

サウジアラビア王国
水・電力省 (MOWE)

サウジアラビア王国

南西地域総合水資源開発・管理計画調査

ファイナル・レポート (追加調査結果 地下水シミュレーション フィージビリティ調査の内容)

平成 22 年 10 月
(2010 年)

独立行政法人国際協力機構
(JICA)

委託先
八千代エンジニアリング株式会社
株式会社三祐コンサルタンツ

環境
JR
10-110

サウジアラビア王国
水・電力省 (MOWE)

サウジアラビア王国

南西地域総合水資源開発・管理計画調査

ファイナル・レポート (追加調査結果 地下水シミュレーション)

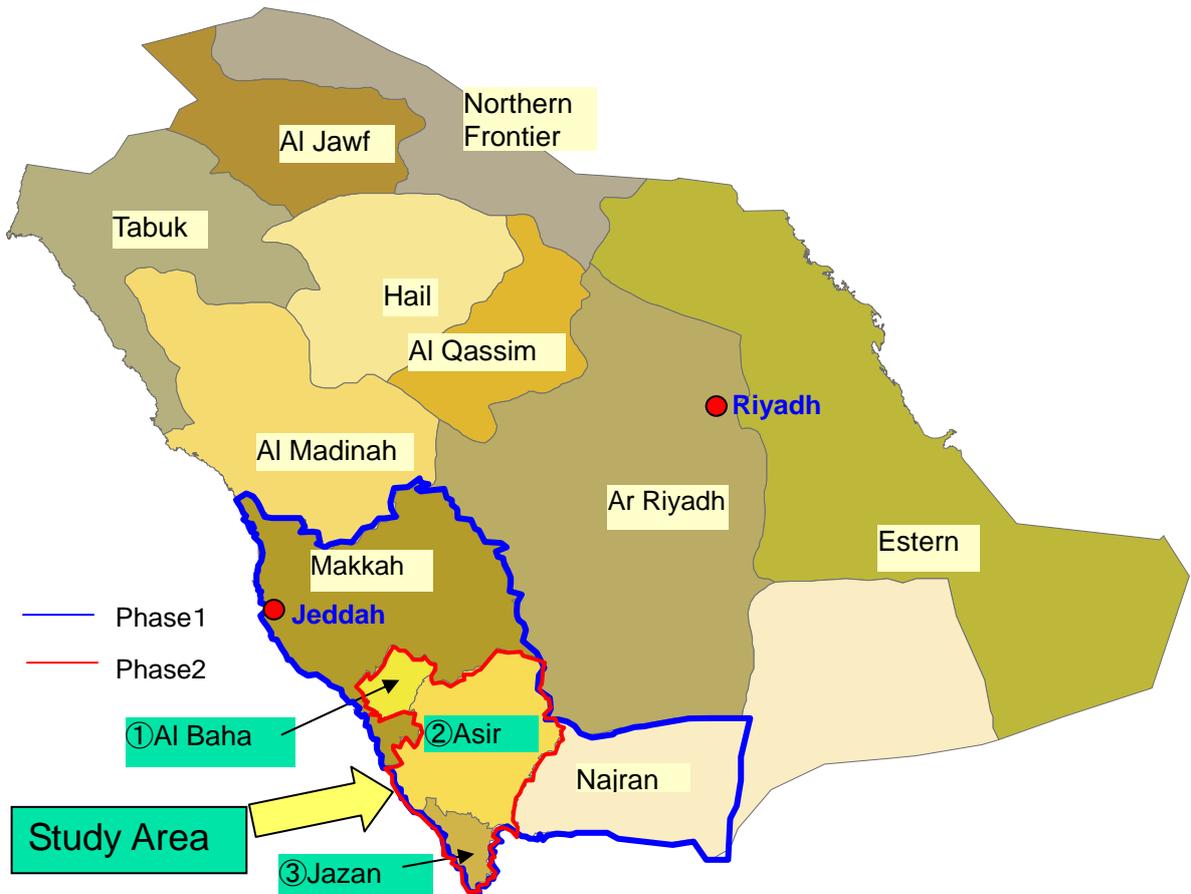
平成 22 年 10 月
(2010 年)

独立行政法人国際協力機構
(JICA)

委託先
八千代エンジニアリング株式会社
株式会社三祐コンサルタンツ

外国為替レート

1.00 米ドル=3.74 サウジリアル=89.0 円
(WEB : 2010 年 3 月 1 日ドル/サウジリアル)



ファイナル・レポート
追加調査結果
地下水シミュレーション

目次

(頁)

第1章	解析概要	1
第2章	統合型水循環シミュレータ GETFLOWS	3
2.1	概要	3
2.2	特徴	3
第3章	Jazan 州を対象とした流域モデルのプロトタイピング	5
3.1	対象領域	5
3.2	利用可能なデータ	5
3.3	3次元格子モデルの構築	9
3.4	初期流動場の解析	14
3.4.1	支配方程式	14
3.4.2	解析方法	14
3.4.3	解析条件	14
3.4.4	解析結果	16
第4章	水資源開発の効果予測の試算	20
4.1	試算ケース	20
4.2	ダムとワジとの連携運用による水資源開発の試算	20
4.2.1	ダムの有無による洪水氾濫挙動の違い	20
4.2.2	ダム放流によるワジ下流地点の地下水位変化	21
4.2.3	ダム放流の効果（蒸発による損失水量の評価）	21
4.3	下水再生水の人工涵養による水資源開発の試算	25
第5章	まとめと提言	28

図表リスト

表 3-1	利用可能なデータ	6
表 3-2	流体物性.....	15
表 3-3	地盤物性.....	15
表 4-1	水資源開発オプションに対する効果予測の試算ケース	20
図 1-1	ダムとワジの連携運用による水資源開発の概念.....	2
図 2-1	GETFLOWS の対象とする水循環システムの概念.....	3
図 2-2	地圏流体システムの構成.....	4
図 2-3	地表水・地下水相互作用の解析例.....	4
図 3-1	モデル化の対象領域.....	5
図 3-2	雨量観測データの例 (MOWE データベースより)	7
図 3-3	月別平均気温 (Gizan, 標高 5m, 緯度/経度 16 54N/042 30E)	7
図 3-4	表層地質図 (USGS Open File Report 97470b)	8
図 3-5	1km メッシュ (30") 土地被覆データ (The Global Land Cover by National Mapping Organizations, GLCNMO)	9
図 3-6	平面格子システム (1)	10
図 3-7	平面格子システム (2)	11
図 3-8	対象領域の地形鳥瞰図 (上段) と 3 次元格子システム (下段)	12
図 3-9	3 次元地質構造モデルと格子システムへの組込み.....	13
図 3-10	主要断面の格子分割と地質区分の割当て.....	13
図 3-11	2 相流パラメータ (相対浸透率曲線、毛細管圧力曲線)	16
図 3-12	地下水位等高線図.....	17
図 3-13	地下水流動経路.....	18
図 3-14	海水侵入域 (塩分等濃度面と深度断面)	18
図 3-15	深度毎の塩分侵入域 (塩分濃度の平面分布図)	19
図 4-1	降水時のダム貯留の有無による下流の洪水はん濫挙動の違い.....	22
図 4-2	降水時のダム貯留の有無による下流の洪水はん濫挙動の違い (沿岸域平野の拡大図)	23
図 4-3	ダム下流域の水位変化 (リチャージダムの有無を比較)	24
図 4-4	ダム放流の有無による開発可能な水資源量の比較.....	25
図 4-5	地下水揚水によって生じる水位低下と海水化 (ケース B1)	26
図 4-6	人工涵養による水位回復と海水化抑制効果 (ケース B2)	27

略語リスト

Abbreviation and Acronym	English	Arabic (عربي)	Japanese (日本語)
BCM	Billion Cubic Meters	مليار متر مكعب	10 億立方メートル
CBD	Convention on Biological Diversity	اتفاقية التنوع البيولوجي	生物多様性保全条約
C/P	Counterpart	النظير	カウンターパート
EIA	Environment Impact Assessment	تقييم الأثر البيئي	環境アセスメント
ER	Effective Rainfall	الأمطار الفعالة	有効雨量
ET	Evapotranspiration	البخرنتح	蒸発散
FAO	Food and Agriculture Organization, United Nations	منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة	国連食料農業機関
GIS	Geographic Information System	نظام المعلومات الجغرافية	地理情報システム
GPS	Global Positioning System	نظام تحديد المواقع العالمي	グローバル・ポジショニング・システム
GDP	Gross Domestic Product	الانتاج المحلي الإجمالي	国内総生産
GDW	General Directorate of Water		地方水事務所
GNI	Gross National Income	الدخل القومي الإجمالي	国民総所得
GSMO	Grain Silos and Flour Mills Organization	صوامع الحبوب ومطاحن الدقيق	サイロ・製粉公団
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technical Zusammenarbeit GmbH	الجمعية الألمانية للتعاون التقني المحدودة	ドイツ技術協力公社
IC/R	Inception Report	تقرير الإنشاء	インセプション・レポート
IEE	Initial Environmental Examination	الفحص البيئي الأولي	初期環境調査
IUCN	World Conservation Union	اتحاد التحويل العالمي	国際自然保護連合
IWPP	Independent Water and Power Project	المياه المستقلة وطاقة المشروع	独立水道・発電事業
IWRP	Integrated Water Resources Planning	التخطيط المتكامل للموارد المائية	総合水資源計画
JCCME	Japan Cooperation Center for Middle East	مركز التعاون الياباني للشرق الأوسط	財団法人中東協力センター
JICA	Japan International Cooperation Agency	الوكالة اليابانية للتعاون الدولي	独立行政法人国際協力機構
KSA	Kingdom of Saudi Arabia	المملكة العربية السعودية	サウジアラビア王国
LCD	Liter per Capita per Day	لتر للفرد يوميا	リッター/人/日
MOAW	Ministry of Agriculture and Water	وزارة الزراعة والمياه	水・農業省
MEPA	Meteorology and Environment Protection Administration	ادارة الأرصاد الجوية و حماية البيئة	気象環境保護庁
MCM	Million Cubic Meters	مليون متر مكعب	100 万立方メートル
M/M	Minutes of Meeting	ملخص الاجتماع	会議の議事録
MMW	Million Megawatt	مليون ميغاوات	100 万メガワット
NAS	National Agriculture Strategy	استراتيجية الزراعة الوطنية	国家農業戦略
NGO	Non-Governmental Organization	المنظمات غير الحكومية	民間公益団体
NMS	National Mining Strategy	استراتيجية التعدين الوطنية	国家鉱業戦略
NSS	National Spatial Strategy	استراتيجية العمران الوطنية	国家特別戦略
NWC	National Water Company	شركة المياه الوطنية	国家水会社
MWS	National Water Strategy	الاستراتيجية الوطنية للمياه	国家水戦略
MOA	Ministry of Agriculture	وزارة الزراعة	農業省
MOEP	Ministry of Economy and Planning	وزارة الاقتصاد والتخطيط	国家経済計画省
MOF	Ministry of Finance	وزارة المالية	財務省
MOI	Ministry of Interior	وزارة الداخلية	内務省
MOMRA	Ministry of Municipal and Rural Affairs	وزارة الشؤون البلدية والقروية	地方自治省
MOWE	Ministry of Water and Electricity	وزارة المياه والكهرباء	水・電力省
M/P	Master Plan	الخطة الرئيسية	マスタープラン
MSR	Million Saudi Riyals	مليون ريال سعودي	100 万サウジリアル
NCWCD	National Commission for Wildlife Conservation and Development	اللجنة الوطنية لحماية و تطوير الحياة البرية	国立動物保護開発協会

Abbreviation and Acronym	English	Arabic (عربي)	Japanese (日本語)
NIA	National Irrigation Authority	السلطة الوطنية للري	国家灌漑局
PME	Presidency of Meteorology and Environment Protection	الرئاسة العامة للأرصاد وحماية البيئة	国家気象環境保護
P/O	Plan of Operation	خطة العمل	プラン オブ オペレーション
PPP	Public Private Partnership	شراكة القطاعين العام والخاص	官民連携
RWPC	Renewable Water Production Corporation	شركة إنتاج المياه المتجددة	再生可能水生産公社
REWLIP	Red Sea Water Lifeline Project	شريان الحياة للمياه البحر الأحمر المشروع	紅海水ライフライン事業
OJT	On the Job Training	التدريب المهني	研修
SAGIA	Governor Saudi Arabian General Investment Authority	محافظة الهيئة العامة للاستثمار العربي السعودي	サウジアラビア総合投資庁
SAMA	Saudi Arabian Monetary Agency	مؤسسة النقد العربي السعودي	サウジアラビア通貨庁
SAR	Saudi Arabian Riyal	الريال السعودي	サウジアラビアリアル
SCT	Supreme Council for Tourism	المجلس الأعلى للسياحة	最高観光委員会
SEA	Strategic Environment Assessment	التقييم البيئي الاستراتيجي	戦略的環境アセスメント
SGS	Saudi Geological Survey	هيئة المساحة الجيولوجية السعودية	サウジ地質調査
SOIETZ	Saudi Organization for Industrial Estates and Technology Zone	الهيئة السعودية للمدن الصناعية و للمنطقة التكنولوجية	サウジ産業国家技術団体
SR	Saudi Riyals	الريال السعودي	サウジリアル
STP	Strategic Transformation Plan	خطة التحول الاستراتيجي	戦略的転換計画
STP	Sewerage Treatment Plant	محطة معالجة الصرف الصحي	下水処理プラント
S/W	Scope of Works	العمل نطاق	業務範囲
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	أداة تقييم التربة والمياه	土壌水アセスメントツール
SWCC	Saline Water Conversion Corporation	المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة	海水淡水化公社
UFW	Unaccounted For Water	مياه غير محسوبة	無収水
UNDP	United Nations Development Programme	برنامج الأمم المتحدة للتنمية	国連開発計画
UN-ESCWA	United Nations Economic and Social Commission for Western Asia	اللجنة الاقتصادية والاجتماعية للأمم المتحدة لغربي آسيا	国連西アジア経済社会委員会
WB	The World Bank	البنك الدولي	世界銀行
WHO	World Health Organizations	منظمة الصحة العالمية للأمم المتحدة	世界保健機関
WMO	World Meteorological Organization	المنظمة العالمية للأرصاد الجوية	世界気象機関

第1章 解析概要

ダムとワジの連携運用による水資源開発計画の事業効果を評価する流域モデリングと数値シミュレーションの試計算を実施した。本システムは、ワジ上流のダムにより雨水を貯留・放流することによりワジからの地下水涵養を促進し、必要に応じて取水利用することを想定するものである。図 1-1 にシステム概念図を示す。

本システムの特徴は、同国南西地域における限られた雨水が直接流出や蒸発によって短時間のうちに喪失することを抑制するため、地域固有の地形起伏を利用したダムや人工涵養による地下貯留の機能を積極的に利用し、飲料水や農業かんがい水等の利水サイクルと同期させることにある。

本調査では貯留層システムに関する以下の諸特性のモデル化が重要となる。

- ・ 雨水の直接流出
- ・ ワジ、ダム貯水の蒸発量
- ・ 表層地質の浸透量
- ・ 地盤内からの土壌蒸発量
- ・ 地下水流動系（地盤透水性、空隙率など）
- ・ 沿岸域の海水侵入域
- ・ 地下水取水による海水化等、地下水障害の発生リスク
- ・ 貯留層全体の水収支（利用可能な地下水生産量）

以上の点を考慮した解析には、地表水、地下水の相互作用を取り入れた流域の3次元モデリングが不可欠である。本検討では統合型水循環シミュレータ GETFLOWS を採用し、幾つかの試計算を通じてその適用性を検討した。

対象流域は Jazan 州一帯のベッシュダム流域を選定とし、気象、地形、水文地質等の現地調査データ及び一般公開データに基づいた3次元モデルのプロトタイピングとデモ計算を実施した。

本デモ計算では、水資源開発の複数の対策オプションによる効果を試算し、開発可能な水資源量の予察的評価を与えた。また、沿岸域の地下水揚水による水位低下と海水化が下水再生水の人工涵養によって抑制・回復される過程を再現し、回復不可能な地下水障害を生じさせない地下水生産量の把握、様々な環境条件の変化に対する事業成立性評価のための適用性を示した。

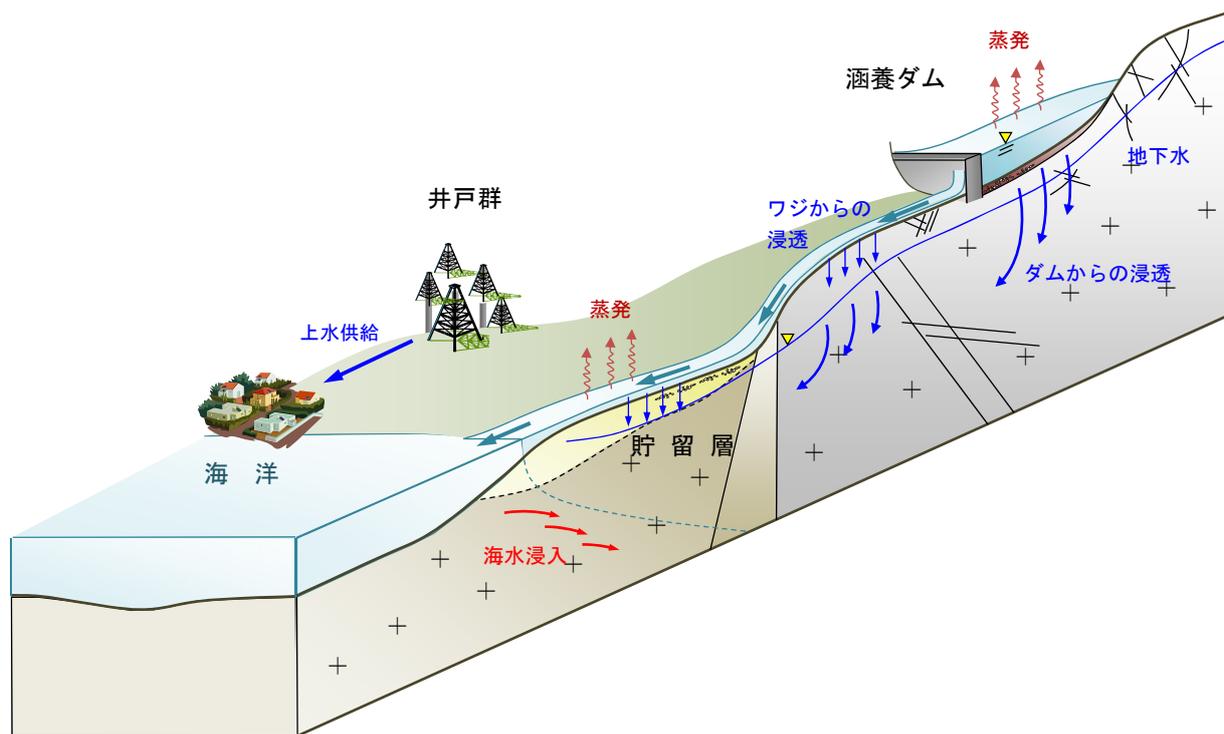


図 1-1 ダムとワジの連携運用による水資源開発の概念

第2章 統合型水循環シミュレータ GETFLOWS

2.1 概要

統合型水循環シミュレータ GETFLOWS の特徴は、陸域における水循環システムを多相多成分流体体系として定式化し、従来困難であった地上および地下の水の流れを完全に一体化させた点にある。さらに、本シミュレータは水に溶け込んだ汚染物質、熱、土砂など地上と地下の様々な相互作用を出来る限り忠実にコンピュータシミュレーションに取り込み、人間の想像を超えた複雑な自然現象の実態解明と将来予測を可能とする。

図 2-1 に GETFLOWS の対象とする水循環システムの概念を示す。GETFLOWS は、一般的な地下水解析、河川流出解析、洪水・はん濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質を含む移流分散解析、油層解析、熱解析など、広範な分野における地圏流体モデリングと実用的な数値シミュレーションを可能とする。

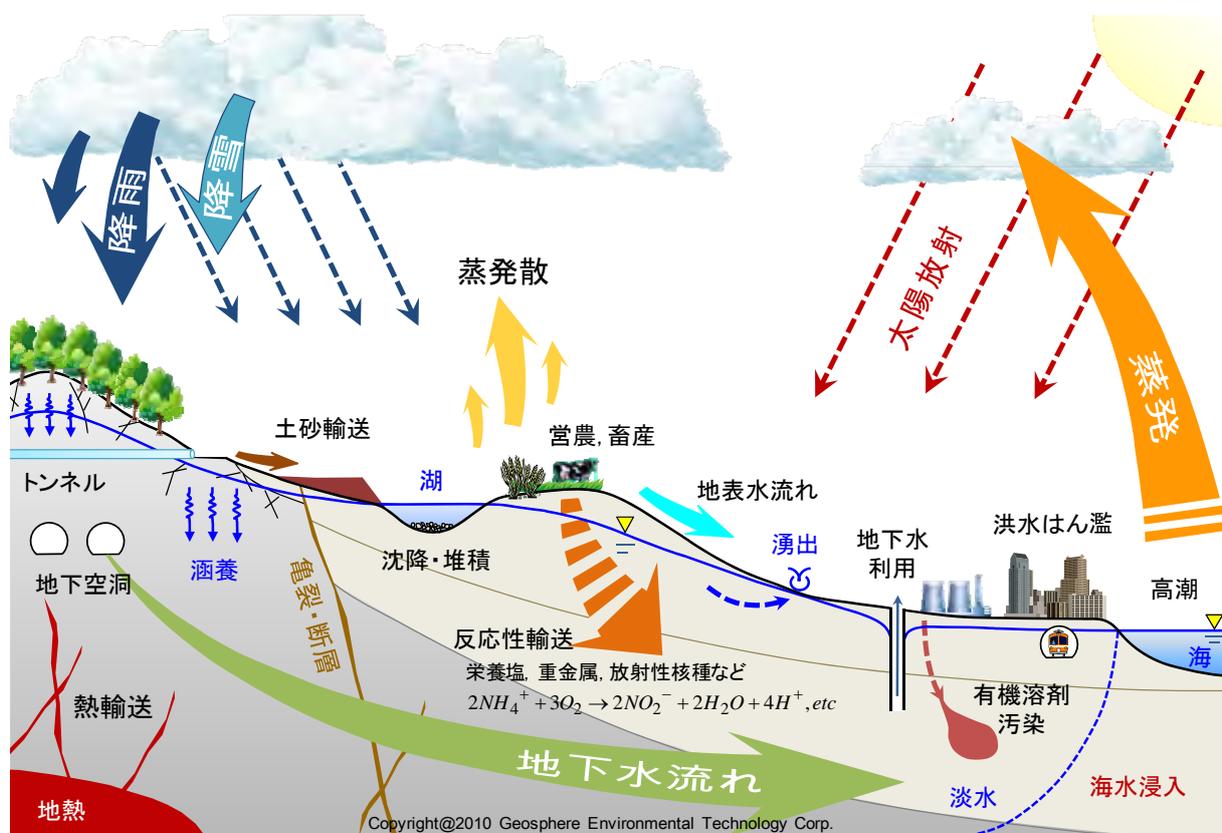


図 2-1 GETFLOWS の対象とする水循環システムの概念

2.2 特徴

- 等温、非等温状態の多相多成分流体挙動（水、空気、水溶性物質、非水相流体などの一般流体体系）を解析する 3次元汎用シミュレータである（図 2-2）
- 地表水と地下水の相互交換挙動の解析（連成解析）を可能とし、地表水の地下浸透や地下水湧水の時間的、空間的変化を追跡する（図 2-3）
- 積分型有限差分法による柔軟な空間表現（離散化）を可能とする
- 気象、土地利用、水利用など地上条件の時間的、空間的変化を考慮する
- 地下地層の透水異方性や埋設管、トンネル等の複雑な人工構造物を柔軟に表現する
- 独自の高速ソルバー（逐次陽化処理を搭載した共役残差法）を採用し、大規模なフィールド問題を実用速度で解く
- 領域分割法によるスカラー並列計算により、局所から広域の大規模問題を高速で解くこと

を可能とし、ロバスト（頑健）な数値的安定性を有する

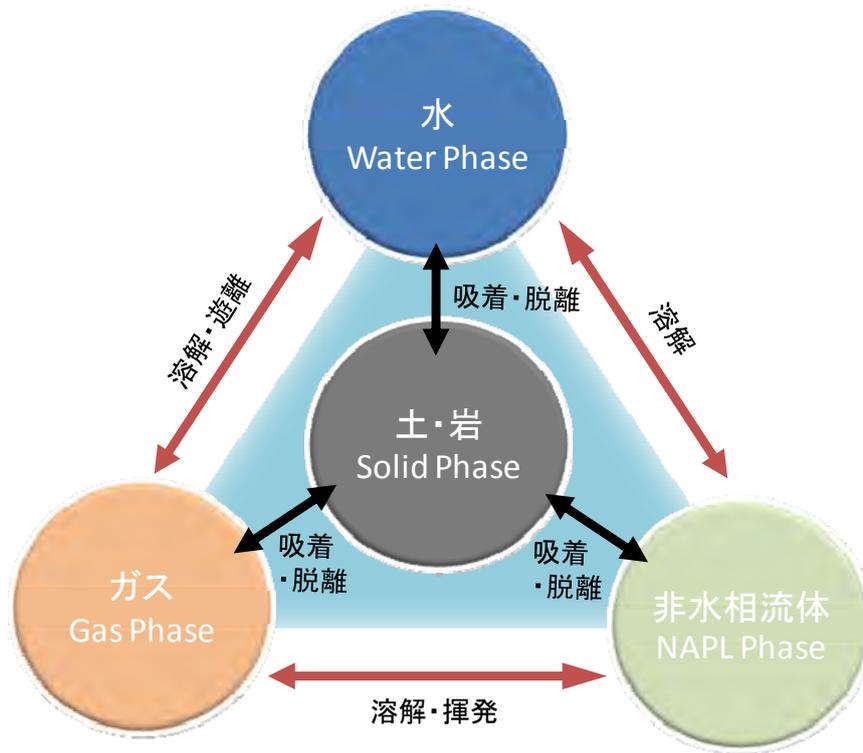


図 2-2 地圏流体システムの構成

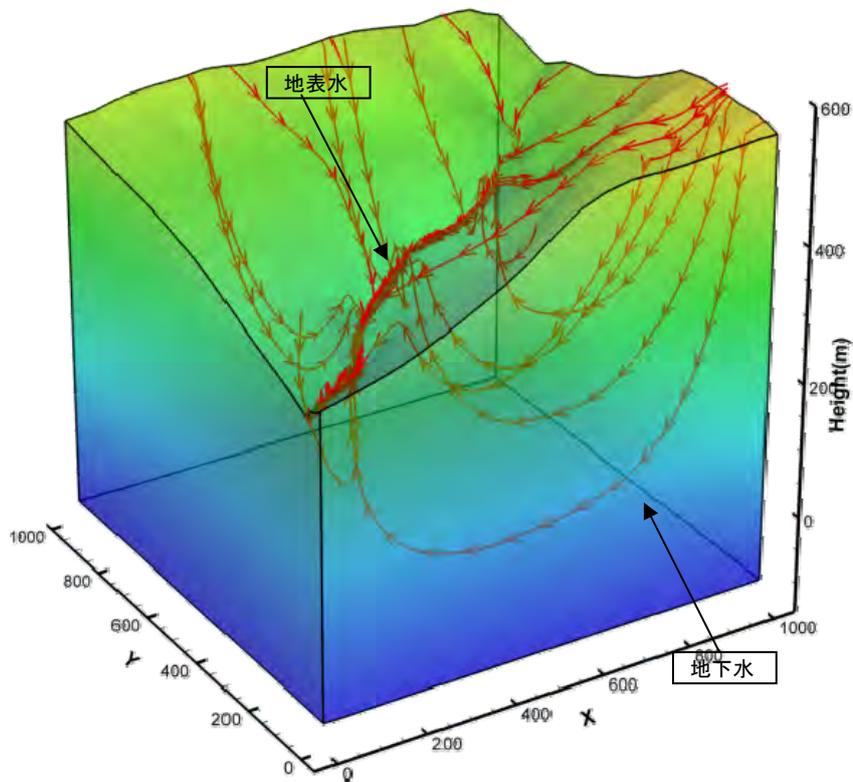


図 2-3 地表水・地下水相互作用の解析例

第3章 Jazan 州を対象とした流域モデルのプロトタイプング

3.1 対象領域

本調査では、ワジベージュ集水域を包含する内陸上流域に下流沿岸域及び海域を加えた範囲を対象流域とし、流域全体における降雨、蒸発散、直接流出、地下水流動を一体化した 3 次元領域モデルを構築した。

図 3-1 に対象領域を示す。対象領域は南北方向に約 150km、東西方向に 120km の約 18,000km²である。沿岸域における海水侵入及び海水淡水相互作用を解析するため、海岸線より沖合約 40km の海域を含めた。対象領域の地形は、標高 2,000m を超える上流涵養域と複合扇状地からなる沿岸部平野域に特徴をもつ。扇状地から紅海沿岸域の平野に至る地形勾配は 1/400～1/200 程度である。ベージュダムは領域内で最も水量が豊富なワジの上流渓谷に位置し、Jizan 市街地から約 110km の距離にある。

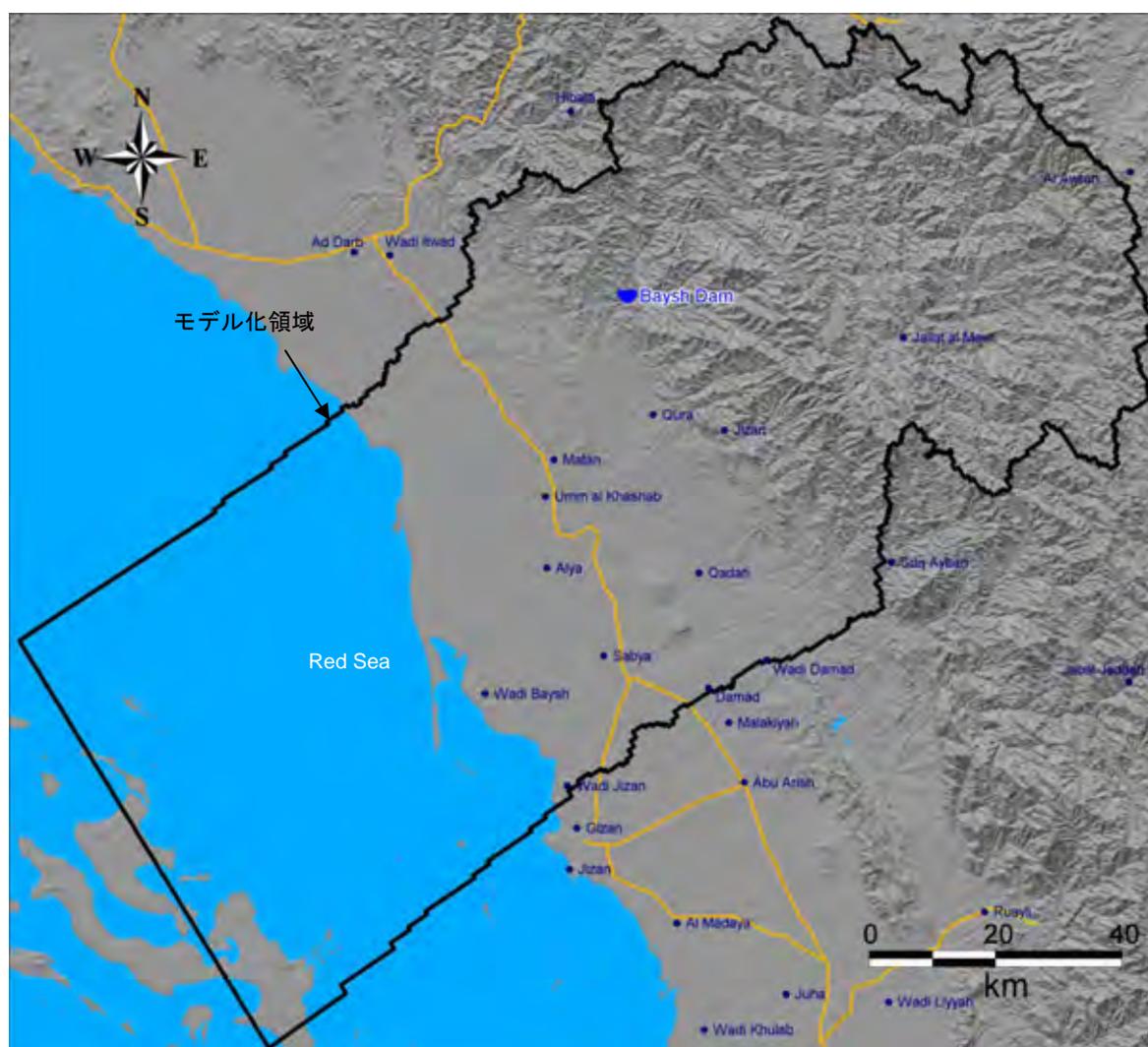


図 3-1 モデル化の対象領域

3.2 利用可能なデータ

領域モデルの構築に利用する情報は、既存調査資料及び一般公開データに基づいた。表 3-1 に本検討で利用可能なデータ一覧を示す。

地形標高は、陸域はアメリカ航空宇宙局 NASA が公開する SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) より 90m メッシュ DEM、海域はアメリカ海洋大気圏局 NOAA の 1km メッシュ海底地形データを用いた。

雨量観測データは、過年度報告書の中で MOWE データベースの 1968 年～2004 年の年間雨量が整理されている。これによると、ベーシュダム上流域の雨量観測地点は無いが、Jazan 州の年平均雨量は隣接する他の州より多く年間 400mm 以上である。図 3-2 は対象流域一帯の雨量観測点と 2007 年 4～9 月の雨量観測データを示したものである。これより、流域内の降雨パターンは不均質であり、局所的かつ短期的な傾向に特徴をもつ。

気温観測データは主に蒸発散量の算定に用いる。ここでは、一般的な気象予報サイトの公開情報より、Gizan 地点の月別平均気温を用いた (図 3-3)。

領域内の表層地質分布は米地質調査局 USGS の公開データに基づいた (図 3-4)。これによると、表層地質は西部沿岸域の第四紀 (Quaternary)、東部山岳域の先カンブリア紀の堆積岩を主体とし、高地から扇頂部にかけての接合部には部分的に第三紀 (Tertiary)、白亜紀 (Cretaceous) 及びペルム紀 (Permian) の地層が露頭する。対象領域の 3 次元地質構造の詳細は明らかでないが、紅海沿岸部の地質については、以下の特徴が明らかになっている。

- 帯水層厚は上流の峡谷部で薄く 10m、また下流の平野との会合部で最大となり 100m 程度となる。紅海沿岸では層厚は概ね 10m～20m となる。
- 沖積層は粘土、シルト、砂、礫、巨礫など様々の粒度の堆積物よりなり、特に河川に沿う一帯は粗粒堆積物からなり、透水性、貯留性共に優良な帯水層を担っている。
- これらの帯水層は砂層に不透水性のシルト、粘土を挟在することから、被圧～半被圧帯水層となっていることが多い。

土地被覆は GLCNMO (The Global Land Cover, National Mapping Organizations) による 30" メッシュデータを参考にした (図 3-5)。沿岸域扇状地内の大部分は裸地であり、領域南側には部分的に植生が分布する。東側山間地では裸地、低木、耕作農地がモザイク状に分布する。

表 3-1 利用可能なデータ

データ		使用データの内容・出典
地形	陸域	SRTM 90 Digital Elevation Data (空間分解能 90m) http://srtm.csi.cgiar.org/
	海域	ETOPO1 Global Relief Model (空間分解能 1 分) http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html
気象	雨量	● Baysh 周辺の雨量観測所データ (MOWE データベース) ● 南西地域総合水資源開発・管理計画調査 ドラフト・ファイナル・レポート 2010 年 5 月
	気温	● Gizan 月別平均気温 (WeatherBase, http://www.weatherbase.com)
地質		● USGS Geoscience Data Catalog http://geo-nsdi.er.usgs.gov/metadata/open-file/97-470/b/geo2a.faq.html ● 南西地域総合水資源開発・管理計画調査 ドラフト・ファイナル・レポート 2010 年 5 月
土地被覆		The Global Land Cover, National Mapping Organizations (GLCNMO), http://www.iscgm.org
ワジ流路網		(参考: SRTM90 の地形解析により抽出)
衛星画像		Landsat, Global Land Cover Facility Earth Science Data Interface (ESDI), http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp

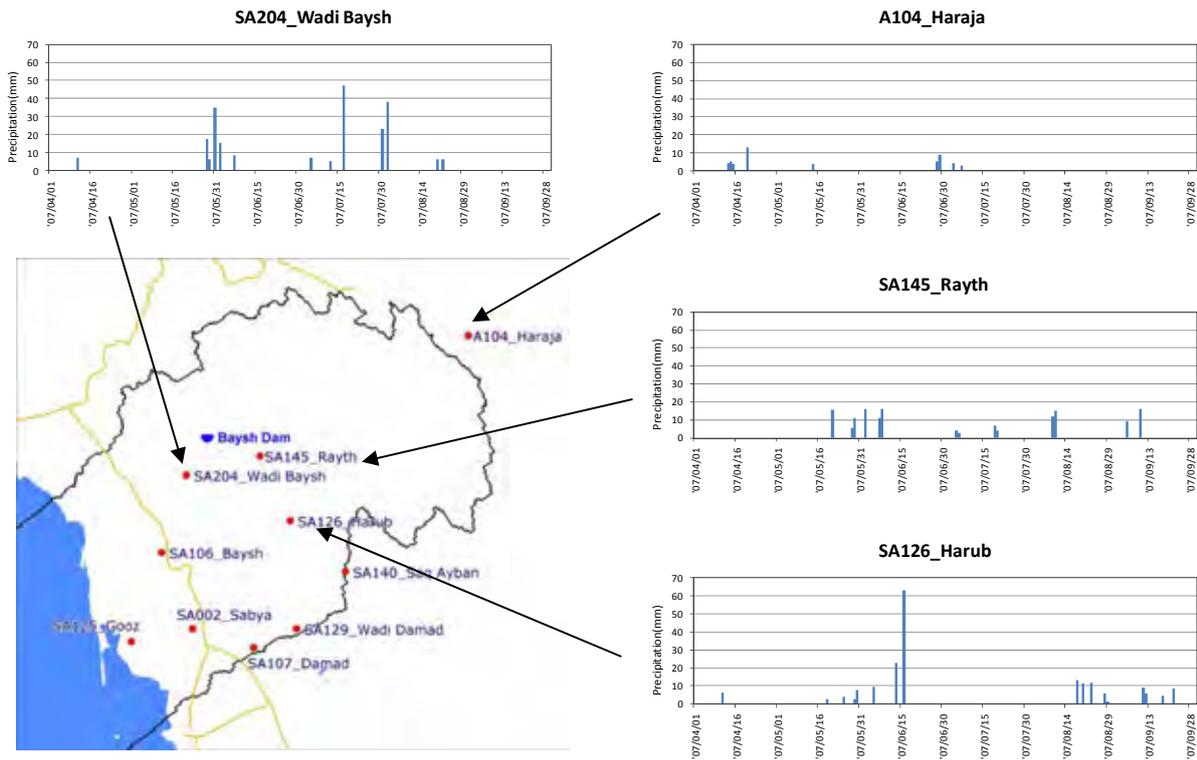


図 3-2 雨量観測データの例 (MOWE データベースより)

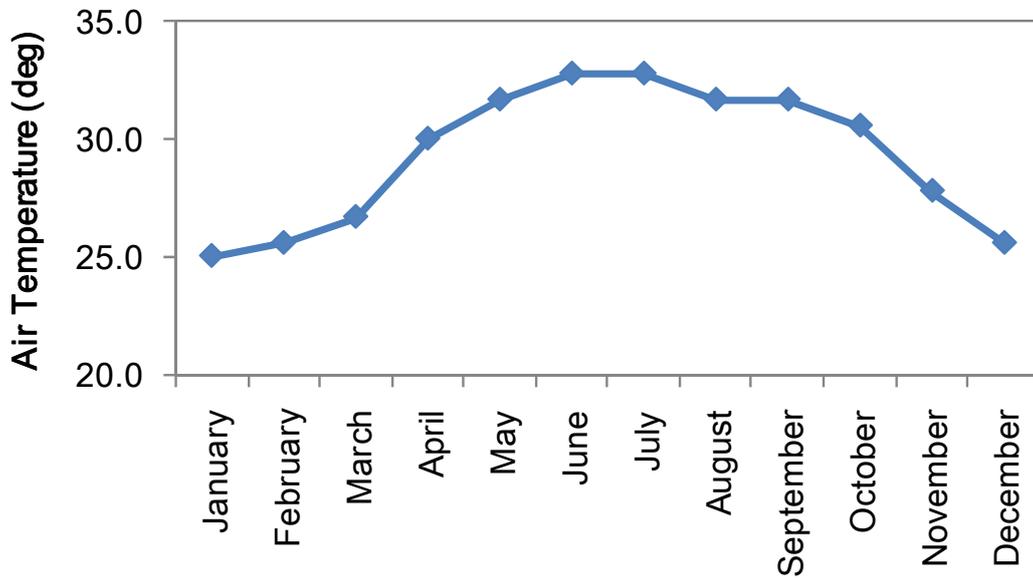


図 3-3 月別平均気温 (Gizan, 標高 5m, 緯度/経度 16 54N/042 30E)



図 3-4 表層地質図 (USGS Open File Report 97470b)

<http://certmapper.cr.usgs.gov/arcgis/rest/services/geology/arabian/MapServer>

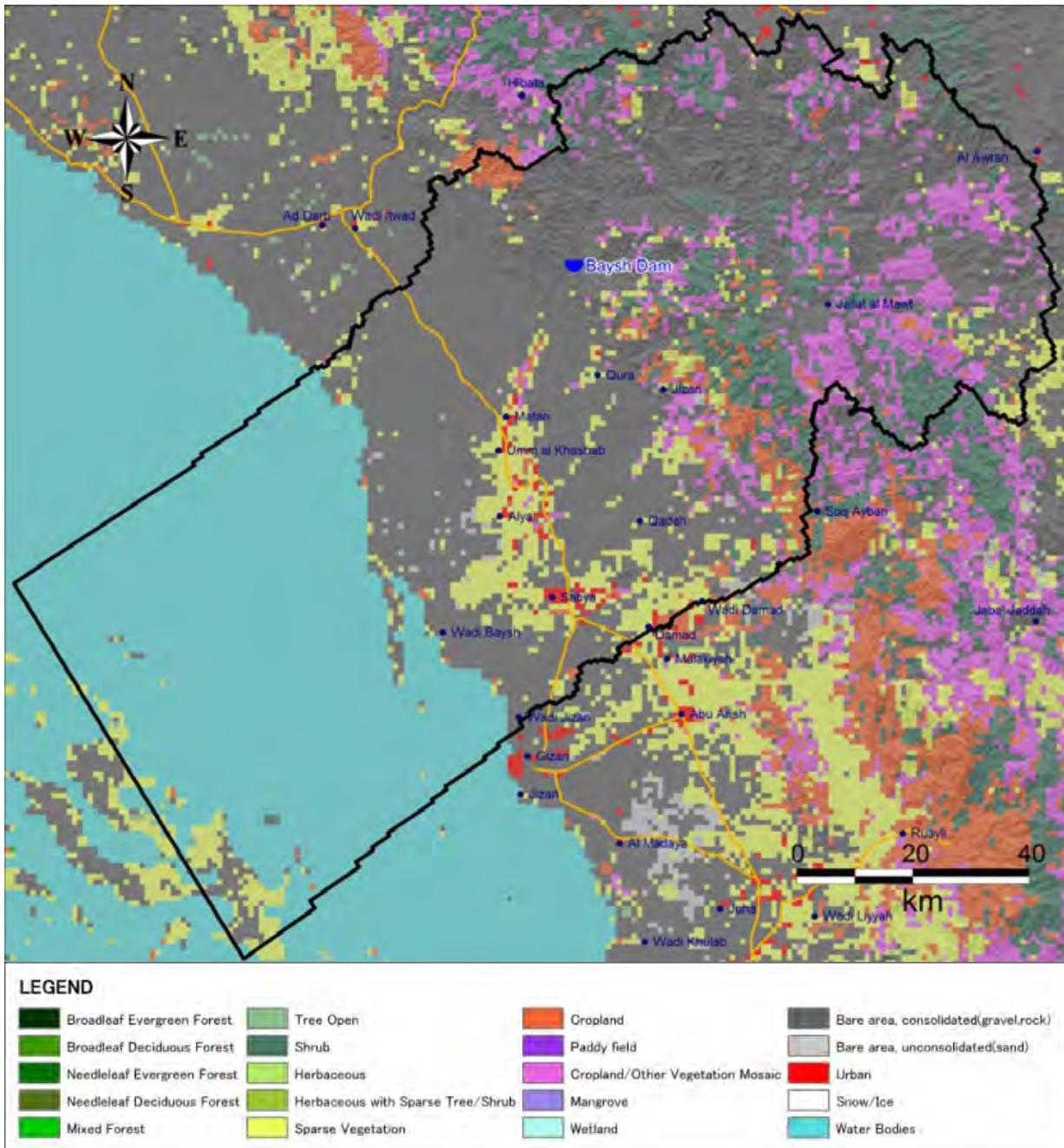


図 3-5 1km メッシュ (30") 土地被覆データ (The Global Land Cover by National Mapping Organizations, GLCNMO)

3.3 3次元格子モデルの構築

平面内の格子分割は、領域内のワジ及びベーシュダム下領域を密に離散化し、他の領域はやや粗くした平衡面格子システムを作成した。図 3-7 に格子分割を行った平面格子システムを示す。ベーシュダム下流の格子分割は約 10m とし、上領域は 50m 程度とした。地形標高データの空間分解能は格子サイズより大きい 90m であるため、これを空間的に内挿補間した二次データを生成し、それぞれの格子頂点 (コーナーポイント) に割り当てた。

平面格子システムを深度方向へ押し出し 3次元化を行った。図 3-8 に 3次元格子システムを示す。同図(a)は、SRTM90 のデジタル標高モデルを空間的に補間することで作成した地形鳥瞰図である。図 3-8 (b)はこれを空間離散化した 3次元格子モデルである。深度方向のモデル化範囲は-3,000m

とし、格子分割は表層付近を十分細密に深部ほど粗くなるよう全 25 層に分割した。

また、上部の第 1 層には大気層格子、第 2 層には地表層格子を設け、大気層格子を標準大気圧の境界条件とし、降雨は地表層格子に与える。第 3 層～第 25 層は地盤層格子とし地層分布に対応した地盤物性を付与した。なお、ワジ内の表流水の挙動は地表層格子で表現し、涵養・湧出等の地表水・地下水の相互作用は地表層格子と第 3 層の地盤層格子間の流体移動により表現する。

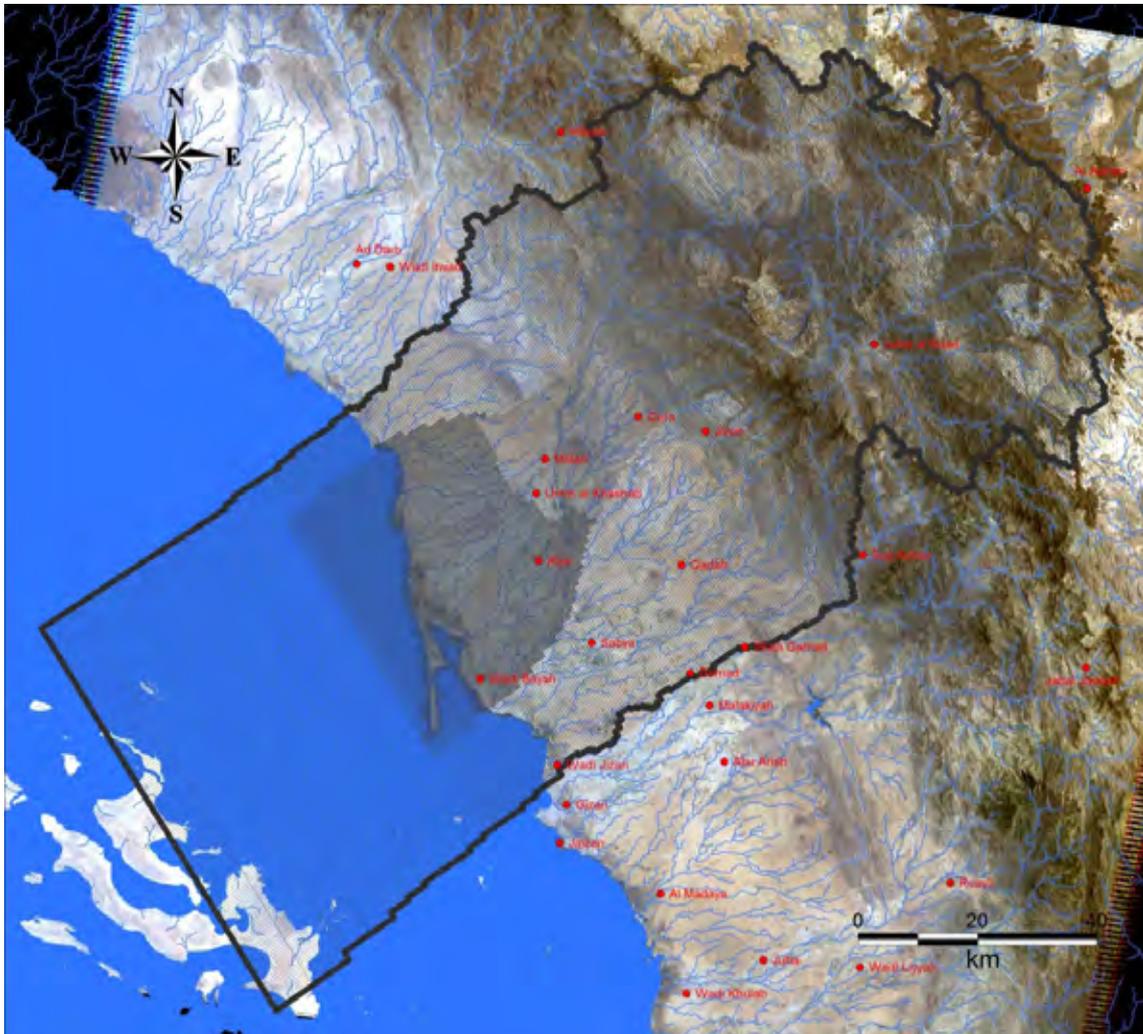


図 3-6 平面格子システム (1)

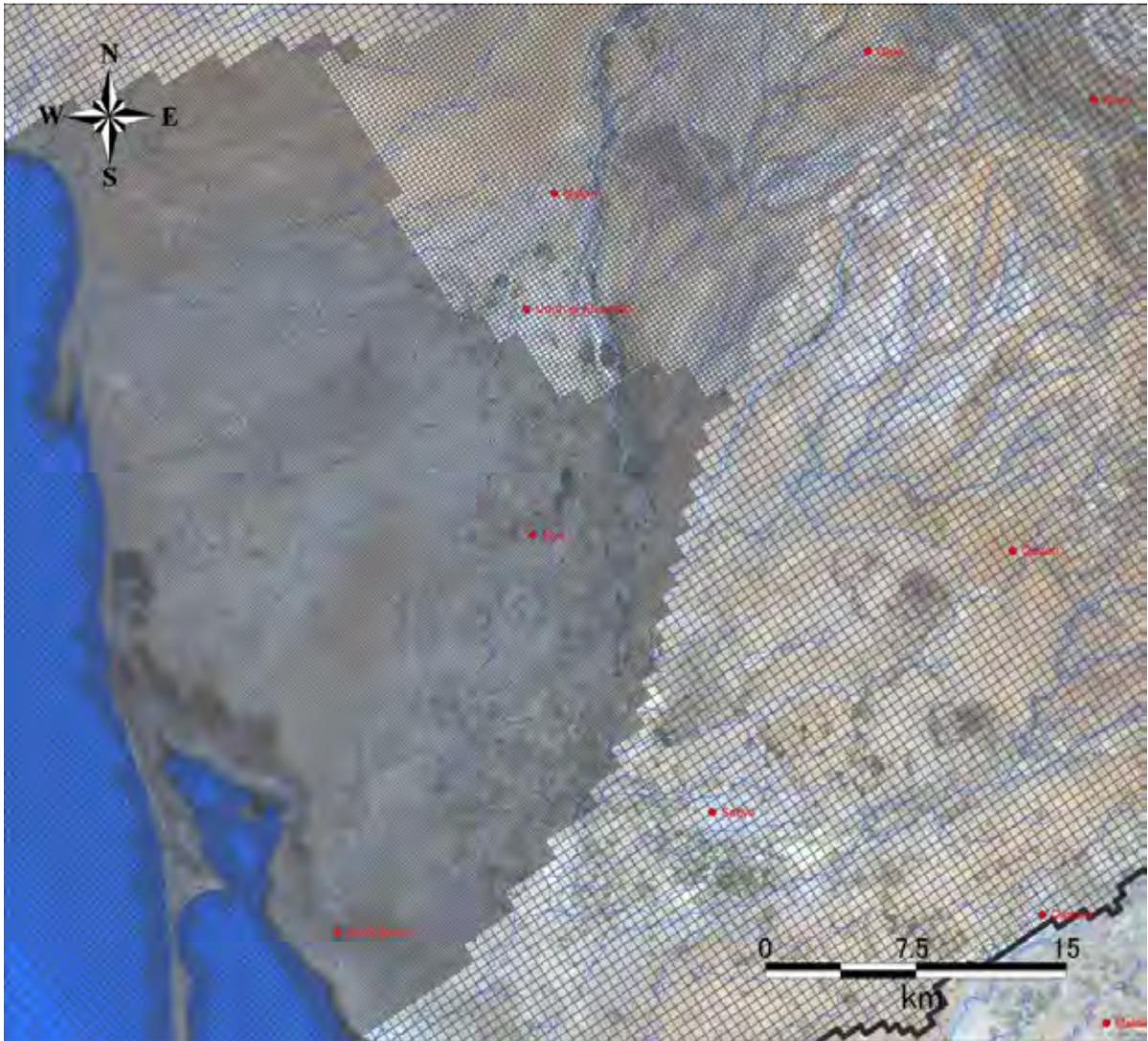
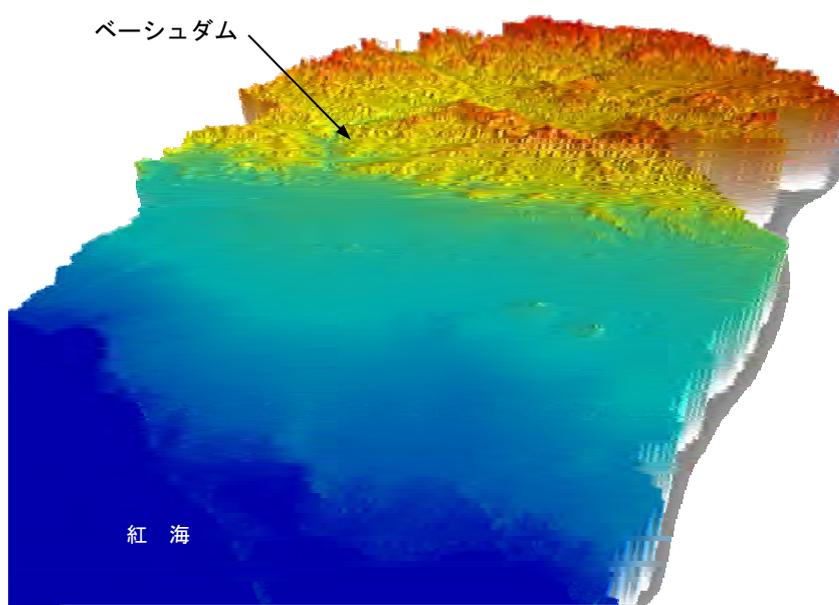
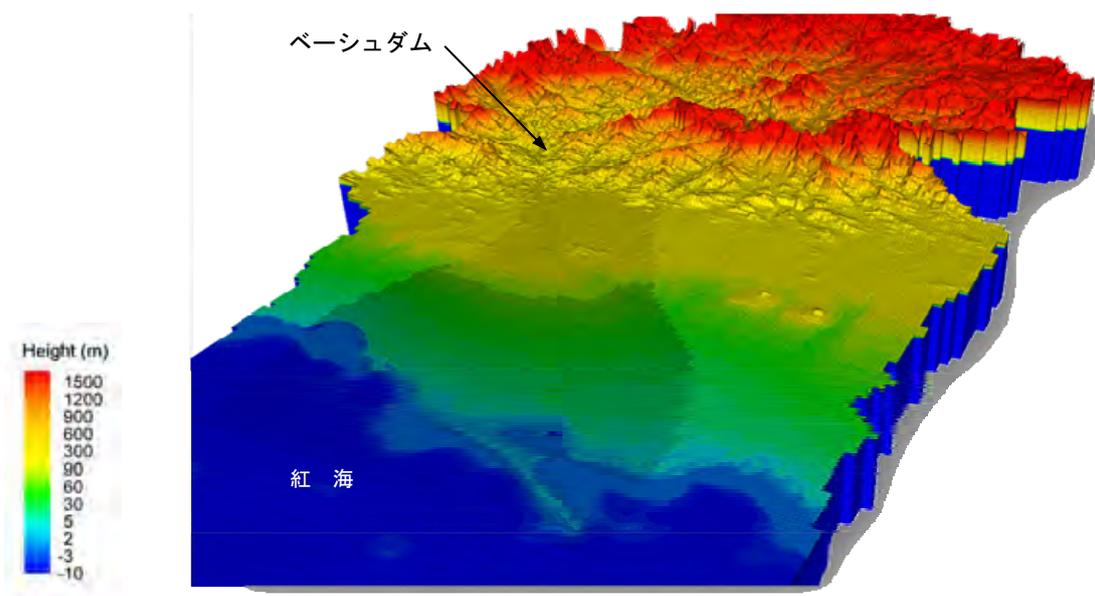


図 3-7 平面格子システム (2)



(a) SRTM90 より作成した地形鳥瞰図



(b) 3次元格子システム (格子数 1,313,880)

図 3-8 対象領域の地形鳥瞰図 (上段) と 3次元格子システム (下段)

作成した 3次元格子モデルに地質区分を割り当てた結果を図 3-9 に示す。前記のとおり、帯水層厚は上流で約 10m、下流平野で 100m 程度、紅海沿岸では 10m~20m となるよう概略で割り当てた。

図 3-10 に主要な深度断面における格子分割と地質区分を割り当てた結果を示す。

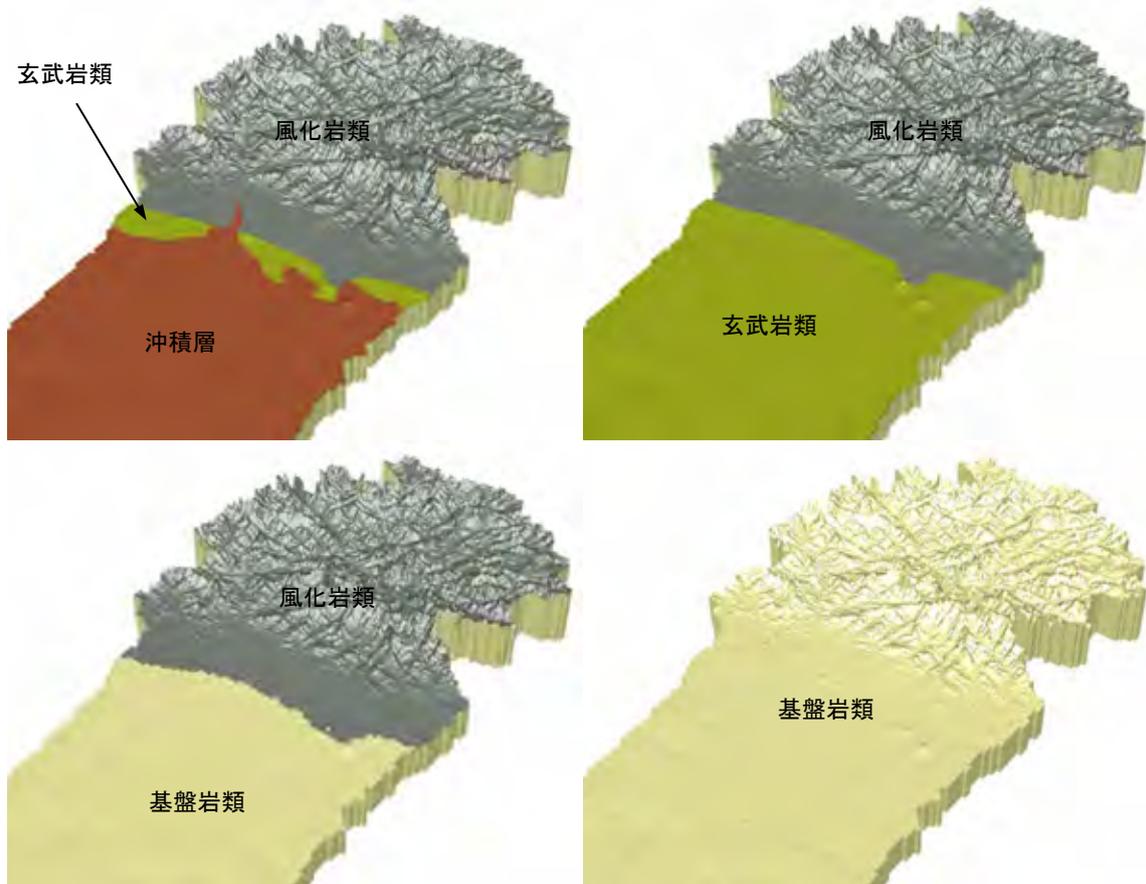


図 3-9 3次元地質構造モデルと格子システムへの組み込み

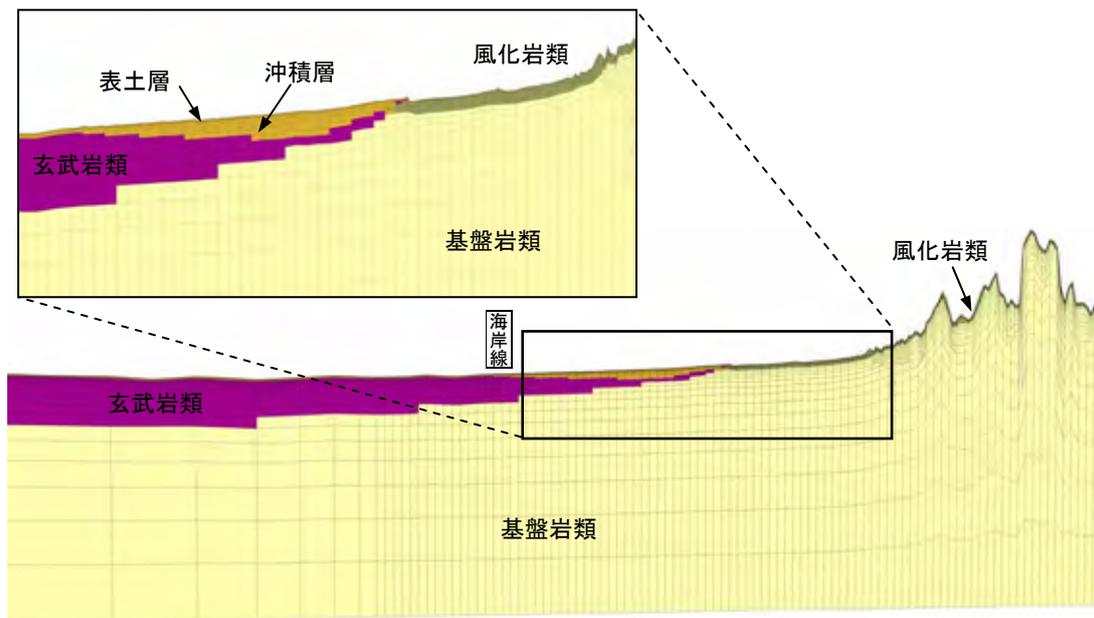


図 3-10 主要断面の格子分割と地質区分の割当て

3.4 初期流動場の解析

3.4.1 支配方程式

対象流体系を地表及び地下における水・空気 2 相流れとして考える。流体の温度変化を考えない等温状態における流れの支配方程式は、水、空気の質量保存式と一般化ダルシー則を組合せた次式により記述される。

$$\begin{aligned} \nabla \left(\frac{Kk_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - q_{wS} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w}{B_w} \right) \\ \nabla \left(\frac{Kk_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - q_{gS} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_g}{B_g} \right) \end{aligned}$$

ここに、 K は絶対浸透率(m^2)、 k_{rp} は相対浸透率(-)、 μ_p は粘性係数($Pa \cdot s$)、 B_p は容積係数(m^3/m^3)、 ϕ は空隙率(-)、 S_p は飽和率(-)、 q_p は標準状態における単位体積、単位時間当たりの生産圧入速度($m^3/m^3/s$)である。添字 p は水(w)及び空気(g)の各流体相に関する諸量であることを示す。地表水流动は拡散波近似を適用したマニング型の平均流速公式に従い、上記と同形式の支配方程式により記述される。

沿岸域における海水進入は、次に示す水相による塩分輸送モデル（移流分散方程式）を用いて記述され、密度の異なる海水・淡水間の相互作用を考慮する。

$$\nabla \left(\frac{Kk_{rw}R_s}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_{cw} \right) + \nabla \left(D_s \nabla \frac{R_s}{\alpha_{cw}} \right) - q_{cS} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w R_s}{B_w} \right)$$

ここに、 R_s は水相中に溶存する塩分濃度(m^3/m^3)、 D_s は水力学的分散係数 (m^2/s)、 q_{cS} は標準状態における単位体積、単位時間当たりの塩分の生産圧入速度($m^3/m^3/s$)である。

これらの 3 式は全ての計算格子の質量収支を満足するよう同時陰的に数値解が得られ、それぞれの格子で①圧力、②水相飽和率および③塩分濃度が求められる。式中の流体物性（粘性係数、容積係数）は圧力の関数、また地盤物性（毛細管圧力、相対浸透率）は水・空気 2 相共存領域（不飽和領域）において飽和度の非線形関数となり、Newton-Raphson 法により反復的に解かれる。

3.4.2 解析方法

対象地域の平均的な地下水流動状態として、リチャージダムや下水再生水の人工涵養による水資源開発の効果予測を行うための初期流動場（バックグラウンド）を解析する。ここでは、領域内の地盤を海水で完全飽和させた状態を出発点とし、当地区の平均的な降水量（淡水）を与え続けた非定常解析を実施する。時間の経過と共に地盤内の海水は淡水で置換され、また透水性に応じて地下水位が低下する（淡水による洗い出し計算）。最終的には、降雨、地形、地質等のモデルに与えられた様々な条件とバランスする唯一の平衡状態に達する。この計算過程は、アラビア半島の陸域が海底から隆起し地形地質が形成される時代スケールに対応するものである。

こうして得られた平衡状態の解析結果は、本来、地下水位や塩分濃度等の実際の観測データと比較することで再現性を照査するが、本検討では試算の位置づけのため傾向的な再現のみを確認する。

3.4.3 解析条件

(1) 降水・蒸発散

上記の初期流動場の解析に用いる平均降水量は、通常は気温観測データから算定される蒸発散量を差し引いた有効降水量が用いられる。しかし、対象地区の降水量は 200~400mm/年であり、気温から算定される蒸発散量に対して極端に少ない。気温と日照時間を用いたハーモン式の試算に

よると蒸発散量は 1,000mm/年を超える。このような乾燥地域の初期流動場の解析には、過去から現在に至る長期間の気候変動を考慮した解析が必要となる。

本調査では、簡単のため、まず有効降水量を 100mm/年と仮定して一定期間の洗い出し計算を行った。海水がある程度淡水によって洗い出された状態に達した後、有効降水量を 20mm/年、0mm/年と減少させることで乾燥化を模擬し、対象地区の現在の地下水流動状態を求めることとした。

(2) 流体物性

水、空気、塩分 2 相 3 成分系の流体物性は、標準状態における一般的数値で代表させる。本調査では表 3-2 に示す諸量を用いた。

(3) 地盤物性

調査対象地域の地盤透水性や貯留性を調査するための水理試験データは得られていないため、現地踏査や地質性状から推定される一般的な数値を設定した。表 3-3 に本調査で使用した地盤物性を示す。扇状地より東側の東側の上領域に分布する玄武岩類、風化岩類、基盤岩類の露頭部については、現地踏査の情報を反映して比較的透水性の低い水理性状を考慮した。

(4) 2 相流パラメータ

不飽和領域における水、空気共存領域では、地盤間隙中の水相、空気相の相互干渉を記述する毛細管圧力、相対浸透率を与える。これらは、間隙を占める水や空気の割合によって異なるものとなり、通常は飽和度に対する非線形関数として定義される。一般的には様々な地質試料に対して得られている Van-Genuchten 式や Brooks-Corey 式等の実験式を用いられるが、ここでは図 3-11 に示す一般的な関数形により代表させることとした。

表 3-2 流体物性

流体条件	地表水流動		マニング型の平均流速公式
	地下水流動		一般化ダルシー流れ
	流体系		水、空気、塩分 2 相 3 成分流動系
	水	密度	1.0 [g/cm ³]
		粘性係数	1.0×10 ⁻³ [Pa・s]
		圧縮率	0.45[GPa ⁻¹]
	空気	密度	1.3×10 ⁻³ [g/cm ³]
粘性係数		1.82×10 ⁻⁵ [Pa・s]	
圧縮率		容積係数として入力 (圧力の逆数に比例)	
海水条件	密度	1.0184[g/cm ³]	
	塩分濃度	0.0160[m ³ /m ³]	

表 3-3 地盤物性

地盤条件	密度		2.5[Mg/m ³]
	圧縮率		10[GPa ⁻¹]
	地質区分		表土層、沖積層、玄武岩層、風化岩層、基盤岩類
	絶対浸透率	表土層	5×10 ⁻² [cm/s] (沖積層分布域のみ)
		沖積層	1×10 ⁻² [cm/s]
		玄武岩類	1×10 ⁻⁵ [cm/s]
		風化岩類	1×10 ⁻⁶ [cm/s]
基盤岩	1×10 ⁻⁶ [cm/s]		
有効空隙率	表土層	0.50 (沖積層分布域のみ)	
	沖積層	0.15	
	玄武岩類	0.10	
	風化岩類	0.10	
基盤岩	0.10		
土地利用	等価粗度係数		水域 0.035 [m ^{1/3} /s] その他 0.100 [m ^{1/3} /s]

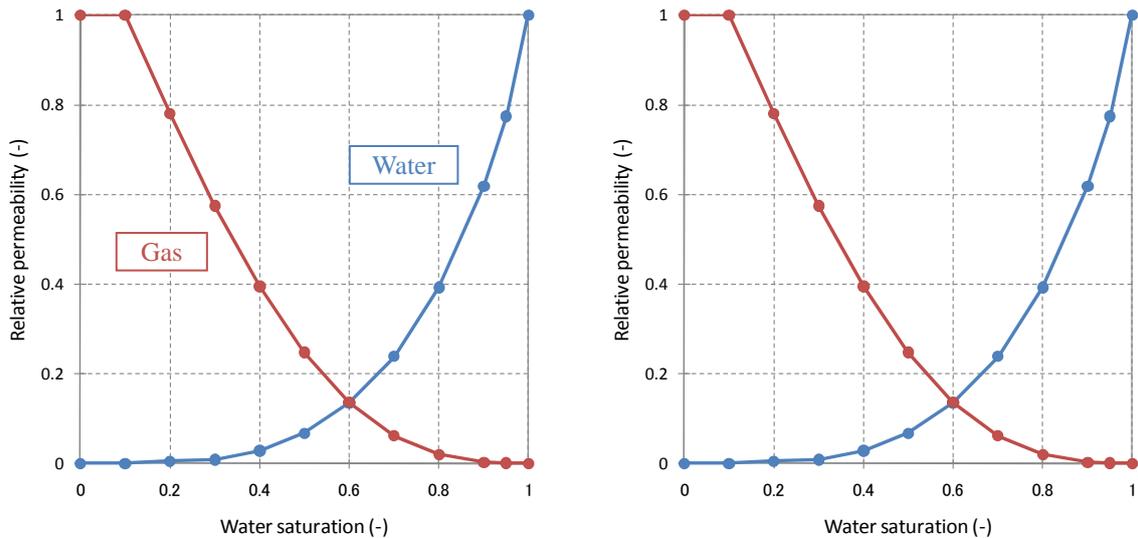


図 3-11 2相流パラメータ（相対浸透率曲線、毛細管圧力曲線）

3.4.4 解析結果

図 3-12～図 3-15 に初期流動場の解析結果を示す。

(1) 地下水位

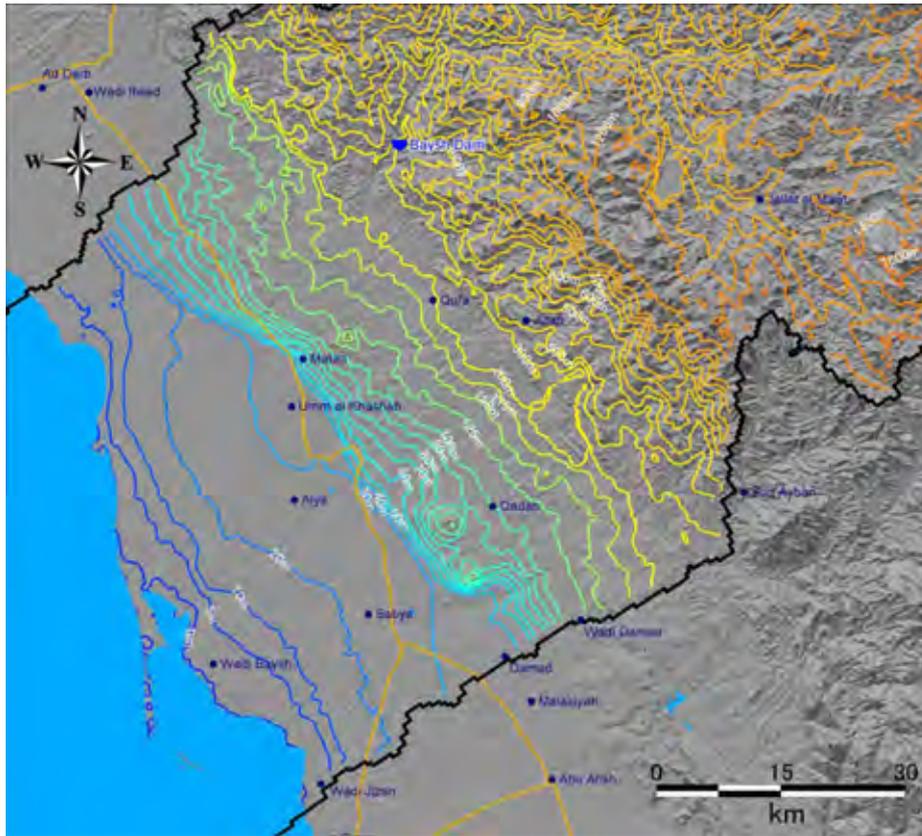
図 3-12 に浅層及び深層（標高-1,000m）における地下水位等高線を示す。浅層水位は領域内の地形起伏の違いに対応した結果となった。地下水位等高線から読み取れる動水勾配は、南北に横断する道路を挟んで傾向が異なる。道路西側の沿岸平野部では複合扇状の地形変化と対応し、動水勾配は0.002程度となった。道路付近とその東側では0.005と大きく、内陸ほど緩やかである。深層水位は大局的な地形標高差と対応する結果となり、動水勾配は領域内で約0.003である。浅層水位に見られるような場所による違いは認められない。沖積層の動水勾配と透水係数 10^{-2} cm/sから試算される地下水流速（ダルシー流速）は5～20m/年程度である。

(2) 地下水流動経路

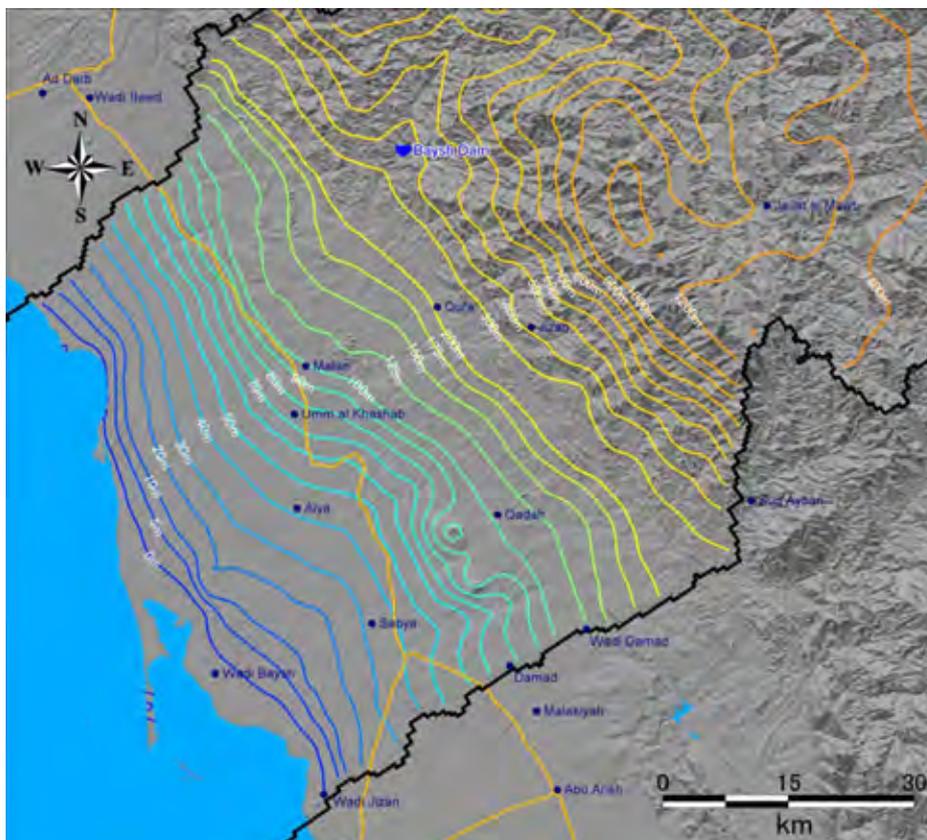
初期流動状態における地下水流動経路を粒子追跡法により解析した。図 3-13 は涵養した地下水が移動する3次元経路を2次元平面に投影表示したものである。これより、平野部の地下水流動は扇状地やワジ地形に対応した低地に集まる特徴的傾向が認められる。海岸付近の標高の低い範囲では、陸域へ浸入する海水の流跡線が認められ、東側内陸で涵養された地下水が海域へ流出する流跡線と迎合した塩淡境界を形成する。

(3) 塩分濃度

図 3-14 に海岸付近の塩分濃度を示す。海水と淡水の境界面は塩分等濃度面により3次元表示した。図 3-15 は深度毎の海水侵入域を塩分濃度の平面コンターで表示したものである。これらの結果より、100mより浅い帯水層内では、海岸線より5～10kmの内陸で塩分濃度が比較的高く海水化の傾向が見られる結果となった。



(a) 浅層地下水



(b) 深層地下水

図 3-12 地下水位等高線図

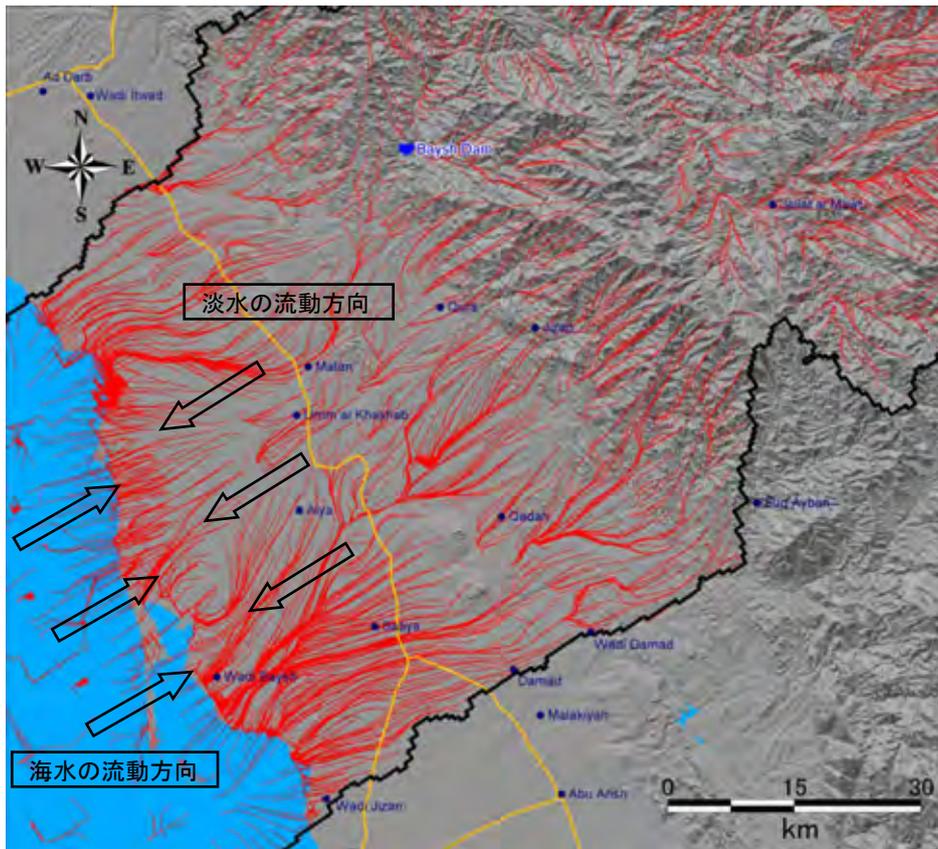


図 3-13 地下水流動経路

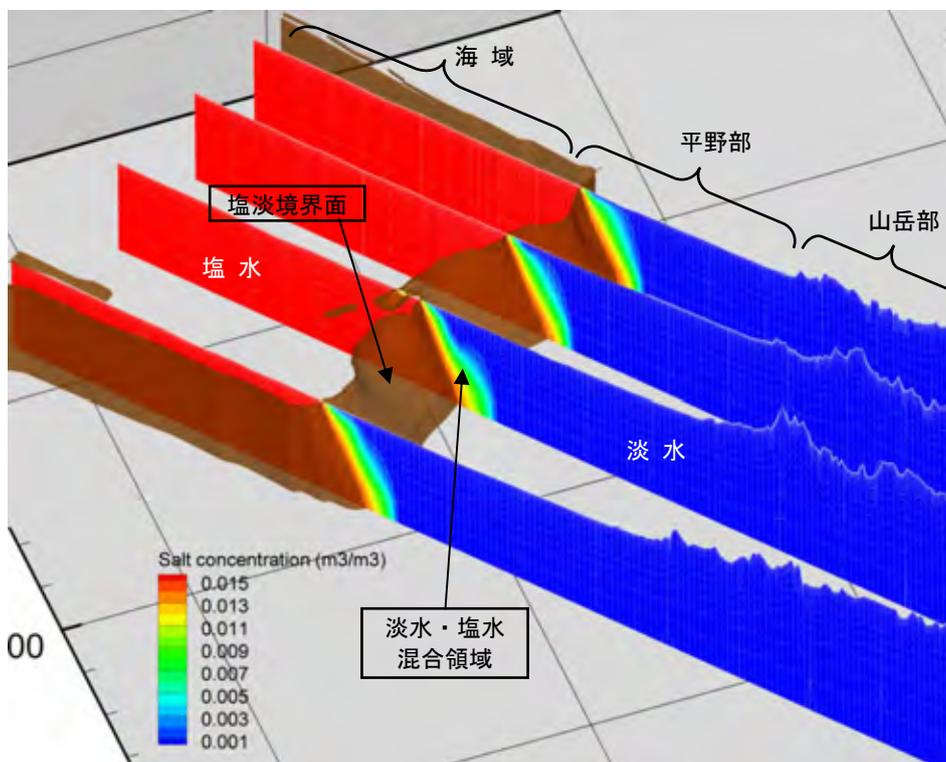


図 3-14 海水侵入域 (塩分等濃度面と深度断面)

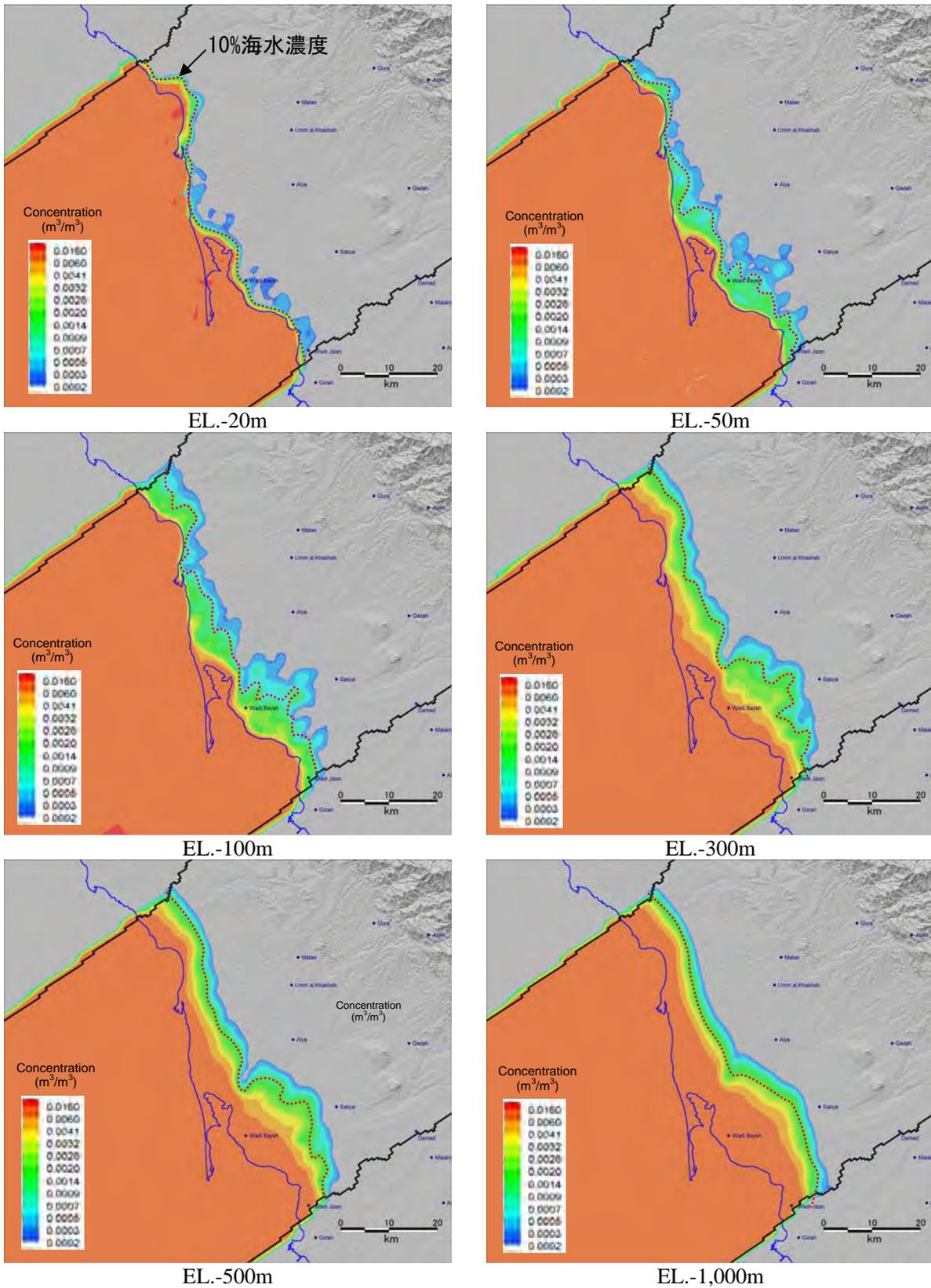


図 3-15 深度毎の塩分侵入域（塩分濃度の平面分布図）

第4章 水資源開発の効果予測の試算

4.1 試算ケース

上記で解析した初期流動場に対して、水資源開発の対策オプションによる効果予測の試算を実施した。表 4-1 に試算ケースを示す。ケース A1 及び A2 では、降水時のダム湛水とその後の放流による帯水層への地下水涵養を解析し、その効果を検証した。ケース A3 は降水時のダム湛水のみを考慮し、以降の降雨停止後の放流は行わない。ケース A2 と A3 を比較することで、ダム湖の貯水のみを行った場合に対し、貯水と放流を組合せて下流域帯水層への涵養を促進した場合で、蒸発による損失水量の違いを評価することができる。いずれも、降水条件は領域東部の領域上流部に 100mm/日を 1 日間のみ与えた。

ケース B1 及び B2 では、地下水揚水による水位低下と海水化が下水再生水の人工涵養によって抑制・回復される過程を解析した。過年度報告書によると、Jizan 州周辺における 1990 年から 2009 年までの農業用の地下水揚水量は 229MCM/y とされているが、このうち本対象領域の沿岸域に周辺における井戸配置、揚水深度、揚水量はいずれも不明である。ここでは、沿岸域での揚水量は上記の総揚水量を目安に 110 MCM/y と仮定した。また、再生水の人工涵養は埋設有効管の線状構造（以下、パイプラインと言う）によるものとし、敷設延長距離 1km を仮定した。

表 4-1 水資源開発オプションに対する効果予測の試算ケース

ケース	水資源開発のオプション		備考
	下水再生水の人工涵養	リチャージダム & 放流	
A1	無し	無し	水資源開発を行わない基本ケース。ケース A2 と同一の降水条件を用いてリチャージダムと放流による効果を検証する。
A2	無し	考慮	降水時（上流部に 100mm/日×1 日間）のダム湛水とその後の放流による帯水層への地下水涵養を解析する。
A3	無し	考慮	ダム湛水のみを考慮し、放流を行わない。ケース A2 との比較により放流の有無による蒸発損失量の違いを評価する。
B1	無し	無し	地下水揚水による水位低下と海水化の傾向を解析する。ケース B1 と比較し、人工涵養の効果を検証する。
B2	考慮	無し	下水再生水の人工涵養による水位低下及び海水化の抑制・回復を解析する。

4.2 ダムとワジとの連携運用による水資源開発の試算

4.2.1 ダムの有無による洪水氾濫挙動の違い

ワジ上流のリチャージダムの有無は、降水時及び降水停止後の下流域の洪水はん濫挙動の違いとして現れる。ケース A1、A2 の解析結果より、時間経過と共に変化する洪水氾濫域の水深分布を比較した（図 4-1）。図 4-2 は洪水氾濫流が最も流下した時点における沿岸域平野部の水深分布拡大図である。

流域上流域での降雨は、多数のワジに洪水流を生じさせ、平野部で網状に発達し流下する。ダムを考慮しないケース A1 は、ベーシュ流域の降水を集め、洪水氾濫流を下流まで拡大させる。ダムを考慮したケース A2 は、降水時のダム貯水が洪水調節機能を示し、ベーシュ流域の下流への洪水氾濫流の拡大は認められない。

4.2.2 ダム放流によるワジ下流地点の地下水位変化

ワジ上流のリチャージダムを考慮したケース A2 の結果を用い、降雨停止後の 2 日目より貯水ダムからの放流を開始した。放流量は 50 万 m³/日で一定放流条件とした。図 4-3 は降雨開始、ダム貯水、放流開始の一連の期間におけるワジ下流の数地点における水位変化を示したものである。比較のため、ダム考慮しないケース A1 の結果を併記した。

放流後のワジ下流の水位変化は、地点によって異なるものの、明らかな水位上昇が認められる。各地点の水位変化は表層地質の透水性によって大きく異なる。最上流の地点 No.8、No.10 は、表層地質の透水係数が 10⁻⁶~10⁻⁵cm/s と小さく涵養量が少ないため、放流後の水位上昇量はわずかである。しかし、No.8 の水位上昇は放流による典型的な水位変化の傾向を示す。すなわち、ダムを考慮しないケース A1 では、降雨時の洪水流によって上昇した水位がその後速やかに減衰するのに対し、放流を考慮したケース A2 は放流後に地下水位を安定的に増加させる結果となった。

No.6 より下流地点では透水性の良い帯水層が分布するため、ワジからの涵養が顕著となる。No.6 の地下水位は、ワジから涵養した地下水の降下浸透による時間遅れを伴うが地下水位は約 20m 上昇する結果となった。ダムを考慮しない場合も同様に、降雨時の洪水氾濫による地下水涵養と水位変化が見られるが、時間経過と共に地下水位が低下する地点が見られる。この傾向は、降雨や洪水氾濫による地下水補給が少ないほど顕著となる。放流を行った場合は、地下水位が安定して増加する効果が認められる。放流水の大部分は No.6 付近で涵養するため、No.2,4 には到達しない。

以上より、ダム放流とワジによる帯水層への涵養促進と水位上昇の効果は明らかに認められた。しかし、ワジ及び周囲の表層地質の分布によっては浸透が容易な地区とそうでない地区があるため、放流水の流路及び浸透能の配置は重要な設計事項となる。

4.2.3 ダム放流の効果（蒸発による損失水量の評価）

ダム湖に貯水のみを行った場合（ケース A3）に対して、貯水と放流を組合せて下流域帯水層への涵養を促進した場合（ケース A2）で、蒸発によって生じる損失水量の違いを評価した。ケース A3 では降雨時のダム湖の湛水、湖面からの蒸発と地下浸透を考慮した。

図 4-4 にダム放流の有無で開発可能な水資源量の相違を比較した。放流を考慮したケース A2 では、ダム湖内の貯水量とワジを介した地下浸透水量の総量を集計した。ケース A3 はダム湖内の貯水量を集計した。これより、ダム放流を行ったケース A2 は、ケース A3 に比較して総水量の減少がやや大きい結果となった。この相違は、ワジを流下する水面からの蒸発による損失水量に対応し、ケース A3 の湖面からの蒸発よりも多くなったことを示すものである。

ワジからの蒸発損失を抑制するため、パイプラインによる帯水層への涵養を行った結果（ケース A2'）を同図中に併記した。この場合、放流による蒸発損失は無いため、ダム湖面からの蒸発損失に対して、明らかな水量増が得られる結果となった。

これらの効果は放流水量の相違や放流による湖面の縮小の寄与によっても大きく異なる。

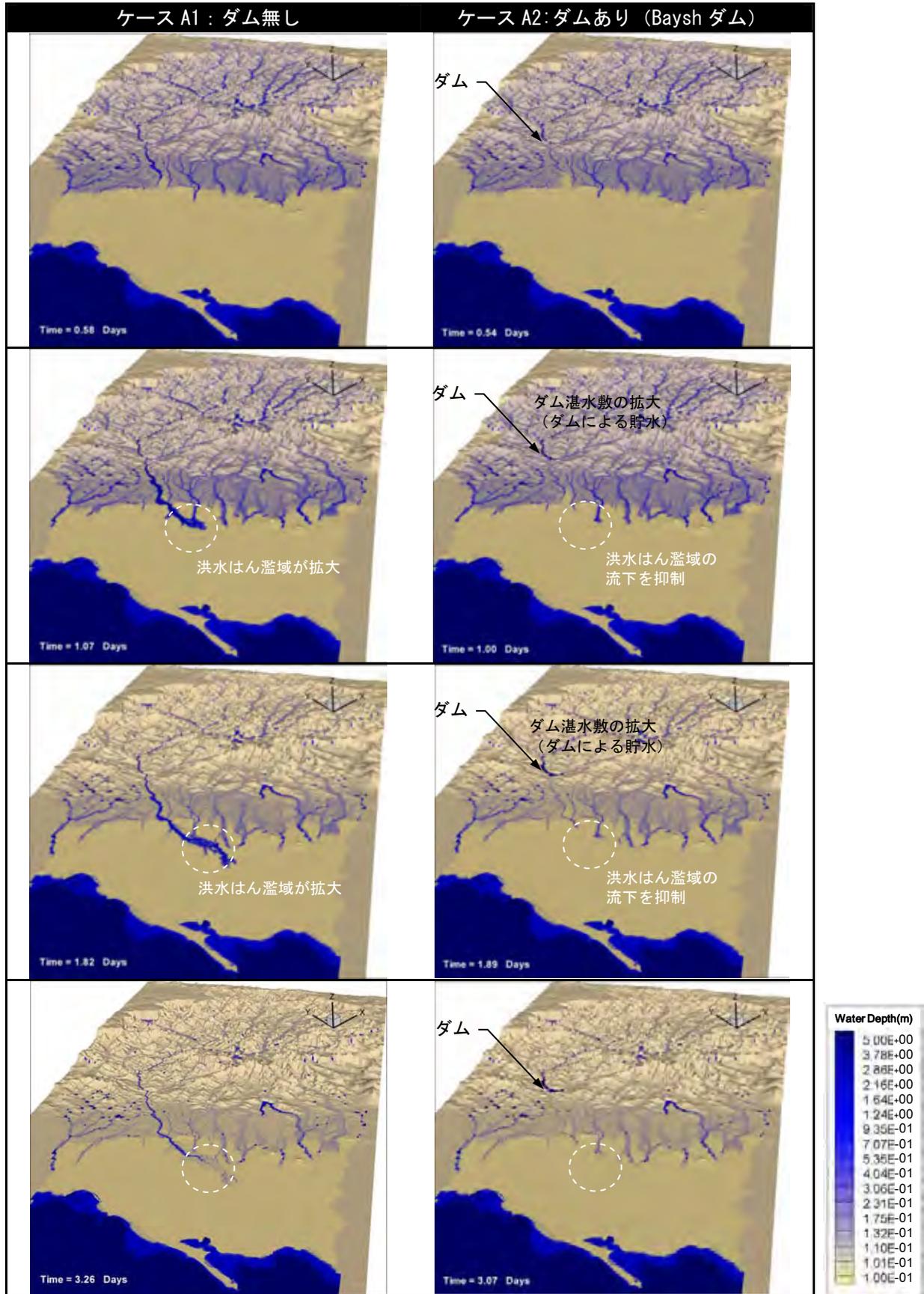
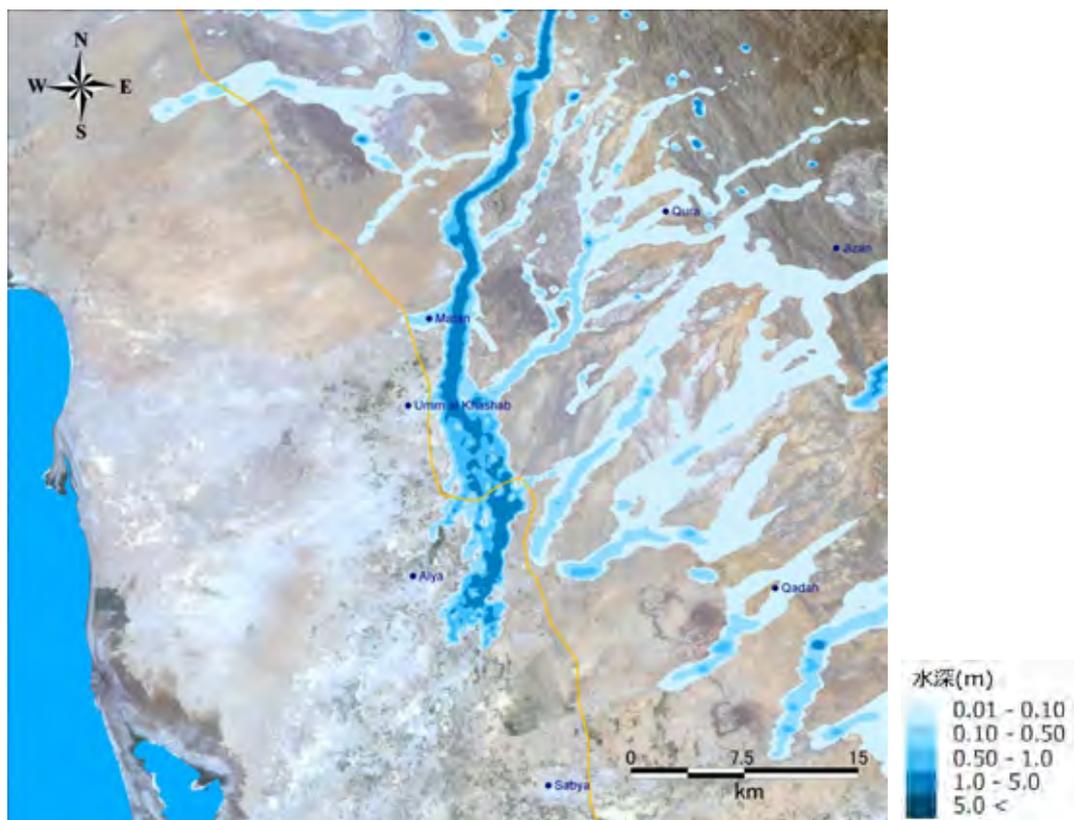
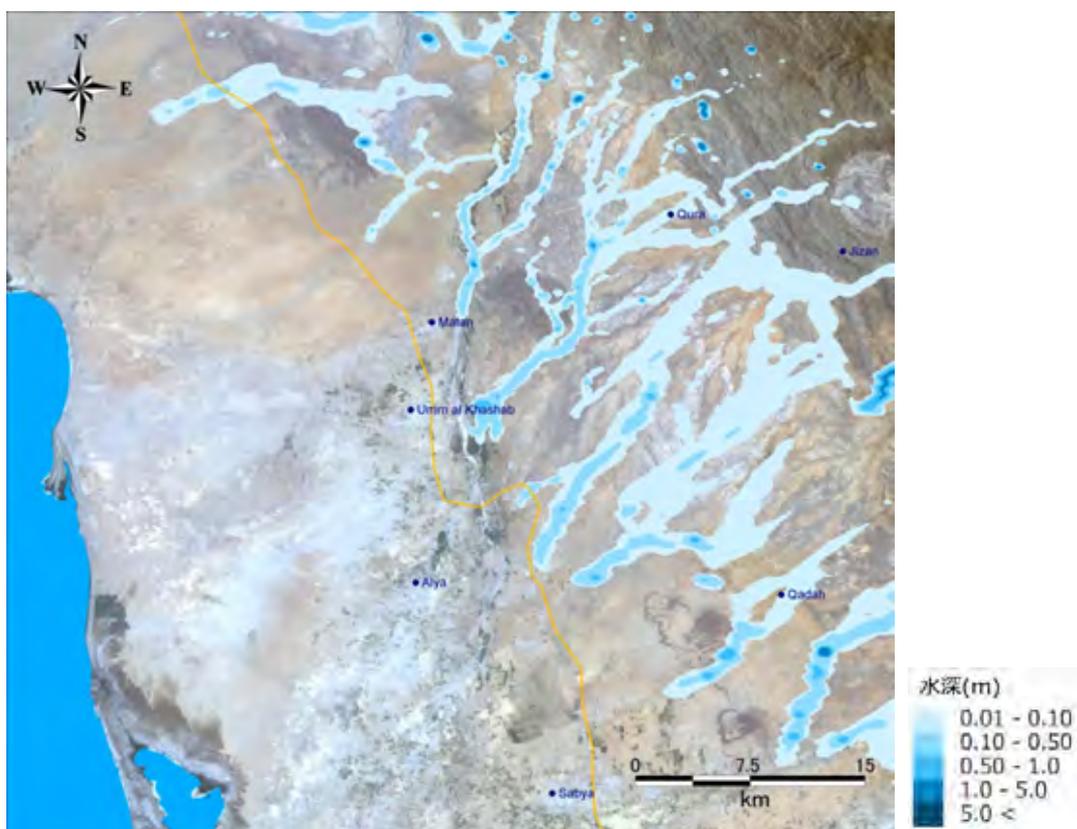


図 4-1 降水時のダム貯留の有無による下流の洪水はん濫挙動の違い



(a) ケース A1 : ダム無し



(b) ケース A2 : ダム有り

図 4-2 降水時のダム貯留の有無による下流の洪水はん濫挙動の違い (沿岸域平野の拡大図)

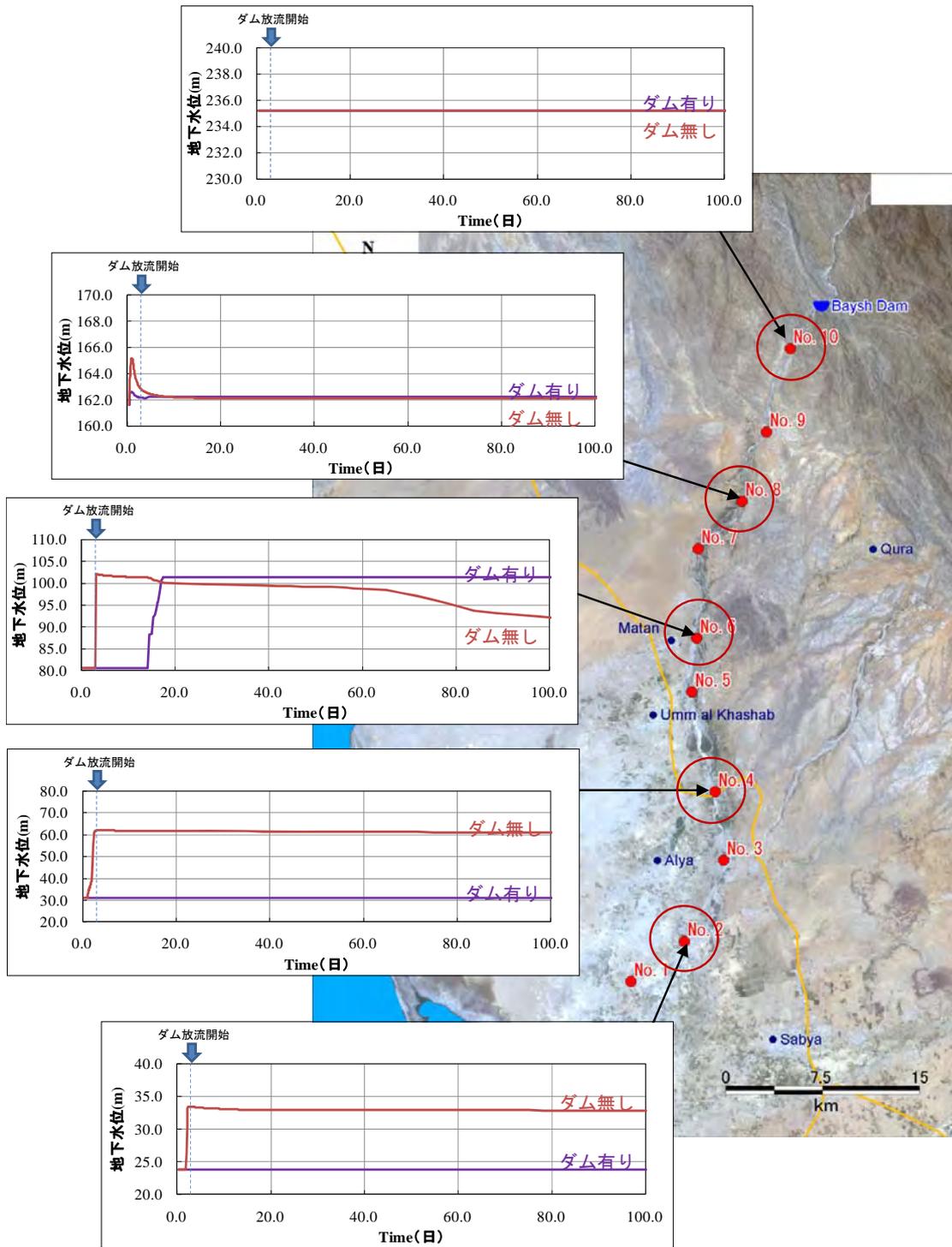


図 4-3 ダム下流域の水位変化 (リチャージダムの有無を比較)

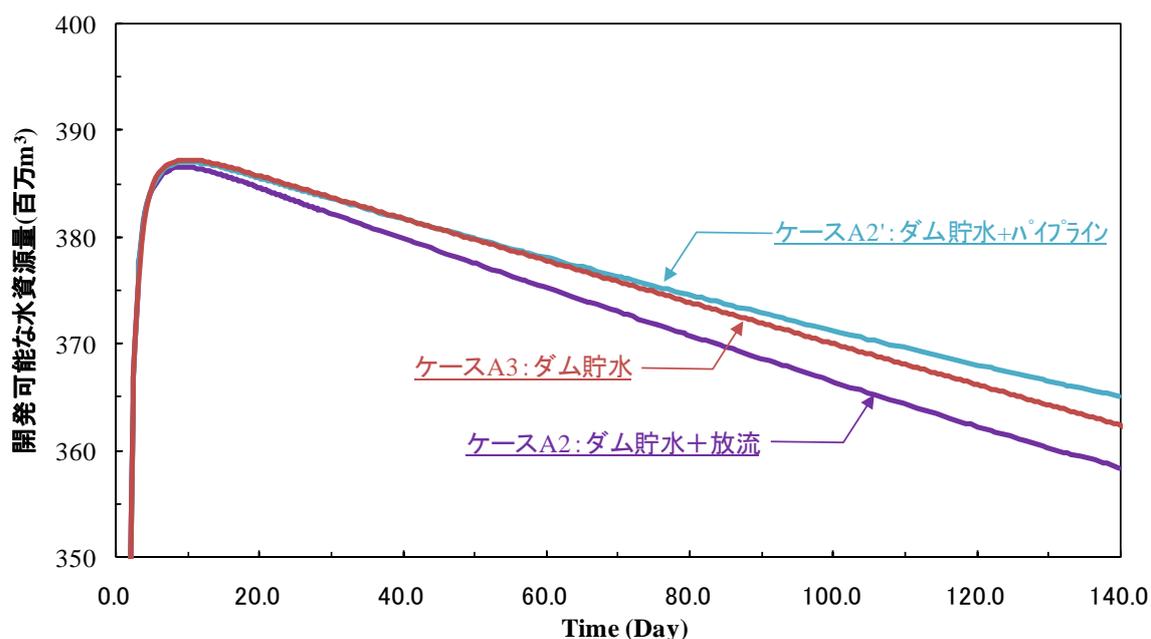


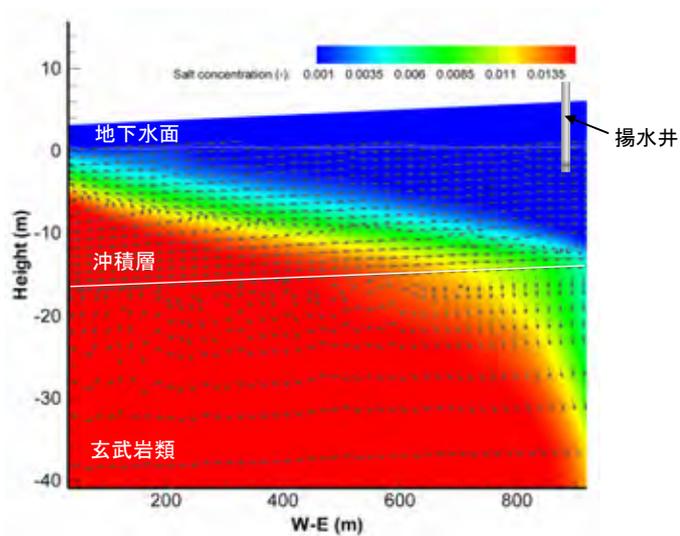
図 4-4 ダム放流の有無による開発可能な水資源量の比較

4.3 下水再生水の人工涵養による水資源開発の試算

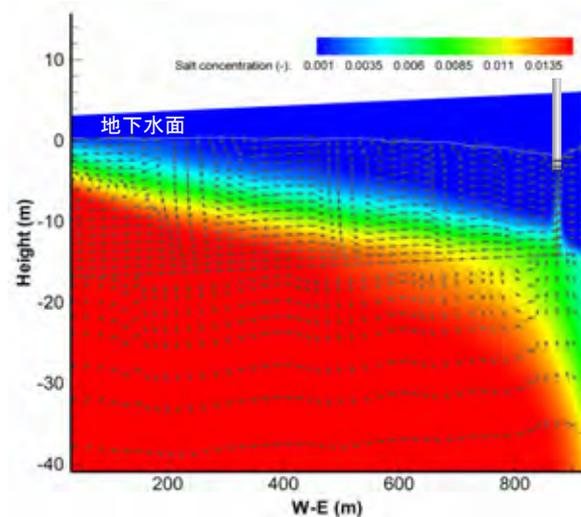
沿岸域における地下水揚水は、地下水位を低下させ、海水侵入による水質低下を引き起こす。図 4-5 は沿岸域の深度断面における塩分濃度分布と地下水位を示したものである。図中のベクトルは地下水の流動方向を示しており、沖積層内では淡水より密度の大きい海水が陸側へと侵入する（潜り込む）様子が確認される。時間は地下水揚水開始からの経過を示し、水位低下と井戸下方での塩分濃度上昇（アップコーニング）の傾向が再現されている。

この状態に対して、下水再生水の人工涵養により水位低下と海水化の抑制を再現した。人工涵養は地下水揚水井より 100m ほど海側に設置した。図 4-6 に人工涵養開始からの地下水流動状況の変化を示す。涵養された地下水は、不飽和領域を降下し、地下水面を上昇させる結果となり、その後、涵養地点周囲の塩分濃度を次第に低下させ、涵養開始から 120 日後には沖積層内の淡水域が顕著に増大する傾向が再現された。

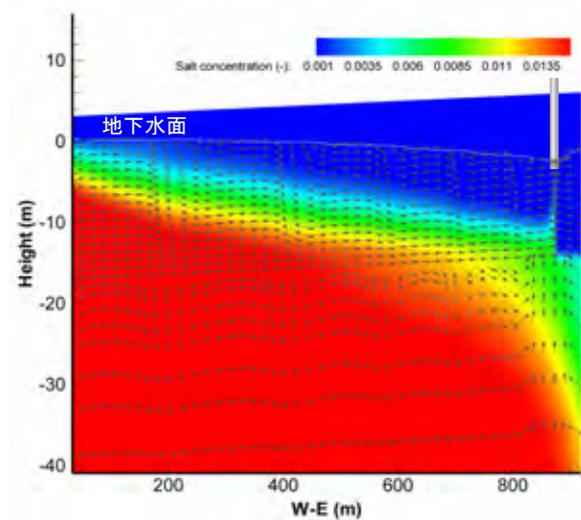
以上の解析結果によると、人工涵養を行わない開発前の淡水資源量はパイプライン敷設長 1km、周辺幅 1km 当たりに対して約 0.65MCM、下水再生水の人工涵養は約 2.94MCM/y、帯水層中の淡水資源量は約 1.08MCM となる。



(a) 揚水直後

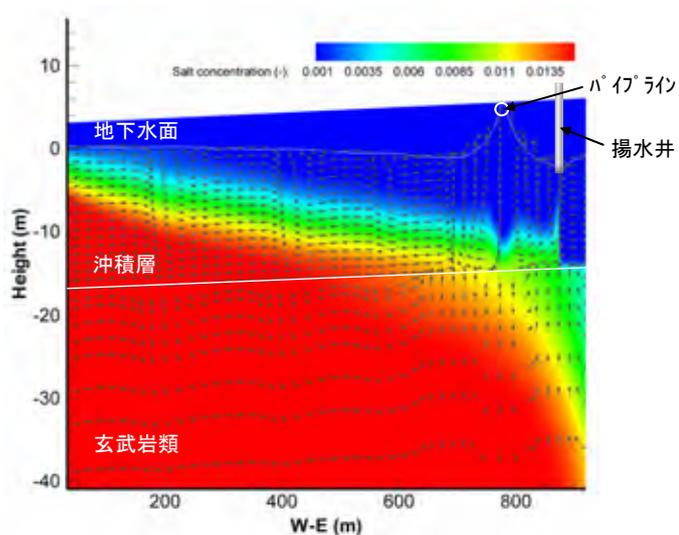


(b) 揚水 28 日後

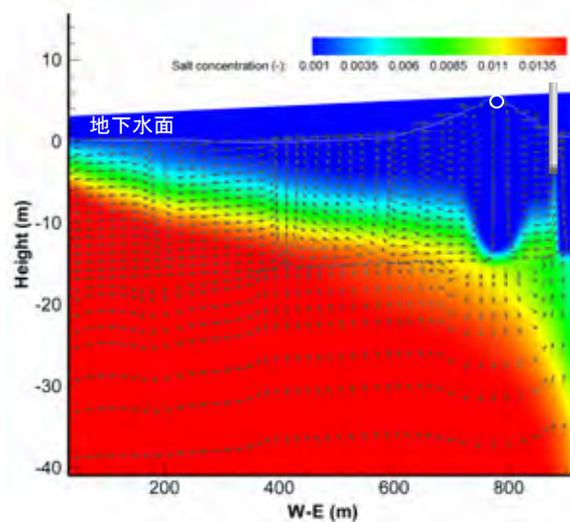


(c) 揚水 80 日後

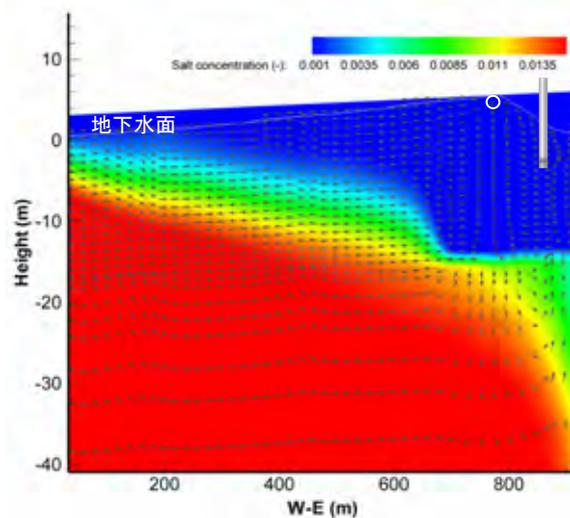
図 4-5 地下水揚水によって生じる水位低下と海水化 (ケース B1)



(a) 人工涵養開始 1 日後



(b) 人工涵養開始 10 日後



(c) 人工涵養開始 120 日後

図 4-6 人工涵養による水位回復と海水化抑制効果 (ケース B2)

第5章 まとめと提言

水資源開発事業の効果を評価するための数値シミュレーションとして、Jazan 州一帯のベージュダム流域を中心に、既存情報に基づいた 3 次元領域モデルのプロトタイピングとデモ計算を実施した。本調査を通じて得られた成果は次のように纏められる。

- a) ベージュダム流域を包含する約 18,000km² の範囲について、地表水、地下水相互作用、海水侵入を考慮した 3 次元領域モデルのプロトタイプを構築した。
- b) 統合型水循環シミュレータ GETFLOWS による試計算を行い、現地の地下水流動状況の実態把握と水資源開発計画ための各種評価ツールとしての適用性を示した。
- c) 水資源開発オプションのうち、計画中の①ダムとワジの連携運用、②下水再生水の人工涵養の効果予測の試計算を実施した。
- d) ダムとワジの連携運用は、放流水がワジから帯水層へ涵養し、下流地点における水位上昇の効果が明らかに認められる。しかしながら、ワジ及び周囲の表層地質の分布によっては浸透が容易な地区とそうでない地区があるため、放流水の流路及び浸透能の配置設計は開発可能な水資源量を左右する重要な要件となる。
- e) また、ダム湖に貯水のみを行った場合に対し、貯水と放流を組合せて下流域帯水層への涵養を促進した場合は、放流水の蒸発によって生じる損失水量が大きくなる可能性が認められた。具体的な放流量操作とそれによる湖面面積の縮小、パイプラインによる帯水層への人工涵養などは、上記と同様に開発可能な水資源量を左右する重要な設計条件となる。
- f) 下水再生水の人工涵養により水位低下と海水化の抑制を再現した。人工涵養された地下水は、不飽和領域を降下し、地下水面上昇させると共に、涵養地点周囲の塩分濃度を次第に低下させ、涵養開始から 120 日後には沖積層内の淡水域が増加する傾向が再現された。

以上の試計算を通じて、対象地区の 3 次元領域モデルにより水資源開発計画を評価できることを示した。しかしながら、ダムとワジの連携運用の試計算では、水資源開発量の増加が見込める状態設定を見出し、可視化することは容易でなく、幾つかの試行錯誤を伴った。これは、現時点では、ダム上流域の降水量分布、下流域の地層物性分布、揚水配置、ダム操作・放流経路の配置等の詳細が明らかでなく、開発可能な水資源量はこれらの組合せによる状態設定や設計条件に影響を受けるためである。

今後は、現地のフィールド情報の詳細を反映した領域モデリングと設計変数の組合せを見出すケーススタディを充実させ、現実的な開発水資源量を評価する必要がある。

以下のその要旨を示す。

- 現地情報を反映した領域モデルへの高度化：領域内の降水・気温分布、3 次元地質構造、利水実態等の現地のより実際に近い状態を反映する。また、降雨時のワジ流量、地下水位の空間的、時間的変化を再現する。
- ダムとワジの連携運用に関する設計諸量の状態設定と最適化：開発可能な水資源量に影響を与える状態設定と設計諸量を確定し、効果的な組合せを見出すケーススタディを実施する。
- 複数の水資源開発オプションの組合せ評価：領域内の降雨、地形、地質及び水利用等の空間配置の実態を反映し、複数の水資源開発オプションの組合せた効果を予測し、地域性を考慮した事業計画の高度化を図る。

サウジアラビア王国
水・電力省 (MOWE)

サウジアラビア王国

南西地域総合水資源開発・管理計画調査

ファイナル・レポート (追加調査結果) -フィージビリティ調査の内容-

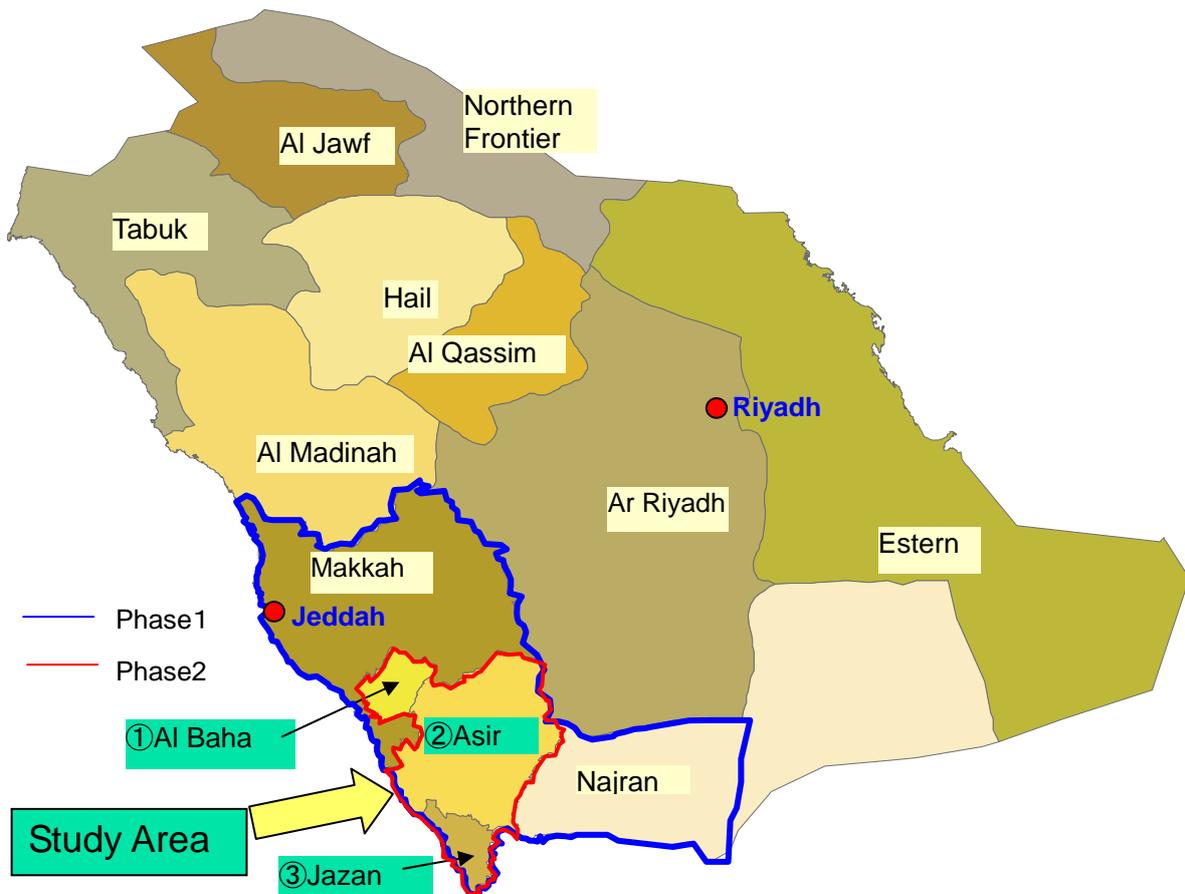
平成 22 年 10 月
(2010 年)

独立行政法人国際協力機構
(JICA)

委託先
八千代エンジニアリング株式会社
株式会社三祐コンサルタンツ

外国為替レート

1.00 米ドル=3.74 サウジリアル=89.0 円
(WEB : 2010 年 3 月 1 日ドル/サウジリアル)



ファイナル・レポート
追加調査結果
フィージビリティ調査の内容

目次

(頁)

第1章	調査概要	1
	1.1 背景	1
	1.2 調査の目的と主要な調査項目	1
第2章	フィージビリティ調査の内容	3
	2.1 データ収集と基本諸元、開発計画の確認	3
	2.2 主要な測量、調査	3
	2.3 下水処理水の再利用パイロットプロジェクトの実施とその評価	7
	2.4 水循環シミュレーションの適用	7
	2.5 都市用水、工業用水の需要計画の策定	9
	2.6 水資源供給量の検討	9
	2.7 給水計画の検討	9
	2.8 紅海ライフラインの諸元検討	10
	2.9 再生可能水資源管理運営計画	10
	2.10 施設概略設計と建設費、運営費の積算	10
	2.11 プロジェクトの評価	11
	2.12 提言、勧告	11
	2.13 日本における研修並びにワークショップ	11
第3章	フィージビリティ調査の実施	12
	3.1 調査期間	12
	3.2 提出レポート	12
	3.3 調査に必要な機材、スペース等	13

図表リスト

表-2.1	紅海水ライフライン測量調査概要.....	3
表-2.2	地下水涵養観測井戸の仕様	5
表-2.3	観測井の仕様	6
表-2.4	水循環シミュレーション対象ダム.....	8
表-3.1	調査実施スケジュール(F/S 調査)	13
表-3.2	調査実施に必要な人員とそのスケジュール.....	13
図-2.1	紅海水ライフラインのルート(A-I).....	4
図-2.2	Wadi Baysh における観測井配置と観測井の構造	5
図-2.3	人工涵養パイプライン敷設レート（案）と観測井の位置と構造.....	6
図-2.4	地下水位の変化(1981-2003, Al Sabya, Jazan).....	8

略語リスト

Abbreviation and Acronym	English	Arabic (عربي)	Japanese (日本語)
BCM	Billion Cubic Meters	مليار متر مكعب	10 億立方メートル
CBD	Convention on Biological Diversity	اتفاقية التنوع البيولوجي	生物多様性保全条約
C/P	Counterpart	النظير	カウンターパート
EIA	Environment Impact Assessment	تقييم الأثر البيئي	環境アセスメント
ER	Effective Rainfall	الأمطار الفعالة	有効雨量
ET	Evapotranspiration	البخرنتح	蒸発散
FAO	Food and Agriculture Organization, United Nations	منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة	国連食料農業機関
GIS	Geographic Information System	نظام المعلومات الجغرافية	地理情報システム
GPS	Global Positioning System	نظام تحديد المواقع العالمي	グローバル・ポジショニング・システム
GDP	Gross Domestic Product	الانتاج المحلي الإجمالي	国内総生産
GDW	General Directorate of Water		地方水事務所
GNI	Gross National Income	الدخل القومي الإجمالي	国民総所得
GSMO	Grain Silos and Flour Mills Organization	صوامع الحبوب ومطاحن الدقيق	サイロ・製粉公団
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technical Zusammenarbeit GmbH	الجمعية الألمانية للتعاون التقني المحدودة	ドイツ技術協力公社
IC/R	Inception Report	تقرير الإنشاء	インセプション・レポート
IEE	Initial Environmental Examination	الفحص البيئي الأولي	初期環境調査
IUCN	World Conservation Union	اتحاد التحويل العالمي	国際自然保護連合
IWPP	Independent Water and Power Project	المياه المستقلة وطاقة المشروع	独立水道・発電事業
IWRP	Integrated Water Resources Planning	التخطيط المتكامل للموارد المائية	総合水資源計画
JCCME	Japan Cooperation Center for Middle East	مركز التعاون الياباني للشرق الأوسط	財団法人中東協力センター
JICA	Japan International Cooperation Agency	الوكالة اليابانية للتعاون الدولي	独立行政法人国際協力機構
KSA	Kingdom of Saudi Arabia	المملكة العربية السعودية	サウジアラビア王国
LCD	Liter per Capita per Day	لتر للفرد يوميا	リッター/人/日
MOAW	Ministry of Agriculture and Water	وزارة الزراعة والمياه	水・農業省
MEPA	Meteorology and Environment Protection Administration	ادارة الأرصاد الجوية و حماية البيئة	気象環境保護庁
MCM	Million Cubic Meters	مليون متر مكعب	100 万立方メートル
M/M	Minutes of Meeting	ملخص الاجتماع	会議の議事録
MMW	Million Megawatt	مليون ميغاوات	100 万メガワット
NAS	National Agriculture Strategy	استراتيجية الزراعة الوطنية	国家農業戦略
NGO	Non-Governmental Organization	المنظمات غير الحكومية	民間公益団体
NMS	National Mining Strategy	استراتيجية التعدين الوطنية	国家鉱業戦略
NSS	National Spatial Strategy	استراتيجية العمران الوطنية	国家特別戦略
NWC	National Water Company	شركة المياه الوطنية	国家水会社
MWS	National Water Strategy	الاستراتيجية الوطنية للمياه	国家水戦略
MOA	Ministry of Agriculture	وزارة الزراعة	農業省
MOEP	Ministry of Economy and Planning	وزارة الاقتصاد والتخطيط	国家経済計画省
MOF	Ministry of Finance	وزارة المالية	財務省
MOI	Ministry of Interior	وزارة الداخلية	内務省
MOMRA	Ministry of Municipal and Rural Affairs	وزارة الشؤون البلدية والقروية	地方自治省
MOWE	Ministry of Water and Electricity	وزارة المياه والكهرباء	水・電力省
M/P	Master Plan	الخطة الرئيسية	マスタープラン
MSR	Million Saudi Riyals	مليون ريال سعودي	100 万サウジリアル
NCWCD	National Commission for Wildlife Conservation and Development	اللجنة الوطنية لحماية و تطوير الحياة البرية	国立動物保護開発協会

Abbreviation and Acronym	English	Arabic (عربي)	Japanese (日本語)
NIA	National Irrigation Authority	السلطة الوطنية للري	国家灌漑局
PME	Presidency of Meteorology and Environment Protection	الرناسة العامة للأرصاد وحماية البيئة	国家気象環境保護
P/O	Plan of Operation	خطة العمل	プラン オブ オペレーション
PPP	Public Private Partnership	شراكة القطاعين العام والخاص	官民連携
RWPC	Renewable Water Production Corporation	شركة إنتاج المياه المتجددة	再生可能水生産公社
REWLIP	Red Sea Water Lifeline Project	شريان الحياة للمياه البحر الأحمر المشروع	紅海水ライフライン事業
OJT	On the Job Training	التدريب المهني	研修
SAGIA	Governor Saudi Arabian General Investment Authority	محافظة الهيئة العامة للاستثمار العربي السعودي	サウジアラビア総合投資庁
SAMA	Saudi Arabian Monetary Agency	مؤسسة النقد العربي السعودي	サウジアラビア通貨庁
SAR	Saudi Arabian Riyal	الريال السعودي	サウジアラビアリアル
SCT	Supreme Council for Tourism	المجلس الأعلى للسياحة	最高観光委員会
SEA	Strategic Environment Assessment	التقييم البيئي الاستراتيجي	戦略的環境アセスメント
SGS	Saudi Geological Survey	هيئة المساحة الجيولوجية السعودية	サウジ地質調査
SOIETZ	Saudi Organization for Industrial Estates and Technology Zone	الهيئة السعودية للمدن الصناعية و للمنطقة التكنولوجية	サウジ産業国家技術団体
SR	Saudi Riyals	الريال السعودي	サウジリアル
STP	Strategic Transformation Plan	خطة التحول الاستراتيجي	戦略的転換計画
STP	Sewerage Treatment Plant	محطة معالجة الصرف الصحي	下水処理プラント
S/W	Scope of Works	العمل نطاق	業務範囲
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	أداة تقييم التربة والمياه	土壌水アセスメントツール
SWCC	Saline Water Conversion Corporation	المؤسسة العامة لتحلية المياه المالحة	海水淡水化公社
UFW	Unaccounted For Water	مياه غير محسوبة	無収水
UNDP	United Nations Development Programme	برنامج الأمم المتحدة للتنمية	国連開発計画
UN-ESCWA	United Nations Economic and Social Commission for Western Asia	اللجنة الاقتصادية والاجتماعية للأمم المتحدة لغربي آسيا	国連西アジア経済社会委員会
WB	The World Bank	البنك الدولي	世界銀行
WHO	World Health Organizations	منظمة الصحة العالمية للأمم المتحدة	世界保健機関
WMO	World Meteorological Organization	المنظمة العالمية للأرصاد الجوية	世界気象機関

第1章 調査概要

1.1 背景

サウジアラビア国（「サ国」）南西部に位置するアル・バハ州、アシール州、ジャザン州は、降雨による再生可能水資源（表流水、浅層地下水）に恵まれた州であるが、近年の少雨傾向や需要の伸びにより、海水淡水化水の非在来型水資源による上水供給が必要な状況になってきている。

再生可能水資源は、表流水、地下水としてワジを流れ、涵養されることから、ダム建設、井戸の設置によって最も容易に開発できる資源であり、南西地域では、上水や農業用水として、取水、利用されてきていたが、需要量が供給量を上回った結果、過剰な取水となり、多くの地域で地下水面が低下し、紅海沿岸では海水が侵入する現象を引き起こしている。

JICA が実施したマスタープラン(M/P)調査の結果、2035年を目標とする上水道供給計画では、需要増に対する供給に対しては、再生可能水資源だけでは対応できない状況にある。近傍ダムにおける連携利用、ダムと下流滞水層との連携による水資源開発の可能性を検討する必要がある。

淡水化水は、渇水等の異常な干ばつ時の緊急対応時に最も有効な水資源であり、対象3州にもすでに供給されている。将来の都市用水や工業用水の需要を充足するためには淡水化水の事業の継続・拡張は不可欠である。淡水化水は、ダムによる再生可能水資源の生産コストと比べて高いため、今後において、水コストの低下を図るべき状況となっている。

対象州の主要都市では、水電力省(MOWE)により、下水処理事業が進められている。「サ」国では、1982年から下水の再利用が行われている。再利用水の用途は、国の基準により果樹、飼料作物、一部の穀類に限定され、野菜への適用は行われていないが、水資源の有効利用のため積極的に下水再処理水の灌漑用水への利用拡大を図っていく必要がある。

下水処理水の再利用は、2010年では、下水処理施設があるアシール州だけの利用であるが、2035年において、3州では、年間で57MCMの生産量が見込まれる。アル・バハ州、アシール州の山地高原地域では、下水処理水の再利用を促進することを主眼として、地形を配慮した分散型下水処理システムを提案している。また、ジャザン州では、下水処理水を使った海岸部での塩水防止対策案を提案している。それぞれの州での下水処理事業の運用に併せて、これらの下水処理水の再利用事業が開始できるような検討が必要である。

M/Pで提案した総合水管理システムの紅海水ライフライン事業は、海水淡水化プラント、ダム群および導水パイプライン網（約1,300km）等の施設から成り立っている。再生可能水資源と海水淡水化水を同時に管理、運営する、4州にわたる広域導水システムは、サウジアラビア国にとって初めてで、かつ最も重要なプロジェクトである。

水管理の総合水管理の中核となる組織としてRWPC（Renewable Water Production Corporation：再生可能水生産公社）の新設を提案する。この組織の目的は、再生可能水資源の開発、管理、供給業務を監督するとともに、関係機関との水供給の調整を図るものである。フィージビリティ調査(F/S)では、MOWE並びに地方水事務所(GDW)、他省庁、淡水化公社(SWCC)、国家水公社(NWC)等の水関連機関の役割や活動内容をレビューし、RWPCの設立に関連する検討を行う。

1.2 調査の目的と主要な調査項目

上記の背景を基に、FS調査は、M/P調査で提案された計画、対策等について、現地において試験、実験、パイロットプロジェクトを立ち上げることにより、その効果や有用性、妥当性の確認、コスト比較等を行うことを目的として実施する。

(1) 再生可能水資源の開発

コストが最小となる上水を供給するために、水資源開発手法として、ダムと下流滞水層との連携による再生可能水資源の開発を行う。

ダムからの定期的な放流運用により、ワジ滞水層への補給を図り、ワジからの取水が最大と

なるダム運用条件の検討を現地調査とこれらに基づくシミュレーションによって行う。

主なる検討項目は、以下の通りとする。

- 1) ワジにおけるダム放流と帯水層地下水のモニタリングとシミュレーション
- 2) 近傍ダムとの連携運用とダムと帯水層との連携運用の評価
- 3) シミュレーションに基づく、可能再生可能水資源の算出

(2) 紅海水ライフライン事業の設計、実施計画

紅海水ライフラインは、既存の淡水化プラントや大型ダムが開発されるマッカ州と対象州の3州を含む広域導水計画である。導水対象は、ダムで開発される再生可能水資源と淡水化プラントにおける開発水である。既存ダム並びに今後開発されるダム群とアル・バハ州、ジャザン州への供給するための新規の海水淡水化プラントが含まれ、これらの水資源開発施設を結ぶ導水パイプライン網の導水事業を検討する。

主なる検討項目は、以下の通りとする。

- 1) 淡水化水の生産量と再生可能水資源による開発量
- 2) 淡水化施設、ダム、パイプラインと供給地
- 3) 送水ルート検討
- 4) 諸元検討、施設設計
- 5) 事業費の積算、事業実施計画

(3) 下水処理水再利用のパイロットプロジェクト立上げと海水侵入防止対策

水資源の有効利用、開発の一環としての下水処理水の再利用の可能性を探ることを目的として、アシール州の山間地域において、分散型の下水処理システムのパイロットプロジェクトを立ち上げることにより、農業用等の他用途への転用の可能性を検討する。また、ジャザン州の沿岸部においては、下水処理水の海水侵入対策としての活用を図る。

主なる検討項目は、以下の通りとする。

- 1) 分散処理システムのパイロットプロジェクトの実施とそのモニタリング
- 2) 上記プロジェクトによる下水処理水再利用事業実現性の検討
- 3) 現地試験による下水処理水の注入試験
- 4) 注入試験に基づく海水侵入防止効果の評価
- 5) 海水侵入防止対策

(4) 再生可能水資源の管理運営組織の検討

3州で開発される、再生可能水資源の管理運営を一括して行う、総合水管理の中核となり、海水淡水化水等の他の水資源との調整、効率的な再生可能水資源の開発を行うための組織として、RWPCの新設についての検討を行う。

主なる検討項目は、以下の通りとする。

- 1) 再生可能水資源開発施設の管理、運営計画
- 2) 管理、運営のための関連機関のキャパシティディベロップメント
- 3) 日本における管理、運営実習
- 4) 情報処理、通信、伝達計画

第2章 フィージビリティ調査の内容

2.1 データ収集と基本諸元、開発計画の確認

3州の社会条件、自然条件、水文資料、ダム施設、水道施設、下水道施設等の現況条件の把握、2035年を目標とした人口、上水、下水道計画、開発計画等の諸元等を把握する。以下のような資料を収集し、分析する。基本的な収集先は3州であるが、送水、淡水化施設については、マッカ州における既存、計画施設の収集を含むものとする。

- 1) 社会条件(人口、商業、工業)
- 2) 自然条件(土地利用、水理地質、植生)
- 3) 水文資料(雨量、ダム水位、地下水位、海水侵入に関する水質)
- 4) ダム施設(計画諸元、一般図面、運用諸元、事業費、維持管理運営費)
- 5) 水道施設(使用量、一般図面、維持管理運営費、料金)
- 6) 淡水化施設(主要諸元、生産量、導水量、一般図面、事業費、生産単価)
- 7) 送水施設(主要ルート、諸元、一般図面、事業費、運営費、送水単価)
- 8) 下水道施設(主要諸元、一般図面、処理量、運営費、処理単価)
- 9) 開発計画(第10次国家計画)
- 10) 上水道計画
- 11) 淡水化水整備計画
- 12) 下水整備計画
- 13) 農業計画
- 14) 工業計画
- 15) 自然環境

2.2 主要な測量、調査

フィージビリティ調査においては、紅海水ライフライン設計のための測量、再生可能水資源の効率的開発のためのダムと下流帯水層との連携運用に関わるダムの試験運用とモニタリング、下水処理水を利用した、海水侵入対策のための抑制実験等を実施する。

2.2.1 紅海水ライフライン測量調査

計画している紅海水ライフラインについての敷設ルート沿いの縦断測量を行う。概略のルートとその諸元は、以下の通りとなる。既存の測量図をチェックした上で、不足区間の測量を実施する。

表-2.1 紅海水ライフライン測量調査概要

Section	Route	Distance (Km)
A	Dawqa- Al Baha	115
B	Hali- Dawqa	108
C	Al Baha – Al Alayah	105
D	Shuqaiq - Abha	124
E	Shuqaiq – Al Birk	96
F	Shuqaiq- Samta	151
G	Abha – Al Alayah	216
H	Abha – Al Janoub	148
I	Al Alayah - Bisha	96
Total Length		1,159

上記のルートについては、図-2.1 に示している。



図-2.1 紅海水ライフラインのルート(A-I)

2.2.2 ダムと下流帯水層の連携による再生可能水資源開発の調査

調査域において、ワジ河床から地下水が帯水層に涵養がされており、ダムから放流される流量を制御することによって地下水涵養量を制御することが可能となる。

地下水涵養量を最大とするダム運用法を計画するに当たって、ワジ流量と地下水涵養量の関係を把握することが必要となる。その目的のために、ワジ沿いに地下水位観測井を設置し(図-2.2 参照)、地下水位の変動を1年～2年程度観測する。調査対象ワジとしては、年間を通じた流水があり、下流での農業用水の取水がある、Jazan 州の Baysh 川流域をモデル流域として実施する。観測井の構造を図-2.2 に、その仕様を表-2.2 に示す。

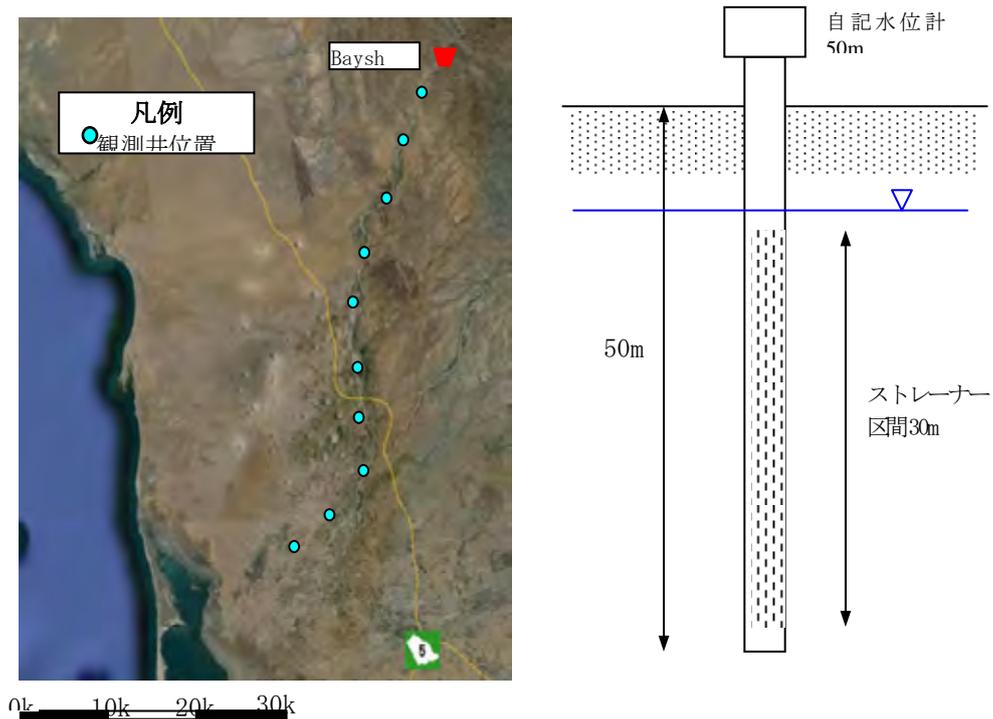


図-2.2 Wadi Baysh における観測井配置と観測井の構造

表-2.2 地下水涵養観測井戸の仕様

調査項目	内容
地下水観測井戸設置区域	Baysh 川流域
観測井戸数	10 観測井
地下水位観測井戸の数量・仕様	
観測井戸径	4 インチ
観測井戸深度	50m
時期水位計	圧力式水位測定
備考) 観測井戸掘削時には、土質サンプルを採取し地層区分を行う	

観測井の設置に当たっては以下の点に留意する。

- 観測井は Wadi Baysha の流路から 100m 以内の距離に設置する。
- 井戸には PVC ケーシングとスクリーンを設置する。スクリーンは砂礫層に設置する。
- 観測井は沖積砂礫層に設置し、これに自記水位計を設置して、水位変化を観測する。
- 調査地域では、ワジ河床堆積物中の伏流水が側方の沖積層帯水層に流入している。沖積層帯水層の地下水位変化を観測井で測定し、ワジ伏流水の流入量を算出する。

2.2.3 下水処理水の活用による海水侵入抑制と対策効果の確認

Jazan 州では大量の地下水が第四紀帯水層から揚水されている。その結果、Jazan 州の海岸沿い帯水層には、海水が広く浸入している。海水侵入を緩和する対策として、パイプラインを地表浅部に敷設しこれを通じて下水処理水を帯水層に人工涵養する。海水侵入が最も深刻であると考えられる Jizan 市周辺地域に涵養用のパイプラインを敷設(図-2.3 参照)し、観測井をパイプラインに沿って配置する。観測井の設置目的は以下のとおりである。

- ① 観測井によって海水侵入の現況を把握し、人工涵養施設の計画・設計のためのデータを入手する。

② 観測井によって、将来的に人工涵養施設を稼働した場合の対策効果を検証する。

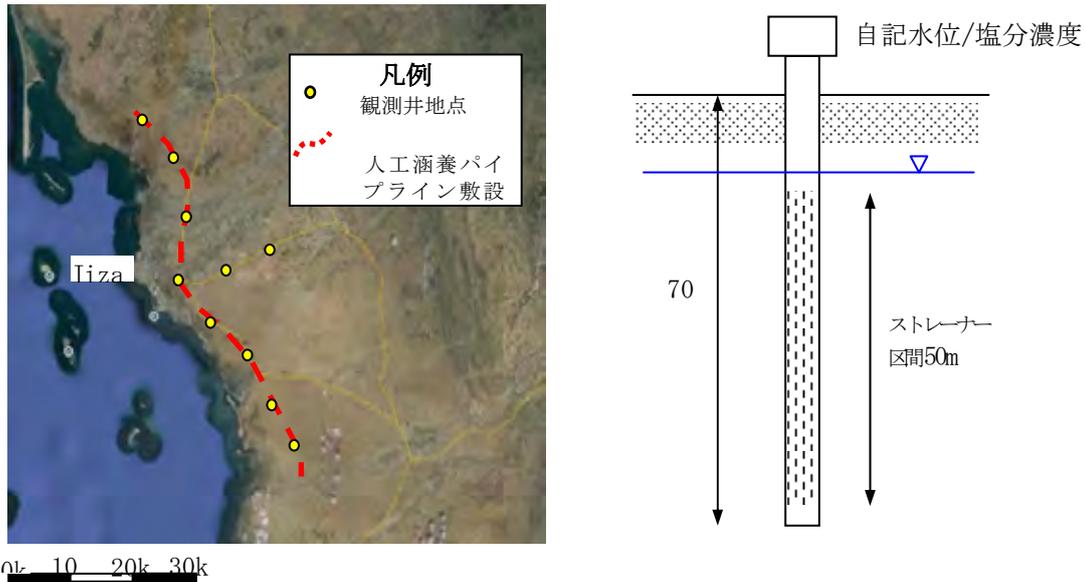


図-2.3 人工涵養パイプライン敷設レート（案）と観測井の位置と構造

観測井の仕様を表-2.3 に示す。

表-2.3 観測井の仕様

調査項目	内容
地下水観測井戸設置区域	Jizan 市周辺の海岸沿い地域
観測井戸数	10 箇所
地下水位観測井戸の数量・仕様	
観測井戸径	4 インチ
観測井戸深度	70m
自記期水位計	圧力式水位測定
自記塩分濃度計測器	孔内センサー設置
備考) 観測井戸掘削時には、土質サンプルを採取し地層区分を行う。	

観測井の設置に当たっては以下の点に留意する。

- 観測井群は、海岸沿いの井戸群と海岸から内陸に向かう井戸群の 2 系統を配置する。
- 観測井は沖積層に設置する。
- 観測井には PVC ケーシングとスクリーンを設置する。スクリーンは砂礫層に配置する。
- 観測井には水位計と塩分濃度（電気伝導度）計を設置し、自記観測を行う。
- 地下水の電気伝導度から海水侵入状況を推定する。
- 地下水位変化と塩分濃度変化の関係から、海水/淡水境界の移動に関する情報を推定する。これを、人工涵養施設の設計に利用する。

2.3 下水処理水の再利用パイロットプロジェクトの実施とその評価

2.3.1 パイロットプロジェクトの実施

下水処理水の再利用は、都市用水や工業用水としての利用は限定され消費量は少ないが、農業用水としての利用量は大きい。また、アル・バハ州やアシール州では、全体農業用水量に比べても量的に大きく、農業にとっては、有望な水資源となる。従って、利用促進を優先的に考えた場合、特に、アル・バハ州やアシール州の起伏の多い高原都市では、下水処理・利用システムとして、「分散型の下水処理システム」を検討する。

本調査では、山間部における農業用水への下水処理水の再利用を図るために、山間部における分散処理システムをパイロット事業として実施するため、アシール州にて事業対象地を選定する。パイロットプロジェクトの処理規模は、日量で $500\text{m}^3\sim 1,000\text{m}^3$ とし、期間は、1年を予定する。

下水処理水のパイロット事業に関する検討事項は、以下の通りとする。

- 1) パイロット事業対象地域の検討、選定（検討対象地域：Abha, Kamis Mushayt, Bisha）
- 2) パイロット事業の下水処理施設の設計（計画処理量、下水再生水、プラント規模）
- 3) パイロットプロジェクトのモニタリング（1年間程度）

2.3.2 パイロットプロジェクトの効果の確認

パイロットプロジェクトを通しての懸案、問題点を整理する共に、プラント施設の処理能力の評価、施設の今後の展開方法の検討を行う。

2.4 水循環シミュレーションの適用

2.4.1 再生可能水資源の開発量推定

本検討では、表流水と地下水の相互の挙動を解析可能な統合型水循環シミュレーションにより、数理モデリングの例示と試算を行いながら、適用手法の有用性を検討し、主要ワジの再生可能水資源の開発量を推定する。

検討、シミュレーション解析事項は、以下の通りとする。

- 1) 開発ワジ流域の検討
- 2) 対象ワジ流域、ダム、井戸等による初期条件の整理
- 3) 初期化シミュレーション（各ワジ流域、ダム、井戸群）
- 4) 数値モデルシミュレーションと成果の整理
 - ① 湛水分布域（等水深線コンター図）
 - ② 地下水位等高線図（浅層地下水）
 - ③ 地下水浸透量分布図
 - ④ 水理ポテンシャル図
 - ⑤ 流線軌跡図（平面投影図、3D 鳥瞰図）

検討結果を基に、3州における再生可能水資源としての表流水、地下水ポテンシャルを算出する。

- 1) ワジ流域における表流水、地下水ポテンシャル
- 2) 地下水涵養を最大とする最適なダム放流量とダム開発量の検討
- 3) ワジにおける井戸群の開発量、取水量

2.4.2 ダムと下流帯水層との連携による水資源開発シミュレーション

2.2における Baysh ダムにおける調査結果をもとに、Wadi Baysh におけるダム放流と下流帯水層での地下水涵養量の関係を把握して、地下水涵養量が最大となる、放流量、放流間隔をシミュレーション(GETFLOWS)によって求める。

Baysh ダムの他に、比較的規模の大きいダムのあるワジにおいても同様の水循環シミュレーションを実施するものとする。実施対象ダムとしては、以下のダムがあげられる。

表 2.4 水循環シミュレーション対象ダム

Name of Dam	Location of Wadi	Catchment Area (km ²)	Annual Flow (MCM/y)	Reservoir Volume (MCM)	Specific Flow *1 (MCM/y/km ²)	Specific Reservoir Volume *2 (y)
King Fahd	East(Desert)	7,600	69.1	325.0	0.009	4.7
Baysh	West (Red Sea)	4,600	104.6	193.6	0.023	1.9
Hali	West (Red Sea)	4,840	122.3	249.9	0.025	2.0

Note) *1: Specific Flow=Annual Mean Flow / Catchment Area,
*2: Specific Reservoir Volume =Reservoir Volume/ Annual Mean Flow

2.4.3 Jazan 州の地下水解析と海水侵入対策のシミュレーション

Jazan 州では、農業用水、都市用水の取水により、地下水位が低下している。Jazan 州の観測井 (6J85P)では、1981 年の地下水位-9.8m が 2003 では、-16.4m と 22 年で 6m 以上も低下している。

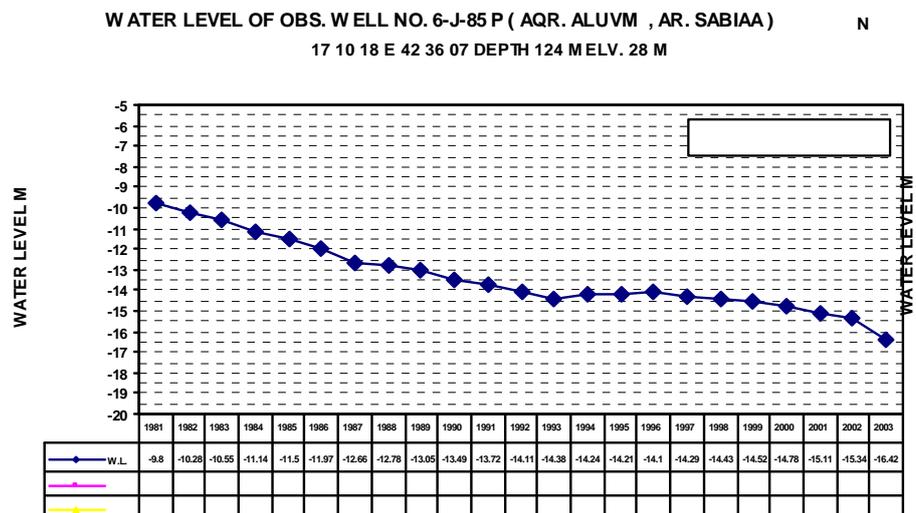


図-2.4 地下水位の変化(1981-2003, Al Sabya, Jazan)

現地観測結果と地下水位データを基に、収集水循環シミュレーションにより、ジャザン州における地下水位の低下状況の再現を行うと共に、再現結果を基に、以下の検討を行う。

- 1) 検討対象地域の検討、選定(ジャザン州)
- 2) 対象地区のモデル化
- 3) 検討条件の検討 (地下水位の低下現象、下水処理水注入による回復を考慮)
- 4) 3次元シミュレーションによる地下水位の低下解析
- 5) 下水注入量と海水侵入の影響解析
- 6) 海水侵入防止のための注入量の効果 (規模、配置、注入量)

解析結果から、以下の評価を行う。

- 現在の取水量が継続した場合の地下水位の傾向
- 地下水位涵養のための最適な取水量
- 下水処理水による注入による海水侵入対策の効果

2.5 都市用水、工業用水の需要計画の策定

都市用水（生活用水＋業務・商業用水）と工業用水について、2035年を計画目標とする3州の需要を予測する。JICAM/Pの検討成果、MOWEの検討成果等の既往の計画資料をレビューすると共に、第10次国家計画や既往の人口予測結果、長期計画等を考慮し、主要5年毎の需要計画を策定する。

都市用水について、ガバナレート別人口を基本として、需要計画を策定する。工業用水については、工場就業者を策定の基本とする。工業用水については、下水再生水の一部が使用されていることから全体需要の策定においては、この量を工業用水から控除する。

M/P調査における、水需要量については、MOWEの基準に沿って計画需要量を算定しているが、現行の原単位、水道普及率に比べて大きくなっており、フィージビリティ調査においては、需要の伸びを適切に把握して検討するものとする。

検討事項は、以下の通りとする。

- 1) 基本条件の検討（人口、水道普及率、上水給水原単位、工場就業者数、漏水率）
- 2) 都市用水の需要予測(将来人口予測、検討ケース別の需要予測)
- 3) 工業用水の需要予測(将来工業就業者数の予測、下水処理再生水の予測、検討ケース別の需要予測)
- 4) 施設計画に用いる都市用水、工業用水需要量の検討(2015～2035年)

2.6 水資源供給量の検討

2.6.1 再生可能水資源による開発量

2.3のシミュレーション結果を基に、主要なダム、井戸群による取水があるワジ流域における表流水、地下水の開発可能量を把握すると共に、ダム放流による下流の帯水層への涵養、近傍ダムとの連携運用等の検討結果を整理する。

開発可能量は、ダム地点、井戸群地点で算出する。

2.6.2 淡水化水ならびに化石水による計画供給量

SWCCによる淡水化プラントによる供給計画(2035年まで)ならびにアル・バハ州、ジャザン州のための新規の淡水化プラントによる供給量を調査、検討する。

ナジラン州、Wajid帯水層からの化石水については、MOWEの供給計画を整理、検討する。検討成果として、3州の既存プラントの主要期間毎の淡水化水、化石水の供給計画を2015年から2035年までを整理する。

2.6.3 下水再生水の計画処理量

既往のイタルコンサルタント、MOWEにおける下水処理計画資料を整理、レビューすることにより、州別、ガバナレート別の2015年から2035年までの下水再生量を整理する。

2.7 給水計画の検討

2.5及び2.6における検討結果を用いて、3州における給水計画を検討する。給水計画は、都市用水（生活用水、業務、商業用水）と工業用水を給水対象とし、開発、生産する水資源としては、表流水（再生可能水、地下水（再生可能水）、海水淡水化水とする。なお、アシール州の一部については、Wajid帯水層（深層地下水）からの導水を考慮する。下水再生水については、その分が水需要から引かれているので、考慮しない。

水開発、供給システムについては、JICA調査の水M/Pで提案した、「紅海水ライフライン」基本にして、2015年から2035年までの総合水供給計画を検討する。

検討事項は、以下の通りとする。

- 1) 現況給水ネットワークの整理
- 2) 新規淡水化プラントの位置並びに生産量の検討（アル・バハ州、ジャザン州）
- 3) 給水計画のための開発施設の整理（ダム、淡水化プラント、井戸開発）
- 4) 州毎の水需要計画検討(2015-2035年)
- 5) 紅海水ライフラインを考慮した給水計画（給水計画代替案1）
- 6) 紅海水ライフラインを考慮しない州別の給水計画（給水計画代替案2）
- 7) 施設計画のための給水施設の諸元検討

2.8 紅海ライフラインの諸元検討

2.7 給水計画の検討結果に基づき、紅海ライフラインの諸元の検討を行う。諸元検討に当たっては、既存の地形図(Scale:1/10,000-1/50,000-1/100,000)を用いて行うが、既存の施設については、SWCC, MOWEから図面提供（パイプライン、淡水化プラント、浄水処理施設、ダム施設）を受けるものとする。

検討事項は、以下の通りとする。

- 1) 再生可能水資源、淡水化プラントの現況施設、送水ルートの確認
- 2) 新規の再生可能水資源（ダム、井戸群）ならびに淡水化プラントの位置、開発量
- 3) 送水ルートの検討
- 4) 送水パイプライン、ポンプ等の水理諸元検討
- 5) 再生可能水資源施設並びに紅海水ライフラインの管理設備計画

2.9 再生可能水資源管理運営計画

3州のダムで開発される再生可能水資源の管理運営を一括して行う、総合水管理の中核となる組織としてRWPC（Renewable Water Production Corporation：再生可能水生産公社）の検討を行う。

現行の水行政組織及び海水淡水化水と再生可能水の供給・利用は、飲料・生活用水を管理・供給するMOWEと農業用水を管理するMOAの間の関係・調整機能が乏しい、各州間に跨る総合的な水供給・水配分管理の実施や統合的な表流水、地下水の管理・運用のための機構が明確になっていない等の課題があり、紅海水ライフラインを含めた給水計画を前提とした、新たな再生可能水資源に関する組織の設立に関する検討を行う。

また、各施設における施設運営の一元化や各施設間における管理情報の伝達通信方法についても検討を行う。

再生可能水資源管理運営計画の研修の一環として、日本の水資源管理施設における中期的な研修（3ヶ月～5ヶ月程度）を実施する。

管理運営に関する検討は、以下の通りとする。

- 1) 関連機関(MOWE,MOA,SWCC,NWC)との関係に関する整理
- 2) 新組織の運営計画の検討と新組織に関する意見聴取
- 3) 新組織とその運営方法の提案
- 4) 再生可能水資源施設の管理方法の提案
- 5) 再生可能水資源、海水淡水化施設間の情報処理、伝達、通信方法
- 6) 新組織の立上げに関する提案

2.10 施設概略設計と建設費、運営費の積算

2.9 までの検討結果を基に、経済、財務評価のための主要施設の概略的な設計を行う。検討項目は、以下の通りとなる。対象施設としては、紅海水ライフラインに関する施設、下水処理再生施設等となる。建設済みの施設については、管理運営費として考慮する。

2.10.1 施設設計

水資源開発施設、導水施設の設計を行う。なお、新設の淡水化プラントの設計は、SWCCによるものとし、本設計では、送水パイプラインとその関連施設を対象とする。設計クライテリアは、MOWEの基準によるものとする。

- 1) 紅海水ライフライン（パイプラインとその関連施設）
- 2) ダムの運用変更に伴う放流設備、下流ワジ取水施設の設計
- 3) 下水処理システム関連設計（処理プラント）
- 4) 海水侵入対策関連施設

なお、設計に当たり、必要とする測量、調査(ボーリング等)を実施するものとする。

2.10.2 施設の維持、運用計画

施設設計を行った施設について、維持、運営、運用計画を立案する。

- 1) 紅海水ライフライン（パイプラインとその関連施設）
- 2) ダム放流設備とワジ取水施設
- 3) 下水処理システム（処理プラント）
- 4) 海水侵入対策関連施設

2.10.3 建設費積算並びに実施工程計画

施設設計における図面、維持、運営、運用計画を基に、主要な工事数量を算出する。単価については、MOWEの基準に基づく。

- 1) 工事数量の積算
- 2) 工事単価、維持管理単価の設定
- 3) 建設費、維持管理費の積算
- 4) 施設の建設工程計画（5～10年として計画）

2.11 プロジェクトの評価

2.10の検討結果を基に、プロジェクトの便益を算出し、海水淡水化プラント、井戸、ダムを含む、紅海水ライフラインの経済・財務分析を行う。分析には計画水量を確保するために必要な新規の施設に加えて、既に計画／建設されている施設が含まれ、水開発計画の便益と費用の比較により、水資源開発計画の実現可能性を検討する。

財務分析は、水道料金収入を便益として算出し、所定の割引率(ex.6.5%)を用いて評価する。経済分析については、内部収益率(IRR)と便益・費用比率(B/C)で評価する。

環境調査については、「サ国」の環境基準に基づく、評価を行う。

2.12 提言、勧告

調査成果に関する提言、勧告を行う。

2.13 日本における研修並びにワークショップ

水資源施設の管理、運営に関しての研修を日本において実施する。研修においては、日本の水資源開発の歴史、現状を理解するとともに、日本のダム管理の現状を視察し、ダム間、河川間の導水、ダム湖における環境対策等を含む、統合的な水資源の管理の実態を理解することを目的とする。研修期間は、3ヶ月から5ヶ月程度とする。

これらの研修を通して、水資源開発手法の計画、立案、ダム施設の管理手法の把握、水文モニタリング計画とその管理、環境対策、水資源に関する地理情報技術(GIS)の利用などの技術移転を行う。研修員は、1回につき、2～3名として、3カ年に渡り、実施する。

ワークショップについては、調査の過程における3次元水循環シミュレーション結果、現地モニタリングの成果の発表等について現地またはリヤドにおいて実施する。

第3章 フィージビリティ調査の実施

3.1 調査期間

フィージビリティ調査の実施スケジュールを以下に示す。調査は、2011年5月に開始し、2014年8月までの40ヶ月を予定する。以下に概略の調査スケジュールを示す。調査スケジュールの計画に当たっては、ラマダンとハジ休暇を考慮した。日本における研修は、3回を予定している。第3回目については、水資源管理の組織、運営のオンザジョブトレーニングとする。

表 3-1 調査実施スケジュール(F/S 調査)

Elapsed Months from Starting Month	Schedule (Year,Month)																																								
	2011												2012												2013												2014				
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug
Events in KSA																																									
Study or Training in Japan																																									
0. Mobilization/Meetings																																									
1. Data Collection and Reviews																																									
2. Surveys and Monitoring																																									
2.1 Topographic Survey for REWLIP																																									
2.2 Monitoring and Analysis on Groundwater Recharge																																									
2.3 Control of Seawater Intrusion																																									
3. Reuse Plan for Reclaimed Waste Water																																									
3.1 Preparation and Execution of Pilot Project																																									
3.2 Evaluation of Project																																									
4. Simulation by GETFLOWS																																									
4.1 Renewable Water Development Simulation																																									
4.2 Simulation on Combination with Dams and Aquifers																																									
4.3 Simulation on Seawater Intrusion																																									
5. Demand Projection for Municipal & Industrial																																									
6. Water Resources Supply Volume																																									
6.1 Renewable water																																									
6.2 Desalinated seawater																																									
6.3 Reclaimed waste water																																									
7. Water Supply Plan																																									
8. Facility Plan for Red sea Water Life Line																																									
9. Organization Plan of RWPC																																									
10. Preliminary Design and Cost Estimate																																									
11. Project Evaluation																																									
12. Recommendation																																									
13. Training in Japan																																									
14. Reporting																																									

3.2 提出レポート

提出レポートは、以下の通りとする。

表 3-2 調査実施に必要な人員とそのスケジュール

作成レポートの種類	提出時期	提出部数	備考
インセプションレポート	着手時	20 部	英文
プログレスレポート(1)	着手時から 9 ヶ月	20	英文
インテリムレポート	着手時から 19 ヶ月	20	英文
プログレスレポート(2)	着手時から 24 ヶ月経過時点	20	英文
ドラフトファイナルレポート	着手時から 38 ヶ月経過時点	30	英文
ファイナルレポート	着手時から 40 ヶ月時点	30	英文 サマリーアラビア語

3.3 調査に必要な機材、スペース等

3.3.1 プロジェクトチームの事務所

プロジェクトチームの事務所は、ジャザンに開設する。なお、事務所については、以下のスペースの提供を希望する。

- 1) オフィススペース：エンジニア7名＋ローカル雇用員3名＝合計10名
- 2) 机とイス：10名
- 3) 会議用の机とイス：1セット
- 4) 電話機：1台

3.3.2 MOWEからの便宜供与、協力

MOWEからの便宜供与、協力事項は、以下の通りとする。

- 1) ビザの取得
- 2) 現地調査における他省庁へのデータ資料の収集協力要請
- 3) チームの現地での安全に関する協力
- 4) その他調査団からの要請に関する事項（事故発生時、医療等）