は、地下水涵養量が少ない場合に相当し、20% の場合は淡水の浸透量のほとんどが淡水レンズの形成に寄与する場合に相当すると考えている。

4.1.3 浮き型地下ダム構築後

4.1.2 で得た自然状態の淡水レンズを用いて、そこに浮き型地下ダムを構築した場合に形成される淡水域を解析した。浮き型地下ダムは、島の同心円状に構築し、その直径を 2kmとした。解析ケースは、 $\alpha=2\%$ の場合

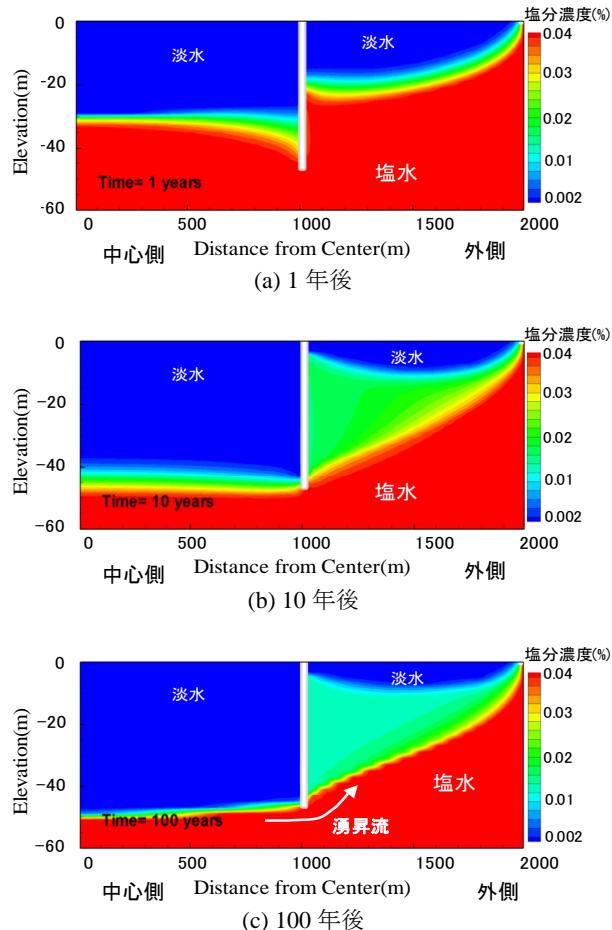


図-16 解析結果（地下ダム構築後、実質貯留率20%）
Fig.16 Time evolution of freshwater/saltwater boundary for floating dam condition ($\alpha=20\%$)

と、 $\alpha=20\%$ の場合の 2 ケースを設定した。地下ダムの深度は、初期の淡水レンズの厚さに合わせ、各々 20m と 40m とした。地下ダムの透水係数は 1×10^{-6} cm/s、有効空隙率は 10% とした。

4.2 解析結果

4.2.1 自然状態の淡水レンズ

地下ダム構築前の淡水レンズを解析した結果を図-14(b), (c) に示す。定常状態となる 100 年後の淡水レンズの層厚は、 $\alpha=2\%$ の場合約 10m、 $\alpha=20\%$ の場合約 30m となった。日本国内の島嶼の淡水レンズ調査結果¹¹⁾によれば、淡水レンズの層厚は 10m オーダーであるという報告もあるが、淡水レンズの厚さは帯水層の透水係数や水理地質構造によっても変化するため、実際のサイトでの実質貯留率の評価にあたっては、上記の要因を加味した総合的な調査と解析が必要となる。

4.2.2 浮き型地下ダム構築後

実質貯留率 2% と 20% の場合の解析結果を、各々図-15 と図-16 に示す。実質貯留率 2% の場合（図-15）には、地下ダム構築後から 10 年経過しても淡水厚さの増加は小さく、地下ダム深度が 20m であっても淡

水域がダム深さに達するのに約100年を要することが分かる。一方、実質貯留率20%の場合(図-16)には、地下ダムを構築してから約10年後に地下ダムのほぼ下端まで淡水が貯留されていることがわかる。一方、ダム外側における既存の淡水レンズに関しては、上流(島中央)からの淡水の供給が止水壁により遮断されることと、ダム下端で発生する止水壁に沿った塩水の湧昇流(図中の矢印)により、淡水レンズの層厚が薄くなる。その結果、ダム外側では淡水揚水利用が不可能となる地域ができる可能性も指摘される。

4.3 考察

浮き型地下ダムの効果は、地表からの淡水の涵養量によって大きく左右され、涵養量が少ない場合には、十分な淡水域の形成に数10年以上の歳月を要する可能性がある。また、地下ダムの深度が深すぎると帶水層の地下水遮断効果により、浅部の地下水面上昇を引き起こすため、地下ダムの深度は淡水の予定貯水量を確保できる範囲で浅めに設定するのが妥当と思われる。ダム設計にあたっては、詳細な水文データならびに揚水量を考慮したダム形状や深度の最適化が重要となる。

5. まとめ

浮き型地下ダムに貯留した淡水の効率的な取水方法として、鉛直二次元水槽による室内試験と室内試験をモデル化した数値解析を実施した。その結果、試験結果と解析結果は、概ね同じ傾向を示し、鉛直二重揚水法によって淡水側の井戸への塩水混入を遅らせることができた。しかし、塩水側と淡水側の揚水量が同程度だと、次第に塩淡境界は淡水側の影響圏に入るため、アップコーニングが発生する可能性が考えられる。また、塩水側の揚水量が淡水側よりも大きい場合、塩水のアップコーニングは完全に抑えられるが、反対に淡水のダウンコーニングが発生する事が示された。したがって、塩水のアップコーニングを終始抑えるためには、揚水量や揚水点が塩淡境界に追従するよ

うな鉛直二重揚水システムが必要であることがわかった。また、地下ダム構築後の貯留シミュレーションにより、地下ダムへの実質貯留率が浮き型地下ダム構築の効果を左右する大きな要因であることを示した。特に、淡水の貯留によって地下ダムの外側では淡水の湧昇流が発生し、淡水レンズの層厚を減少させるなどの課題が明らかとなった。

参考文献

- 1) Ian White, Fresh groundwater lens recharge, Bonriki, Kiribati, preliminary report, IHP-V Project 6-1, UNESCO, Paris, 1996
- 2) Ryan T. Bailey, John W. Jenson, Arne E. Olsen, Estimating Ground Water Resources of Atoll Islands, Water 2010, 2
- 3) SOPAC, An Overview of Integrated Water Resources Management in Pacific Island Countries: A National and Regional Assessment, SOPAC Miscellaneous Report 554 Revised Edition, 2004
- 4) (社)日本原子力産業協会 海水の淡水化に関する検討会, 海水淡水化の現状と原子力利用の課題—世界的水不足の解消をめざして一, 調査研究報告書, 2006
- 5) 三村信男, 原沢英夫: 海面上昇データブック, 国立環境研究所 地球環境研究センター, 2000
- 6) 筆橋一輝, 秋元圭吾: 南太平洋島嶼国の淡水レンズに対する海面上昇の影響評価, 第24回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, pp.41-44, 2005
- 7) IPCC, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2007
- 8) 中里裕臣, 井上敬資, 中西憲雄, 沖縄県津堅島における淡水レンズ強化試験の可視化, (社)物理探査学会第114回学術講演会論文集, pp.113-114, 2006
- 9) 岸智, 浜谷直史, 長田実也, 原郁男, 楠本岳志, 沖縄県津堅島における集水井を利用した淡水レンズからの地下水開発, 応用地質, 第39巻, 第3号, pp.298-305, 1998
- 10) 宮城調勝, 小宮康明: 琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度, 琉球大学農学部学術報告50, pp.131-135, 2003
- 11) 長田実也, 吉川博恭, 富田友幸, 座波吉実: 沖縄・多良間島の淡水レンズ-琉球石灰岩の透水性について, 日本地質学会, pp.420, 1988
- 12) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis, TOUGH2 user's guide. Version 2.0. Rep. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA. 1999