砂漠開発のための海水人造湖の有効な水面面積算出の試み

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者名	山口,秀甫 大田,忠親
発行元	水利科学研究所
巻/号	43巻6号
掲載ページ	p. 76-85
発行年月	2000年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

砂漠開発のための海水人造湖の有効な水面面積算出の試み

――カッターラ低地（エジプト）を想定した場合――

山　口　秀　甫
大　田　忠　親

目　　次

1. はじめに
2. 気象ならびに地理的データ
3. 算出方法
4. 算出結果および考察
5. 海水湖の将来
6. おわりに

1. はじめに

サハラ砂漠（リビア砂漠なども含む）は今は砂漠であるが，昔はそうではなかった。人の営みが砂漠化を促進させたといわれている。我々が今日の生活水準を保てば，空気中の二酸化炭素が増大しつづけるだろう。二酸化炭素の増大は地球の温暖化を招き，それが海面水位の上昇を引き起こすといわれている。かつて筆者らは掘込式港湾の鹿島工業港の例をあげ，熱帯，亜熱帯の砂漠において，内陸部を掘り込んで海水を入れることにより，空気中の水分を増加させ，その地域の農業開発の第一歩になる可能性を述べた[1]。砂漠開発のプロジェクト「グローバル・スーパー・プロジェクト」には「デザート・アクアネット構想」「カッターラ低地開発計画」などがある[2]。「デザート・アクアネット構想」は清水建設㈱の宮本と前垣内により提案されている。その構想はサハラ砂漠に巨大な海水の人造湖を数個造り，湖水の蒸発作用等により，砂漠の過酷な気象の改善をし，緑化を図る構想である。その構想では地下水や大河川を水

源として緑化する従来の手法とは異なり，無尽蔵の海水を利用し，高温，低湿度の砂漠気候を改善し，砂漠開発を行なおうとするものである。まず海岸に接したポンプステーションから海水を取水し，直径8 m, 5本を1組とするコンクリート製パイプラインで砂漠内陸部に海水を送り込む。そして自然の窪地を利用して，直径30 km，深さ20～30 mの東京湾に匹敵する海水の湖を数個造り，それらの湖は，それぞれ幅50 m，深さ約10 mの運河で結ぶ。一番，高所に位置する湖から，海水は自然勾配を利用し運河を通り他の湖に入り，最終的には海に戻るという構想である。「カッターラ低地開発計画」も前述の宮本と前垣内により報告されている。それによると，カッターラ低地（図1参照）開発は，なにも今に始まったことではなく，初めは1912年に，ベルリン大学のペンクが地中海からカッターラ低地に海水を流入させ，蒸発する量とバランスさせた恒久的な発電，更に耐塩性植物による緑化の構想を提案した。この考えは，ボール博士に受け継がれ，導入する海水量と蒸発のバランスの検討がなされた。その低地に，水面が形成された場合の降雨量の増加，蒸発量，浸透水量などが考慮され，湖水面は海抜－50 mと計画された（1927年）。それによると，海水導水路は，エルアラメイン地点（図1参照）を通り，一部は開渠（20 km）で，あとは3本のトンネル（直径はそれぞれ11 m）により導水する

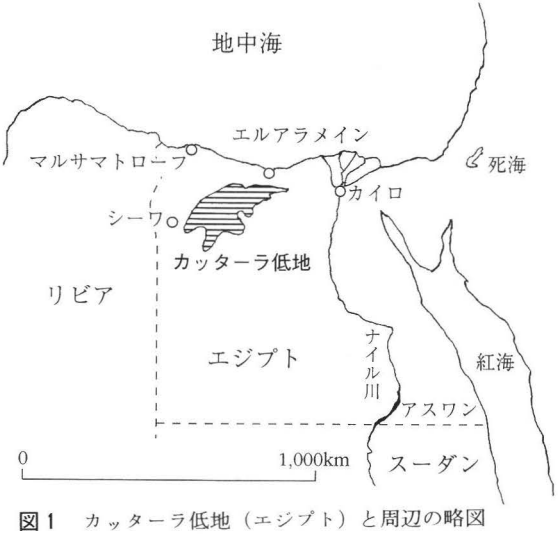

図1　カッターラ低地（エジプト）と周辺の略図

(60 km)。そして発電能力は17.5万 kW と見込んだ。なお，その後もこの地域の調査研究がなされ，特に，スイス，スエーデン，西ドイツ，エジプトなどの諸国の調査が知られている。そして1964年，西ドイツのバスラーにより導水路は全て 3 本のトンネルを用い，発電需要に合わせた揚水発電設備も建設する提案がなされた。その場合，湖水面は海抜－60 m で，湖水面積12,000 km^2，そして湖面からの年間蒸発量を19×10^9 m^3/年と推定した。また，ほぼ同時期に，カイロ大学のゴハールはトンネルを造らず開渠だけの導水案で，湖面は海抜－75 m，連続発電10万 kW，最大34.5万 kW と見込んだ提案をだした。そして1981年，西ドイツとエジプトのグループ「JVQ」により提案された開発計画が，今日では最も経済的と考えられている。それはマルサマトローフ地点（図1参照）において，海岸から数 km ほどの処に海抜150 m の高地があるので，そこに揚水してから約80 km の開渠をとうして海水を低地へ導入するのである。この場合，揚水施設の付近に火力発電所を建設し，電力需要のピーク時以外は揚水させる。1 日あたりの揚水に380万 kWh（8.1時間），そして水力発電で480万 kWh，すなわち，差し引き100万 kWh（1 日）の電力が生産できる。そしてトンネルのない分だけ，工事費が安くなる見当であった。しかしながら，エネルギーコストは石油換算で60～70ドル/バーレルと試算され，経済的には合わないと報告された[2)]。しかしながら，宮本と前垣内は次のように述べている。これらの計画の良否は，単に現在の経済性だけで判断するのは好ましいことではなく，今後の湾岸危機の石油価格の変動，地球温暖化防止のクリーンエネルギーの必要性，砂漠の緑化等を十分考慮に入れて判断すべきだ[2)]。さらに，彼らはエジプトの開発にも言及し，国土の97％が砂漠で，残り 3 ％のナイル流域に5000万人が生活しているので，ナイル川自体に余力がなくなりつつある現在，ナイル川に頼らないニューフロンティアの必要性を述べている[2)]。

本稿では，サハラ砂漠北東部のカッターラ低地の人造湖を想定した。そして，人造湖の水面はどれだけ広ければ，気象上，効果がでると考えられるか検討した。また，このカッターラ低地に海水を流入させた場合，その海水は濃縮されて，やがて死海のような人造湖になるが，その砂漠開発の意義を考察した。

2. 気象ならびに地理的データ

サハラ砂漠はアフリカ北部に大きくひろがり，地球上でもっとも乾燥した地

域といわれている。カッターラ低地（図1参照）はサハラ北東部，リビア砂漠の地中海寄りに位置し，東西の長さ約300 km，平均幅100 km（最大幅145 km），面積約19,500 km^2，平均標高－70 m（最低地点－134 m）の低地である[2)]。サハラ砂漠北東部の気柱[注1)]あたりの水分量（水蒸気量）は1月で1.0～1.2（g/cm^2）（サハラ全域では0.8～1.6），7月は2.0～2.4（g/cm^2）（サハラ全域では1.0～3.2）であった[3)]。年間の蒸発量はサハラ砂漠では10 cm/年であったが同緯度の大西洋海域では，100～200 cm/年であった[4)]。カッターラ低地付近のシーワ（北緯29度12分，東経25度29分）地点（図1参照）では，7月の日平均の蒸発量は15.5 mm/日であった[5)]。シーワ地点の温度と湿度は下記のとうりであった[6)]。1月の月平均最高，最低温度はそれぞれ24.9℃，0.3℃であった。相対湿度は72％（午前7時30分の月平均）および42％（13時30分の月平均）であった。7月では月平均最高，最低温度はそれぞれ42.4℃，17.8℃であった。相対湿度はそれぞれ63％（午前7時30分の月平均）および25％（13時30分の月平均）であった。サハラ砂漠での平均風速は5 m/秒（7月）であった[7)]。

3. 算出方法

砂漠は巨大な開放系であるから，面積と時間を限定して論ずる必要がある。人造湖ができた場合，そこに海陸風が生じることを予想した。その海陸風は昼と夜で吹く方向が変わるので（すなわち1日のサイクルなので），時間を1日と限定した。1日の時間スケールは，気象上の水平スケールでは，通常200 km×200 kmから2,000 km×2,000 kmの面積となるだろうと推論した。土地開発の場合，国境を越えるほど広い面積は現実的ではないので，ここでは仮説的に200 km×200 kmのスケールの面積を用いた。その面積（200 km×200 km）の中に人造湖（面積S km^{2}とする）が存在すれば，その人造湖の水面（S）からの蒸発をK（g/cm^2/日）とした場合，1日の人造湖の蒸発量は$S\times K$（10^{10} g/日）と計算できる。この水蒸気が面積200 km×200 kmの地域に均等に拡散したと仮定すれば，その気柱あたりの水分量H（g/cm^2/日）は，次の式で表される。すなわち，H（気柱あたりの水分量）は1日分の蒸発量$S\times K$（10^{10} g/日）を拡散仮定面積200×200（10^{10} cm^2）で除すと得られる。

$$H=S\times K/200\times 200 \qquad \text{式(1)}$$

次に，Hがどれほどの値であれば，その地域の生育可能な植物に，少なく

とも好い条件をあたえるかを検討した。砂漠では，通常，夜に温度が下がり石や岩石に結露し，場合によっては苔が生育する。もし，その地域に露天温度を1℃上昇させるような余分な水分が空気中に存在したとすれば，植物に「点滴灌漑」[注2)]の効果をあたえるだろう。そこで，その条件を検討してみた。空気が17℃の場合，その飽和水蒸気量は14.8 g/m^3, 18℃では15.4 g/m^3 である。その差は0.6（g）は14.8（g）（17℃の飽和水蒸気）の4.1％である。仮に，4.1％の水分が，17℃の飽和水蒸気（14.8 g/m^3）に加算されると，結露が起きるだろう。サハラの7月の平均最低温度は約17℃であるから，4.1％余分の水分増加で，結露が起きるだろう。ここでは，気柱あたりの水分量の4.1％増加させるような水面面積を算出しようと試みた。まず，7月の気柱あたりの水分量（2.0～2.4 g/cm^2）の4.1％を求めると，Hは0.082～0.098（g/cm^2）となった。このHを式(1)に代入した。

想定した人造湖からの蒸発量は，大西洋（サハラと同緯度）の海域のものを使用した。100～200 cm/年であるから，1日あたり0.27～0.55 cm/日と換算できる。これを単位面積cm^{2}当たりのg数に変え0.27～0.55 g/cm^2/日とした（K）。これらの値を，式(1)に代入すれば，未知数のS（水面面積）が計算できるだろう。式(1)を変形し，

$$S=200\times200\times H/K \qquad \text{式(2)}$$

とし，それぞれを代入した。

4. 算出結果および考察

式(2)を用いて，人造湖の水面面積（S）を求めると次のような結果が得られた。

①$K=0.27$の場合，

(1－1)　$H=0.082$　ならば，$S=12{,}148$（km^2）

(1－2)　$H=0.098$　ならば，$S=14{,}519$（km^2）

②$K=0.55$の場合，

(2－1)　$H=0.082$　ならば，$S=5{,}964$（km^2）

(2－2)　$H=0.098$　ならば，$S=7{,}127$（km^2）

7月は暑い時期であるから，当然，蒸発量は増すので，①より②の場合のほうが妥当であろう。このことから，Sは5,964～7,127（km^2）と予想した。なお，

本稿で用いた人造湖の蒸発量については，前述の西ドイツのバスラーにより算出した数値とほぼ同じ結果になる（前述のバスラーの湖水面積は12,000 km^2 であるから，本稿で用いた大西洋の年間蒸発量，1～2 m/年を用いて，年間蒸発量を求めると，12×10^9～24×10^9 m^3/年と計算できる。バスラーにより算出された年間蒸発量は19×10^9 m^3/年であった）。

計算結果を吟味するため，最初の前提にもどると，水面 S からの水蒸気は，200 km×200 km の範囲内に拡散したと仮定した。ところが，S が大きな値になると，当然，S からの水蒸気は200 km×200 km を越境することになる。では，この前提がなりたつための S の範囲は，どうなるか。海風は中緯度では，内陸に15～50 km 進入することが，経験的に知られている[8]。そこで，人造湖を水面 S の正方形と仮定する。この人造湖から海風が内陸に向かって50 km 進入するとして，200 km×200 km の境界から，50 km 手前までしか，水面を拡大できないことになる（それよりも大きな水面では，水蒸気が200 km×200 km の境界を超えてしまう）。それは，水面の一辺が100 km の正方形（面積100 km×100 km すなわち，10,000 km^2）よりも，小さい水面までしか，式が成立しないことになる（実際は，一般風や季節変動など多くの要素を加味し，もっと複雑になる）。また，前提では，地勢について何も述べていない。風(空気）と比較すると，水（水蒸気）は地勢の影響を受けやすい。すなわち，地形によっては，拡散仮定領域を200 km×200 km よりも狭く見積もることができる場合もあるだろう。さらに，ここで使用した蒸発量は大西洋上の 1 年分の蒸発量の 1/365（日割り計算したもの）である。7 月の暑い時期の蒸発量は上記の値を超えている可能性がある。さらに，この地域内において，前日，前々日の蒸発した水分は，全てがこの地域外へ移動してしまったと考えるより，幾分か残留していると考えるのが自然である。以上のことから，算出した S は多めの値の可能性があるといえそうだ。なお，気柱あたりの水分量の4.1％増加は地表面での4.1％水分増加と同じではない。しかし，気柱あたりの水分量の大部分が地表近くに存在するので，この S の算出方法は妥当であろう。

次に，人造湖の水面の評価（湖面からの蒸発量と水面面積の広さから砂漠開発上，有意義と考えられる）をこころみた。この評価は人造湖が多数ある場合，それらの水面は陸地にどれだけ恩恵を与えられるかという数値で比較することができるだろう。二宮らは豪雨の水収支の観察から下記のことを報告している[9]。夏の豪雨で，雨量50 mm に達する場合でも，気柱あたりの水分量で降

雨になりうる量は高々30 mm である。それゆえ，豪雨はその気柱の水分だけでは，供給不可能であり，周辺の空気中の水分の補給が必要であることを述べている。たとえば，270 mm/3 時間（降雨面積50 km×50 km）の豪雨はその場所（50 km×50 km）の気柱の水分だけでは，供給不可能であり，150 km×150 km の面積の空気中の水分の補給が必要であることを述べている。このことから筆者らは人造湖の水面面積，たとえば，150 km×150 km，が存在する場合，その 1/9 の面積（50 km×50 km）の水蒸気濃縮（気柱あたり水分量は 9 倍になる）の可能性を，その水面の砂漠開発上の「潜在的」力と評価した。「潜在的」とは実際にそこで水蒸気濃縮が起きるという意味ではないからである。これらの数値はあくまでも，計算上の数値であるが，人造湖がいくつかあり，それらの水面同士を比較する場合にこの評価が役立つであろう。

人造湖はどれほどの広さがあれば，海陸風などの気象的現象を発生させうるであろうか。Meyer のワロップ島での海陸風前線のレーダー観察では，海風は沖合い12～14 n mi[注3)]から陸に向かって吹いていた[10)]。それゆえ，筆者らは対岸まで12～14海里（22～26 km）の距離がある水面ならば，少なくとも海陸風などの気象的現象を発生させうる広さと考えた。そこで対岸まで22～26 km の距離のある水面（22 km×22 km から26 km×26 km の広さの人造湖）を想定してみた。その水面の 1/9 の面積の大きさ（7.3 km×7.3 km から8.9 km×8.9 km の底面積）の水蒸気濃縮が起きた場合，気柱あたり，おおよそ23.0～26.6 (g/cm^2) の水分量になりうる「潜在的」力を有する水面と評価できるだろう（人造湖の気柱あたりの水分量は，7 月のサハラの気柱あたりの水分量2.0～2.4 g/cm^2 に人造湖の蒸発量を加えた。蒸発時間は 1 日とし，K=0.55を加算すると2.55～2.95となる。これが 9 倍濃縮されるので，9 を掛けて算出した）。

5. 海水湖の将来

では，砂漠開発のために，陸地の内陸部に多量の海水を導入した場合を考えてみたい。簡単にするため，蒸発だけがあるものとして，話をすすめる。カッターラ低地に満杯に海水を注ぎこんだとしよう。蒸発した分を海から補いながら，砂漠開発にその人造湖が使われているものとする。そこの推定蒸発量は前述の気象のデータより，1～2 m/年であるから，35～70年経過で，その人造湖の塩濃度は 2 倍になると計算できる（カッターラ低地の平均深度は，海抜－70 m であるから，それを 1 年の蒸発量で除して計算した）。さらに35～70年

が経過すると，塩濃度は3倍に濃縮される。そして，おおよそ192～385年が経過した時には，そのカッターラ低地の人造湖は「死海」になっているだろう（死海は平均的な海水の6.5倍の塩濃度といわれているから）。では,このような死海の人造湖を造り出すような砂漠開発には，どんな意義があるのだろうか。

その前に，サハラ砂漠の過去を大まかに振り返ってみたい。サハラ砂漠の1万年前は草原や森林であり，数千年以前に古代国家がサハラ砂漠の中央付近に存在していたことを示す遺跡が発見されている[11)]。大サハラ[注4)]の岩面画は大サハラ美術と呼ばれ，膨大な量の先史岩面画があり，その絵には象，河馬，サイなど，水を多量に飲む多くの獣が描かれている[12)]。実際，象の遺骸も各地で見出されている。象は200 kg/日もの草を食すので，象の生息は大サハラに草木が繁茂していたことを実証するものである[12)]。また，花粉分析により，湿潤期のサハラにはイトスギ，スギ，トネリコ，カシ，クルミ，オリーブ，ハンノキが生えていたことがわかっている[12)]。紀元前2000年頃までは，サハラは緑であった。雨がよく降り緑の草原が広くひろがっていた。そこの住人達は牛や羊を放牧し，農耕もしており，ナイル川沿いのエジプト人におとらない収穫をあげていたようだ[13)]。しかしながら，紀元前2000年にちかづいた頃，気象に大きな変化が起きた。すなわち，定期的にあった雨期がだんだん短くなり，農耕ができなくなっていった[13)]。このあたりから，サハラ砂漠のはじまりである。すなわち，サハラは比較的，最近，砂漠になったのである。

我々は，ごく普通の生活しているつもりでも，その生活を維持してきたために，空気中の二酸化炭素濃度が高まったという。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第1部会の報告では，過去100年間に地球の平均気温は0.3～0.6度上昇し，それにともない，海水面は10～20 cm 上昇したと発表された[14)]。今後も，規制が全くとられない場合，空気中の二酸化炭素濃度の増加はさらに進み，10年間で温度は0.2～0.5度上昇し，海面も10年間で3～10 cm の上昇をすると発表した。そして，21世紀末までには約3度の温度上昇を予測している[14)]。しかし，二酸化炭素の増加はたしかに気温を高めるのだが，その他にも温度変化の可能な要因（自然の変化を含む）があり，海洋の熱に関する理解や気候のレスポンスの速さについては，良く分かっていない[15)]のが現状である。だからといって，なにもしないわけにはいかない。なぜなら，過去に大気中に排出された温室効果ガスに対する将来の気候のレスポンスは，排出が今日停止されたとしても必ず生じるからである[15)]。海面上昇の幅は2030年までは約20

cm, 21世紀末までは約65 cm に達すると予測されているが，海水位の変化は地球全体にわたるものと，局地的なものに分けられる[16]ことに注意すべきである。地球温暖化は前者であり，局地的な例としては，たとえば，海流にともなう海面の凹凸があり，太平洋，大西洋とも西岸の海水位は東岸より2 m も高い，すなわち，海流が変化すると海水位も変わるのである[16]。この上昇した海面に突発的な事柄，たとえば，高潮などがあると，今まで海水をかぶることなど予想さえしなかった地域にも，その可能性がでてくる。

上昇する海面と増加する二酸化炭素に対応するために，人造の死海を造ってでも，すなわち，陸地をすこし犠牲にしても，植物の光合成を多くして，二酸化炭素を固定することを考えてきた。熱帯，亜熱帯の乾燥地帯や砂漠に，現在よりも少し多めの水分が存在したら，植物の生育の可能性は少しだけ高まるであろう。すなわち，それは二酸化炭素の貯蔵庫になるだろう。今後の土地開発は二酸化炭素増加や海面上昇を念頭におき，海岸埋立の代わりにメガフロート[注5]のような浮遊体を利用した土地拡張など，思い切ったやり方を考えないと，砂漠化そして二酸化炭素増加や海面上昇などの過去の付けにより，破局に追い込まれるかもしれない。

6. おわりに

砂漠に人造湖を建設する構想にとって必要なことは，どれだけの水面の面積があれば有効かということである。そして，あと1つは，そこに巨大水面ができた場合の水面の評価（陸地にどれだけ恩恵を与えられるかという評価）である。これらの研究では，未知の要因が多い。本稿では，入手できる主な要因のみを取り上げ，理論を組み立てた。

サハラの昔の人々から今の我々まで，その生活自体が一因となって，今日のような砂漠のサハラになってきた部分がある。21世紀を目前に控え，我々は，人造の死海を造ってでも，それに対処していく必要があるだろう。

付記：本稿を執筆するにあたり佐藤俊朗氏の助言に深謝するしだいである。

参考文献

1） 山口秀甫，他；東京農大農学集報；30（3），189（1986）
2） 菊池良介，他；土木施工；34（11），40（1990）

3) J. K. Bannon, L. P. Steele, Average Water-vapor Content of the Air-geophysical Memoroirs 102, 6 (1960)
4) A. Baumgartner, E. Reichel, The World Water Balance, Map 2, Elsvier (1975)
5) J. F. Griffiths, K. H. Soliman, World Survey of Climatology 10, 90 (1972)
6) Her Majesty's Stationery Office, Table of Temperature, Relative Humidity, Precipitation and Sunshine for the World, London, 4, 47 (1983)
7) F. Laucher, Archiv f. Meteo., Geophysik und Bioklimat. Ser. B BAND Ⅱ, 435 (1951)
8) 中山　章：気象研究ノート；125, 1 (1975)
9) 二宮洸三，秋山孝子：気象研究ノート；138, 91 (1979)
10) J. H. Meyer, J. Appl. Meteor. 10, 1224 (1971)
11) 安田延尋：基礎大気科学；p. 31，朝倉書店 (1994)
12) 木村重信：世界の大遺跡 1 先史の世界；p. 98，講談社 (1987)
13) プランタジネット，S. フライ：パノラマ世界の歴史；p. 36，講談社 (1996)
14) 竹内敬二：地球温暖化の政治学；p. 36，朝日新聞社 (1998)
15) 地球温暖化影響研究会編：米国 EPA レポート抄訳，地球温暖化による社会影響；p. 29，技報堂出版 (1990)
16) 環境庁地球温暖化問題研究会：地球温暖化を防ぐ；p. 52，日本放送出版協会 (1990)

注 1) 気柱：地上から天空に延びている理論上の気体の柱のこと。本文に使われる気柱あたりの水分量，例えば，5 g/cm^2 とは底面積が 1 cm×1 cm の天空にのびた理論上の柱の内部に，水蒸気（霧や雲など全ての水分）は重さとして 5 g 存在するという意味である。なぜ，これを用いたかというと，気象現象での水分は複雑なので，少しでも簡単に処理するためにである。

注 2) 点滴灌漑：乾燥，半乾燥地域で少ない水資源を節約し，効率良く活用するための灌漑の方法である。栽培作物に水を「点滴」のように（チューブに穴をあけ，間欠的に）散水するシステムのことを言う。

注 3) nautical mile すなわち，海里，1,825 m。

注 4) 大サハラ：サハラ，リビア，スーダンの各砂漠とサヘル地帯の総称。

注 5) メガフロート：超大型浮体式海洋構造物のこと，例えば，鋼製浮体に舗装して滑走路として使用するなど。運輸省では2001年度以降の海上空港などへの実用化調査にはいる予定。

（山口，大田：東京農業大学応用生物科学部・アイソトープセンター講師）