アブダビ海域, 上部ジュラ系 Arab・Hith 層中にみられる 海水準変動と堆積システムの変遷

石橋 正敏*

Sea level changes and depositional systems in the Upper Jurassic Arab-Hith Formations, offshore Abu Dhabi, UAE.

Masatoshi Ishibashi *

The arid, shallow marine, carbonate/evaporite succession of the Arab-Hith Formations (Upper Jurassic) is the reservoir interval for the GA Field, offshore Abu Dhabi, UAE. It consists of multiple sequences bounded by second-fourth order marine flooding surfaces, which are powerful tools for detailed regional stratigraphic correlation. Using these key bounding surfaces, the chronostratigraphic framework between the GA Field and WMB-1 well, which is located 50km westward of the field, can be constructed to describe the facies changes within this sedimentary package.

The second order transgressive systems tract (TST) is composed of an aggradational/retrogradational parasequence set that was deposited in a barrier shoal-sabkha complex. The highstand system tract (HST) comprises a thickening upward parasequence set that is characterized by a sabkha depositional system.

The evolution of flood tidal delta deposits of Upper Jurassic age in this region is controlled by the second and third order sea level changes. The flood tidal delta deposits were well-developed in the second order TST deposits, especially at the third order highstand sea level phase. However, the flood tidal delta deposits are not found in the second order HST deposits. This can be interpreted by the fact that accommodation space in the lagoon had already been filled by the prograding sabkha deposits in the second order highstand phase.

はじめに

上部ジュラ系の Arab・Hith 層の炭酸塩岩は、大小様々な油・ガス田が散在するアラビア湾南部の貯留層のひとつである (Fig. 1)。石橋 (1994) は、その Arab・Hith 層中にみられる堆積サイクルの特徴を、アラブ首長国連邦の首都アブダビ市の西方海上約 100km に位置する Neewat Al Ghalan (以後 GA と略す) 油田 (ムバラス石油株式会社が操業: Fig. 2) において明らかにした。しかし、ジュラ紀

の広大な陸海 (epicontinental sea) に堆積した Arab・Hith 層は、一つ一つの堆積システムの規模が大きく、一油田からだけのデータでは堆積盆の堆積システムの変遷を知ることは難しい。堆積システムの消長が一油田の貯留岩性状に影響を与えていることがあり、油・ガス田の貯留岩性状を評価する際には、堆積盆中の堆積環境の側方変化を把握することも必要である。本地域周辺ではコンデンスセクション (condensed section) が、電気検層記録で比較的容易に認定できるほか、堆積サイクルの境界となる海成氾濫面 (marine flooding surface) が、アブダビ沖合のジュラ系のような構造的に安定した場所では特に対比の手段として有効である。そこで今回は、GA 油田の西方約 50km の地点に掘削された坑井 WMB-1 (ムバラス石油株式会社が権益を保有:

受付: 1997年 2月13日 受理: 1997年 4月16日

* ジャパンエナジー石油開発株式会社 探鉱部

Exploration Department, Japan Energy Development Co., Ltd.

連絡先: 千葉県千葉市美浜区浜田1-2-2

石油公団石油開発技術センター地質・地化学研究室

Fig. 1 Stratigraphy of the WMB-1 well.

Fig. 2) のコア (Fig. 3) で海成氾濫面を認定し、それを GA 油田のものと対比することによって、同一時間内における両者の堆積相の変化を記載した。

なお、Arb 層の油層区分は、各操業会社によって異なるが、本論は石橋 (1994) で報告した堆積相の側方変化を調べるのが目的であるため、石橋 (1994) と同じ Arab 層の油層区分を使用する。

地質概説

Arab 層は、炭酸塩岩と硬石膏の互層から構成されている地層で、下位の瀝青質細粒石灰岩の Diya b 層とは整合の関係、上位の硬石膏からなる Hith 層とは整合及び一部同時異相の関係にある (Schlumberger, 1981 ; 鈴木・大沢, 1987 ; Alsharhan, 1989 ; ほか)。本報告の対象となる GA 油田及び WMB-1 のコアの Arab 層からは、陸側から (1) サブカ (sabkha), (2) 潮汐低地, (3) ラグーン, (4) 潮汐三角州, (5) バリアーショール (barrier shoal), (6) 外浜, (7) 沖合の 7 つの堆積相が認められる。概して西方には陸に近い堆積相が卓越し、東方に向かうにつれ沖合の堆積相に変化する。それらの堆積相の概説を Table 1 に。代表的なコアの写真を Fig. 4 と 5 に掲げる。

GA 油田における堆積相と積み重なりパターン

石橋 (1994) では、GA 油田の Arab・Hith 層において第 2 オーダーから第 4 オーダーまでの堆積サイクルの階層性を明らかにしている。第 2 オーダーの堆積サイクル (Arab・Hith 層中の堆積シーケンス全体に相当する) では、上方浅海化を示す 8 つの第 3 オーダーのパラシーケンス (parasequence : 図中ではスペースの関係上 PS と略すときもある) から構成されており、細粒堆積物が卓越するコンデンスセクション (PS 4) を境にして 2 つのパラシーケンスセット (海進期堆積体 (transgressive systems tract) と高海面期堆積体 (highstand systems tract) に分けられる (Fig. 6)。

第 2 オーダーの海進期堆積体では、バリアーショール堆積物からラグーン～サブカ堆積物に至る上方浅海化の第 3 オーダーのパラシーケンスが、上方薄層化のパターンで積み重なっている。一方、第 2 オーダーの高海面期堆積体では、ラグーン堆積物からサブカ堆積物に至る上方浅海化の第 3 オーダーのパラシーケンスが、上方厚層化のパターンで積み重なっている。各々の第 3 オーダーのパラシー

Fig. 2 Locality map. ADOC : Abu Dhabi Oil Co., Ltd., MOCO : Mubarratz Oil Co., Ltd.

ケンスの中には第4オーダーの海水準サイクルの痕跡も認められる。

WMB-1の第2オーダーの各堆積体の特徴とGA油田との比較

WMB-1のArab層中でも、第2オーダーから第4オーダーの堆積サイクルの階層性がみられる。本論では、説明の便宜上、第3オーダーの堆積サイクルを“パラシーケンス”，第4オーダーの堆積サイクルを単に“サイクル”と呼ぶことにする。

1. 第2オーダーの海進期堆積体

1-1. WMB-1の第2オーダーの海進期堆積体の特徴

WMB-1における第2オーダーの海進期堆積体を構成する3つのパラシーケンスでは、ラグーン堆積物からサブカ堆積物に至る上方浅海化サイクルが認められる (Fig. 7)。対比の鍵となる海成氾濫面は、堆積物の色・堆積相・境界面の特など徴からコア中で容易に認識できる。代表的な例を Fig. 4 に示す。一般に炭酸塩岩のラグーン堆積物では、水深が浅く

なるにつれ酸化作用により堆積物が茶褐色になることが知られている (Shinn, 1983)。WMB-1の第2オーダーの海進期堆積中にみられる上方浅海化サイクルも海進ラグ (transgressive lag) を伴う侵食面を境にして突然色が変わっていることと同時に、堆積相も深い水深のものへと変化しているので、この境界が海成氾濫面であることは明白である。

WMB-1における第2オーダーの海進期堆積体を構成する各パラシーケンス内にもGA油田と同様、第4オーダーの海水準変動のサイクルが認められる (Fig. 8)。パラシーケンスの層厚が厚いので小さなサイクルもはっきり確認できるパラシーケンス1を例にとってみると、第3オーダーの海進時の堆積物はラグーン内の潮下帯の静穏な環境下で堆積したマッドストーン (mudstone)、その上に重なる第3オーダーの高海面期の堆積物は潮汐三角州堆積物のグレイントストーン (grainstone) のサブカ堆積物の硬石膏で構成されている。第3オーダーの高海面期には、4回の第4オーダーの上方浅海化サイクルが認められ、各々のサイクルは、上位になるにつれより陸側の堆積相の占める割合が多くなるとい

CORED INTERVALS

Formation	GA Field			WMB-1	Boundary	Shallowing Upward Cycle	
	GA-1	GA-2	GA-3			3rd order	2nd order
Yamama Form.					SB 1		
Hith F.					PSB 7	PS 8	Highstand Systems Tract
Arab A					PSB 6	PS 7	
Arab B					PSB 5	PS 6	
Arab C					PSB 4	PS 5	
Arab D					PSB 3	PS 4	Transgressive S. T.
					PSB 2	PS 3	
					PSB 1	PS 2	
					SB 0	PS 1	

(no scale)

Fig. 3 Cored intervals in the GA Field and the WMB-1 well.

う特徴をもつ。

1-2. GA 油田との比較

GA 油田でも WMB-1でも第2オーダーの海進期堆積体内にみられるパラシーケンスの積み重なりパ

ターンは、上方浅層化を示すが、パラシーケンスを構成している堆積相は第3オーダーの海水準変動のステージによって異なる。

パラシーケンス内の第3オーダーの海進時について比較してみると、GA 油田ではバリエーション堆積物（石橋，1994）が、WMB-1ではラグーン内の潮下帯の静穏な環境下で細粒な堆積物が堆積している（Fig. 8）。ラグーン側に位置する WMB-1及び周辺坑井データからは潮汐三角州堆積物があまりみられないので、海進時にはラグーン側の潮汐三角州堆積システムはそれほど活動的ではなかったと考えられる。

一方、第3オーダーの高海面期の堆積物中には、GA 油田・WMB-1とも第4オーダーの海水準変動に支配されたラグーン～サブカ堆積物が繰り返しみられるが、WMB-1のラグーン堆積物は厚い潮汐三角州堆積物を狭在していることがGA 油田と異なった特徴となっている。

2. 第2オーダーの高海面期堆積体

2-1. WMB-1の第2オーダーの高海面期堆積体の特徴

残念ながら WMB-1では、第2オーダーの高海面期堆積体を構成している一つのパラシーケンス全体を貫いてコアを採取していない（Fig. 3）。そのため、WMB-1における第2オーダーの高海面期のパラシーケンスの特徴は、WMB-1の第4オーダーのサイクルの堆積相及びGA 油田の堆積相からの類推によってパラシーケンス全体を推定しなければならない。WMB-1のコアにみられる高海面期堆積体の堆積サイクルは、GA 油田と同じく、潮汐チャンネルに始まるラグーン堆積物からサブカ堆積物に至る第4オーダーの上方浅海化サイクルを示す（Fig. 9）。従って、WMB-1の第2オーダーの高海面期堆積体を構成するパラシーケンスもGA 油田と同様、潮汐チャンネル堆積物からサブカ堆積物に至る第4オーダーの上方浅海化サイクルの積み重なりから構成されているものと考えられる。サイクルの境界はサブカ堆積物を侵食して覆う潮汐チャンネル堆積物の基底面で、コア中で容易に海成氾濫面と認定できる。WMB-1でコアを採取した区間では、第4オーダーの上方浅海化サイクルの上方厚層化パターンは、GA 油田のように明確ではない。

2-2. GA 油田との比較

GA 油田・WMB-1ともに潮汐チャンネル堆積物か

TST

Fig. 4 Representative sedimentary facies of transgressive systems tract (TST) in the WMB-1 well.

MFS : marine flooding surface. **A**) Parasequence boundary (indicated by arrow. PSB = MFS). Dark gray subtidal mudstone with transgressive lags overlies on sabkha anhydrites (10,608.1-10,608.6 ft). **B**) Cross laminated grain/packstone with tidal couplets (10,680.3-10,680.8 ft). **C**) Sequence boundary (indicated by arrow. SB = MFS). White mud/ boundstone deposited on tidal flat is overlain by dark gray subtidal mudstone with subtle erosional surface and transgressive lags (10,710.1-10,710.7 ft). Each core slab is 4 inches (10 centimeters) in width. See Fig. 7 for legend of stratigraphic column.

HST

WMB-1

Fig. 5 Representative sedimentary facies of highstand systems tract (HST) in the WMB-1 well

MFS : marine flooding surface. BSB : bedset boundary. A) Bedset boundary (indicated by arrow. BSB = MFS). Low-angle laminated grain/packstone of tidal channel deposits overlies on sbkha anhydrites (10,399.4.-10,340.2 ft). B) Algal boundstone of intertidal deposits (10,430.2-10,430.7 ft). Each core slab is 4 inches (10 centimeters) in width. See Fig. 7 for legend of stratigraphic column.

Table 1 Brief description of facies association found in the cores from the GA Field and WMB-1 well.

Facies Association	Description
Offshore	Massive, light gray-olive gray mud/wackestone with medium-grained peloids & bioclasts. Well-developed bioturbation. Occasionally intercalate horizontally laminated very fine-medium grained pack/grainstone beds.
Nearshore	Gray, low angle laminated, very fine-fine grained pelloidal grain/packstone. Occasionally mottled.
Barrier Shoal	Gray-olive gray, low angle laminated fine-small pebble sized pelloidal, locally bioclastic grainstone. Coarsening upward cycle. Rarely bioturbated.
Lagoon	Dark gray-black, massive-faint laminated mudstone rarely interbedded with thin very fine-medium grained wacke/packstone. Burrowing.
Tidal Delta	Low angle laminated fine-small pebble sized pelloidal, locally bioclastic grainstone with tidal bundle structure.
Tidal Flat Lower Upper	Alternation of mudstone and very fine-fine grained wacke/packstone with wave-ripple, current-ripple and fraser beddings. Burrowing. Occasionally upward-finening, laminated, fine-coarse grained pack/grainstones appear at the base. Tan, brown enterolithic mud/boundstone. Algal mats flourish at the upper part. Vertical burrows are common and increasing with depth. Desiccation cracks and fenestral structure are dominant.
Sabkha	Chicken-wire and enterolithic anhydrite. Occasionally interbedded dolomite layer. Poorly sorted grain/packstone and mottled brecciated mud/wackestone rarely preserved at the upper part.

らサブカ堆積物に至る上方浅海化のサイクルを示すが、WMB-1の方がサブカ堆積物の硬石膏が厚くなっている (Fig. 9)。

この状況は、現在高海面期にある (Kassler, 1973) アブダビ市周辺の地形と堆積物の分布から理解できる。アブダビ市はバリアーショール上に建設された都市で、アラビア半島とはラグーンで隔てられている。ラグーン内は堆積物による埋積がすすんでおり、陸地化しているところが多い (Purser and Evans, 1973; Evans, et al., 1973; ほか)。サブカはアラビア半島側に良く発達していて、その上を主流の潮汐チャネルからのびた小さな支流が刻んでいる (Butler, 1973; ほか)。現世の堆積物の分布と比較してみると、WMB-1の方がGA油田より陸側で堆積したと推定される。これは、広域的な地質からみて西側がより陸よりの堆積相を示すこと (Schlumberger, 1981; 鈴木・大沢, 1987; Alsharhan, 1989; ほか) と調和的である。また、Arab・Hith層中の高海面期堆積体のラグーン堆積物中に潮汐三角州を示す堆積相が見つからないのは、現在のアブダビ同様ラグーン内は堆積物によっ

て埋積されてしまったため、潮汐三角州システムを発達させるのに十分な堆積空間 (accommodation space) がなかったからなのであろう。

ま と め

Arab・Hith層で認められるコンデンスセクション及び海成氾濫面を対比することによって、同一時間内におけるGA油田及びその西方約50kmに位置するWMB-1の堆積相の違いを調べた。その結果、以下のようなことが明らかになった (Table 2)。

第2オーダーの海進期堆積体

各々次のような上方浅海化を示す第3オーダーのパラシーケンスから構成されている。

GA油田：バリアーショール堆積物→ラグーン堆積物→サブカ堆積物。

WMB-1：ラグーン堆積物→(潮汐三角州堆積物)→サブカ堆積物。

第3オーダーのパラシーケンス内に認められる海進期には、GA油田では粗粒なバリアーショール堆積物が、WMB-1では細粒なラグーン堆積物が発達している。一方、高海面期には、両者ともラグーン・

Fig. 6 Stacking pattern of the Arab and Hith Formations in the GA Field.

The second-order depositional sequence from the Arab D Upper to the Hith Formation is divided into two systems tracts at a condensed section (top of Arab C). Transgressive systems tract (Arab D Upper and C) is mainly composed of alternation of thick grainstone and mudstone which were deposited in barrier shoal to sabkha environments and shows thinning upward cycle. Highstand systems tract (Arab A, B and Hith Formation) is mainly composed of anhydrite and dolomite which were deposited in lagoon to sabkha environments and shows thickening upward cycle. Note that the ADOC zonation system is used in this paper. See Fig. 7 for legend.

サブカ堆積物から構成されているが、WMB-1の方に厚い潮汐三角州堆積物が狭在されることが両者の相違点である。

第2オーダーの高海面期堆積体

両者とも、潮汐チャネル堆積物で始まりサブカ堆積物で終わる上方浅海化サイクルから構成されているが、海進期堆積体のように潮汐三角州堆積物はみられない。両者の相違としては、WMB-1の方がサブカ堆積物中の硬石膏層の層厚が厚いことが挙げられる。

以上のことから、ジュラ紀のアブダビ周辺における潮汐三角州システムの発達状況がうかがえる。この時代、ラグーン側の潮汐三角州堆積物は海進期に発達し、高海面期には発達が悪い。高海面期に潮汐三角州堆積物の発達が悪い原因として、現在のアブダビ周辺のように碎屑物による堆積空間の埋積が考えられる。また、潮汐三角州システムは、海進期のなかでも、特に一段高次の海水準変動の高海面期に活動が活発化していると考えられる。

謝 辞

本論文および資料の公表を許可された Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), アブダビ石油株式会社, 石油公団, ジャパンエナジー石油開発株式会社に対して心より謝意を表する。本研究を進めるにあたって、ADNOCの地質部門のスタッフおよびアブダビ石油株アブダビ鉱業所開発部の皆様には有意義な討論をいただいた。石油公団石油開発技術センターの Ben McNeil 博士には英文を添削して頂いた。また、本研究には、石油公団石油開発技術センターの大型研究『貯留岩形成過程解析技術』及び『炭酸塩岩油層モデル構築技術』の研究費の一部を使用した。記して深く感謝の意を表する。

文 献

- Alsharhan, A. S., 1989 : Petroleum geology of United Arab Emirates. *Jour. Petrol. Geol.*, 12, 253-288.
- Butler, G. P., 1973 : Strontium geochemistry of modern and ancient calcium sulphate minerals. In Purser, B. H. ed., *The Persian Gulf. Holocene Carbonate Sedimentation and Diagenesis in a Shallow Epicontinental Sea.* 423-452, Springer-Verlag.
- Evans, G., Murray, J. W., Bigge, H. E. J., Bate, R., and Bush, P. R., 1973 : The oceanography, ecology,

Fig. 7 Stacking pattern of the second-order TST.

Each parasequence boundary recognized in the GA Field can be traceable to the WMB-1 well. 3rd order parasequences in the second-order TST of the WMB-1 well also show shallowing upward cycles.

LEGEND

Boundary	Lithology	Visual Structure	Grain Size	Visual Structure
				Anhydrite
				Boundstone/Mudstone
				Mudstone/Wackestone
				Grainstone/Packstone
				gradational
				sharp
				erosional
				stylolite
				Anhydrite
				Dolomite
				Limestone

Sedimentary Structure

algal lamination	lamination
anhydrite nodules	tidal bundle
burrows	current ripple lamination
mottling (bioturbation)	wave ripple lamination
compaction seams	peloids
desiccation cracks	intraclasts

S : sabkha
 TF : tidal flat
 L : lagoon
 TD : tidal delta
 BS : barrier shoal
 NS : nearshore
 OS : offshore
 S B : sequence boundary
 PSB : parasequence boundary
 P S : parasequence
 HST : highstand systems tract
 C S : condensed section

Fig. 8 Stratigraphic section of Parasequence 1 in the second-order TST at the WMB-1 and GA-2 wells.

Small transgressive/regressive cycle, corresponding to third and fourth-order sea level change, can be recognized in Parasequence 1. During the third-order transgressive phase, a thick grainstone of barrier shoal deposits developed around the GA Field. A number of thick grainstone layers interpreted as tidal delta deposits, in turn, are interbedded in the third-order highstand unit of the WMB-1 well. See Fig. 7 for legend.

Fig. 9 Stratigraphic section in the second-order HST at the WMB-1 and GA-3 wells.
All bedsets show fourth-order shallowing upward cycles (mainly tidal channel deposits) to sabkha anhydrites. See Fig. 7 for legend.

Table 2 Characteristics of the depositional systems tracts at the GA Field and WMB-1 well.

	TST	HST
GA Field	barrier shoal to tidal flat/sabkha (barrier shoal deposits developed in 3rd order transgressive phase)	lagoon to sabkha
WMB-1	lagoon to sabkha (tidal delta deposits developed in 3rd order highstand phase)	sabkha with tidal channel

sedimentology and geomorphology of parts of the Trucial Coast barrier island complex, Persian Gulf. In Purser, B. H. ed., *The Persian Gulf. Holocene Carbonate Sedimentation and Diagenesis in a Shallow Epicontinental Sea*. 223-278, Springer-Verlag.

石橋正敏, 1994 : アブダビ海域 Neewat Al Ghalan (GA) 構造における Arab・Hith 層中の HST と TST-GA 構造における堆積サイクルと積み重なりパターン, 石油技協誌, 59, 99-108.

Kassler, P., 1973 : The structural and geomorphic evolution of the Persian Gulf. In Purser, B. H. ed., *The Persian Gulf. Holocene Carbonate Sedimentation and Diagenesis in a Shallow Epicontinental Sea*. 11-32, Springer-Verlag.

Purser, B. H. and Evans, G., 1973 : Regional

sedimentation along the Trucial Coast, SE Persian Gulf. In Purser, B. H. ed., *The Persian Gulf. Holocene Carbonate Sedimentation and Diagenesis in a Shallow Epicontinental Sea*. 211-232, Springer-Verlag.

Schlumberger, 1981 : Well Evaluation Conference 1981, UAE and Qatar. 4-16, Schlumberger Middle East, S. A.

Shinn, E. U., 1983 : Tidal flat environment. In Scholle, P. M., Bebout, D. G., and Moore, C. H., eds., *Carbonate Depositional Environments*. AAPG Memoir 33, 171-210, AAPG.

鈴木正義・大沢正博, 1987 : アブダビ海域における Arab 層の堆積相について. 石油技協誌, 52, 124-133.

アブダビ海域，上部ジュラ系 Arab・Hith 層中にみられる 海水準変動と堆積システムの変遷

石橋 正敏，1997，堆積学研究，No. 45，45－57

Ishibashi, M., 1997 : Sea level changes and depositional systems in the Upper Jurassic Arab-Hith Formations, offshore Abu Dhabi, UAE, *Jour. Sed. Soc. Japan*, No. 45, 45－57

アラビア湾南部地域の貯留層のひとつ，上部ジュラ系の Arab・Hith 層中にみられる海成氾濫面を結ぶことによって，アラダビ沖合の Neewat Al Ghalan (GA)油田と坑井 WMB-1の間，約50km の時間的・空間的枠組みを構築した．そこには，第2～4オーダーの海水準変動に支配された沖合からサブカに至る堆積物が認められる．第2オーダーの海進期堆積体はバリエーションール～サブカ堆積システムの複合体から，第2オーダーの高海面期は前進するサブカ堆積体から構成されている．本堆積体の特徴は，第2オーダーの海進期堆積体，そのなかでも特に第3オーダーの高海面期に厚い潮汐三角州堆積物が狭在することである．第2オーダーの高海面期にラグーン側の潮汐三角州の発達が悪いのは，サブカ堆積物の前進によって堆積空間が埋積されてしまったためと考えられる．