

# 化石密集層の形成様式と堆積シーケンス —化石密集層は堆積シーケンス内でどのように分布するのか—

Shell concentrations and depositional sequences:  
How shell concentrations are distributed within depositional sequences?

## Abstract

安藤寿男\* 近藤康生\*\*

Hisao Ando\*  
and Yasuo Kondo\*\*

1999年6月24日受付。

1999年9月25日受理。

- \*茨城大学理学部地球生命環境科学科  
Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Ibaraki University, Mito 310-8512, Japan
- \*\*高知大学理学部自然環境科学科  
Department of Natural Environmental Sciences, Faculty of Science, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan

Major subdivisions, formative processes and distribution patterns of fossil concentrations are reviewed from the viewpoints of taphonomy and sequence stratigraphy. Fossil concentration processes affected by reducing sedimentation rate contain such hydraulic events as winnowing, reworking, total bypassing, dynamic bypassing and sediment starvation. In terms of their differential control, fossil concentrations are divided into four categories, namely single-event, composite, condensed and lag concentrations. Condensed shellbeds also include onlap, backlap, downlap and toplap types according to stratal termination patterns based on the sequence stratigraphic model. When the relative sea-level rapidly rises, onlap-backlap compound types will be formed due to development of thin transgressive systems tracts. These concentrations are systematically distributed within depositional sequences reflecting sedimentation rate, skeletal input and condensation. During the early transgressive stage, transgressive lag and onlap types are formed at base of cycle shellbeds. Backlap and downlap beds constitute midcycle shellbed formed during maximum flooding stage between late transgressive and early highstand stages, and by long term sediment starvation. Diverse concentrations as single-event, composite and toplap beds develop during middle to late highstand such as top of cycle shellbeds. Many case studies of the Quaternary deposits in New Zealand and Japan, and the middle to upper Tertiary in Maryland, United States, show that the Kidwell's model for distribution patterns of condensed beds is generally applicable to many basins.

*Key words:* shell concentrations, depositional sequence, sequence stratigraphy, condensation, taphonomy

## はじめに

古生物学研究では、素材の得やすさ、研究の容易さから、化石密集層を対象とすることが多い。これは、化石密集層に多くの化石層序、古生態、堆積、古環境、そして進化情報が含まれているからでもある。また、化石密集層は単調な岩相中でも認定が容易なことから、対比に有効な鍵層として化石層序学や石油探鉱でよく用いられてきた。しかし、化石密集層の形成要因は多様であるため、長い間理解があまり進展しなかった。

日本では新第三系～第四系の軟体動物化石密集層の素材に恵まれているため、その形態や成因については、井尻・藤田(1949)以降多くの研究がある(例えばOgasawara, 1977など)。最近では堆積相解析、シーケンス層序学、そしてタフォノミーの進展を踏まえて、新たな視点からの取

り組みが進められている(例えば、Kondo, 1989; 徳橋・近藤, 1989; 佐藤・下山, 1992; 北村, 1994, Kitamura et al., 1994; 鎌滝・近藤, 1997など)。

1980年代後半になって確立したシーケンス層序学は、堆積学を中心に石油地質学や海洋地質学などで急速に普及してきた。また、陸上露頭を対象とする野外地質学でも頻繁に用いられるようになってきた。日本でもシーケンス層序学を解説する和文の記事が出そろい、ケーススタディーも各種の和文雑誌に掲載されつつある。シーケンス層序学の概念や手法は、地層を扱う様々な分野に適用・応用されており、多くの影響を与えている。これは、地層やその分布・堆積相の累重様式の意味を、より成因論的にそして四次元的に捉える視点を提供したことによるところが大きい。

シーケンス層序学では地層を時間層序学的に扱う前提として、地層中に時間面を入れるための高精度な微化石層序

を必要とした。したがって、微化石の産状や産出頻度、そして堆積シーケンスや堆積体中での一般的な分布様式は早い段階で注目されていた (Emery and Myers, 1996 参照)。これに対し大型化石は、産出頻度が少なく浅海域に限られることもあり、また炭酸塩岩を構成する生物礁化石に比べても十分に理解されているとは言い難かった。1990 年代に入って、化石密集層の形成過程や古生態をシーケンス層序学と関連づけて理解する動きが活発になってきた (Kidwell, 1991a, c, 1993a-c; Brett, 1995, 1998; Abbott, 1997, 1998; Abbott and Carter, 1997; Brett et al., 1997; Naish and Kamp, 1997; Kamp and McIntyre, 1998; 近藤, 1996, 1998; Kondo, 1997; Kondo et al., 1998など)。化石層の形成と古生態は相対海水準変動に密接に関連しており、化石層の分布様式とシーケンス層序に多くの成因的関連があることは言うまでもない。

小論では、1) 化石密集層の形成要因と形成過程、2) 形成過程による化石密集層の大分類、3) 化石密集層の堆積シーケンス中での分布について、こうした研究の先駆をつけた Kidwell (1991a, c, 1993a-c) を中心にレビューしてみたい。後半では近藤が日本やニュージーランドの第四系で行ってきた研究をもとに、欧米の研究動向を踏まえてケーススタディを紹介する。

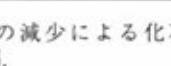
なおシーケンス層序学の概説や小論で用いる用語については、安藤 (1990), 荒戸 (1993, 1994a, b), 増田 (1993, 1997) や保柳・西村 (1992), 保柳ほか (1994), 増田・徳橋 (1994), 岡田 (1992), 齋藤ほか編 (1995), 徳橋 (1995)などを参考されたい。

### 化石密集層の形成要因

化石密集層 (fossil concentration) は、ごく稀な例外を除いて、化石に保存されやすい生物の硬組織 (skelton もしくは hard tissues) が地層の特定層準に遺骸として集積したものである。硬組織には貝殻、骨、歯などがあるが、最も一般的ものは貝殻で、それらが集積したものは、貝殻層 (shell bed) とかコキナ (coquina)・コキナイト (coquinite) と呼ばれる。

化石密集層の形成要因は多様であるが、大きく分けて生物学的要因、堆積学的要因があげられる。前者には化石生物の形態、生息時の生態 (生活様式、生息姿勢、個体群動態、群集特性など) や古生物地理などがある。例えば、群居性あるいは群体をなす底生生物は、散在的に生活する生物より化石として密集しやすい。また同じ生息密度なら、内在生より表在生の方が、波浪などで洗い出されやすいので化石化しにくい反面、密集しやすいだろう。

一方、堆積学的要因には、堆積粒子として地層に取り込まれるまでのもの (初生堆積性) と、二次的なもの (後堆積性) がある。堆積過程で化石が密集するには、水力学的堆積能で直接貝殻が集積することが多いが、堆積速度、形成期間といった効果も無視はできない。形成期間で見ると、底生生物の大量死をもたらすような瞬時の埋没から、

様式	形成過程	密集層	堆積物供給速度	純堆積速度
「 気泡 」	吹き分け 選択的細粒基質の除去		変動的	-
	洗濯 基質からの活性な分離		変動的	-
「 表面 」	全通過 選択的選別・潮流選別		変動的	0
	動的通過 堆積・侵食の繰り返し		+	0
堆積物の欠乏 堆積物供給の遮断			0	0

第1図. 堆積速度の減少による化石密集過程. Kidwell (1986) より改編.

地質学的時間に及ぶ堆積速度減少によるコンデンセーション (後述) まで幅広い。また、堆積場によって貝殻が密集しやすい所もある。さらに埋没するまでの堆積面の化学的特徴は殻の溶解作用の主要因として重要である。殻は埋没後地層内で続成作用を受ける。例えば、差別的圧密や基質の圧縮溶解などは後堆積性の密集作用と考えられる。

これらに加えて、堆積学的な要因が生物学的要因を誘引する、タフォノミック・フィードバック (taphonomic feedback: Kidwell and Jablonski, 1983; Kidwell, 1991b) も考えられている。例えば、貝殻形成や貝殻の再堆積による底質変化 (軟質底から硬質底あるいは貝殻質底) が、新たに異なる生態群集を誘因するというのである。

これらの要因は、1980年代後半以降のタフォノミーの進展によって、様々な観点から系統的にまとめられている (例えば, Allison and Briggs, 1991; Donovan, 1991; Martin, 1999など)。また、化石密集層の形態や特徴についての記載用語は、Kidwell (1986, 1991a), Kidwell and Bosence (1991); Kidwell et al. (1986), Kidwell and Holland (1991), Parsons and Brett (1991) に詳しい。そして、より定式化された定性的/定量的な概念モデルとして、タフォノミー相 (taphofacies) が提案されている (Brett and Baird, 1986; Speyer and Brett, 1991など)。実際には、堆積速度や堆積時の物理的擾乱度のような堆積環境指標に加え、合弁殻の割合、破片化度、摩耗度、溶解度、生物侵食の程度のような化石の保存様式や初期続成も考慮されている。

化石密集層の形成要因で最も重要なのは、堆積速度と遺骸の供給速度である。堆積速度が大きければ、化石は “希釈 (dilution)” され、小さければコンデンセーション (濃縮: condensation) が生じる (Fürsich, 1978; Fürsich and Aberhan, 1990; Kidwell, 1986, 1991a-c; Kidwell and Bosence, 1991)。したがって堆積速度と遺骸の供給速度とは逆相関の関係になる。

次に堆積速度の減少による化石密集の過程には幾つかの様式がある。第1図には、1) 基質が選択的に水流で飛ばされる「吹き分け」(winnowing), 2) 基質と共に殻が

洗い出されて分級される「洗掘」(reworking), 3) 堆積物が懸濁や掃流運搬で通過してしまう「全通過」(total bypassing), 4) 小スケールの堆積と侵食の繰り返しによる堆積物の「動的通過」(dynamic bypassing), 5) 堆積物供給が遮断されて生ずる「堆積物の欠乏」(sediment starvation) が示されている (Kidwell, 1986). 1) と 2) の堆積速度はむしろマイナスとなるため, そこでは侵食が起こる. 3)~5) は堆積速度が小さいか 0 に近いので無堆積 (omission) となる.

堆積速度の変化傾向は海進海退サイクルや堆積シーケンスの中でおおよそ推測が可能である. たとえば相対的な堆積速度の低下は, 沖合いでの堆積物欠乏が起こる海進期, あるいは, 浅海ならば堆積物の吹き分けや洗掘, 堆積物の通過が顕著になる低海水準期や高海水準期後期に生じやすい. したがって, 低エネルギー, 高エネルギー環境のどちらの場合でも生じうることに注意する必要がある.

### 形成過程による化石密集層の分類

化石密集層の研究には, 正確な層序学的位置づけを基礎にした, 野外での 3 次元的な形態観察が重要であることは言うまでもない. それにはこれまで述べたような形成要因や形成過程を考慮したタイプ分け (分類) が有用であろう.

#### 1. Fossil-Lagerstätten

保存の良い化石の密集層を示す用語として, しばしば“化石鉱脈”('Fossil-Lagerstätten'): Lagerstätten がドイツ語の鉱床を意味する語であることから, 「化石床」と訳したいところだが, 既に異なる意味で用いられているのでこれは不適当) が使われてきた. これは Seilacher et al. (1985), Seilacher (1991) が普及した概念で, 特に軟体部や全身骨格までが残されているような極めて保存の良いものは, 保存的化石鉱脈 (conservation Lagerstätten) と呼ばれる. これに対し, 保存はそれほどでもないがよく密集した場合は, 密集的化石鉱脈 (concentration Lagerstätten) と呼ばれる. いずれも多くの実例が知られており, 個々に詳細な研究が蓄積されている. 例えば, 前者にはバージェス頁岩, ポシドニア頁岩, Solnhofen 石灰岩が, 後者にはフランス・ノルマンディー海岸の中部ジュラ系のアンモナイト・コキナがあげられる. Seilacher (1991) が指摘しているように, 化石鉱脈という用語の問題点は, 「保存の良い」という定義に明確な境界がない点である. したがって, Brett et al. (1997) のように, 一般的な意味での化石密集層に化石鉱脈を用いるのは望ましくない, と我々は考える.

#### 2. 陸棚浅海の化石密集層

陸棚浅海における化石密集層を形成営力に結びつけて理解しようと試みた研究例として, Norris (1986), Fürsich and Oschmann (1986, 1993), Fürsich and Pandey (1999) などがある. これらは, 個々の地層の堆積相や化

石の産状に基づいて, 主要な形成要因が海岸-陸棚断面上でどのように反映して, どんなタイプの化石密集層が分布したかをモデル化している. 例えば, Norris (1986) では, カリフォルニア州の鮮新統を対象に, 堆積相と化石層の特徴から, 堆積速度, ストームや水流の洗掘・再堆積, 生物擾乱の 3 つの要因の組み合わせに基づいて, 1) 水流吹き分け化石層 (current winnowed bed), 2) ストーム化石層 (storm beds), 3) 骨格化石層 (bone beds), 4) 生態的コンデンス化石層 (ecologically condensed bed), 5) 群集化石層 (community bed) に区分した. そしてこれらが当時の陸棚勾配 (水深帯) に沿う堆積環境を反映して分布したことを推定した. つまり, 1), 2) は外浜に卓越ストーム波浪限界水深に向かって減少し, 3), 4) は内側陸棚以深に分布して内側陸棚をピークとするが外側陸棚になるといずれも減少する. 5) は陸棚に安定的に存在するが大陸斜面以深で激減する. そして, 全体として陸棚から沖合いに向かって化石層に乏しくなる.

Fürsich and Oschmann (1993) は, 西インド Kachchh のジュラ系で, 計 200 の浅海成化石層のタフォノミーや生物相を詳細に観察し, 9 タイプの化石層を識別した. つまり, 1) 平穏時波浪化石層 (fair weather wave concentration), 2) ストーム波浪化石層 (storm wave concentration), 3) 供給源側テンペスタイル (proximal tempestite), 4) 盆側テンペスタイル (distal tempestite), 5) 水流化石層 (current concentration), 6) 吹き分け化石層 (winnowed concentration), 7) 海進ラグ, 8) コンデンス化石層 (condensed concentration), 9) 生物源化石層 (primary biogenic concentration) である. 基本的な考え方は Norris (1986) と似ているが, 平穏波浪, ストーム波浪, 供給源側ストーム流, 海盆側ストーム流, 長期の水流, 生物活動といった主要な 6 つの営力を想定し, 密集層形成時間と幾つかの過程 (例えば, 穀の運搬, 穀の物理的破壊, 生物侵食など) とを組み合わせて, 海岸-陸棚断面での 9 タイプの分布傾向を復元した.

Fürsich and Pandey (1999) は, 南インド Cauvery ベースンの上部白亜系 Kallankurichchi 層に含まれるカルクアレナイト中の化石密集層について, タフォノミー特性から貝殻層を構成する卓越分類群の名称を冠した, a) *Isognomon*, b) *Pycnodonte*, c) *Ceratostereon*, d) *Inoceramid* 化石層, そして, e) 多様種化石層 (polyspecific concentrations) の 5 タイプを識別した. それぞれの内部構造の詳細な観察から形成過程を復元している. Fürsich and Oschmann (1993) の分類でいうと, a)~d) は 2) とおよび 3) に, e) は 9) に相当する.

これらのタイプ分けは研究対象とする地層群ごとに, また観察精度によってかなり異なってくる. したがって, 時代, 地層を問わずに一般化できる大分類が望ましい. そこで, 化石密集層の総合的なタイプ分けとして, Kidwell (1986, 1991a, 1993a-c) によく考察されているので, Fürsich (1995), Brett et al. (1997), Martin (1999)



第2図 堆積速度変化と上下面での純堆積速度から分類した4タイプ（I～IV）の化石密集層（Kidwell, 1986, 1991cから改編）。堆積速度が0に近づくとコンデンセーションが起り無堆積面（omission surface）が、-になると侵食面が形成される。

なども参考にしながら次項以下で詳しく紹介してみよう。

### 3. 化石層の堆積速度と速度変化

Kidwell (1986) は、化石層の堆積速度変化（減少／増加）と密集層上下面での純堆積速度（net sedimentation rate）の組み合わせから、4タイプ（I～IV）に単純化した貝殻層形成モデルを提案した（第2図）。つまり、化石密集速度が上方に減少していく場合（タイプI, II）と、増加していく場合（III, IV）で、上面での堆積速度が0なら無堆積となり（I）、-なら侵食作用が起こる（II）。逆に下面が無堆積面となる場合はIII、侵食面ならIVとなる。

このモデルは、化石密集層形成の最も基本的な要因が、堆積速度低下による化石のコンデンセーションとみなし、化石密集度が時間的にどう変化するかを示している。さらに密集層と散在層もしくは無化石層との関係（漸移／急変）に加え、場によって、化石集団の見かけの層的（時間的）形態変化をも説明が可能であることを明らかにした。非常に単純な図式化であるが、化石密集層形成過程を考える上で重要な視点を与える。

### 4. 本論で採用する分類

次に、Kidwell (1991a) は、欧米各地におけるカンブリア紀から第四紀におよぶ顕生代の化石密集層についての多数の研究例を検討した。これらの多くは既存の文献であるが、北米東岸第三系を中心とした Kidwell 自身の長年にわたる精密な野外研究の成果も少なくない（Kidwell, 1988, 1989; Beckvar and Kidwell, 1989など）。その上で、化石密集層の層序と集積過程から、イベント化石層（event concentration）、複合化石層／多重イベント化石層（composite/multiple-event concentrations）、堆積間隙化石層／コンデンス化石層（hiatal or condensed concentration）、ラグ化石層（lag concentration）の4つに大別した（第1, 2表、第3図）。これらは互いに複合している場合もなくはないが、それぞれは化石層のサイズ、形態、内部構造、層序学的位置などで異なる特徴をもって

第1表 形成過程による化石密集層の大分類。Kidwell (1991a-c, 1993a-c), Brett et al. (1997), Naish and Kamp, (1997), Kondo et al., (1998) より改編。

1. 単一イベント化石層 single-event concentration
  - 1) 急速埋没を伴わない大量死による単一イベント化石層 mass mortality horizon without burial
  - 2) 急速埋没がもたらす大量死による単一イベント化石層 mass mortality horizon with rapid burial (obrution deposits)
  - 3) 準原地性単一イベント化石層 paraautochthonous coquina
  - 4) 異地性単一イベント化石層 allochthonous coquina
2. 複合化石層／多重イベント化石層 composite / multiple-event concentration

#### 3. コンデンス化石層／堆積間隙化石層

condensed / hiatal concentration

- 1) オンラップ型コンデンス化石層 condensed onlap shellbed
- 2) バックラップ型コンデンス化石層 condensed backlap shellbed
- 3) ダウンラップ型コンデンス化石層 condensed downlap shellbed
- 4) トップラップ型コンデンス化石層 condensed toplap shellbed
- 5) オンラップ-バックラップ複合型コンデンス化石層 condensed onlap-backlap compound shellbed

#### 4. ラグ化石層 lag concentration

いる。したがって化石密集層の形成過程による一次的な分類として有用であろう。そこで小論では、Kidwell (1991a), Brett et al. (1997) を組み合わせた分類を採用することにする。

##### 1) 単一イベント化石層

Kidwell (1991a) で使われた「イベント」という語は、研究者によって様々な用い方がされており、場合によってかなり長期間のコンデンス層や、複合層と混同されたりしている。そこで Brett et al. (1997) に従い、このタイプを単一イベント化石層（single-event bed）と呼ぶ。

このタイプは、地質学的に单一あるいは比較的短時間のイベントで形成される、ラミナや単層レベルの薄い化石層である。集積能力としては水力学や生物活動であるが、例えば、ストームによる再堆積イベントや急速埋没による大量死など、おそらく数分から数100年単位の時間間隔で形成されるものが想定されている。生態学的には短期的、相対的に単純な過程を意味し、それには生物の個体群動態による「急激繁殖」や「破滅的な大量死」などを含む。

単一イベント化石層を丹念に解析すれば、堆積・侵食・運搬過程などの短期間の堆積過程を復元するための強力な手がかりとなり、岩相だけを基にした復元に比べるかに精度が向上する。また岩相的に顕著な側方連続性のよいイベント層の場合には、鍵層として堆積盆内の地域層序对比に役立つ。単一イベント層の一部は、生態群集のセンサス（census：人口調査の意）集団として多くの生態学的情報を保存しており、ほかの密集層に比べ最も高い時間分解能を持っている。後述する(1), (2)がセンサス集団に相当すると思われる。

Brett et al. (1997) は、Kidwell (1991a) の示したこのタイプに4つのカテゴリーが含まれることを指摘している（第1表）。上述の記載では網羅・識別されていない内容を含み有用なので簡単に紹介する。

第2表. 化石密集層の分類と特徴. Kidwell (1991a, 1993a-c) より編集.

名 称	形成要因	サイズ	岩相・堆積相・堆積構造	化石の産状 (タフォノミー)	意 義
单一イベント化石層	単一の堆積イベント (ストーム波浪による潮上帯・潮間帯への打ち上げ、ストーム波浪による再堆積、ストーム誘因泥流、深海乱泥流、土石流、津波、火山灰降下、異地性道筋流入、懸濁物質や浮遊性生物の急速沈降) ; 生態学的短期イベント (貧・無酸素環境埋没による大量死、個体群動態による大量死、群生化など)	ラミナ～单層 (数mm～数10cm) ;	単純なシート～レンズ状	生態学情報の完全保存 (センサス集団) ; 異地性～同相性；時間平均化遺骸集団。	短期の堆積・侵食・運搬過程の推定；層層として地域層序対比 (高時間分解能)
複合化石層 / 多重イベント化石層	单一イベント層の付加・癒着；複合イベントの長期過程 (数年～数10万年前) ; 群生化、底生生物活動による洗掘、外域からの遺骸流入などそれらの組み合わせ	单層、单層セット、堆積相 (数10cm～数10m)	複雑な付加性の内部堆積構造；癒着や覆瓦状の構造など多様：メガリップル、バイオハーム；細かな構造が失われて塊状になることもある	保存は一般に不均質；タフォノミック・フィードバック効果；上位層による侵食；異なる生息環境・タフォノミック履歴を持った化石集団による複雑化	厚い場合、炭化水素鉱床の貯留層の可能性
コンデンス化石層 / 堆積間隙化石層	堆積速度の低下；群生化、生物性洗掘・水力学的擾乱、異地性流入の組み合わせ；堆積・侵食・無堆積イベントの組み合わせ	单層、单層セット、堆積相	顕著な水力学的堆積構造なし；上下どちらかに不連続面を伴うことが多い；長期間によぶので、複雑な内部構造	化石が豊富で密度も多様性も高い；複雑な古生態の、好～不良保存の混在；化石層序のコンデンセーション	古地形、不連続面の認定 (不整合、シーケンス境界、海辺面、ダウングラップ面)
ラグ化石層	波浪や水流による機械的侵食 (洗掘・再堆積) / 海進外浜侵食 / 海退時の外浜侵食	单層、单層セット (<1m)	顕著な侵食基底に大きな層序的欠落、短縮が認められる；内部構造は多様だが、癒着や無構造の一塊見られることあり	異なる堆積相・時代層からの物理・化学的耐久性の高い残存性再堆積性貝殻・骨格の集団およびそれらの混合；侵食・蘇食による貝殻や基質の選択性の分級・除去	不連続面の認定 (シーケンス境界、バラシケンス境界、ラビンメント面)

## (1)急速埋没を伴わない大量死による单一イベント化石層

様々な原因の環境摂動がもたらす底生・遠洋性生物の大量死による化石密集層で、通常の堆積速度で埋没されごくまれに保存される。大量死の原因の一つとしては、海底面や底質中の酸素濃度の変化 (貧酸素・無酸素事変、酸素濃度の異常な変動) が考えられている。Seilacher et al. (1985) の“停滞”堆積物 (stagnation deposits) もこの区分に含められると思われる。

## (2)急速埋没がもたらす大量死による单一イベント化石層

急速な埋没イベントによって、主に底生生物が窒息死して形成された化石層をいい、“窒息性”堆積物 (obruction deposits : Seilacher et al., 1985; Brett and Seilacher, 1991) と呼ばれる。obruction は、ウェブスターなどの辞書にも収録されていない特殊な語であるが、オックスフォード英語辞典 (OED) によれば、動詞形の obrute には「埋める」という意味があり、古生物学の分野では「窒息 (smother)」という意味を持たせて使用されている。保存的化石鉱脈の主要な部分をなす。その形成の要因として、Brett and Seilacher (1991), Brett et al. (1997) は、i) 急速埋没時の底質中に無数の完全な生物死骸が存在すること、ii) 腐肉食生物や底生生物による死骸の擾乱を妨げる程度に、厚い堆積物が急速に沈積すること、iii) 埋没後、侵食再堆積イベントの影響を受けない状態が永続すること、iv) バクテリアによる生鉱物作用のような、軟体部を保存する適切な初期成環境、を挙げている。急速埋没力としては、ストーム波浪やそれに帰因する乱泥流、津波、深海乱泥流、火山灰降下、火山泥流などがある。特に、ストーム波浪によるテンペスタイルモデルや海水深に依存した分布モデルが、Speyer and Brett (1988) や Brett and Seilacher (1991) によって提案されている。

## (3)準原地性单一イベント化石層

单一の堆積イベントによって生物死骸が吹き分け・洗掘されて生息場周辺に集積した化石層をいう。陸棚浅海域の

ストーム堆積物やテンペスタイル (Aigner, 1985) 起源の化石層がこれに相当する。このタイプの典型的特徴は明瞭な侵食性基底があることで、密集層内部は殻の堆積過程を反映した集積様式や級化を示す場合がある。最近のストーム堆積物の研究から、地層に保存される死骸の多くは殻生生物の生息域内で集積し、側方移動が比較的少ないことが指摘されている (Fürsich and Oschmann, 1993 など)。

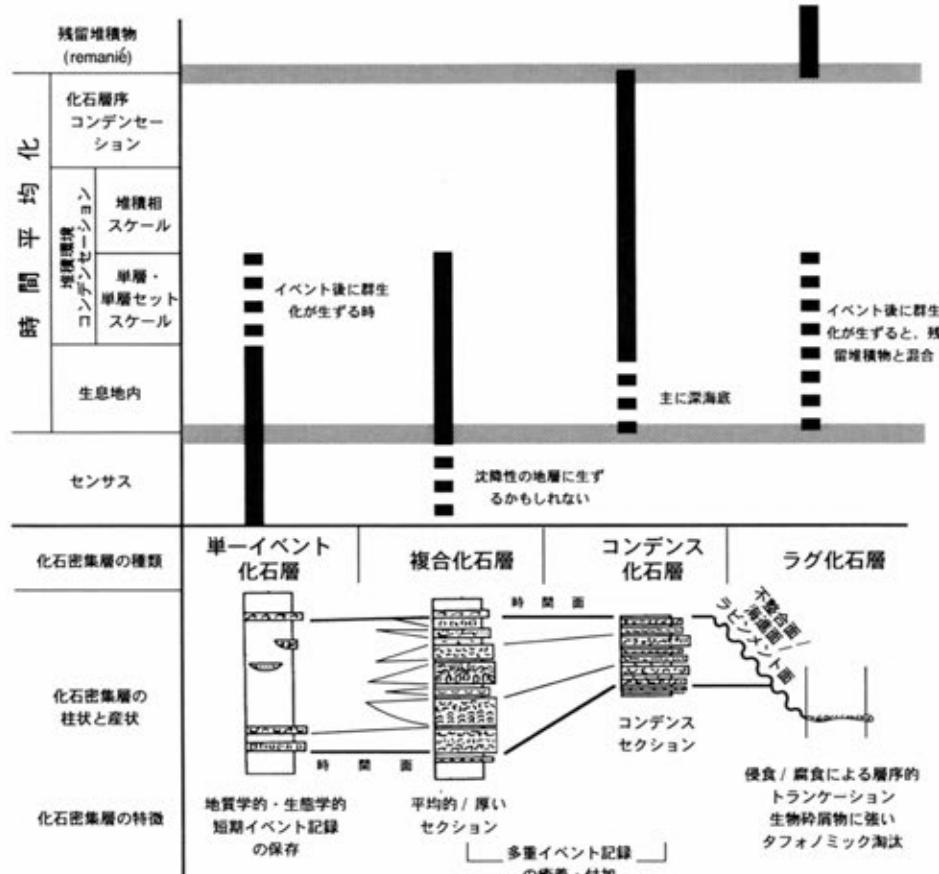
## (4)異地性单一イベント化石層

域外に生息していた生物死骸が、单一の堆積イベントによって運搬されて集積した異地性の化石層をいう。貝殻や骨格を多量に含むタービダイトや土石流堆積物、強いストームによって潮上帯～潮間帯に打ち上げられた貝殻層が該当する。また、ストーム時の氾濫などで冲合いにもたらされた懸濁死骸や、遠洋性生物の大量の死骸が、比較的急速に沈積したケースもこれに含められる。

## 2) 複合化石層

複数の单一イベント層が複合累重した、あるいは、長期におよぶ複合したイベント群で形成された、单層～单層セット～堆積相レベルの、平均的に厚い (数10cm～数10m) 大規模な化石密集層である。群生化 (colonization)、生物活動による洗掘、外域からの死骸流入やそれらの組み合わせを伴い、全体として、堆積・侵食・無堆積イベントを示す堆積物や構造が互層した、複雑な内部構造を持つ。例えば、生物碎屑性メガリップルやバイオハームなどの大規模な堆積構造やベッドフォームを含む、個々の单一イベント化石層が付加したり完全に癒着したりして、結果として、細かい顕著な層序構造が失われて塊状になってしまうことがある。化石の保存は一般に不均質であるが、化石層の分布は広い。数年～数万年規模の期間で形成されると想定されている。

また、タフォノミック・フィードバックの効果も考えられる。例えば、軟質砂泥底において死骸殻が集積すると、底質環境が貝殻質底に変化し、それが生態群集組成を変化



第3図 化石密集層の形成過程による分類. Kidwell (1993a, 1993a-c) から編集. 上半の時間平均化については Kidwell (1993c) 参照.

させる。この場合、全く同所的に生息するが生息時期が異なるよう、複数の生態群集が混合した化石集団が形成されるであろう。

単一イベント層のように、形態、基質、タフォノミー特性が多様であるが、スケール、形成様式、形成速度（あるいは連続性や間欠性）、形成場ははるかに多様である。したがってそれらの形成過程は単層やユニットごとに解析する必要がある。ただし、新期イベントの侵食によって古期イベントの記録が失われてしまうことが予想されるので、すべてのイベントが必ずしも保存されているわけではないことに注意する必要がある。複合化石層の形成過程の1モデルが、Kidwell and Aigner (1985) に提起されている。

### 3) コンデンス化石層

堆積速度の低下によって、層序学的なコンデンセーションが生じて、化石や生物碎屑物が濃集した比較的薄い密集層である。基底もしくは上面が侵食（scour）面、あるいは無堆積面であることが多い。貝殻が洗い出されて基質も選択的に吹き分けられて密集したり、あるいは堆積物の欠乏によって長期間のうちに濃集したタイプである。単一イベント化石層、複合化石層が通常の堆積速度条件でできるのに対し、このタイプは周囲の同時代層に比べコンデンスして薄いことが特徴である。形成期間は様々であるが長期

に及ぶため、多数の短期イベント（生物学的・水力学的过程、続成過程）の効果が蓄積されて、化石層内部の層構造は複雑になると予想される。

コンデンセーションは、堆積盆の条件によって生成場、継続時間、層序間隔や厚さが異なっており、化石の濃集度は化石密集層分類の絶対的基準（標識）とはならない。コンデンス層は、海進海退サイクルのどの相でも形成可能であり、陸棚や大陸斜面、内湾、沈水した炭酸塩プラットホーム、海山など様々な水深の堆積場で形成される。しかし、シーケンス層序学的に見ると、堆積シーケンス内の特定位置に頻繁に出現し、重要な不連続面（例えば、シーケンス境界、海氾濫面、ダウンラップ面）に伴われる。したがって、このコンデンス化石層は、小規模不連続面、震探反射面、化石層序学的基準面として、時間面を示す重要なツールとなる。

コンデンセーションの生じやすい条件として、Kidwell (1991a, c, 1993c) は、(1)堆積物供給が妨げられる孤立した海底地形、特に高まりや海闊堆積盆（silled basin）や深海底、(2)相対海水準上昇が堆積物供給を上回ることで生ずる堆積物の欠乏や、堆積物通過の長期化（堆積システムの相対的定期性が連続すること）、(3)貝殻生産速度の減少、(4)貝殻破壊速度の増大、を指摘している。

第3表. コンデンス化石層のタイプと特徴. Kidwell (1991c), 近藤 (1998), Kondo et al. (1998) より編集.

タイプ	端末型	形成時期・堆積体	形成要因	堆積環境・環境変化	岩相・堆積相	化石群集(古生態)	化石の産状(タフォノミー)	典型的な実例 (日本の第三系~第四系)
トップラップ型		高海水準期後期	堆積物の通過 + 淹食性洗掘	浅海上方浅海(粗粒)化	斜交層理などの波浪・水流堆積構造が発達; 生物遺骸片支持~基質支持; チャネルラグ、シート状密集層	物理的擾乱が多いので、低多様性の厚殻内在型の二枚貝が混在	殻の摩擦・分離が顕著で下位層からの洗掘・再堆積もしばしば; 残留化石層が普通に見られる; タイプI, II; 経時的(海塩側に覆瓦配列)	底層上部のエゾタマキガイ密集層(Kondo et al., 1992); 清川層上部のバカガイ密集層(Kondo et al., 1992)
ダウンラップ型		高海水準期初期	堆積物の欠乏	浅海~深海上方浅海(粗粒)化	遺骸は散在的に密集層は稀; 芝葉堆積物; 自生貝類; 底生・浮遊性生物化石の濃集; 側方変化小さく分布が広い	高多様性の底生+浮遊性生物が混合; 低多様性の薄殻内在型小型二枚貝種も多い; 足食二枚貝のみの場合も	保存は不良・最良と様々; 急速埋没性の逃避「逆転姿勢」二枚貝や、殻内部が堆積物未充填の二枚貝がしばしばタイプIII;	ランギティケイ川の高海水準期堆積体/強制海退堆積体下部の殻在化石層(Naish and Kamp, 1995); 清川層上部のバカガイ密集層下部(Kondo et al., 1992)
バックラップ型		海退期後期	堆積物の欠乏	浅海上方深海(細粒)化	遺骸が芝葉基質に密集; セメント化されていることも多い; 側方変化小さく分布が広い	堆積物流入の少ない安定環境を好む。腕足類。コケ虫を含む。表在生の底生生物群集	長時間の海底露出のため殻に穿孔・付着の痕跡がしばしば; タイプI; 上限が同時間面(最大海辺面)	上部キャッスルクリフ貝殻層の上部Hawea貝殻層上部(Fleming, 1953); 泉谷化石帶地蔵堂化石帶の中上部(Kondo, 1989)
オンラップ型		海退期初期~中期	堆積物の通過と欠乏	浅海上方深海(細粒)化	分級の良い砂に底生貝種の殻が密集; 海進ラグ直上にあって、しばしばラグと複合収束(複合型)	高多様性の生態的に混合した底生生物; 薄殻内在型二枚貝が卓越	殻の摩擦・分離が顕著な新旧混合した被洗掘性化石; タイプIII, IV; 経時的(陸側への覆瓦状配列)	大森層中部の堆積サイクル基底化石密集層(Kitamura et al., 1994); 清川層基底部の自生的な化石層(Kondo et al., 1992)

#### 4) ラグ化石層

一旦堆積したものが削剥されて再堆積した、一般的に薄い(数cm~1m)残留性の化石密集層をいう。波浪や水流による機械的侵食や化学的溶食を受けており、破片化や摩耗のために貝殻の保存が一般に悪い。また初生の貝殻集団や基質がある程度選択的に分級・吹き分けられている。基底に残留骨格片(特に骨、歯、そしてそれらが磷酸塩化や黄鉄鉱化したもの)を含むこともある。密集層の厚さは下位層の削剥量やそこに含まれる初生的貝殻量や殻の破壊の程度による。

Kidwell (1991a) は、層序的に顕著な侵食(truncation)の存在を重視し、不整合やラヴィンメント面に伴われるラグに対してこの化石層区分を充てた。そして、層序的侵食のない、微小なイベント(例えば、ストームの洗掘や潮汐チャネルの移動など)に伴う密集層(单一イベント化石層)とは区別した。海成層で特に上下の岩相が類似する場合には、侵食面は不明瞭となり、逆にラグ化石層の存在が不整合面の指示者となる。下位層の侵食と再堆積によって化石層序学的に異なる時代の化石がコンデンスしていることもある。Brett et al. (1997) はラグ化石層はコンデンス化石層と側方遷移することがあり、場合によって両者の違いがわざかであることを指摘している。

ラグ化石層には海進期初期にできる海進ラグ(transgressive lag)と、高海水準期後期の海退ラグ(regressive lag)がある。いずれも浅海(外浜)の波浪卓越環境に最もよく見られる。海進ラグはしばしば、形成後に底生生物の群生化を受け、生態的に生息環境の異なる生物が混合した集団を構成する。例えば、カキ礁の発達するラグーン堆積物が海進によって侵食を受けると、カキ密集層にいくらか外海生の底生生物や遊泳・浮遊性生物殻を含むことになる。一方、海退期のラグではこうした混在は稀である。海退ラグの基底の侵食面は、侵食海退面(regressive surface of marine erosion: Nummedal et al., 1993)と呼ばれる。

最近では、高海水準期の後期(高位安定から海退の時期)に、海退侵食堆積物をもたらすような速度の大きい海退は、強制海退(forced regression)と呼ばれる。強制海退は、海退期のラグ化石層の形成に重要な地質学的条件として注目されている(Hunt and Tucker, 1992など)。

#### コンデンス化石層の分類

前述したように、コンデンス化石層形成の最大の要因は、堆積速度の減少(特に堆積物の欠乏)である。したがって、その形成時期と分布は、堆積シーケンス内の堆積速度変化やシーケンス内の局所的な堆積様式と密接な相関を示すことが考えられる。Kidwell (1991c) は、シーケンス層序モデル(Vail, 1987)で示された地層端末型(stratal termination patterns)の中で、コンデンセーションが生ずると予測される位置をもとに、4タイプのコンデンス化石層が形成されうることをモデル化した(第4図、第3表)。すなわち、オンラップ(上接)型、トップラップ(頂接)もしくはオフラップ型、ダウンラップ(下接)型、そしてバックラップ(後接)型のコンデンス化石層である。

シーケンス層序学でいう地層端末型は、震探層序断面で認定される反射面端末型(もしくは反射波列端様式: reflection termination patterns; Mitchum et al., 1977)を、地層の一般的な累重様式に外挿したものである。震探チャートに表現される反射面は、音響インピーダンスの境界面として、経験的に同一時間面とみなされている(Vail et al., 1977)。これに対し、シーケンス層序モデルに示された地層端末の1ユニットはパラシーケンス(van Wagoner et al., 1988)として表現されており、両者は必ずしも同じものではない。しかし、いずれにせよ、Kidwell (1991c) のモデルは、地層端末、つまり漸近線をなして地層が終結したり収斂する部分で堆積速度が減少するため、そこに化石のコンデンセーションが起こることを指摘した点で大きな意義がある。

最近ではニュージーランドのワンガヌイ・ベースンの鮮新統上部から更新統を中心とした精密なシーケンス層序研究の中で、大型軟体動物化石密集層がほぼ Kidwell モデルにしたがって分布することが実証されつつある (Kamp and McIntyre, 1998; Kondo et al., 1998など；後半で詳述)。ただし、コンデンス化石層以外の化石層を含めている研究もあるので、注意が必要である。例えば、単にオンラップ型化石層といつても、ラグ化石層とオンラップ型コンデンス化石層とを一括しているような場合である (例えば Naish and Kamp, 1997)。

ここでは Kondo et al. (1998) で定義したように、Kidwell (1991c) の 4 つの端末型コンデンス化石層に加えてオンラップーバックラップ複合型コンデンス化石層を加えて 5 つに区分することにする (第 1 表)。

### 1. オンラップ型コンデンス化石層

オンラップは、古い地層からなる初生的な傾斜面に対し、より若い地層が海側から陸側に向かってほぼ水平に覆う地層端末型である。この傾斜した不連続面に対し地層が陸側に収束していく漸近線型の形態をとる。地層が漸近しないで高角度でオンラップ面に交わる (アバットする) と、地層の減衰がないためコンデンセーションが起こりにくい。

オンラップ型コンデンス化石層は、海進に伴う侵食面 (ラヴィンメント面) 直上の海進ラグ (化石) 層のさらに上位に形成される。一般に、ラグからコンデンス層には漸移する。そして、その上方には、あまりコンデンスしていない化石散在層に漸移する。Kidwell (1986) のタイプIV に相当し (第 2 図)、堆積物の通過と欠乏の組み合わせによって形成される。つまり、海進時には殆ど陸源堆積物が沿岸河川域に堆積 (トラップ) してしまうため、陸棚は堆積速度が減少し、局的に珪質碎屑物がもたらされても、連続的な懸濁や掃流によってオンラップの場を横切って通過してしまう。そのため海進期初期の地層にはコンデンセーションの記録が多くなるというのである。

海進期初期の波浪侵食は、低海水準期堆積体由來の、もしくは、下位の堆積シーケンスに由来する “古い” 貝殻や粗粒碎屑物 (粗粒砂や礫) を再堆積させる。この再堆積物質 (remanié) が海進ラグ、あるいはラビンメント堆積物 (ravinement deposits; Vail et al., 1991) である。海進ラグ中の化石層の特性は、外浜侵食の深さや量と殻物質の耐久性に依存する。これに対し、その上位のオンラップ型コンデンス化石層は、ラグが堆積した後の “新しい” 貝殻が相対的にやや静的に集積したものである。ラグ化石層とオンラップ型コンデンス化石層のどちらが発達するかは、侵食の深さと、侵食物質の特性、貝殻生産量、そして堆積速度低下期の保存可能性を反映している。ラグ堆積物が薄い場合には、両者は複合しそれらの区別は難しくなる。

Naish and Kamp (1997) はオンラップ型化石層に 2 種類あることを指摘しているが、彼らのオンラップ (1)

は、Kidwell (1991a) でいうラグ化石層に相当し、必ずしもコンデンセーションによるものではないと考えられる。単に下位シーケンスにオンラップしている意味で用いられている。したがって筆者らは今回、上述のように、海進期堆積体基底～下部に見られる化石密集層に対し、ラグ化石層とオンラップ型コンデンス化石層とを区別すべき、と考える。

オンラップ型コンデンス化石層の化石集団は、浅海生息域を反映して種多様性が比較的高い。そして、タフォノミック・フィードバックの効果や、浅海での連続的な侵食による再堆積などによって、生態的に組成が混在し、複雑なタフォノミー履歴をもった化石が集積する。

海進が進むとオンラップ面は陸側に移動していくため、オンラップ面上のコンデンセーションの場も陸側に移動する。そのため、ラビンメント面や海進ラグと同様、オンラップ型コンデンス層も経時的 (diachronous) である (Nummedal and Swift, 1987; 斎藤, 1989; 安藤, 1990など参照)。つまり同じ一つの化石層でも海側から陸側に向かって時代が新しくなる。詳しく見ると、同時代にコンデンスした層準は海側に傾く屋根瓦のように (shingled) 配列している。これらの同時性層準は、一連の海進面に伴う別々の地層として保存されることもある。また、堆積シーケンス基底に沿って側方に連続しながらも、細かく見ると複雑なユニットが、一つのユニットに癒着していることもある。内部構造に関わらず、オンラップ型コンデンス層は、その上位が海進期後期～高海水準期の堆積物で覆われるため地層中に保存されやすい。

### 2. バックラップ型コンデンス化石層とダウンラップ型コンデンス化石層

バックラップ (backlap) は、相対海水準が上昇して海進する際の、陸側に後退していく地層における海盆側縁での端末型をいう。新しい地層の沖合い側末端が古い地層に比べて陸側に後退していく様式である。震探層序学では一般に使われないが、Vail (1987) ではこの関係は “見かけの侵食 (apparent truncation)” と見なされ、そして、van Wagoner et al. (1988) の “backstepping” に相当する。

一方、ダウンラップは、相対海水準が上昇から下降あるいは高位安定状態に移行し、陸側堆積システムが前進していく際の沖合い側に形成される。新しい地層が古い地層よりもさらに海盆側に発達 (前進) していく端末型をいう。堆積体先端の地層が、海盆側で漸近線状に収束するところでコンデンセーションが生ずる。

バックラップ型コンデンス層では、通常の堆積速度の堆積相から上方にコンデンス層に漸移し、上限は無堆積面に覆われる (Kidwell, 1986 のタイプ I, 第 2 図)。この無堆積面はシーケンス層序学でいう最大海氾濫面 (maximum flooding surface; van Wagoner et al., 1988) に相当する。それに対しダウンラップ型コンデンス層は、最大海氾濫面上にのる、上方浅海化 (堆積速度の上昇) 最初期の堆

積物である（タイプⅢ、Ⅳ）。したがって、両者は海進期堆積体と高海水準期堆積体の境界部にあって、多くの点で互いに鏡像のような関係をもつ。上下が対称的な堆積シーケンスならばその中央部に位置する。言い換えると、それぞれ、堆積中心の後退と前進による、堆積から欠乏、そして最大海氾濫面を挟んで、欠乏から堆積への変化を記録する。ただし、最大海氾濫面は漸移的な岩相変化をなすことが多く、必ずしも明瞭な境界面を認定できるとは限らない。シーケンス層序学で用いられるコンデンス・セクション（condensed section；Loutit et al., 1988）は、両者を一括したものに相当する。これらの上位に海退性の海成堆積物が続くためどちらのコンデンス化石層も保存されやすい。

堆積物の欠乏の効果が大きくなってコンデンセーションが進行すると、局所的に、底生生物殻、自生鉱物、遠洋性懸濁有機物質が沈積する。遠洋性物質の量比、分類群組成の保存、統成作用の状態は欠乏環境によって変異する。例えば、浅海潮下帯での堆積物欠乏で形成されるコンデンス化石層は、高エネルギー環境の堅く締まった（firm-ground）砂～泥質砂の底質、多様な有殻底生生物遺骸で特徴づけられるので、堆積物通過によって形成されるオンラップ化石層と似ている。一方で、海盆側における欠乏性のコンデンス化石層は、遠洋性物質を多く含み、低酸素環境・鉱物化作用・膠結作用の影響を受け、保存程度の違いが大きい。

堆積物の欠乏は珪質碎屑物供給が遮断されるだけで成立するのに対して、堆積物の通過は堆積物供給量、粒径、水力学との敏感なバランスを反映し、そうした条件は短期間に限定的に成立する。したがって、欠乏の方が通過よりも広範に広がり持続性がある。そのため、バックラップ型・ダウンラップ型コンデンス層は、オンラップ型よりも広域に分布し、層厚・分類群組成・タフォノミー形質の側方変化が少なく一様であるため、広域な同時間面として利用できる可能性が高い。そこでコンデンセーションの継続時間は、全体としては長いが、堆積盆地辺で最小、盆地中央で最大になる。

特に陸棚沖合い域で、堆積物欠乏が顕著になると、もしくは相対海水準上昇速度が大きいと、バックラップ型とオンラップ型は一枚の化石層に複合収束することが認められている。そしてそこでは海進期堆積体がコンデンス堆積物で代表される。こうしたものは複合コンデンス化石層（compound shellbed；Naish and Kamp, 1997），あるいはオンラップ-バックラップ型複合コンデンス化石層（condensed onlap-backlap compound shellbed；Kondo et al., 1998）と呼ばれている。ニュージーランドの鮮新統-更新統ワンガヌイ・ベースンのような沈降速度の大きな地域で報告されている（Naish and Kamp, 1997；Kamp and McIntyre, 1998；Kondo et al., 1998）。

### 3. トップラップ型コンデンス化石層

トップラップは、海側に傾斜する下位の地層が水平な上

位層に交わったり収斂したりする端末型をいう。コンデンセーションは海側に前進するクリノフォーム（くさび状の地層）の頂部における陸側の上方末端で生ずると考えられる。堆積システムの前進とともに、新しい地層の陸側末端は陸棚斜面上部から海盆方向に移動していく。

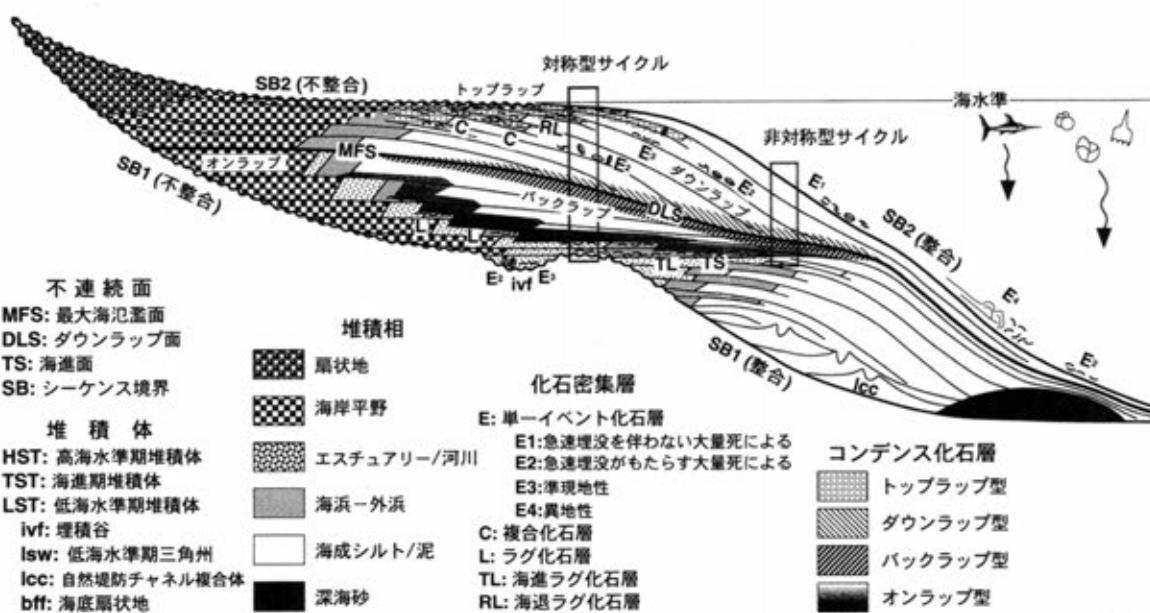
トップラップ型コンデンス化石層は、海水準が高位安定して浅海化が最大に達する、高海水準期堆積体上限に形成される。陸側からの堆積物が供給されて陸源堆積システムが海側に前進するため、堆積柱状での堆積相変化は上方粗粒化性の海退（浅海化）傾向を示す。物理的な擾乱や分級を強く被る高エネルギー環境への変化を反映して、上方に堆積物通過の卓越するタイプⅠやⅡのコンデンス層へと漸移する。そして無堆積作用や侵食作用によって密集層上面は明瞭となる。化石集団は全体として多様性の低い底生生物群集で特徴づけられる。化石層は形成時の水深によって様々な形態をとるが、浅海ではシーケンス境界直下の側方付加性のチャネルラグやシート状の密集層からなる。

高海水準期後期～低海水準期の陸上侵食や次の海進期の海底侵食を受けやすいため、ほかのコンデンス層に比べ保存が稀で、分布も不連続であることが多い。オンラップ型コンデンス層と同様に、トップラップ型は経時的である。詳しく見ると、一連の同時性コンデンス層準が側方に癒着し、海盆側に覆瓦するように配列する。

### 堆積シーケンス内の化石密集層の位置

堆積シーケンスの形成要因には、汎世界的海水準変動（ユースタシー）、堆積物供給、堆積盆地のテクトニクス（沈降・隆起）、堆積機構、沿岸の運搬・侵食作用（Posamentier et al., 1988；Swift and Thorne, 1991, Reynolds et al., 1991参照）などがある。そして、これらの総和としての海水準がある特定地域での相対海水準になる。この概念はシーケンス層序学を様々な時代・スケールの地層群に適用するのを可能にした。シーケンス層序モデルでは、この相対海水準変動サイクル（曲線）での特定の位置（相）で形成される、一連の堆積システムに対して堆積体（systems tract）という名称が与えられた。それらの境界には特徴的な不連続面や境界面が形成される。第3～4オーダー・シーケンスの内部構造はシーケンスごとに、また、堆積盆地によっても異なっている。しかし、多少の変異はあっても、化石密集層は相対海水準変動に対応した予測可能な様式で出現する（Kidwell, 1991a, c, 1993a-c；Brett, 1995, 1998；第4図）。

コンデンス化石層以外のタイプを含めた堆積シーケンス中における分布様式については、Kidwell（1991b, 1993a-c）に詳しい。それらの中で彼女は、不整合境界で定義された層序ユニットとしての堆積シーケンスではなく、より一般的な用語である「堆積サイクル」内の相対的位置から、3つの化石層グループを認めている。すなわち、1) サイクル基底（base-of-cycle/sole）化石層、2) サイクル中部（midcycle）化石層、3) サイクル上端（top of cycle/end-cycle/roof）化石層である。これ



第4図. 堆積シーケンス内での化石層の分布. Kidwell (1991a-c, 1993a-c), Naish and Kamp (1997), 近藤 (1998), Kondo et al. (1998), Kamp and McIntyre (1998) などから編集. シーケンスモデルは Haq (1991) を参照.

らは、露頭レベルでのシーケンス内の相対的位置を表すには十分であるし、境界不連続面の観察や堆積体の位置づけが不十分な際の化石層の記述にも有効である。しかし、前述したコンデンス化石層の、1) オンラップ型、2) バックラップ型とダウンラップ型、そして、3) トップラップ型という3区分を言い換えただけの印象を免れ得ない。ここでは堆積体ごとに、特徴的な化石層の分布様式や化石の保存特性をまとめてみることにする。

これらのタイプはいつも発達するとは限らないので、堆積シーケンス内での分布はかなり多様である。シーケンス内の局所的な堆積速度の変化によって複合したり欠如したりするので、相対的位置は変わらなくても厚さや出現の組み合わせはかなり変化する。さらに、同じ浅海成環境で形成されたとしても、堆積システムが違うと化石層の特性は異なってくる。

### 1. 低海水準期

低海水準期は、相対海水準の低下によってそれまで浅海域にあった堆積場が干出して、河川の下刻作用を受ける陸上侵食域へと変化し、堆積場の中心は沖合側の大陵斜面や海盆底に移動する。したがって堆積場全体の斜面勾配は大きくなり、“高エネルギー”条件を代表する堆積物が卓越する。動的な洗掘や細粒堆積物の通過の結果として堆積速度は減少し、化石は破壊や再堆積が顕著になる。その上、貝殻生産の高い陸棚域の面積は縮小するため、化石密集層形成の機会も減少する。タービダイトのような重力流堆積物の流入量が増大するため、急速埋没によって化石の保存は良くなるが化石は希釈されると予想される。したがって、低海水準期堆積体は、単一イベント化石層や複合化石層が含まれることがあるがその产出はかなり稀であろう。また、低海水準期後期の堆積物が陸棚や大陸海域で発達す

るところ、特に侵食谷埋積層 (incised valley fill) では、浅海～非海生の化石を散在的に産するが、密集層は一般に稀である。

### 2. 海進期初期

海進期初期には、海進面あるいはラヴィンメント面上に於ける海進ラグ化石層や、その上位のオンラップ型コンデンス化石層が発達する。場合によってこれらに複合化石層が伴う。低海水準期堆積体が保存されないと、海進面やラヴィンメント面は下位のシーケンス境界と一致することになる (安藤, 1990; van Wagoner et al., 1990など参照)。したがって、これらの化石層は堆積サイクル基底化石層に含められる。Banerjee and Kidwell (1991) が報告したバラシーケンス基底 (BOP: base of parasequence) 化石層は、下位層の洗掘・再堆積を伴う海進ラグではなく、ストーム成の単一イベント層やそれらの複合層とみなされている。堆積速度の大きな堆積盆や海進時の波浪侵食の程度が弱いと、ラグではなくイベント層や複合層に移化すると考えられるからである。また、冲合いの低堆積速度域では、サイクル基底化石層はオンラップ型～バックラップ型複合コンデンス化石層で代表されるようになる (Naish and Kamp, 1997; Kamp and McIntyre, 1998; Kondo et al., 1998)。

サイクル基底化石層の分布様式で重要なことは、海進と共に陸側にオンラップしながら形成されるために、たとえ側方に連続した化石層でも海側に覆瓦した内部構造を持つことである。

### 3. 海進期後期～高海水準期最初期（最大海氾濫面形成期）

最大海氾濫面が形成される最大海進期の前後では、ほとんどの陸源堆積物は沿岸河川域に堆積し、冲合い域の堆積

速度が最小になる。一方、海底の大部分は炭酸塩生産に重要な有光帶以深にまで沈水してしまう。そこで貝殻質堆積物は、海進期初期よりも低エネルギーの沖合い条件で堆積するため、摩耗や物理破壊の程度が弱い。ただし、それらは強い生物侵食や化学的溶解を被るので (Loutit et al., 1988), 地球化学的に安定な生物碎屑性粒子で特徴づけられる。例えば、ウニ殻片のような方解石結晶や、コノドントもしくは脊椎動物骨格のような磷酸塩殻である (例えば, Kidwell, 1989; Baird and Brett, 1991など)。

こうしたサイクル (シーケンス) 中部に含まれる化石層は、堆積物の欠乏によって形成されるコンデンス化石層を主体とし、サイクル内で最も深い堆積環境を示す。van Wagoner et al. (1988) のコンデンスセクションに相当する堆積物でもある。最大海氾濫面を挟んで、最初はバックラップ型コンデンス化石層が陸側に後退しながら、その後はダウンラップ型コンデンス化石層が海盆底側に前進しながら形成される。Banerjee and Kidwell (1991) の mid-sequence shell bed や Abbott (1997, 1998) の mid-cycle condensed shell bed は、バックラップ型に相当すると思われる。

この時期は全体として低エネルギー環境下にあるが、物理的侵食の要因がないわけではない。外側陸棚までもたらされるようなストーム波浪やそれに伴う水流などである。また、底層流 (コンターカレントなど) のような弱い流れですら、深海性侵食の重要な営力として、単一イベント化石層を形成する可能性がある (例えば, Loutit et al., 1988 の再堆積性磷灰土 (phosphorite) 層)。

#### 4. 高海水準期初期～中期

高海水準期初期はコンデンセーションが継続しているため、一般に殻物質の保存が悪い。特に殻の化学溶解は重要な破壊営力である。底質に硫化物 (黄鉄鉱の酸化物や硫酸) が生成してしまうと、海面や堆積物上部に含まれる殻が溶け、ふつうアラレ石殻はほとんど破壊される。薄い変形した殻皮だけが保存された軟体動物化石はこうした底質環境条件によると考えられている (Seilacher et al., 1985)。

離弁し破片化した殻が敷石 (pavement) 状に密集した化石層もこの時期に発達することが知られている。破片化の正確な営力は明らかとはいえないが、化学溶解や殻の弱化に加え、わずかな底層流ですら殻を粉碎するのに十分かもしれない。また底生生物の捕食による破壊を重視する考え方もある。

水流による擾乱の少ない沖合では、保存的化石鉱脈と呼ばれるような極端に保存状態の良い化石層が見られることがある。特に、貧酸素～無酸素海底環境が頻繁に発達すると、腐肉食者による遺骸の摂食が妨げられるので、合弁個体の保存に適しているかも知れない (いわゆる “停滞” (stagnation) 堆積物 : Seilacher et al., 1985)。しかしながら、供給源から離れた沖合い深海では、急速埋没に必要な陸源堆積物が届かないため、海底に露出する時間が長

くなり化石層の保存は難しくなる。

高海水準期中期になると、平均ストーム波浪限界以深の外側陸棚や沖合では、堆積速度が増加するので、“窒息性”的な単一イベント層 (obruction 堆積物) が保存される可能性が高くなる。有名なイリノイ州石炭紀後期の Mazon Creek Essex 動物群は好例の一つである。極めて急速な埋没と初期統成 (シデライトの形成) により軟質体生物ですら保存されている。

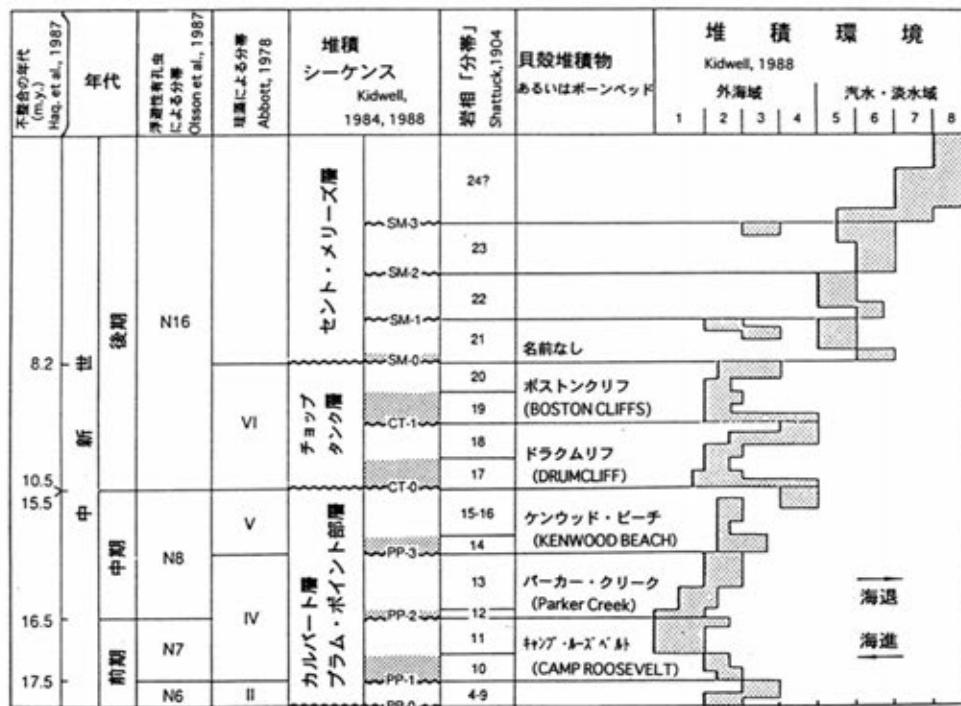
#### 5. 高海水準期後期

高海水準期後期あるいは海水準の高位安定期に形成される化石層は、堆積サイクル (シーケンス) 上部に発達する。一般に陸棚浅海域の化石層を主体とし、海退ラグ化石層、複合化石層、トップラップ型コンデンス化石層が含まれる。それぞれは、侵食性の切断 (erosional truncation)、前進型の堆積 (例えば、ストーム成の単一イベント層の付加)、堆積物通過によるコンデンセーションに伴われる。これらの化石層はそれぞれで、またお互いに、癒着しあうことしばしばであろう。炭酸塩-珪質碎屑物混合型陸棚ではバイオハーム、バイオストローム形成による複合層もありうる。Banerjee and Kidwell (1991) のパラシーケンス頂置 (TOP : top of parasequence) 化石層は、この時期の複合化石層に相当する。

海退とともに平均ストーム波浪限界から平穏時波浪限界へと高エネルギー環境に推移するため、堆積速度が増加しながら上方粗粒化堆積物 (パラシーケンスあるいはパラシーケンスセット) が累重する。そのため、殻の離弁化・破片化、再堆積作用が増大し、非常によい保存状態に始まって、保存度が上方へ低下していくような化石保存特性の傾向をもたらすと予想される。この時期はまだ浅海域が広がっているため、貝殻や生物碎屑物の生産性が高い (特に浅海潮下帯で頂点に達する) が、高エネルギー環境の物理的・機械的擾乱が化石保存の負の要因として大きく働く。しかし逆に、例えばストーム堆積物のように、急速埋没の機会が増え、海底上の生物遺骸の平均的露出時間は少なくなるだろう。したがって、合弁で摩耗していない密集層が保存される可能性は高くなるかもしれないし、さらに、局所的なバッチ状分布が保存されることも考えられよう。この時期の化石層は上位の堆積シーケンスによって削除される可能性があるので、全体的には保存されにくい。

#### 堆積シーケンスと化石密集層形成の実例

ここでは、これまでおもに解説してきた Kidwell の一連の研究 (Kidwell and Jablonski, 1983; Kidwell, 1989, Kidwell, 1991a, b, など) の主要なフィールドとなった、米国メリーランド州の中新統にみられる堆積シーケンスと化石密集層の形成についての具体的な実例を紹介する。また、日本でなじみ深い更新統の堆積シーケンスを理解する際には、ニュージーランド・ワンガヌイ・ベースンの鮮新統-更新統で行われてきた研究 (Fleming, 1953; Naish and Kamp, 1997; Kamp and Naish, 1998;



第5図. メリーランド州の中新統の層序と古環境. 下位4層の主な貝化石密集層は外洋に開いた海域で形成された堆積シーケンスの基底部に見られる. Kidwell (1989) のFig. 2より. 堆積環境1: 外洋海域陸棚のストーム波浪限界以深, 2: 外洋海域陸棚の静穏時波浪限界以深, 3: 沿岸海域, 4: 海域潮間帯, 5: 汽水域波浪限界以深, 6: 汽水域波浪限界以浅, 7: 汽水域潮間帯, 8: 河川流路.

Kondo, et al., 1998, など) が参考になる. ワンガヌイ・ベースンでは、現在もニュージーランドやオーストラリアの研究者によって、時代的にも地理的にも範囲を拡げて研究が進められつつあるが、ここでは古くから研究されてきたワンガヌイ・キャッスルクリフの海岸露頭、そしてワンガヌイ・ベースン東部のランギティケイ川沿いの露頭を中心に紹介する. 化石密集層形成に関するモデルとなつたこれらの地域で、どのような地層の観察を基礎としてモデル化が行われてきたかを理解しておくことは、これらの研究を批判的に理解し、さらに発展させていくためにも重要である. また、これまで日本で行われてきた研究のフィールドとなった下総層群や大桑層の化石密集層についても、本論で採用した化石層の区分ではどのような位置づけになるのか、簡単に解説しておく.

### 1. 第3オーダー堆積シーケンスの例—米国メリーランドの中新統チェサピーク層群

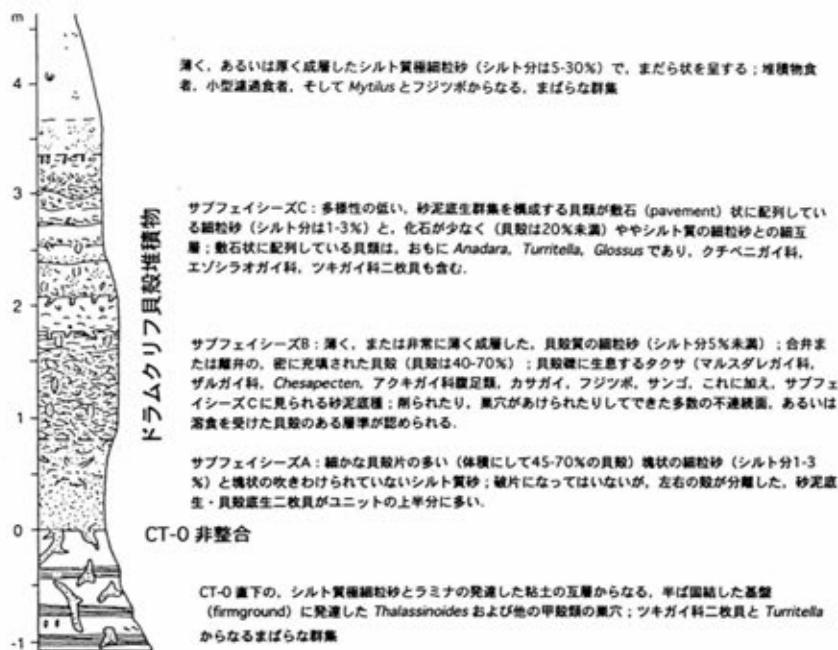
メリーランド州の中新統チェサピーク層群 (Chesapeake Group) は、米国東海岸で最も深い湾入部を形成している、現在のチェサピーク・エスチュアリの西岸に広範囲に露出する. 潮間帯から陸棚中部にかけて堆積した、厚さ70mの堆積物から構成されている. この堆積物は、ソルスベリー湾 (Salisbury Embayment) と呼ばれる、中生代から新生代にわたって沈降し続けた堆積盆を埋積したもので、中新統の下位にも同じような古第三系や白亜系がある. 中新統のチェサピーク層群には、形成期間がそれぞれ100万年未満の海成層からなる6層の堆積シーケンスと、

これらよりずっと薄い海域縁辺で形成された4層の堆積シーケンスが含まれる (第5図).

チェサピーク層群 (Chesapeake Group) の研究上の利点は、いくつもの類似した堆積シーケンスが観察できることに加え、地層の傾斜が非常に小さいために、化石密集層を、堆積盆の縁辺から中心に向かって長距離にわたって追跡できる点である. Kidwell (1989, 1991c) はこの利点を生かして堆積シーケンス (あるいは海進海退サイクル) における化石密集層の形成様式のモデル化を試みた.

下位から4シーケンスがカルバート層 (Calvert Formation) のプラム・ポイント部層 (Plum Point Member) に相当し、各シーケンスの基底部に見られる非整合は、地層名の略称にシーケンスの番号を付して、下位から順にPP-0, PP-1, PP-2, PP-3と名づけられている. カルバート層の上位に重なる2シーケンスを構成するのがチョップタンク層 (Choptank Formation) である. ここまですべて海成層であるが、さらに上位には、汽水・淡水域で形成された4シーケンスを含むセント・メリーズ層 (St. Marys Formation) がのっている. シーケンス基底の不整合は、同様にCT-0, SM-0などと呼ばれている (第5図).

これらの地層群の最大の特徴は、それぞれのシーケンス基底部に顕著な化石密集層が見されることである. これらは、major complex shell beds (Kidwell and Jablonski, 1983), あるいは major shell deposits (Kidwell, 1989) などと呼ばれてきたもので、本論の区分ではオンラップ型コンデンス化石層に相当する. これらの化石密集



第6図. メリーランドの中新統におけるオンラップ型コンデンス化石層の複雑な内部構造の例 (Drumcliff shell deposit). Kidwell (1989) の Fig. 4から.

層は、厚さが数mで、シーケンスの下半分、すなわち海進期の堆積物に相当する。化石層の形態は板状あるいはレンズ状で、下面是たいてい巣穴 (*Thalassinoides*) が掘られており、非整合面（シーケンス境界）となっている。内部にも多数の不連続面（小規模な侵食面）が認められる。岩相は、体積にして20-70%の貝殻を含み、基質は含泥率が0-13%の細粒砂（平均粒径2.0-3.0φ）である。貝殻片支持（shell-supported）のファブリックを主体とし、一部は基質支持（matrix-supported）となっている。貝殻は地層面にはほぼ水平に配列しているが、無秩序に配列しているように見える部分や、波浪の影響を受けて折り重なって立っている（edgewise）ところもある。二枚貝では、離弁個体ばかりで生息位置を保持したものがほとんどないもの（Camp Roosevelt shell bed）から、合弁個体が多く生息姿勢を保持した個体が少なくないもの（Kenwood Beach shell bed）まで、さまざまである。これらの化石層の柱状図の一例（Drumcliff shell bed）を第6図に示す。

Drumcliff 化石層は多様な海生軟体動物を主体とし、棘皮動物、コケムシ、フジツボ、サンゴ、そして魚類、海生哺乳類を含んでいる。二枚貝についてみると、貝殻底に生息する種群としては、*Mytilus*, *Isognomon*, *Crassostrea*, *Chesapeake*, *Anomia* など、砂泥底生の種群では、*Modiolus*, *Pinna*, *Lucina*, *Miltha*, *Eucrassatella*, *Spisula*, *Tellina*, *Glossus*, *Pitar*, *Chione*などがある。野外で認められるさまざまな特徴には、これらの化石密集層が静穏時波浪限界とストーム波浪限界の間の浅海底において、侵食と堆積を繰り返しながら（dynamic bypassing）形成されたことを示す証拠が多い。例えば、小規模な不連続面や、よく淘汰された砂層中に乱されていないシ

ルト質砂の小塊が見られたり（侵食を伴うイベントが存在した証拠）、砂泥底の群集と貝殻底の群集が混じっていたり（生態的に異なる群集の遺骸が混合した証拠）、化石の保存状態がさまざまであったり（遺骸が海底に露出した時間が多様であった証拠）などである。この化石層は、同層準に対比される部分が他の地点よりも明らかに薄いことから、堆積速度が相対的に小さい、すなわち「層序的に濃縮されている（stratigraphically condensed）」と考えられている。したがって、これらの化石群は、長期間にわたって集積されて混合してはいるが、死後あまり長距離運搬されてはいない。すなわち、生息場と堆積場が同相的（indigenous）なものと見なされている。海進の進行による水深の増大と共に伴う底質の変化に応じて、化石群の組成は上位に向かって変化する（Kidwell and Jablonski, 1983）。水深の変化は、潮間帯からストーム波浪限界あたりの範囲と推定される。

また、野外で観察される地層相互の関係は明らかに海進に伴うオンラップ・バタンを示しているが、地層の形成期間が短く化石層序学的時間分解能（珪藻）を越えているため、岩相が時間面に対して斜交しているかどうかは今のところ確かめられていない。

このように、オンラップ型コンデンス化石層は、メリーランドの中新統ではきわめて特徴的である。これに対して、シーケンス層序学の地層端末型から想定される残り3タイプのコンデンス化石層は、メリーランドの中新統では実はそれほどはっきりしたものではない。

バックラップ型コンデンス化石層は、ダウンラップ型コンデンス化石層と複合したものが一例だけ（カルバート層のプラム・ポイント部層の下から3番目のシーケンスの基底にあるパーカー・クリーク貝殻層：Parker Creek

shell bed) 見つかっている。岩相は骨格片を多量に含む海緑石砂岩である。厚さは1m以下であるが、側方によく続分布が広い。海生哺乳類そして魚類に加えて、陸生と汽水生の脊椎動物の骨を含んでいる。多くの骨は関節がはずれており、壊れたり摩耗したもの、また固着生物の付いたものもある。しかし、関節のはずれていない標本も少なからず見つかっている。底生無脊椎動物は、主としてフジツボと二枚貝であるが、产出はまばらで保存も悪い。一方、浮遊性の微化石群集はこの化石層で最も多く、多様性も最も高い。これらの化石群は、長期間にわたって遺骸が混合、すなわち時間平均化された (time-averaged) ものと考えられる。また、海緑石の分布もこの地層で最大に達しており、陸源碎屑物の供給が長期にわたって途絶えたことを反映しているものと思われる。

トップラップ型コンデンス化石層も、セント・メリーズ層基底の化石層のわずか一例だけである。シーケンスの基底にある地層がトップラップに伴って形成されたというのは奇異であるが、もともと海退期に形成された地層が海進に伴って侵食・再堆積したものと説明されている。この地層は、粗粒砂から細礫サイズに細かく破碎され磨滅された、骨片と歯を含む、厚さわずか8cmの側方にあまり続かない砂層である。そして、粗粒の石英砂、潮下帯浅所に生息する小型の *Caryocorbula* の殻内部を充填した磷酸塩ノジュール (いわゆる steinkern)，起源不明の磷酸塩ペレット、海緑石の密集した部分、などを含んでいる。

メリーランドの中新統には、これらのコンデンス化石層のほかにも、minor simple shell beds (Kidwell, 1982; Kidwell and Jablonski, 1983) と呼ばれた小規模な化石層が多い。これらは本論の区分では单一イベント化石層にあたる。オンラップ型コンデンス化石層とは異なり、厚さが数十cm以下と薄く、側方への連続性も露頭の範囲内程度であることが多い。含まれる化石群の組成も単調で、化石層内で垂直的にも水平的にも変化することはほとんどない。ひも状に多数の個体が連なった *Turritella plebeia* の産状 (stringer: Kidwell et al., 1986) は、現在の陸棚に見られる *Turritella commins* や *T. annulata* の生息状態に対応すると考えられ、多数の破片が密に充填された *Chione parkeria* や *Mercenaria rileyi*などのレンズは、貝を食べるエイの捕食活動の結果できたものとみなされている。小型二枚貝の *Corbula elevata* の多数集まった塊は、巣穴に落ち込んだもの、あるいは、吹き分けられた (winnowed) ラグと考えられる。これに対して、*Pandora crassidens* は波浪の影響の少ない干潟において遺骸とともに生息個体が埋没したもので、死後の移動はほとんど受けないと考えられている。このほかの小規模な化石層をつくる種類には、*Atrina harrissi*, *Ostrea percrassa*, *Isognomon maxillata*, *Glossus fraterna*などがあり、これらはもともと群居していたものが、生息域内で運搬されたものだろう。

先に述べた、オンラップ型コンデンス化石層は、平均堆積速度の減少した状態で、こうした单一イベント化石層が

堆積と侵食を繰り返しながら長期間にわたり累積・融合してできたものと見なすことができるかもしれない。

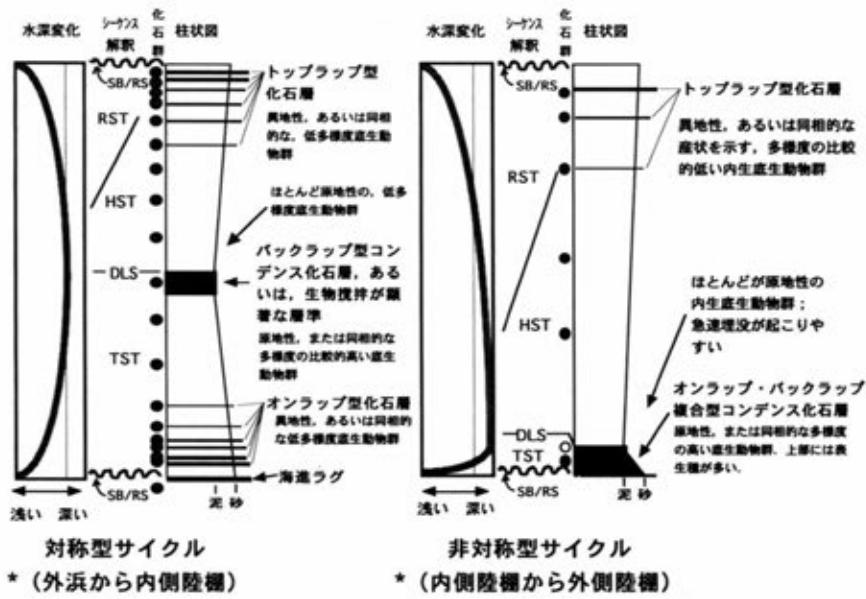
## 2. 鮮新一更新統の氷河性海水準変動によって形成された高周波堆積シーケンス：ニュージーランドと日本の鮮新一更新統の例

鮮新世後期から更新世、そして現在にかけて、シーケンス層序学で基本とする第3オーダーの堆積シーケンスよりもはるかに短い、2万年、4万年、10万年という周期 (ミランコビッチサイクル) で、海水準が昇降を繰り返し高周波堆積シーケンス (high frequency sequence: Mitchum and van Wagoner, 1991) が形成された。この時代の氷河性海水準変動によって形成された堆積シーケンスは、特にニュージーランドと日本で詳しい研究が行われてきた。ここでは、これらの研究を簡単に紹介し、高周波堆積シーケンスにおける化石密集層の特徴について述べる。

鮮新一更新統のミランコビッチサイクルに対応した堆積シーケンスでも、シーケンス層序の基本的な特徴は、第3オーダーのシーケンス層序モデルと本質的な違いはない。したがって、Kidwell (1991c) がまとめた、堆積シーケンスにおける化石密集層の形成パターンも基本的には適用が可能である。メリーランドの中新統で明瞭に認められるのはコンデンス化石層のうちオンラップ型だけであるが、ここに述べる第四系の例では、オンラップ-バックラップ複合型化石層やトップラップ型化石層がはっきりとした形で認められ、全体としては、Kidwell (1991c) のモデルを実証するものとなっている。しかし、これら高周波堆積シーケンスに特有と思われる特徴もあり、それは以下の2点にまとめられる。

- (1) 短周期の堆積シーケンスでは、海水準の変動速度が大きくなる結果、堆積環境変化の速度や堆積速度も大きくなりがちであるため、地層の記録が引き伸ばされて、コンデンス型や複合型の化石層も、個々の单一イベント化石層に分解される傾向がある。また、長期間にわたって形成されるコンデンス化石層でも、厚さがずっと薄い。例えば、典型的なオンラップ型の化石層である中部更新統大桑層中部の化石密集層には、長期的な環境変化の記録と考えられる内部構造を示すものがある。しかし、後述のように、单一あるいは複合型の化石密集層と考えられる。一方、メリーランドの中新統の堆積シーケンスでは、オンラップ型の化石密集層が厚さ数mに達し、表在生ベントスを多数含むコンデンス化石層を形成している。
- (2) 氷河の融解に伴う海水準上昇は、構造運動による海水準変動と比べて、また、氷河の形成に伴う海水準低下と比べても、その進行速度が大きいため、海進期堆積体が発達しにくく、オンラップ型とバックラップ型の化石密集層が融合して、複合型コンデンス化石層を形成することが多い。

この典型例は、ニュージーランド・ワンガヌイ・ベースン東部のランギティケイ川沿いの上部鮮新統に見られる。



第7図. 鮮新ー更新統の堆積シーケンスに現れる化石密集層. 堆積シーケンス中での堆積柱状の位置と内部構造によって、対称型・非対称型サイクルに分けて比較した. Kondo et al. (1998) を修正. RST: 海退期堆積体、それ以外の記号は第4図参照.

この場合の堆積シーケンスは、オンラップ・バックラップ複合型コンデンス化石層を含むきわめて薄い海進期堆積体と、比較的化石の少ない厚い高海水準期堆積体とから構成される。同じワンガヌイ・ベースンのキャッスルクリフ海岸のシェークスピア層群の一部にも、これに近い状態のものがみられる。Kondo (1989) が basal condensed shell bed と呼んだ、下総層群地蔵堂層の泉谷化石層（帯）や上泉層の海成砂層基底の化石密集層も本質的にはこのタイプのものである。遮蔽された環境から海進が始まったために、オンラップ型化石密集層が厚く発達しなかったのであろう。これらの化石密集層は、メリーランド中新統のオンラップ型化石密集層と比べると、厚さはわずか10分の1程度にすぎず、化石群の組成も内在種が多い。しかし、薄いながらもその内部に、上位に向かって海が深くなるような群集の変化が認められるので、コンデンス化石層と見なされるべきものである。

第7図に、以下に解説する、日本とニュージーランドの鮮新ー更新統の堆積シーケンスに見られる化石密集層のパターンを、堆積シーケンス内での堆積柱状の位置と内部構造によって対称サイクルと非対称サイクルとに分けて比較した (Kondo et al., 1998)。

### 1) ニュージーランド・ワンガヌイ・ベースンの鮮新ー更新統

ワンガヌイ・ベースンはニュージーランド北島の南西部に位置する堆積盆で、中新統から、完新統の段丘堆積物まで、厚さ3,000m以上の碎屑性堆積物によって埋積されている。太平洋プレートがオーストラリアプレートに沈み込むことによって形成された島弧の背弧海盆として位置づけられる。北島の中都市ワンガヌイ南西のキャッスルクリフ海岸露頭では、Fleming (1953), Abbott and Carter (1994), Abbott (1997, 1998) に代表される多くの研究

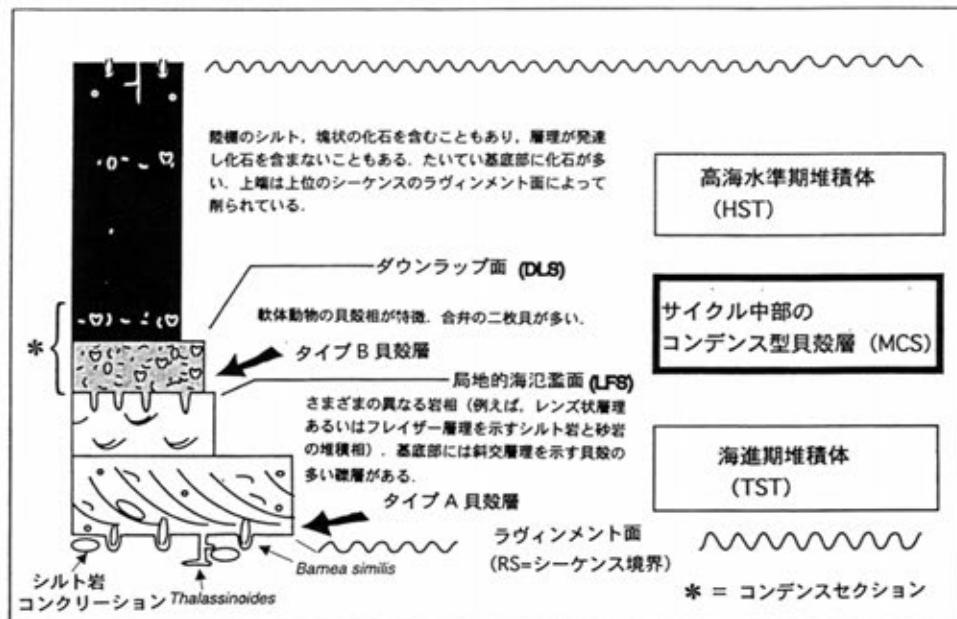
が行われてきた。一方、沈降速度の大きなベースンの東側では、最近、Naish and Kamp (1997), Kamp and Naish (1998) などによって、層序、堆積シーケンスなどの研究が精力的に行われ、堆積シーケンスと化石密集層の形成についての理解が大きく進展している。

#### (1)キャッスルクリフ海岸の堆積シーケンスと化石層の形成環境

キャッスルクリフ海岸には、東に緩く傾いた地層が連続的に露出しており、107万年前から約40万年前までの約70万年間の環境変動が、10の堆積シーケンスとして記録されている。これらの地層群は、下位から粗粒堆積物、貝化石密集層、泥質堆積物の順に重なることが多い。Abbott and Carter (1994) は10のシーケンスが同じ基本構造をもつ点に着目し、下部の粗粒堆積物を海進期堆積体、中部の貝化石密集層をコンデンスセクション、上部の泥質堆積物を高海水準期堆積体と解釈した。彼らの解釈にしたがえば、下部の粗粒堆積物中の貝化石層はオンラップ型の化石層となり、mid-cycle shellbed と呼んだシーケンス中部の貝化石密集層はバックラップ型のコンデンス化石層となる。

個々のシーケンスよりも大きなスケールの変化傾向も認められ、基底部に貝殻質のチャネル堆積物を含む下位のオケフ層群 (Okefu Group; シーケンス1-3)、フレイザーレイ (flaser bedding) の目立つ泥質堆積物が厚い中位のカイ・イウイ層群 (Kai-iwi Group; シーケンス4-7)、よく淘汰された海浜堆積物を含むシェークスピア層群 (Shakespeare Group; シーケンス8-10) に、3区分することができる (Fleming, 1953)。このような堆積相の全体的な変化は、閉鎖的なエスチュアリーから開放的な海浜が発達する古地理への変化を表している。

最上部のシーケンスであるシーケンス10を例にして、こ



第8図 キャッスルクリフ海岸露頭の中部更新統に見られる典型的な堆積シーケンス。Abbott (1997) より。

これらの堆積シーケンスを説明する。シーケンス10は、下位から順に、よく淘汰された細粒砂からなるシェークスピアクリフ砂層 (Shakespeare Cliff Sand: 海進期堆積体)、貝化石密集層である上部キャッスルクリフ貝殻層 (Upper Castlecliff Shellbed: コンデンスセクション)、泥質堆積物からなるカラカ・シルト層 (Karaka Siltstone: 高海水準期堆積体) から構成される (サイクルを模式的に示した第8図を参照)。

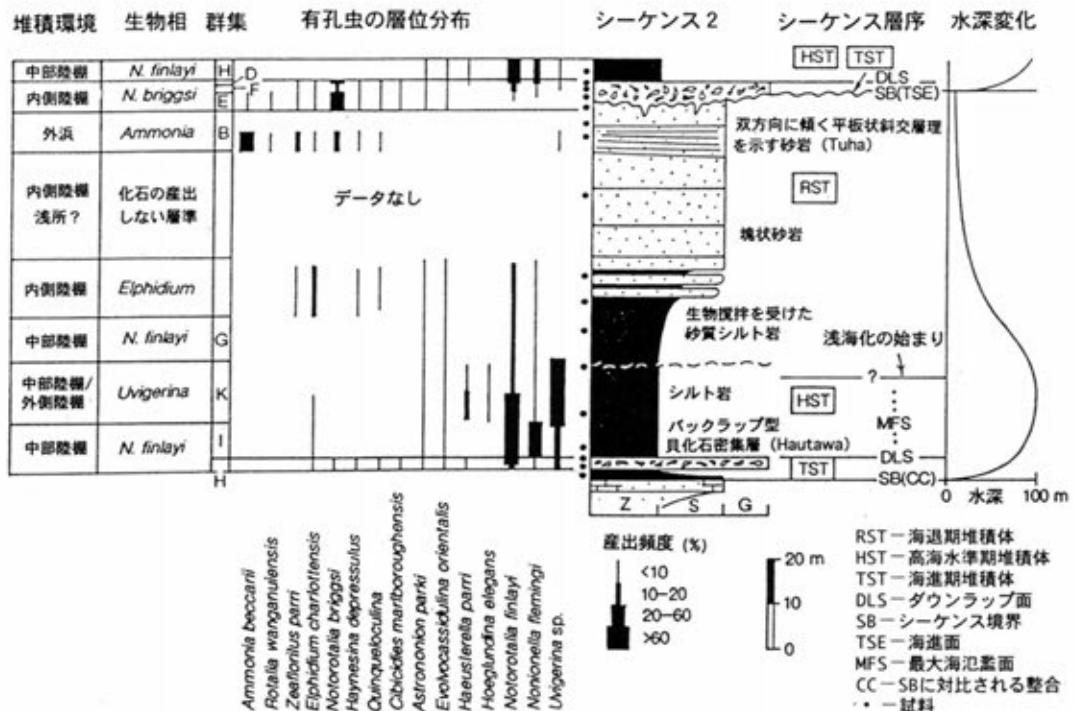
シェークスピアクリフ砂層は、平行層理または低角の斜交層理を示す、よく淘汰された細粒砂層から成り、外浜の堆積物と考えられる。ここには、潮間帯または潮下帯浅部に生息する貝類の化石が含まれる。

コンデンスセクションと考えられる上部キャッスルクリフ貝殻層の化石群は、内在種が多い *Gari lineolata* 群集と表在種主体の *Tiostrea* 群集に分けることができる。このキャッスルクリフ貝殻層の中で海進とそれに続き海退が起こったことが推定される (近藤, 1996)。そのおもな根拠としては、化石層の下部から上部にかけて、i) 表在生二枚貝の割合が、下部の *Gari lineolata* 群集と中上部の *Tiostrea* 群集にかけて増大し、再び最上部で減少に転ずること、およびii) 凹面を上にした二枚貝殻の割合が増大し、再び最上部で減少すること、があげられる。これらのことから、水深の増大から減少への折り返しの層準は、上部キャッスルクリフ貝殻層の最上部付近にあるものと推定される (近藤, 1996)。

以上のことから、この上部キャッスルクリフ貝殻層は、Abbott and Carter (1994), Abbott (1997) らの堆積シーケンスの解釈に従うと、本論の用語では、バックラップ型コンデンス化石層ということになる。

## (2) ランギティケイ川沿い露頭の堆積シーケンスと化石密集層の形成環境

ワンガヌイ・ベースン東部のランギティケイ川沿いの上部鮮新統には、4万年周期の海進海退サイクル (Naish and Kamp, 1997) が認められ、キャッスルクリフ海岸露頭とは特徴の異なる堆積シーケンスが形成されている (第9図)。多くのシーケンスでは数10cmの厚さの化石密集層の基底部に侵食面が認められ、これがシーケンス境界となっている。そして、化石密集層からなる海進期堆積体がきわめて薄く、高海水準期堆積体の泥質層がシーケンスの大半を構成する。つまり、内部構造が著しく「非対称」である。この化石密集層は、成因的には、最大海氾濫面の形成に伴うコンデンスセクションに相当する。通常であれば堆積シーケンスの中間に位置するものが、シーケンス最下部にオンラップ-バックラップ複合型コンデンス化石層として存在する。しかし、化石密集層は、その薄さにもかかわらず、2万年程度の比較的長期にわたる環境変化を記録していると考えられる。例えば、わずか10cm程度の層準の違いでも化石群の組成に大きな変化が認められる場合があるのは、堆積速度の低下により異なる化石群が「濃縮」されている証拠である。その化石群は、*Tiostrea chilensis lutaria*, *Chlamys gemmulata*などの二枚貝、*Neothyrid campbellica*, *Notosaria nigricans*, *Calloria inconspicua*などの腕足類、またコケムシなど、種多様度の高い表在ペントスを主体とし、様々な付着生物、穿孔生物の痕跡など、遺骸が長期間海底にさらされた証拠も多い。同じワンガヌイ・ベースンでも、キャッスルクリフ海岸露頭のサクセッションの中には表在生種の割合がこれほど高い群集は見あたらない。一方、高海水準期堆積体は、大型化石の产出頻度がはるかに小さく、種多様度・分布密度ともにきわめて低い二枚貝主体の群集で特徴づけられ、その種組成の



第9図. ランギティケイ川沿いのセクションに見られるシーケンス2の非対称型サイクルと有孔虫化石の組成. 深度変化を示す種, 有孔虫群集/生物相, そして推定された水深変化曲線を示す. Naish and Kamp (1997) より.

変化は上方に浅海化することを示す。

このように、ワンガヌイ・ベースンの中で、沈降速度の大きな東端では、より安定した西端と比べて、堆積速度の変化がより大きく、ダイナミックな環境変化が記録されているものと考えられる。

## 2) 日本の更新統

更新世に入って顕著な隆起が起こった日本では、海成更新統が各地の丘陵に露出している。なかでも、関東の太平洋岸、房総半島に見られる中上部更新統下総層群と、日本海岸北陸地方の下部更新統大桑層の例がよく知られている。これらについては、すでに公表されたデータも多いが、本論に紹介した化石層区分に基づいてあらためて見直してみたい。

### (1) 中上部更新統下総層群の堆積シーケンスと化石密集層の形成環境

下総層群は、淡水・汽水域の泥層と海成砂層の繰り返しからなる地層群である。これらが氷河性海水準変動によって形成されたものであることは、さまざまな層準に含まれる化石密集層中の貝類化石群の示す水深の増大と海中気候の温暖化傾向などから、古くより認識してきた。

これらの中で厚さ・化石量が卓越するのは、トップラップ型コンデンス化石層である。例えば、木下層や清川層にしばしば見られる *Mactra chinensis* (バカガイ) 密集層や、上泉層・藪層などの堆積シーケンス上部にしばしば発達する化石密集層である(徳橋・遠藤, 1984; 徳橋・近藤, 1989)。これらの具体的な形成過程は、ストームの堆積作用であったり、潮流による選択的運搬であったりとさまざまである。しかし、個々のイベントによって形成され

た化石層はさらに融合・複合して化石密集層を形成しており、海進海退サイクルの中で見れば、トップラップに伴うコンデンス化石層として位置づけられる。トップラップ型コンデンス化石層は、メリーランドの中新統にも、ワンガヌイ・ベースンの鮮新ー更新統にも具体的な例があまりなく、下総層群の特徴である。これは下総層群が古東京湾という内湾に堆積したためと考えたい。外洋に面した海域では、海退期に高海水準期堆積体の上部は削られやすく、地層として残りにくい。実際、ワンガヌイ・ベースンのキャッスルクリフ海岸露頭のシーケンスでは、高海水準期堆積体の中で、上方浅海化を示す部分の記録があり残っておらず、半ば固結した内湾成泥層が、潮間帯に生息する穿孔性二枚貝 *Barnea similis* によって、穿孔されている。すなわち、ここでは外浜の砂が海退期の地層にはまったく記録されていない。

一方、海進期に形成された化石層は比較的薄いが、側方への連続性がよく、鍵層としてよく使われている。また、トップラップ型のものとは異なり、化石の産状が自生または同相的なものが多いので、古生態や古環境の復元にはきわめて重要である。地蔵堂層では、海進期堆積体が高海水準期堆積体に比べてはるかに薄く、非対称シーケンスを形成しており、オンラップー・バックラップ複合型コンデンス化石層を形成している。地蔵堂層中の化石密集層としてよく知られてきた、泉谷化石層(帶)・地蔵堂化石層(帶)はともにこの複合型コンデンス化石層であり、海進の初期から末期までの環境変化を記録している地層である(鎌滝・近藤, 1997)。

## (2) 中部更新統大桑層の堆積シーケンスと化石密集層の形成環境

大桑層の中段には、陸棚で形成された厚さ数mの堆積シーケンスが見られる(北村・近藤, 1990; Kitamura, et al., 1994; 北村, 1995; Beu and Kitamura, 1998; Kitamura, 1998)。ここでは、古地磁気層序、各種の化石層序データがよくそろっていて、このシーケンスが、ミランコビッチ・サイクルの地軸傾斜の変動周期に相当する、およそ4万年周期であることが明らかになっている。それぞれの堆積シーケンスは侵食面で境され、その基底部には化石密集層がある。この化石密集層を除くと、シーケンスの大部分は貝類化石をまばらに含む、生物攪拌を受けた細粒砂から砂質シルトによって構成されている。この散在型の化石群を詳細に調べると、この一見単調な細粒砂や砂質シルトの地層の中に海進と海退が明瞭に記録されており、それぞれ海中気候の温暖化と寒冷化とに連動していることも明らかにされている。このことから、下総層群の場合と同様、これらの地層が氷河性海水準変動の影響下で形成されたことは間違いない。シーケンス基底部に見られる化石密集層は、大桑万願寺動物群と呼ばれる寒冷水域の動物群のうち、上部浅海帯の群集を主体としており、海進期初期の堆積物であることがわかり、オンラップ型の化石層であると考えられる。

これらの化石密集層の形成メカニズムについては、まだ詳細な検討は行われていないが、さまざまなものがありそうである。内部構造に長期的な環境変化を記録していると考えられるものもあり、これらは複合型またはコンデンス化石層になる。しかし、厚さは最大でも70cm程度であり、わずか数cmにすぎないものもある。また、化石密集層をなすのは主に内在生の二枚貝類であり、表在種はきわめて少ない。しかも、貝殻の表面にも付着や穿孔の痕跡は見られず、砂泥底に埋もれていた遺骸がストームの堆積作用によって洗い出され、すぐにまた埋没したことが推定できる。すなわち、これらの化石密集層の中にはストームというイベントに際して形成された、单一あるいは複合型の化石層もあると考えられる。

## おわりに

化石密集層の形成過程や分布様式を理解するために、時代、地層の違いを問わず、共通した形成要因やタフォノミー特性で類型化する試みは、これまで多くの研究者によってなされてきた。シーケンス層序学の進展とともにあって、化石密集層の形成過程や分布様式はシーケンス層序復元に重要な情報を提供するし、逆にシーケンス層序モデルから大スケールの4次元的な視点で化石密集層を見直すことができるようになったといってよいだろう。小論ではKidwellらの研究を中心に、化石密集層の成因的類型化やシーケンス層序的な位置づけをまとめてきたが、この分野はまだ進展途上でもあり、多くの研究の余地を残している。したがって、化石密集層のすべてを網羅したものではないだろうし、すべてを説明し尽くせるものではない。

化石密集層を構成する硬組織を供給する生物は地質時代を通じて大きく進化している。例えば、Kidwell and Brenchley (1994) は、オルドビスーシルル紀、ジュラ紀、新第三紀の貝殻層の層厚と組成を比較し、新第三紀のものがはるかに厚く複雑であることを指摘した。彼らはこの傾向を軟体動物の殻の生産性と殻強度に帰因するものとした。古生代の腕足類の殻は相対的に薄く、微細構造の上で破片化しやすい。そして、希な例外はあるが、厚さ20cmを越える貝殻層は極めて少ないという。したがって、地質時代を通じた生態系の進化、特に浅海の有殻生物の殻生産能力やその進化に対応した化石記録を我々は見ていることになる。

最近では、進化・絶滅などの生物事変と地球環境変化との関連性を探求する研究例や研究者が数え切れない。堆積シーケンスは相対海水準の変化によって形成されるので、海水準やテクトニクスという外的環境要因が生物進化を制御していることは疑いないだろう。しかし、それが化石密集層にどう反映しどう記録されるかは、十分わかっているとはいい難い。今後の研究課題であることを指摘しておきたい。

## まとめ

1. 化石密集層の形成要因やタイプ、そしてそれらの堆積シーケンス中での分布について、この数年、日本やニュージーランドで進められつつあるケーススタディーを参照しながら、Kidwell (1991a-c, 1993a-c), Brett et al. (1997) を中心にレビューした。
2. 化石密集層の形成要因として重要なのは堆積速度と遺骸の供給速度である。堆積速度の減少はとりわけ重要であり、その化石密集過程には、吹き分け、洗掘、全通過、動的通過、堆積物欠乏がある。
3. 形成要因や過程の違いから化石密集層は大きく、单一イベント化石層、複合化石層、コンデンス化石層、ラグ化石層に4分できる。これらはお互いに複合している場合もあるが、化石層の内部構造、層序的位置などで異なる特徴をもつ。
4. コンデンス化石層にはシーケンス層序モデルの端末型にしたがって、オンラップ型、バックラップ型、ダウンラップ型、トップラップ型が認められる。さらに海水準上昇速度の大きい場合や沖合側、また堆積速度が小さいシーケンスの場合に、前二者が複合収束したオンラップ-バックラップ複合型も認められる。
5. これらの化石密集層のそれぞれは、1回の相対海水準変動サイクルで形成された堆積シーケンス(サイクル)の中で、特定の堆積体や層準・場所に分布する。海進期堆積体基底に含まれるラグ化石層とオンラップ型コンデンス化石層は、多くの場合シーケンス基底に認められる。海進期後期から高海水準期初期の最大海氾濫面を前後して、バックラップ型とダウンラップ型コンデンス化石層がシーケンス中部に認められる。そして、高海水準期後期には单一イベント化石層、複合

- 化石層、トップラップ型コンデンス化石層がシーケンス上部に含まれる。
6. ニュージーランドと日本の第四系、北米東部の第三系でのケーススタディから、Kidwell (1991c) が示したコンデンス化石層のシーケンス層序モデルと基本的に共通した化石密集層の分布様式が確認されてきている。ただし、氷河性海水準変動に帰因するシーケンスでは周期が短く海水準上昇速度も大きいために、固有の分布特性を持っている。

### 謝 詞

小論をまとめるに当たり、筑波大学地球科学系小笠原憲四郎教授には本論集への投稿の機会を与えていただいた。ドイツの Würzburg 大学 Franz T. Fürsich 教授には種々の討論をしていただき、英文要旨は茨城大学理工学研究科の Andrew Martin 氏に校閲をお願いした。文献収集に当たっては早稲田大学教育学部地学専修三次徳二氏にはご協力を受けた。また、査読に際して、大阪学院大学鎮西清高教授にご尽力いただいた。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費（基盤 C、課題番号 10640446、代表者：安藤寿男；基盤 C、課題番号 09640556、代表者：近藤康生）によった。以上の方々、機関に感謝の意を表したい。

### 文 献

- Abbott, S.T., 1997, Mid-cycle condensed shell beds from mid-Pleistocene cycloths, New Zealand: implications for sequence architecture. *Sedimentology*, **44**, 805-824.
- Abbott, S.T., 1998, Transgressive systems tracts and onlap shellbeds from mid-Pleistocene sequences, Wanganui Basin, New Zealand. *Jour. Sed. Res.*, **68**, 253-268.
- Abbott, S.T. and Carter, R.M., 1994, The sequence architecture of mid-Pleistocene (c. 1.1-0.4 Ma) cycloths from New Zealand: facies development during a period of orbital control on sea level cyclicity. In de Boer, P.L. and Smith, D. G., eds., *Orbital forcing and cyclic sequences*. Intern. Assoc. Sediment. Spec. Publ., no. 19, 367-394.
- Abbott, S.T. and Carter, R.M., 1997, Macrofossil associations from Mid-Pleistocene cycloths, Castlecliff section, New Zealand: implications for sequence stratigraphy. *Palaios*, **12**, 188-210.
- Aigner, T., 1985, *Storm depositional systems*. Lecture Notes in Earth Sciences, **3**, Springer-Verlag, Berlin, 174p.
- Allison, P.A. and Briggs, D.E.G., eds., 1991, *Taphonomy. Releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, 560p.
- 安藤寿男, 1990, 堆積シーケンスとその境界の認定と意義. 地学雑誌, **99**, 247-261.
- 荒戸裕之, 1993, シーケンス層序学と石油の探鉱（その1：概観）。石油の開発と備蓄, **26**, 97-114.
- 荒戸裕之, 1994a, シーケンス層序学と石油の探鉱（その2：解析手法）。石油の開発と備蓄, **27**, 86-104.
- 荒戸裕之, 1994b, シーケンス層序学と石油の探鉱（その3：展望）。石油の開発と備蓄, **27**, 58-82.
- Baird, G.C. and Brett, C.E., 1991, Submarine erosion on the anoxic seafloor: stratinomic palaeoenvironmental and temporal significance of reworked pyrite-bone deposits. In Tyson, R.V. and Pearson, T.H., eds., *Modern and ancient continental shelf anoxia*. Geol. Soc. Spec. Publ., **58**, 233-258.
- Banerjee, I. and Kidwell, S.M., 1991, Significance of molluscan shell beds in sequence stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous Mannville Group of Canada. *Sedimentology*, **38**, 913-934.
- Beckvar, N. and Kidwell, S.M., 1989, Hiatal shell concentrations, sequence analysis, and sealevel history of a Pleistocene coastal alluvial fan, Punta Chueca, Sonora. *Lethaia*, **21**, 257-270.
- Beu, A. and Kitamura, A., 1998, Exposed coasts vs sheltered bays: contrast between New Zealand and Japan in the molluscan record of temperature change in Plio-Pleistocene cycloths. *Sediment. Geol.*, **122**, 129-149.
- Brett, C.E., 1995, Sequence stratigraphy, biostratigraphy, and taphonomy in shallow marine environments. *Palaios*, **10**, 597-616.
- Brett, C.E., 1998, Sequence stratigraphy, paleoecology, and evolution: biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaios*, **13**, 214-262.
- Brett, C.E. and Baird, G.C., 1986, Comparative taphonomy: a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios*, **1**, 207-227.
- Brett, C.E., Baird, G.C. and Speyer, S.E., 1997, Fossil Lagerstätten: stratigraphic record of paleontological and taphonomic events. In Brett, C.E. and Baird, G.C., eds., *Paleontological events. Stratigraphic, ecological and evolutionary implications*. Columbia Univ. Press, New York, 3-40.
- Brett, C.E. and Seilacher, A., 1991, Fossil Lagerstätten: a taphonomic consequence of event sedimentation. In Eisele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 283-297.
- Donovan, S.K., ed., 1991, *The processes of fossilization*. Belhaven Press, London, 303p.
- Emery, D. and Myers, K.J., eds., 1996, *Sequence stratigraphy*. Blackwell Sci. Ltd., Oxford, 297p.
- Fleming, C.A., 1953, The geology of Wanganui subdivision, Waverley and Wanganui sheet districts (N137-138). *New Zealand Geol. Surv. Bull.*, **52**, 1-362.
- Fürsich, F.T., 1978, The influence of faunal condensation and mixing on the preservation of fossil benthic communities. *Lethaia*, **11**, 243-250.
- Fürsich, F.T., 1995, Shell concentrations. *Eclogae geol. Helv.*, **88**, 643-655.
- Fürsich, F.T. and Aberhan, M., 1990, Significance of time-averaging for palaeocommunity analysis. *Lethaia*, **23**, 143-152.
- Fürsich, F.T. and Oschmann, W., 1986, Storm shell beds of *Nanogyra virgula* in the upper Jurassic of France. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **172**, 141-161.
- Fürsich, F.T. and Oschmann, W., 1993, Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of Kachchh, western India. *Jour. Geol. Soc. London*, **150**, 169-185.
- Fürsich, F.T. and Pandey, D.K., 1999, Genesis and environmental significance of Upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **145**, 119-139.
- Haq, B.U., 1991, Sequence stratigraphy, sea-level change, and significance for the deep sea. In Macdonald, I.M. ed., *Sedimentation, tectonics and eustasy. Sea-level changes at active margins*. Intern. Assoc. Sediment. Spec. Publ., no. 12, 3-39.
- 保柳康一・西村瑞穂, 1992, シーケンス層序学—基本概念とその可能性—（その1）基本概念。地球科学, **46**, 169-176.
- 保柳康一・西村瑞穂・高野 修, 1994, シーケンス層序学—基

- 本概念とその可能性—(その2) 堆積地質学への応用. 地球科学, **48**, 159-170.
- 井尻正二・藤田至則, 1949, 化石床 (fossil enclosure) —化石の成因, 特に化石の堆積機構の研究. 地球科学, **1**, 29-37.
- Hunt, D. and Tucker, M.E., 1992, Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base level fall. *Sediment. Geol.*, **81**, 1-9.
- 鎌滝孝信・近藤康生, 1997, 中・上部更新統の地蔵堂層にみいだされた水河性海水準変動による約2万年または4万年周期の堆積シーケンス. 地質雑誌, **103**, 747-762.
- Kamp, P.J.J. and McIntyre, A.P., 1998, The stratigraphic architecture of Late Pliocene (2.8-2.4 Ma) symmetrical shelf sequences, western Wanganui basin, New Zealand. *Sediment. Geol.*, **122**, 53-67.
- Kamp, P.J.J. and Naish, T., 1998, Forward modeling of the sequence stratigraphic architecture of shelf cyclothems: application to Late Pliocene sequences, Wanganui basin (New Zealand). *Sediment. Geol.*, **116**, 57-80.
- Kidwell, S.M., 1982, Time scales of fossil accumulation: patterns from Miocene benthic assemblages. *Proc. 3rd. North Amer. Paleont. Conv.*, **1**, 295-300.
- Kidwell, S.M., 1984, Outcrop features and origin of basin margin unconformities in the lower Chesapeake Group (Miocene), Atlantic Coastal Plain. In Schlee, J.S., ed., *Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., **36**, 37-58.
- Kidwell, S.M., 1986, Models for fossil concentrations: paleobiologic implications. *Paleobiology*, **12**, 6-24.
- Kidwell, S.M., 1988, Taphonomic comparison of passive and active continental margins: Neogene shell beds of the Atlantic coastal plain and northern Gulf of California. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **63**, 201-223.
- Kidwell, S.M., 1989, Stratigraphic condensation of marine transgressive records: origin of major shell deposits in the Miocene of Maryland. *Jour. Geol.*, **97**, 1-24.
- Kidwell, S.M., 1991a, The stratigraphy of shell concentrations. In Allison, P.A. and Briggs, D.E.G., eds., *Taphonomy. Releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, 211-290.
- Kidwell, S.M., 1991b, Taphonomic feedback (live/dead interactions) in the genesis of bioclastic beds: keys to reconstructing sedimentary dynamics. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 268-281.
- Kidwell, S.M., 1991c, Condensed deposits in siliciclastic sequences: expected and observed features. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 682-695.
- Kidwell, S.M., 1993a, Influence of subsidence on the anatomy of marine siliciclastic sequences and on the distribution of shell and bone beds. *Jour. Geol. Soc. London*, **150**, 165-167.
- Kidwell, S.M., 1993b, Taphonomic expressions of sedimentary hiatus: field observations on bioclastic concentrations and sequence anatomy in low, moderate and high subsidence settings. *Geol. Rundschau*, **82**, 189-202.
- Kidwell, S.M., 1993c, Patterns of time-averaging in shallow marine fossil assemblages. In Kidwell, S.M. and Behrensmeyer, A.K., eds., *Taphonomic approaches to time resolution in fossil assemblages*. Paleont. Soc. Shortcourse, no. 6, 275-300.
- Kidwell, S.M. and Aigner, T., 1985, Sedimentary dynamics of complex shell beds: implications for ecologic and evolutionary patterns. In Bayer, U. and Seilacher, A., eds., *Sedimentary and evolutionary cycles*. Lecture notes in earth sciences. Springer, 382-395.
- Kidwell, S.M. and Bosence, D.W.J., 1991, Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In Allison, P.A. and Briggs, D.E.G., *Taphonomy. Releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, 151-209.
- Kidwell, S.M. and Brenchley, P.J., 1994, Patterns in bioclastic accumulation through the Phanerozoic: changes in input or in destruction? *Geology*, **22**, 1139-1143.
- Kidwell, S.M. and Jablonski, D., 1983, Taphonomic feedback, ecological consequence of shell accumulation. In Tevesz, J.S. and McCall, P.L., eds., *Biotic interactions in Recent and fossil benthic communities*. Plenum Press, New York, 195-248.
- Kidwell, S.M. and Holland, S.M., 1991, Field description of coarse bioclastic fabrics. *Palaios*, **6**, 426-434.
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T. and Aigner, T., 1986, Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, **1**, 228-238.
- 北村晃寿, 1994, 下部更新統大桑層上部に見られる水河性海水準変動による堆積シーケンス. 地質雑誌, **100**, 463-476.
- 北村晃寿, 1995, 日本海第四紀堆積物のシーケンス層序学的解析への生層序学の貢献 —時間面としての暖流系種の消長—. 地質学論集, no. 45, 110-117.
- Kitamura, A., 1998, Glaucony and carbonate grains as indicators of the condensed section: Omma Formation, Japan. *Sediment. Geol.*, **122**, 151-163.
- 北村晃寿・近藤康生, 1990, 前期更新世の水河性海水準変動による堆積サイクルと貝化石群集の周期的变化 —模式地の大桑層中部の例. 地質雑誌, **96**, 19-36.
- Kitamura, A., Kondo, Y., Sakai, H., Horii, M., 1994, Cyclic changes in lithofacies and molluscan content in the early Pleistocene Omma Formation, central Japan related to the 41,000-year orbital obliquity. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **112**, 345-361.
- Kondo, Y., 1989, Faunal condensation in early phases of glacio-eustatic sea-level rise, found in the middle to late Pleistocene Shimosa Group, Boso Peninsula, central Japan. In Taira, A. and Masuda, F., eds., *Sedimentary facies in the active plate margin*. Terra Sci. Publ., Tokyo, 197-212.
- 近藤康生, 1996, ニュージーランドの第四紀堆積サイクルに記録された古環境変動と底生動物群集の変遷:特に、コンデンスセクションの群集に注目して. 地学雑誌, **105**, 506-511.
- Kondo, Y., 1997, Inferred bivalve response to rapid burial in a Pleistocene shallow-marine deposits from New Zealand. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **128**, 87-100.
- 近藤康生, 1998, 海進海退サイクルの古生態学とタフォノミー. 化石, no. 64, 54-60.
- Kondo, Y., Matsui, S. and Chinzei, K., 1992, Taphonomy and paleoecology of the Pleistocene Molluscs in the Boso Peninsula (B22). In Kato, H. and Noro, H., eds., *29th IGC field trip guidebook. Vol. 2: Island Arcs: Cenozoic stratigraphy and tectonics of Japan*. Geol. Surv. Japan, 99-108.
- Kondo, Y., Abbott, S.T., Kitamura, A., Kamp, P.J.J., Naish, T., Kamataki, T. and Saul, G.S., 1998, The relationship between shellbed type and sequence architecture: examples from Japan and New Zealand. *Sediment. Geol.*, **122**, 109-127.
- Loutit, T.S., Hardenbol, J., Vail, P.R. and Baum, G.R., 1988, Condensed sections: the key to age determination and correlation of continental margin sequences. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St. C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., no. 42, 183-213.
- Martin, R.E., 1999, *Taphonomy. A process approach*.

- Cambridge Paleobiology Ser., no. 4, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 508p.
- 増田富士雄, 1993, シーケンス層序学: 我が国における陸域地質への適用例. 石油技術協会誌, **58**, 292-310.
- 増田富士雄, 1997, シーケンス層序学入門. 化石, no.63, 32-39.
- 増田富士雄・徳橋秀一, 1994, Sequence stratigraphy: 地層学にもたらした影響と今後のへの展望. 石油技術協会誌, **59**, 4-17.
- Mitchum, R. M., Vail, P.R., Jr. and Sangree, J.B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In Payton, C. E., ed., 1977, *Seismic stratigraphy -application to hydrocarbon exploration*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., no.26, 117-133.
- Mitchum, R.M. and van Wagoner, 1991, High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sediment. Geol.*, **70**, 131-160.
- Naish, T. and Kamp, P.J.J., 1997, Sequence stratigraphy of sixth-order (41 m.y.) Pliocene-Pleistocene cycloths, Wanganui basin, New Zealand: a case for the regressive systems tract. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **109**, 978-999.
- Naish, T. and Kamp, P.J. J., 1997, Foraminiferal depth paleoecology of Late Pliocene shelf sequences and systems tracts, Wanganui Basin, New Zealand. *Sediment. Geol.*, **110**, 237-255.
- Norris, R.D., 1986, Taphonomic gradients in shelf fossil assemblages: Pliocene Purisima Formation, California. *Palaios*, **1**, 256-270.
- Nummedal, D. and Swift, D.J.P., 1987, Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. In Nummedal, D., Pilkey, O.H. and Howard, J.D., eds., *Sea-level fluctuation and coastal evolution*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., no.41, 241-260.
- Nummedal, D., Riley, G.W. and Templett, P.L., 1993, High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies. In Posamentier, H., Summerhayes, C.P., Haq, B.U. and Allen, C.P., eds., *Sequence stratigraphy and facies associations*. Intern. Assoc. Sediment. Spec. Publ., no.18, 55-68.
- Ogasawara, K., 1977, Paleontological analysis of Omma Fauna from Toyama-Ishikawa Area, Hokuriku Province, Japan. *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, 2nd. Ser., **47**, 43-156.
- 岡田博有, 1992, 東層層序学: 日本における Sequence Stratigraphy の確立. 堆積学研究会報, no.36, 5-8.
- Parsons, K.M. and Brett, C.E., 1991, Taphonomic processes and biases in modern marine environments: an actuarial perspective on fossil assemblage preservation. In Donovan, S.K., ed., *The processes of fossilization*. Belhaven Press, London, 22-65.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T. and Vail, P.R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition I -conceptual framework. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St. C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., no.42, 109-124.
- Reynolds, D.J., Steckler, M.S. and Coakley, B.J., 1991, The role of the sediment load in sequence stratigraphy: the influence of flexural isostasy and compaction. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, B4, 6931-6949.
- 齊藤文紀, 1989, 陸棚堆積物の区分と暴風型陸棚における堆積相. 地学雑誌, **98**, 164-179.
- 齊藤文紀・保柳康一・伊藤慎編, 1995, シーケンス層序学: 新しい地層觀を目指して. 地質学論集, no.45, 249p.
- 佐藤慎一・下山正一, 1992, 斧足類化石群集を用いた下総層群中部の古環境解析. 地質雑誌, **98**, 529-545.
- Seilacher, A., 1991, 3.11 Taphonomy of Fossil-Lagerstätten. 3.11.1 Overview. In Briggs, D.E.G. and Crowther, P.R., *Palaeobiology. A synthesis*. Blackwell Sci. Publ., Oxford, 266-270.
- Seilacher, A., Reif, W.E. and Westphal, F., 1985, Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil Lagerstätten. In Whittington, H.B. and Conway Morris, S., eds., *Extraordinary biotas: their ecological and evolutionary significance*. Phil. Trans. Royal Soc. London, **B311**, 5-23.
- Speyer, S.E. and Brett, C.E., 1988, Taphofacies models for epeiric sea environments: Middle Paleozoic examples. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **63**, 225-262.
- Speyer, S.E. and Brett, C.E., 1991, Taphofacies controls: background and episodic processes in fossil assemblage preservation. In Allison, P.A. and Briggs, D. E.G., *Taphonomy. Releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, 502-545.
- Swift, D.J.P. and Thorne, J.A., 1991, Sedimentation on continental margins, IV: lithofacies and depositional systems. In Swift, D.J.P., Oertel, G.F., Tillman, R.W. and Thorne, J.A., eds., *Shelf sand and sandstone bodies*. Spec. Publs. Intern. Assoc. Sediment., no.14, 89-152.
- 徳橋秀一, 1995, 海水準変動と堆積作用: シーケンス層序学序論. 地質ニュース, no.487, 26-35.
- 徳橋秀一・遠藤秀典, 1984, 姉崎地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅). 地質調査所, 136p.
- 徳橋秀一・近藤康生, 1989, 下総層群堆積サイクルと堆積環境に関する一考察. 地質雑誌, **95**, 933-951.
- Vail, P.R., 1987, Seismic stratigraphy interpretation procedure. In Bally, A.W., ed., *Atlas of seismic stratigraphy Part I. Studies in Geol. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, no. 27, 1-9.
- Vail, P.R., Jr., Todd, R.G. and Sangree, J.B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 5: chronostratigraphic significance of seismic reflections. In Payton, C.E., ed., 1977, *Seismic stratigraphy -application to hydrocarbon exploration*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., no.26, 99-116.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Curz, C., 1991, The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology -an overview. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and events in stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 617-659.
- van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. and Hardenbol, J., 1988, An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St. C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and van Wagoner, J.C., eds., *Sea-level changes: an integrated approach*. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Publ., no.42, 39-45.
- van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campion, K.M. and Rahmani, V.D., 1990, Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Methods in Exploration Ser.*, **7**, 1-55.

## (要 旨)

安藤寿男・近藤康生, 1999, 化石密集層の形成様式と堆積シーケンス 一化石密集層は堆積シーケンス内でどのように分布するのかー. 地質学論集, 第54号, 7-28. (Ando, H. and Kondo, Y., 1999, Shell concentrations and depositional sequences: How shell concentrations are distributed within depositional sequences?. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 54, 7-28.)

化石密集層は、単一イベント化石層、複合化石層、コンデンス化石層、ラグ化石層に4分できる。これらのうち、コンデンス化石層、すなわち、堆積速度の減少による化石密集層の形成過程には、吹き分け、洗掘、全通過、動的通過、堆積物欠乏がある。また、コンデンス層には地層の端末型に準じた、オンラップ型、バックラップ型、ダウンラップ型、トップラップ型が区別できる。さらに海水準上昇速度の大きい場合にはオンラップ-バックラップ複合型も認められる。これらは、堆積シーケンス（サイクル）の中で、特定の堆積体や層準・場所に分布する。海進期堆積体基底に含まれるラグ化石層とオンラップ型化石層は多くの場合サイクル基底に認められる。海進期後期から高海水準期初期の最大海氾濫面形成期を前後して、バックラップ型とダウンラップ型がサイクル中部層として形成される。そして、高海水準期後期には単一イベント層、複合層、トップラップ型が形成され、サイクル上部に含まれる。ニュージーランドと日本の第四系、北米東部の第三系の研究例では、コンデンス化石層のシーケンス層序モデルと基本的に共通した分布様式が確認されている。