



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

地中海掘削が なぜ必要か？

— 地中海掘削の歴史と今後の展望 —

黒田潤一郎

Introduction of the Mediterranean Drilling Project

Junichiro Kuroda

くろだじゅんいちろう：海洋研究開発機構
地球内部ダイナミクス領域

地中海の海底下には、厚い岩塩が眠っている。これは、中新世の末期メッシニアンに形成されたものである。地球史の中で最も若い巨大蒸発岩体 salt giant である。その規模は、 10^6 km^3 と見積もられている。この巨大な蒸発岩体は、どのように形成したのか？その成因を巡る論争を紹介し、それに決着をつけるために新たな掘削の必要性を説きたい。

1. メッシニアン塩分危機とは

読者の皆様は「地中海が孤立して蒸発した」という仮説を耳にされたことはあるだろうか？アペニン山地やシチリア島など地中海の周辺に蒸発岩類が露出することが古くから知られていた^[1]。その後のさまざまな研究により、地中海の蒸発岩の分布や年代が明らかとなり、中新世の末期に地中海が大西洋から孤立して地中海に広く蒸発岩が堆積するイベント「メッシニアン塩分危機 Messinian Salinity Crisis (MSC)」が提唱された^[2,3]。メッシニアン塩分危機は、現在に至るまで多くの研究者を魅了する第一級の問題であり続けている。

初めて地中海に科学掘削のメスが入ったのは1970年のことである。DSDP Leg 13で深海掘削船グロマーチャレンジャー号が地中海の深海盆の底に眠る石膏や岩塩の回収に成功し、地中海が深海まで干上がったというモデル (deep desiccated basin model) が誕生した^[3,4]。地中海海底下音響構造データの研究により深海盆の海底下深くに岩塩と思わしき音響ユニットが認められ、岩塩の存在はすでに予見されていた^[5]。科学掘削では、その岩塩ユニットを覆う蒸発岩層を回収することに成功したのである。

本論では、まず過去の深海掘削がメッシニアン塩分危機のモデル構築に果たした役割をレビューする。そのモデルを巡って勃発した論争を解説し、新たな深海掘削の必要性を説きたい。その上で、新たな掘削で開拓される新しいサイエンスの可能性について考えたい。

2. これまでの地中海掘削で得られたもの

地中海では、1970年以降、DSDPで3回、ODP

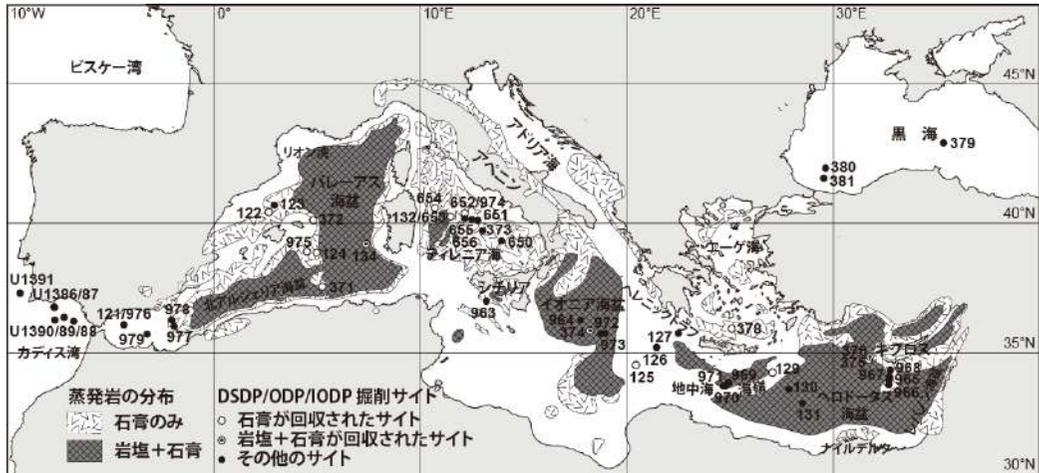


図1 地中海の蒸発岩(石膏や岩塩)の分布と過去のDSDP/ODP/IODP掘削地点^{[6][15]}.

で2回の掘削航海が展開された。このうち、西地中海、東地中海、ティレニア海で蒸発岩が回収されている^[6,7](図1)。1970年のDSDP Leg 13では合計15サイトで掘削が行われ、初めて地中海の海底から岩塩の回収に成功した^[3]。西地中海バレアレス海盆西縁のSite 134であった。1975年にLeg 42Aで再び地中海掘削が行われた。この航海では8サイトで掘削が行われた^[8]。特筆すべきは現在の水深4000mを超えるイオニア海の深海盆地から岩塩とカリウム塩が回収されたことである。ODPの時代になった1990年、Leg 107ではティレニア海の7サイトで掘削が行われた^[9]。1998年のLeg 160では東地中海の9地点で掘削が行われたが、この掘削の主目的は鮮新世～更新世堆積物の回収であったため、蒸発岩は回収されなかった^[10]。これに続くLeg 161ではティレニア海と西地中海の6サイトで掘削が行われた^[11]。合計4航海で16サイトからメッシニアン蒸発岩が回収され、そのうち3サイト(134, 374, 376)では岩塩が確認された。

西地中海、サイト122, 124, 134, 371, 372, 975の6地点で石膏やドロマイト質泥岩を主体とするメッシニアン蒸発岩が回収された(図1)。このうち、サイト124, 134, 371はそれぞれ深海盆地であるバレアレス海盆の西縁、東縁、南縁にあたり、サイト134からは岩塩が回収された(図2)。

ただし、その岩塩は音響探査から推測されるメインの岩塩ではなく、その上位の石膏を主体とする蒸発岩に含まれる岩塩と考えられる^[3]。メノルライズのサイト372では、石膏層の直下に不整合が存在し、その下位からは下部～中部中新統の遠洋性堆積物が回収された^[8](図2)。これらの遠洋性堆積物は、メッシニアン塩分危機よりずっと前からすでに西地中海が十分な水深のある海盆であったことを示す。

ティレニア海、サイト132, 652, 653, 654の4サイトでメッシニアン蒸発岩が回収された(図1)。いずれも石膏を主体とし、ドロマイト質泥岩や碎屑岩類を伴う(図2)。サイト654では、メッシニアン塩分危機が始まる直前の深海堆積物が初めて回収された^[9]。このことは、ティレニア海もまたメッシニアン塩分危機より前にはすでに深海盆が発達していたことを示している。

東地中海、サイト125, 129, 374, 375, 376, 378でメッシニアン蒸発岩が回収された^[4,8](図1)。東地中海のハイライトは、イオニア海の深海サイト374である。ここでは、現在の水深が4000mを超えるにも関わらず、コア最下部で岩塩が回収された(図2)。この地域では急激な沈降などはなく、中新世末期と現在でそれほど深度が変わっていない。それでは、メッシニアン塩分危機で東地中海の深海盆地にどのように岩塩がたまったのだ

ろう？ Hsü らは、このサイトで回収された岩塩が、干上がった深海盆モデルの根拠の一つと考えた^[8]。一方、キプロス島の東方沖にあたるフローレンスライズのサイト 375 と 376 でも蒸発岩が回収され、そのうちサイト 376 では岩塩が回収された(図 2)。しかし、これらの岩塩はいずれも音響構造に見られるメインの岩塩層ではなく、その上位の蒸発岩類に含まれる岩塩である。一方、浅海盆にあたるクレタ海盆のサイト 378 では初生的石膏(セレナイト)が回収された(図 2)。この浅海性セレナイトはイタリア・シチリア島やスペイン・ソルバス地域のセレナイトに酷似しており、似たような浅海堆積環境で晶出したと考えられる^[12]。

このように、過去の掘削航海では地中海の様々なセッティングでメッシニアン蒸発岩が回収された。これらの掘削試料は、干上がった深海盆モデルの強力な証拠とされた。次項では、このモデルと、それを巡る論争について触れよう。

3. メッシニアン塩分危機をめぐる論争

海水から蒸発岩が晶出する際、最初に微量の炭酸塩が析出し、次いで石膏が析出する。石膏が析出を始めるのは、塩水の体積が元の海水の 1/3 程度まで蒸発した時である。塩水の体積が 1/10 まで蒸発が進んだ時、岩塩の晶出が始まる。蒸発が進みきって塩水がほとんどなくなった段階でカリウム塩やマグネシウム塩(にがり)が析出する。海水からの蒸発で圧倒的に多いのは岩塩で、析出物の総量の約 80% を占める。地中海の蒸発岩の分布(図 1)は、この析出段階をよく反映しているように見える。岩塩の分布は地中海の沿海部にはなく、深海盆に限られる。この構造は雄牛の目(bull's eye)構造と呼ばれる^[3]。これは、蒸発の初期に沿海部から石膏が析出し始め、徐々に蒸発の進行とともに海水準が低下して沿海部は石膏形成場から陸上露出した浸食場へと変わり、一方の深海盆は岩塩を主体とする蒸発岩の堆積場となっていく様子を示しているように見える。

ここで、もう少し音響探査構造を詳しく紹介しよう。地中海海底下の音響構造には厚い岩塩層と

思われるダイアピル構造を示す特徴的な音響ユニット Mobile Unit が認められる。この Mobile Unit の下位に存在する Lower Unit と、Mobile Unit を覆う Upper Unit の 3 つの音響ユニットの組み合わせがメッシニアン塩分危機の一連の蒸発岩シーケンスと考えられている^[13]。Upper Unit と Lower Unit はいずれも縞状構造が発達しており、石膏とマールや泥岩の互層と解釈されている。Mobile Unit は深海盆底にしか存在せず、このユニットを浅海方向に辿ると薄くなり、やがて収束して浸食構造を示す反射面に繋がる。その浸食構造の反射面はおおよそ水深 1500 m の深度より浅い部分に認められる。これらの地球物理学的観測事実は、メッシニアン塩分危機で地中海の蒸発が進んで水深が 1500 m (あるいはそれ以上)低下し、深海盆に残されたブラインから厚い岩塩が晶出したことを示唆している^[13]。

過去の掘削で得られたコア試料は、「干上がった深海盆」モデルに物的証拠を与えた。DSDP/ODP で得られた以下の 4 つの地質学的観察結果が干上がった深海盆モデルの重要な拠り所になっている。

a. 岩塩はサイト 134, 374 など深海サイトからのみ回収された。

b. 浅海サイトの多くでは、メッシニアンの石膏の上下位に不整合が存在し(図 2)、その層準は浸食面と考えられる強い音響反射面に一致する(浸食の証拠)。

c. サイト 124, 374, 376 などで見つかった硬石膏(anhydrite)のチキンワイヤー組織やのジュールがサブカの潮間帯でできた硬石膏に酷似する^[3]。

d. サイト 134 の岩塩コアに陸上露出時に浸食によってできたと思われる鉛直クラックが認められた^[4]。

こういった証拠を基に、干上がった深海盆モデルでは、以下のようなシナリオが提唱された^[6,7]。まず約 6 Ma に地中海と大西洋の海水の交換が停滞し始める。降水量を蒸発量が上回る地中海では海水の蒸発が進み、海水準は 1500 m 以上低下した。海盆中央部に僅かに残った塩水から大量の塩が析出した。そのピークは 5.6 Ma 辺りであったと考えられている。塩分危機の終焉は、5.33 Ma

(中新世-鮮新世境界)とされる。ジブラルタル海峡が開き、大量の海水が大西洋から供給されて地中海は再び普通の海に戻る。このモデルは、その後の研究で次第に受け入れられるようになった。

この干上がった深海盆モデルに異を唱えたのがイタリアの陸上地質研究者達であった^[14,15]。彼らは、シチリアやアペニン山地のメッシニアン蒸発岩類を精査し、単純なモデルでは蒸発岩の発達を説明できないと主張している。特に、シチリア島やアペニン山地の深海相の蒸発岩の多くは浅海域で晶出した石膏(セテナイト)が再堆積した碎屑性石膏であることが重要である^[16]。この碎屑性石膏は、乱泥流やデブリ流からの堆積を示唆し、十分な水深がある海底に浅海から供給された再堆積性の石膏と解釈される。また、陸上セクションでは数少ないシチリアの岩塩層には、明瞭な陸化の痕跡は一層準にしか存在せず、それ以外の蒸発岩の大部分は、ある程度水深のある高塩水から晶出したもの(subaqueous halite cumulates)と解釈している^[17]。このシチリアの岩塩の陸上露出の証拠も、この地域の地殻変動が活発化したことによる隆起の影響が指摘されており、単純な地中海の海水準の低下では説明できない。

また、Manziらは干上がった深海盆モデルが拠り所とする上記の4つの証拠のうち、3と4については証拠不十分であると指摘した^[18]。硬石膏のチキンワイヤー組織は必ずしもサブカの根拠とはならず、石膏の埋没続成作用による再結晶でも同様の組織を呈す硬石膏が形成される。また、サイト134のクラックは、陸上浸食の証拠ではなく単にドリリングによってできた鉛直クラックである可能性が高いとした。彼らは蒸発岩の大部分が、十分な水深がある深海盆で蒸発岩が晶出したとするモデルを唱える^[15]。

4. 論争に決着をつける深海盆蒸発岩掘削への挑戦

これまでの研究で、メッシニアン塩分危機に関する理解は非常に進んだ。しかし、依然として本質的な問題「地中海が干上がったのか、干上がっ

ていないのか」が未解明のまま残っている。最初に干上がった深海盆モデルが提唱されてから40年が経過した^[3]。しかし、前項で触れたとおり、その後の研究でこのモデルの根拠とされた証拠に疑問の目が向けられつつある。しかし、その反証も必ずしも十分ではない。地中海は本当に干上がったのか?メッシニアン塩分危機はどのようにすれば解決するか?それは、とりもなおさず深海盆の掘削によってのみ解決される。過去の深海掘削はUpper Unitの最上部や、沿海部の不整合を伴う不連続な石膏層を回収したに過ぎず、メインの岩塩層であるMobile Unitや塩分危機の前半を記録するLower Unitは手つかずのままである。現在の深海盆でメッシニアンの蒸発岩を掘削することが必要不可欠である。これにより、

- a. 深海盆の岩塩に陸上露出の証拠があるか?地中海は本当に深海盆まで干上がったのか?
- b. これまで提唱されてきたシナリオと整合的か?全く異なるか?
- c. 深海盆で最初に蒸発岩が晶出するのはいつか?それは浅海域とずれるか、同時期か?
- d. 東地中海と西地中海のメッシニアン塩分危機は同時期か?
- e. グローバルな海水準変動との関連性はどうか?

といった問題を一挙に解決することができるだろう。特に、深海盆の岩塩に陸上露出の証拠が多く見つかるかどうかで、長年に渡る論争に終止符が打たれる。岩塩に陸上露出を示す鉛直クラックや古土壌が普遍的に認められれば、地中海はやはり深海盆まで干上がったと言えるだろう。逆に、十分に水深がある海底で上方に結晶成長する岩塩が累々と堆積していれば、十分な水深がある環境で岩塩晶出が進んだ。つまり深海盆が干上がる必要はないという結論になる(現在の死海の湖底のような環境)。では、どこで掘削するのが望ましいか?現在、掘削候補地点の選定が進められている。候補として挙げられているのは、フランス沖のLion湾、バレアレス海盆、東地中海のヘロドータス海盆やレバノン海盆などである。しかし、いずれの候補地も掘削に必要な条件(科学的・技術

的条件)を満たしているわけではなく、今後さらなる地点選考が必要となるだろう。掘削が実現したあかつきには、試料の詳細な年代決定と環境復元により、これまでのシナリオのいずれが正しいか、全てが根本的に間違っていたか、評価することができるだろう。

5. さらなる地中海掘削の魅力

地中海の掘削は、メッシニアン塩分危機の成因に決着をつけるだけにとどまらない、多くのインプリケーションを得られることが期待される。特に、蒸発岩に関連した微生物学的研究や、地中海周辺のテクトニクスやリフティングに伴う海盆発達史と蒸発岩の形成プロセスとの関連は、これからの重要な研究テーマとなっていくだろう。

筆者が興味を持つもう一つのポイントは、中東など周辺地域との関連である。紅海では DSDP Leg 23 で中新世末期の厚い岩塩が回収されており、メッシニアン塩分危機に関連した岩塩形成が紅海でも起こっていたことを示す^[19]。また、現在の死海は塩分が海水の10倍に達する塩湖で、湖底では岩塩が成長している。この死海はかつて東地中海と繋がっていたが、新第三紀のある時点で海水の交換が途絶えたとされている。このタイミングがメッシニアン塩分危機であるという可能性がある。このように、メッシニアン塩分危機は、地中海のみならず、死海や紅海といった中東周辺の発達史にも大きく関わっているようだ。

また、大西洋と地中海のゲートウェイ問題も大きな課題である。現在のジブラルタル海峡では、塩分の低い大西洋の海水が表層から流入し、塩分の高い地中海中層水が海峡深部から大西洋に流出している。この地中海流出水はその後ヨーロッパ西岸の大陸縁に沿って北上し、やがて北大西洋深層水に合流してグローバル海洋循環に取り込まれてゆく。この地中海流出水 (Mediterranean Outflow Water) は、いつ頃から発達し、グローバル気候変動にどのように寄与してきたのか? IODP Exp. 339 では地中海流出水の出口にあたるカディス湾で地中海流出水の底層流によって形成される堆積

体の砂や泥(コンターライト)を回収した^[20](図1)。その発達史の解明が進められていて、今後の研究成果が期待される。

6. おわりに

本論では、メッシニアン塩分危機に焦点を当てて、地中海掘削の必要性を上げた。地球史を通してしばしば形成されてきた巨大蒸発岩体 Salt Giant、その最も若い岩体をターゲットとし、最新の掘削科学のメスを入れることで、Salt Giant 形成メカニズムの理解は一挙に進むだろう。岩塩は透水性が悪いため、しばしば重要な炭化水素リザーバーのキャップロックになる。したがって、これまでのノンライザー掘削では安全上の問題から掘削が難しかった。掘削船「ちきゅう」で用いられるライザー掘削は、このような岩石を掘削回収できる唯一の方法である。ちきゅうを用いた地中海の深海掘削で、これまでの論争に決着をつけることができると期待する。欧州で40年もの間、決着がつかずに燻っている第一級の科学的問題を日本の掘削船が解決する。何とも痛快な計画ではないだろうか。

参考文献

- [1] Ogniben, L. (1957) Petrografia della Serie Solifera Siciliana e considerazioni geologiche relative. Mem. Descrit. Carta Geol. It., 33, 275.
- [2] Ruggieri, G. (1967) The Miocene and later evolution of the Mediterranean Sea. In: Aspects of Tethyan Biogeography (Eds C. G. Adams and A. V. Ager), Vol. 7, pp. 283-290. Systematics Association Publ., London.
- [3] Hsü, K. J., Ryan, W. B. F. and Cita, M. B. (1973) Late Miocene desiccation of the Mediterranean. Nature, 242, 240-244.
- [4] Ryan, W. B. F., Hsü, K. J., Cita, M. B., Dumitrica, P., Lort, P., Maync, W., Nesteroff, W. D., Pautot, P., Stradner, H. and Wezel, F. C. (1973) Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project (Eds. W. B. F. Ryan and K.J. Hsü), Vol. 13, pp.1447. U. S. Government Printing Office, Washington, DC.
- [5] Hersey, J. B. (1965) Sedimentary basins of the Mediterranean Sea, in Submarine Geology and Geophysics: Proc. 17th Symposium Colston Res. Soc. April 5-9, 1965 (Eds. W. F. Whittard and R. Bradshaw), pp. 75-91. Butterworths. London.
- [6] Rouchy, J. M. and Caruso, A. (2006) The Messinian salinity crisis in the Mediterranean basin: A reassessment of the data and an integrated scenario. Sed. Geol., 188-189, 35-67.

- [7] CIESM, 2008, The Messinian Salinity Crisis mega-deposits to microbiology - a consensus report : Monaco, CIESM Workshop, Monograph, v. 33, p. 73-82.
- [8] Hsü, K., Montadert, L. *et al.*, 1978. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 42, Part 1 : Washington (U. S. Government Printing Office).
- [9] Kastens, K. A., Mascle, J., Auroux, C., *et al.*, 1987. Proc. Init. Repts. (Pt. A), ODP, 107.
- [10] Emeis, K. -C., Robertson, A. H. F., Richter, C., *et al.*, 1996. Proc. ODP, Init. Repts., 160 : College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- [11] Comas, M. C., Zahn, R., Klaus, A., *et al.*, 1996. Proc. ODP, Init. Repts., 161 : College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- [12] Garrison, R. E., Schreiber, B. C., Bernoulli, D., Fabricius, F. H., Kidd, R. B., and Mélières, F., 1978. Sedimentary Petrology and Structures of Messinian Evaporitic Sediments in the Mediterranean Sea, Leg 42A, Deep Sea Drilling Project. In Hsü, K. J., Montadert, L., *et al.*, 1978. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Volume 42, Part 1 : Washington (U. S. Government Printing Office), pp.571-611.
- [13] Lofi, J., Gorini, C., Berne, S., Clauzon, G., Dos Reis, A.T., Ryan, W. B. F. and Steckler, M. S. (2005) Erosional processes and paleo-environmental changes in the western Gulf of Lions (SW France) during the Messinian Salinity Crisis. *Mar. Geol.*, 217, 1-30.
- [14] Manzi, V., Lugli, S., Ricci Lucchi, F. and Roveri, M., 2005. Deep-water clastic evaporites deposition in the Messinian Adriatic foredeep (northern Apennines, Italy): did the Mediterranean ever dry out? *Sedimentology*, 52, 875-902.
- [15] Manzi, V., Gennari, R., Lugli, S., Roveri, M., Scafetta, N., and Schreiber, B. C., 2012, High-frequency cyclicality in the Mediterranean Messinian evaporites: evidence for solar-lunar climate forcing. *J. Sed. Res.*, 82, 991-1005.
- [16] Lugli, S., Manzi, V., Roveri, M., and Schreiber, B.C., 2010, The Primary Lower Gypsum in the Mediterranean: a new facies interpretation for the first stage of the Messinian salinity crisis: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297, 83-99.
- [17] Lugli, S., Schreiber, B. C., and Triberti, B., 1999, Giant polygons in the Realmonte mine (Agrigento, Sicily): evidence for the desiccation of a Messinian halite basin: *Journal of Sedimentary Research*, 69, 764-771.
- [18] Manzi, V., Gennari, R., Lugli, S., Roveri, M., and Schreiber, B.C., 2013, Review of DSDP/ODP findings. In DREAM Workshop, Brisighella, Italy, May 2013.
- [19] Ross, D. A., Whitmarsh, R. B., Ali, S. A., Boudreaux, J. E., Coleman, R., Fleisher, R. L., Girdler, R., Manheim, F., Matter, A., Nigrini, C., Stoffers, P. and Supko, P. R. (1973) Red Sea Drillings. *Science*, 179, 377-380.
- [20] Stow, D. A. V., Hernández-Molina, F. J., Alvarez Zarikian, C. A., and the Expedition 339 Scientists, 2012, Proc. IODP, 339. IODP-MI Inc., U. S. Implementing Organization Science Services, Texas A&M University.

