Shazam 層序学をボーリングデータベース解析へ適用する試み

— 大阪平野の表層地質研究を例に —

増田 富士雄* 佐藤 智之**
伊藤 有加*** 櫻井 皆生****

Preliminary Note on a New Shazam Stratigraphy Applied to a Borehole Database Analysis of Subsurface Geology in the Osaka Plain

Fujio MASUDA*, Tomoyuki SATO**,
Yuka ITO*** and Minao SAKURAI****

[Received 14 February, 2013; Accepted 24 June, 2013]

Abstract

We propose Shazam stratigraphy as a new analytical method based on facies analysis and sequence stratigraphy. This method is applied to a recently developed borehole database and subsurface geology in the Osaka Plain. Using the method, the shapes of lithofacies boundaries in subsurface sections are optimized for sedimentary facies and changes. The optimized boundary allows interpretation of seismic sections. The result is better recognition and reconstruction of depositional systems, geomorphological evolution, and tectonics. Irregular sequence boundaries, flat transgressive ravinement surfaces, and sawtooth downlap surfaces of the prograding depositional system are key boundaries for this method.

Key words : Shazam stratigraphy, drilling database, Osaka Plain, depositional systems, sequence boundary, ravinement surface, downlap surface

キーワード : シャザーム層序学, ボーリングデータベース, 大阪平野, 堆積システム, シークエンス境界, 海進ラビーンメント面, 前進堆積体のダウンラップ面

I. はじめに

近年, 地質ボーリングのデータベース, すなわち地質地盤情報データベースが, 国の機関をはじめ

め地方自治体や大学や各種研究機関あるいは学会などで, 全国規模, あるいは都道府県や地域などを対象に整備されている。例えば, KuniJiban (国土交通省, ウェブ公開), 港湾版土質データ

* 同志社大学理工学部

** 産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループ

*** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

**** 同志社大学理工学研究科

* Department of Environmental Systems Science, Doshisha University, Kyotanabe, 610-0321, Japan

** IGG, Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba, 305-8567, Japan

*** Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa, 227-8568, Japan

**** Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, 610-0321, Japan

ベース（港湾空港技術研究所，CD-ROM 配布），地盤工学会（北海道地盤情報データベース，北海道支部，CD-ROM 配布；みちのく GIDAS，東北支部，ウェブ公開；関東の地盤，関東支部，CD-ROM 配布），関西圏地盤情報データベース（関西圏地盤情報ネットワーク・関西圏地盤情報協議会，CD-ROM 配布），ほくりく地盤情報システム（北陸地盤情報活用協議会，ウェブ公開），九州地盤情報共有データベース（九州地盤情報共有協議会）のほか，日本原子力研究開発機構，新エネルギー・産業技術総合開発機構，産業技術総合研究所などの研究機関でデータベースは公開されている。さらに，群馬県，栃木県，埼玉県，千葉県，東京都，神奈川県，三重県，鳥根県，岡山県，徳島県，熊本県，あるいは，旭川市，八戸市，東京都杉並区・新宿区・世田谷区，川崎市，横浜市，岡崎市，名古屋市，鈴鹿市，神戸市，高知市などの自治体でも，ウェブ公開されている。これらは，建築確認申請や公共工事などで得られた土質ボーリングデータがもとになっている。

地盤情報データベースは，応用地質学や水文地質学，あるいは地盤工学などの応用分野で開発され，さまざまな用途で活用されている（例えば，小池ほか，1989；KG-NET・関西圏地盤研究会，2007）。この地盤情報データベースは学術的な地層研究に利用することができるだろうか。多数のボーリングデータを容易に入手できるというデータベースの利点は，例えば，露頭が少ない沖積層の研究などには有効であろう。すでに，東京都港湾局（2001），石綿（2004）や三田村・橋本（2004）は，地盤情報データベースから沖積層の基底地形を 3 次元で復元しており，山口ほか（2006），江藤ほか（2008）や石原ほか（2013）は，データベースを用いて地下地質の 3 次元分布を解析するなど，その利点を生かした学術研究が報告されている。

これまでのデータベースを利用した地層の解析に，近年発展してきた地層学の知識が適用された例は少ない。地層を研究する学問は，1970 年代から 1980 年代に，地層や堆積物の観察から堆積環境を推定する堆積相解析（Selley, 1970; Walk-

er, 1984）が，1980 年代末から 1990 年代に，地層の重なり様式を相対的海水準変動との関係で考えるシーケンス層序学（Van Wagoner *et al.*, 1988; Vail *et al.*, 1991）が導入され，急速に発展した。さらに沖積層を対象に放射性炭素同位体年代を使ったダイナミック地層学（増田，2007）は，地層の累重様式の解明に大きく貢献した。こうした新しい学問上の成果はデータベースに基づいた地層の解析に，どの程度導入できるだろうか？ここでは，関西圏地盤情報データベースを用いて，地層の解析を行う方法，Shazam 層序学を具体例で紹介してみよう。

II. 地盤情報データベース

関西圏地盤情報データベース（関西圏地盤情報ネットワーク・関西圏地盤情報協議会 2011）を利用することで，任意の方向での地質柱状図断面をつくることができる。この断面図の解析に有効な手法を考案してみた。

関西圏地盤情報データベースは，1980 年代後半という早い時期から開発され（岩崎ほか，1990），多数（2007 年時点で約 48,000 本：KG-NET・関西圏地盤研究会，2007）のボーリングデータのデータベース化が行われている。このデータベースは学術的な研究目的には，申請して許可されれば利用できるようになっている。

データベースを利用する最大の利点は，多数のデータが入手でき，地質柱状図断面を容易につくることができることである。地図上のボーリング地点を連続して選択すれば，ボーリング柱状図断面を表示できるのである。

学術研究に用いる際の弱点は，1 本の柱状図から得られる情報量が，岩相，層厚，標高（深度），*N* 値などで，野外観察などに比べて少なく，データの質も一定していないし，信頼性も保証できないことである。とくに，公開に先立ってデータベース化される際に，データが“丸められ”ており，例えば，砂層は 1 種類で，それが粗粒砂か細粒砂かの区別もなく，産出化石や火山灰層の記載もない。

III. Shazam 層序学

地盤情報データベースを用いた地質柱状図断面の解析に、ここで提唱する Shazam (シャザーム: sha'zæm) 層序学を用いてみよう。

Shazam 層序学は Shazam 線を地質柱状図断面に描き、地層を解析する方法である。Shazam 線とは、地質断面図上で堆積相の境界に用いられる鋸歯状の境界線で、接する堆積相 (層相) が指交関係にあり漸移していることをあらわす。早くは Rich (1951) がデルタシステムの断面図に用いている。Shazam とは、「えいやっ」とか「そらっ」という意味である。断面図上での堆積相境界線は不確実さをつねにもっているのです、その線は Shazam ということになる。従来、境界線はデータが得られた地点間を滑らかな曲線や直線で内挿するのが普通であった。しかし、堆積システムによっては、例えば、デルタのフォーセット (前置層) とボトムセット (底置層) との堆積相境界は、直線ではなく鋸歯状になることが、全面露頭による観察と研究 (例えば, Willis *et al.*, 1999; Chidsey, 2001) からわかってきた。これは同時異相の場合などで、等時間面と堆積相境界が斜交しているためにおこる。そのような境界線は直線よりギザギザの鋸歯状に描く方がより真実に近い、という解釈に基づいている。線のギザギザを、現世の地形や層理面の走向・傾斜などから得た等時間面の傾きや、岩相の重なり (デルタシステムの場合は上方粗粒化ユニットの分布) から推定することで、より確実度の高い境界線を復元することができると考えている。そのため、同じデータ量からより詳細な復元や解析を目指すことが可能になる。これが Shazam 線を描く Gani and Bhattacharya (2005) の主張である。

ここで提案する層序学, Shazam 層序学では、この Shazam 線をさらに広い意味に用いて、「地質断面に描く堆積相 (層相) 境界線」に対して使う。すなわち、Shazam 線は Shazam 層相境界線ということになる。さらに、この層序学では、Shazam 線がこれまで用いられてきた、鋸歯状だけではなく、形成過程によっては曲線や直線にな

る。Shazam 線がどのような形になるかは、その境界面がどのような岩相からなり、どのような地形や営力のもとでつくられ、あるいはどのような過程で変形したか、などによって決まる。したがって、Shazam 線を描くときには、地層学、堆積学、あるいは地形学の知識が必要になる。

IV. Shazam 層序学の手順

ここで、データベースを利用した Shazam 層序学の手順を述べる。

1) 岩相境界線を柱状断面図に描く

データベースからつくったボーリングコアの柱状図断面に岩相境界線を描く。隣接する柱状図間で連続する (と思われる) 岩相境界をトレースする。このときに重要なことは、短い線で描くこと、無理して側方に繋がないことである (図 1A)。

こうして岩相境界線を描いた柱状断面図には、音響断面図に対する解析と同じようなセンスが適用できる。音響断面における反射面は連続・不連続が明確だが、ここで描いた岩相境界は「連続する!」と推定して引いた線にすぎないので、精度は低い。しかし、柱状図の間隔が狭く高密度になるほど、精度は高くなる。音響断面図での反射面が岩相境界であることが最も多い (Emery and Myers, 1996) ということからすると、高密度で多数の柱状図からなる断面図に岩相境界線を描くことで、音響断面図を解析するようなセンスの解析ができるというわけである。

岩相境界線を描くときには、次のような注意が必要である (増田ほか, 2010)。(1)「確実」と思われる線と「不確実」と思われる線を区別する。確実は実線で、不確実は破線や点線で描く。(2) 岩相境界を、「漸移」「明瞭」「侵食」あるいは断層などの構造的な境界であることを意識して描く。これは堆積相解析における柱状図の表現法としても、重要なことである (増田, 1988, 1989)。(3) 岩相によって、斜面堆積物、谷埋堆積物、さらに平坦地の堆積物で、重なり様式や基底面や上面の形がある程度決まるので (図 2)、堆積環境が推定できるならそれを意識して岩相境界を描く。例えば、礫層の基底は下位の層を谷状に侵食する

図 1 地質柱状断面図に Shazam 線を描いた模式的な例。

A: 岩相境界線の記入, B: シーケンス境界 (SB), 海進ラビメント面 (TRS) と, 前進堆積体のダウンラップ面 (DPS) の加筆。

Fig. 1 Example of geological columnar sections with Shazam lines (A) and bounding surfaces of strata (B). SB: sequence boundary, TRS: transgressive ravinement surface, and DPS: downlap surface of prograding depositional system.

図 2 岩相境界線を描く場合に考慮する岩相の違いによる単層や地層の分布形態の模式図。

礫, 砂, 泥によって, 平面上, 斜面上, チャネル内での形態が異なる。

Fig. 2 Geometry and distribution pattern of deposits and/or strata with different lithofacies.

Distribution on flat surface, on slope or in channel change shape by lithology of gravel, sand and mud.

ことが多く, 上面の形も上に凸の盛り上がった形になる可能性がある。また, 礫層は堆積時の側方への連続性も悪い。河川の流路堆積物の礫層や砂層の基底は侵食面になることはあるが, 砂層は礫層ほど下層を大きく削らない。流路堆積物が礫層の場合はヒモ状の細長い分布をとる。また, それが砂層の場合, 上面が少し盛り上がる程度まではとりうる。一般に, 礫層や砂層は平坦地上では平面的にローブ状に分布する。泥層は平坦なところでは, 薄く平たく広がって堆積する。泥層の基底が下位層を侵食することはほとんどない。削っているとすると, それは後生的なスランプなどに伴うものである。泥は谷状の地形内の横断面では谷状の形を埋積するように堆積し, その上面はほぼ水平になる。

さらに, 岩相境界線を描くときには, その岩相からなる堆積体がどのように発達したかを考える。このとき, 地層が単純に上に累重したのか, 側方に前進したのか, ヒモ状に細く長く伸びたのかななどを意識することが重要である。精度の高い柱状図であれば, こうした堆積体の発達様式を岩相境界から推定できる。例えば, 大阪平野淀川河

口での南北断面における砂嘴堆積物の砂層（図3で南側に分布する砂体）では、南から北に前進しながら堆積している様子が、岩相境界線の構造から読みとれる。

2) Shazam 線を柱状断面図に描く

岩相境界線を描いた柱状断面図に、地層区分に重要な Shazam 線を加筆する（図1B）。前章で述べたように、すべての岩相境界線も“Shazam”な線といえるが、そのなかでも、地層の境界として重要なものがある。それは、(1) シークェンス境界、(2) 海進ラビーンメント面、(3) 前進堆積体のダウンラップ面などである。これらの境界線については次章で詳しく述べる。これらの境界のうち、シークェンス層序学で使用されているのはシークェンス境界のみで、それ以外の境界は地層の観察では識別されてきたが、地層境界面として地層解析に利用されてこなかった。すなわち地盤情報データベースを用いた沿岸域の沖積層の解析では、それらが有効な地層境界面になる。

V. 地層区分に重要な Shazam 線

データベースから作成した柱状断面図に描いた岩相境界線が、最も基本となる Shazam 線であることを述べた。次に、地層区分や、堆積システムや堆積環境を復元する場合に重要となる3つの Shazam 線について、大阪平野の沖積層の具体例で紹介する。

1) シークェンス境界 (Sequence boundary: SB)

堆積シークェンスの基底面であるシークェンス境界は、不整合面とそれに連続する整合面として定義される (Vail *et al.*, 1991)。それは、相対的海水準変動の低下速度の最も大きいときに形成される (Jervey, 1988)。例えば、わが国の沖積層のシークェンスでは、シークェンス境界は約2.5万年ないし3万年前から最大に海面が低下した1.8万年前までの間につくられた (増田, 2007)。ここで重要なことは、沿岸域においては、海面低下期の地形の下刻、すなわち不整合面の形成は、海面低下速度の大きい時期に行われることであり、海面が最も下がった時期ではないことである。

この海面の低下速度が大きくなった時期、沿岸域では急激な海面低下によって侵食基準面となる河口の位置が下がり、河川の下刻作用が著しくなり、沿岸部では明瞭な開析谷がつくられる (増田, 2007)。地層で識別できる河川の下刻による不整合面を、Swift *et al.* (2003) はとくに河川侵食面 (fluvial erosion surface) と名づけている。

例えば、淀川河口部の地下断面（図3）では、沖積層基底と定義できるシークェンス境界を、埋没段丘礫層の上面から開析谷の基底を結んで描くことができる（図3BのSB）。シークェンス境界の最も下がった部分が開析谷の基底で、いわゆる氷期の古淀川（梶山・市原, 1972）や古大阪川（藤田・前田, 1969）の谷である。この断面では最も下刻が進んだ部分が河川侵食面である（図3Bと図4のSB）。地層では河川堆積物としての上方細粒化を示す礫層である。大阪平野のデータベースを用いた解析では、最も厚い礫層の基底を、便宜上、シークェンス境界としている。侵食基準面の低下速度が大きくなって河川勾配が大きくなると、下流にまで粒度の大きな礫質堆積物が分布するようになり、そこには最大礫からなる礫層が分布すると考えられる。データベースからは礫径はわからないので、厚い礫層の基底にシークェンス境界を想定しているにすぎない。今後、沖積層基底の礫層に対する年代測定値が多く報告されるようになれば、このシークェンス境界の認識は深まるだろう。古淀川について、シークェンス境界の形状から、現在の大阪湾沿岸での流路は、大阪湾底で見いだされている古大阪川（藤田・前田, 1969）に繋がっていることは確認できている。また、八幡付近から大阪湾岸までの古淀川の平均河床勾配を求めると、約0.7～0.8/1000である（伊藤・増田, 2012）。現在の淀川の最深河床高から求めた勾配が約0.2～0.3/1000なので、約3～2万年前の淀川はかなり急勾配で、しかも、現在の淀川とは異なり、岩相からは礫層が卓越した、いわゆる礫床河川であったことがわかる（図4）。事実、西大阪平野の淀川河口、JR大阪駅付近でのボーリングデータによると、地下25 m から35 m までの河川性礫層は直径数 cm

図 3 淀川河口域での河川と直交する地質柱状断面の解析例。

加島-塚本-新淀川-福島-中之島-本町-難波を通る南北断面。A：岩相境界線などの Shazam 線を入れた図，B：シーケンス境界 (SB)，海進ラビーンメント面 (TRS) のほか，堆積環境を記入した図。岩相は図 1 の凡例参照。

Fig. 3 Geological columnar section with transverse plane of the Chuseki-so at the lower reaches of the Yodo River. The north-south cross section is from Kashima, Tsukamoto, Shin-Yodo River, Fukushima, Nakanoshima, Honmachi to Namba. A: Sections with Shazam lines, and B: with bounding surfaces of strata. SB: sequence boundary, TRS: transgressive ravinement surface, and DPS: downlap surface of prograding depositional system.

図 4 淀川流域の沖積層断面図。

大阪湾-咲州-福島-毛馬-守口-寝屋川-枚方-樟葉-大山崎を通る南西-北東断面。SB：不整合面のシーケンス境界，TRS：西大阪から大阪湾の海成粘土層の基底に認められる直線的な海進ラビーンメント面，DPS：高海面期から現在までに前進した淀川デルタのフォーセット基底のダウンラップ面。主な堆積環境も記入。

Fig. 4 Geological columnar section in the longitudinal direction of the Chuseki-so at the Yodo River.

The northwest-southwest cross section is from Osaka Bay, Sakishima, Fukushima, Kema, Moriguchi, Neyagawa, Kuzuha to Oyamazaki. SB: sequence boundary, TRS: transgressive ravinement surface, and DPS: downlap surface of prograding depositional system.

のチャートの円礫を主体とし、直径 10 cm 以上の流紋岩や砂岩の礫を含む。現在の淀川でいえば中流域にあたるという（中川, 1993）。

沿岸域の沖積層のシーケンス境界で、次に重要なことは、形成時の形態はその後の海進期の波食作用によってかなり壊れてしまっていることである。いわゆる氷期の地形を復元するには、この現象の理解なくしてはできないということである。沖積層の基底が氷期の地表を示しているというわけではない、ということを強く意識すべきである。この波食作用による地形改変については次節で述べる。

2) 海進ラビーンメント面 (Transgressive ravinement surface: TRS)

海進時には波浪や潮汐の作用で、海底が平坦化される。地層に記録されるこの海進期の平坦

面をラビーンメント面 (ravinement surface) という (Nummedal and Swift, 1987; Dalrymple, 2010)。海進期に特有のこのラビーンメント面を、Swift *et al.* (2003) はとくに「海進ラビーンメント (transgressive ravinement)」と名づけて、地層境界に用いている。ストーム時の波（暴浪）で外浜に形成されるラビーンメント面 (oceanic ravinement: Swift *et al.*, 2003; 増田, 2007) は、波浪の作用が大きい外洋に面した地域での堆積物には明瞭に記録される (田村・増田, 2004; Tamura *et al.*, 2008)。

内湾域でも波浪による平坦化に加え、海進時の潮汐作用によって潮汐低地を形成する平坦化が起り、そこにラビーンメント面 (tidal ravinement: Allen and Posamentier, 1993; bay ravinement: Nummedal and Swift, 1987) がつくられる。

内湾域である大阪湾でも、海進ラビーンメント面は沖積層に明瞭に記録されている（増田, 2007）。大阪平野淀川沿いの沖積層断面の例（図4）でも、難波累層中部（古谷, 1978; 三田村・橋本, 2004）に相当する、高海面期の湾底堆積物である海成粘土層（Ma13：第13海成粘土層）の基底、すなわち、難波累層下部の砂泥互層との境界が、平坦な海進ラビーンメント面として認識できる（図4のTRS）。柱状図断面で、上位の粘土層と下位の砂泥互層とのこの境界は、ほぼ直線的に結ぶことができる。言い換えると、このShazam線は直線状に描くことが重要なのである。海成粘土層の基底の海進ラビーンメント面は、海進が進んだ大阪湾で発生するようになった波浪によって形成された波食面といえる。

一方、守口から枚方の淀川流域や河内湾地域の柱状図断面では、明瞭な直線的な海進ラビーンメント面を引くことができない（図4）。これは海進期の河内湾（梶山・市原, 1972, 1986）が閉鎖的で海域が狭く、発生した波浪が小さかったため波食作用も小さく、ラビーンメント面が識別し難くなっているためと思われる。

西大阪平野や大阪湾域の沖積層の海進ラビーンメント面には、明瞭な段差がみられる（図5）。その段差は深さ-15~-16 mや-21~-22 m, -26~-27 m, である（伊藤・増田, 2012）。ラビーンメント面に段差があることは、現世や地層の研究で知られており（Thorne and Swift, 1991; Murakoshi and Masuda, 1992）、それが急激な海面上昇によってつくられたもので、海面急上昇のイベントに対応した時間面として考えられている。大阪平野の沖積層にみられるラビーンメント面の段差のいくつかは、氷床からの急激な融水による世界的な急な海面上昇（Bird *et al.*, 2007）に対応している可能性が高い。このうち、-15~-16 mの段差は、その深度と海面変動から考えて8000年前から7000年前のイベント（Blanchon and Shaw, 1995）に対応していると思われる。

難波累層最下部や下部の礫層や砂泥層は、海進期の谷埋めのエスチャリー堆積物である。その砂泥互層においても、岩相境界線が平坦に連続す

る。しかも、その境界線は基底礫岩層にオンラップして堆積している（図4）。これは、すでに説明した潮汐低地面で潮汐作用によって平坦化されたラビーンメント面で、tidal ravinementあるいはbay ravinementと呼ばれるものに当たる。淀川河口域の古淀川の段丘礫層の上面も平坦なShazam線が描けて（図3A）、そこがラビーンメント作用を受けたことを示している。さらにその上位のエスチャリー堆積物の砂泥互層の岩相境界線も、礫層上面に対してオンラップ構造を示している（図3A）。

大阪平野では、5000年前から6000年前に最高海面期を迎えた（Masuda *et al.*, 2002）。この時に上町台地の西側や千里丘陵の南側では波食崖が形成された。これらの崖が縄文海進に伴う海面上昇で次第に侵食されてきたことが、波食崖に直交した断面図からわかる。千里丘陵から南南西に伸びた柱状図断面では、海成粘土層の基底に直線的な海進ラビーンメント面が描ける（図5）。その海進ラビーンメント面は千里丘陵南縁の波食崖に連続している。しかも波食崖から沖側約2.5 kmは、基盤となる千里丘陵を構成する大阪層群を直接平坦化した波食面が標高-2 mから-5 mに分布している（図5）。この地域では、その平坦化された基盤の上に、当時は千里丘陵が南に延びていて、そこに波食崖があったことがわかる。同様な基盤の波食面は、上町台地の西側の標高-1 mから-4 mの地下にも、幅1 km程で分布している。上町台地でも海進以前はその西縁が現在よりも1 kmも西側にあったことがわかる。したがって古地理の復元で、最終氷期と縄文海進最盛期における上町台地の西縁や千里丘陵南縁が、軟らかい地層で波食作用を受けたにもかかわらず、同じ位置に描かれたりすることはあり得ない。

3) 前進堆積体のダウンラップ面（Downlap surface of prograding depositional system: DPS）

前進堆積体とは、海面が安定した高海面期や海面が低下する海退期に、沖側の水域（海域）に向かって発達する沿岸での堆積システムがつくる

図 5 千里丘陵の波食崖と基盤の波食平坦面と海進ラビーンメント面。

千里丘陵（関大前）-江坂-神崎川-三国-十三を通る北北東-南南西断面。SB：不整合面のシーケンス境界，TRS：海進ラビーンメント面，DPS：デルタのフォーセット基底のダウンラップ面。

Fig. 5 Geological columnar section in the longitudinal direction of the Chuseki-so through a wave-cut cliff in the Senri hills.

The north-northeast to south-southwest cross section is from the Sennri Hill, Esaka, Kanzaki River, Mikuni to Juso. SB: sequence boundary, TRS: transgressive ravinement surface, and DPS: downlap surface of prograding depositional system.

地層である。河口にできるデルタや砂浜海岸や砂州などが海側に発達してできる堆積体である。前進堆積体のサクセションでは上方粗粒化の重なりが特徴である（増田・齋藤，1995）。前進する堆積体では地層はダウンラップ面をつくりながら発達する。デルタではフォーセット/ボトムセット（前置層/底置層）境界，海岸では外浜/沖浜境界，砂嘴（砂州）では堆積体の基底面が，ダウンラップ面となる。こうしたダウンラップ境界は，Gani and Bhattacharya（2005）がデルタのフォーセット/ボトムセット境界に描いたのと同じように，鋸歯状のShazam線で表現される。デルタのフォーセット/ボトムセット境界が，狭義のShazam線ということになる。

地盤情報データベースを用いた解析では，前進堆積体のダウンラップ面は上方粗粒化を示す粘土層，シルト層，砂層，あるいは粘土層，砂質泥層，砂層への重なりで捉え，その砂層の基底を利

用している。この砂層の基底は直線的ではなく，凸凹の境界線で表現されるのである。そうした意味でこの境界が堆積学的なダウンラップ面にあたるかどうかについては問題が残っている。

淀川沿いの沖積層の縦断面では，上方粗粒化を示すサクセションがみられ（増田・宮原，2000，増田，2002），淀川デルタの堆積物であることが容易に認定できる。その基底の岩相境界は平坦ではなく，鋸歯状をしたShazam線として描くことが重要である（図4，図5のDPS）。これは淀川デルタの前進に伴って形成された構造で，フォーセット/ボトムセット境界でも，ボトムセット/プロデルタ境界でも，同じように描ける。

浜堤列が発達する尼崎平野（田中ほか，2001）では，5000年前からの海岸線の前進に伴って，ダウンラップする外浜/沖浜境界が形成され，その下面は平坦ではなく（図6），鋸歯状境界として描くことができる。また，天満砂州や吹田砂州

図 6 伊丹台地と尼崎低地のラビーンメント面によるテクトニクス解析例。

伊丹-塚口-尼崎-大物-中島を通る南北断面。TRS1：第13海成粘土層（Ma13）基底の海進ラビーンメント面，TRS2：第12海成粘土層（Ma12）基底の海進ラビーンメント面。海成粘土層は北側でくさび状にせん滅している。伊丹台地側の隆起と南への傾動が読みとれる。

Fig. 6 Geological columnar section showing tectonic effects in the Itami uplift and the Amagasaki plain.

The north-south cross section is from Itami, Tsukaguchi, Amagasaki, Daimotsu to Nakajima. TRS 1: transgressive ravinement surface of the 13th marine clay bed in the Holocene Chuseki-so, and TRS 2: transgressive ravinement surface of the 12th marine clay bed of the uppermost Pleistocene.

でも、砂州の前進に伴うダウンラップ面がぎざぎざのShazam線で示すことができる。

VI. Shazam境界線とテクトニクス

データベースを用いた沖積層の解析では、テクトニクスによる変動が影響する効果を検知できるほどの精度にはない。しかし、下位の地層にShazam層序学を適用する場合には、テクトニクスの効果について論じられる可能性がある。そのひとつの例を紹介する。

海進ラビーンメント面が平坦なShazam境界線であることは述べた。それは断面では直線として描ける。海面上昇の速度や下位の地形が同じような場合には、その境界は同じような形になることがわかる。したがって、同じ地域に形成された海進ラビーンメント面、すなわち沖積層のものとひとつ前の間氷期（下末吉期）のものを比較すれば、その期間での構造運動が推定できる、というものである（櫻井ほか, 2012）。

大阪平野北西部の伊丹台地から尼崎平野での地下断面をデータベースから作成した結果、沖積層

の海成粘土層（Ma13層：最高海面期＝約5500年前）と下位の下末吉期の伊丹粘土層（藤田・前田, 1966）（Ma12層：最高海面期＝約12.5万年前）という、2枚の海成粘土層の基底に直線的な海進ラビーンメント面を復元することができた（図6）。この図の2つのラビーンメント面（図6のTRS 1, TRS 2）の特徴は、海成粘土層の分布が海進最終期の陸側末端にまでトレースできている点である。2つの高海面期の海水準はほぼ同じである（Lambeck *et al.*, 2002）と仮定できれば、断面における2つの海進ラビーンメント面の傾斜の違いから、構造運動を読みとることができるだろう（櫻井ほか, 2012）。

VII. おわりに

ここでは、関西圏地盤情報データベース（関西圏地盤情報ネットワーク・関西圏地盤情報協議2011）を用いて大阪平野の沖積層を解析した例を紹介した。Shazam層序学と命名したこの解析法は、断面図に、詳細な岩相境界線を描くことで、音響断面での解析と同じようなセンスで地層

の解析を行い、堆積システムの復元や堆積シーケンスの認定、さらに、堆積作用による地形の変化やテクトニクスの解析などを行う。この解析のなかで重要なのは、凸凹なシーケンス境界、直線的な海進ラビーンメント面、鋸歯状の前進堆積体のダウンラップ面などの地層境界である。

ここでは詳しく述べなかったが、Shazam 層序学の「基礎」には、当然であるが、これまで行われてきた地層区分の方法が利用されている。例えば、解析には、これまで公表されている地層研究の成果や、年代値や含有化石の種類や海成・非海成の区別などの情報を加えたりしている。これらはデータベースからは得ることができないからである。とくに、沖積層の場合は、地層の硬さの指標である N 値が重要な地層区分の識別要素となるので、当然、それを地層区分に利用している。例えば、千里丘陵南縁の基盤の波食平坦面の認定(図 5) などには、地層の N 値の違いが用いられている。

謝 辞

この研究にあたって関西圏地盤情報データベース運営機構からは貴重な地盤情報データベースの利用許可を頂いた。記して謝意を表します。

文 献

- Allen, G.P. and Posamentier, H.W. (1993): Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: The Gironde Estuary, France. *Journal Sedimentary Petrology*, **63**, 378-391.
- Bird, M.I., Fifield, L.K., Teh, T.S., Chang, C.H., Shirlaw, N. and Lambeck, K. (2007): An inflection in the rate of early mid-Holocene eustatic sea-level rise: A new sea-level curve from Singapore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **71**, 523-536.
- Blanchon, P. and Shaw, J. (1995): Reef-drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse. *Geology*, **23**, 4-8.
- Chidsey, T.C., Jr. (2001): Geological and petrophysical characterization of the Ferron Sandstone for 3-D simulation for a fluvial-deltaic reservoir. Salt Lake City, Utah. *Utah Geological Survey, Report*, 490p.
- Dalrymple, R.W. (2010): Interpreting sedimentary successions: Facies, facies analysis and facies models. in *Facies Models 4* edited by James, N.P. and Dalrymple, R.W., *GEOtext 6*, Geological Association of Canada, **2**, 3-18.
- Emery, D. and Myers, K. (1996): *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science, London, 297p.
- 江藤稚佳子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄 (2008): ボーリング柱状図資料を用いた N 値と岩相の 3 次元分布モデル—東京低地北部における沖積層の例—. *地質学雑誌*, **114**, 187-199. [Eto, C., Ishihara, Y., Tanabe, S., Kimura, K. and Nakayama, T. (2008): Three dimensional models of N -values and lithofacies by using borehole logs: An example of incised valley fills under the northern part of the Tokyo Lowland, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **114**, 187-199. (in Japanese with English abstract)]
- 古谷正和 (1978): 大阪平野西部の上部更新統. *地質学雑誌*, **84**, 341-358. [Furutani, M. (1978): Upper Pleistocene Series of the western Osaka Plain. *Journal of the Geological Society of Japan*, **84**, 341-358. (in Japanese with English abstract)]
- Gani, M.R. and Bhattacharya, J.P. (2005): Lithostratigraphy versus chrono-stratigraphy in facies correlations of Quaternary deltas: Application of bedding correlation. in *River Deltas-Concepts, Models, and Examples* edited by Giosan G. and Bhattacharya, J.P., *SEPM Special Publication*, **83**, 31-47.
- 藤田和夫・前田保夫 (1966): 大阪平野北西部 (尼崎地域) の沖積層とその基底 (大阪湾の沖積層 その 1). 第四紀研究, **5**, 19-28. [Huzita, K. and Maeda, Y. (1966): Latest Quaternary deposits of the Northwestern part of Osaka Plain (Studies on the "Alluvial deposits" of Osaka Bay, Part 1). *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **5**, 19-28. (in Japanese with English abstract)]
- 藤田和夫・前田保夫 (1969): 大阪湾の "沖積層" とその基底 (大阪湾の "沖積層" その II). 第四紀研究, **8**, 89-98. [Huzita, K. and Maeda, Y. (1966): Latest Quaternary deposits in Osaka Bay. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **8**, 89-98. (in Japanese with English abstract)]
- 石原与四郎・宮崎友紀・江藤稚佳子・福岡詩織・木村克己 (2013): 東京港湾地域のボーリング情報を用いた浅層 3 次元地質・地盤モデル. *地質学雑誌*. in press. [Ishihara, Y., Miyazaki, Y., Eto, C., Fukuoka, S. and Kimura, K. (2013): Shallow subsurface three-dimensional geological model using borehole logs in Tokyo Bay area, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*. in press. (in Japanese with English abstract)]
- 石綿しげ子 (2004): 東京湾北部沿岸域の沖積層と堆積環境. 第四紀研究, **43**, 297-310. [Ishiwata, S. (2004): The late Pleistocene-Holocene deposits and the sedimentary environment in the northern coastal area of Tokyo Bay, central Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **43**, 297-310. (in Japanese with English abstract)]
- 伊藤有加・増田富士雄 (2012): 沖積層タイプのひとつとしての砂州堆積物をもつ大阪・淀川流域のサク

- セッション. 日本堆積学会講演要旨, P33, 102-103. [Ito, Y. and Masuda, F. (2004): Depositional succession with transgressive bars in the Yodo-river area, the Osaka Plain as a type of the "Chuseki-so". *Abstracts of Annual Meeting of Sedimentological Society of Japan*, P33, 102-103. (in Japanese)]
- 岩崎好規・諏訪靖二・山本浩司 (1990): 地域地盤情報に対する地盤工学データベース・システムの開発と構築理念. *情報地質*, **1**, 103-113. [Iwasaki, Y., Suwa, S. and Yamamoto, K. (1990): Concept and development of geotechnical data base system for Regional Ground and Geological Information. *Geoinformatics*, **1**, 103-113. (in Japanese with English abstract)]
- Jervey, M.T. (1988): Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. *SEPM Special Publication*, **42**, 47-69.
- 梶山彦太郎・市原 実 (1972): 大阪平野の発達史—14C年代からみた—. *地質学論集*, **7**, 101-112. [Kajiyama, H. and Itihara, M. (1972): The developmental history of the Osaka Plain with references to the radio-carbon dates. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **7**, 101-112. (in Japanese with English abstract)]
- 梶山彦太郎・市原 実 (1986): 大阪平野のおいたち. 青木書店, 138p. [Kajiyama, H. and Itihara, M. (1986): *Development of the Osaka Plain (Osaka Heiya No Oitachi)*. Aoki Book Company, 138p. (in Japanese)*]
- KG-NET・関西圏地盤研究会 (2007): 新関西地盤—大阪平野から大阪湾. 354p. [Kansai Geo-informatics Research Committee (2007): *Kansai Jiban-Osaka Plain and Osaka Bay*. Kansai Geoinformatics Council, 354p. (in Japanese)]
- 小池克明・西山 孝・大見美智人・清水信宏 (1989): 地盤構造解析へのボーリングデータベースの応用. *情報地質*, **14B**, 11-24. [Koike, K., Nisiyama, T., Ohmi, M. and Shimizu, N. (1989): Structural analysis in the shallow subsurface using the boring database system. *Geoinformatics*, **14B**, 11-24. (in Japanese with English abstract)]
- Lambeck, K., Yokoyama, Y. and Purcell, A. (2002): Into and out of Last Glacial Maximum: Sea-level change during the oxygen isotope Stage 3 and 2. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 343-360.
- 増田富士雄 (1988): ダイナミック地層学—古東京湾域の堆積相解析から—「その1基礎編」. *応用地質*, **29**, 312-321. [Masuda, F. (1988): Dynamic stratigraphy: Facies analysis in Paleo-Tokyo Bay area. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **29**, 312-321. (in Japanese)]
- 増田富士雄 (1989): ダイナミック地層学—古東京湾域の堆積相解析から—「その2発展編」. *応用地質*, **30**, 29-40. [Masuda, F. (1989): Dynamic stratigraphy: Facies analysis in Paleo-Tokyo Bay area. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, **30**, 29-40. (in Japanese)]
- 増田富士雄 (2002): 掘削コアから推定した大阪湾の海況変動. 日本応用地質学会関西支部シンポジウム論文集: コア精密対比による京阪神地域の地下地質・地質構造の高精度解説, 117-127. [Masuda, F. (2002): Temporal variation of Holocene Osaka Bay conditions reconstructed from two bore hole cores. *Proceedings of the Symposium by Kansai Branch of the Japan Society of Engineering Geology*, 117-127. (in Japanese)]
- 増田富士雄 (2007): 相対的な海面変動が支配する地層の累重と地形の形成: わが国の沖積層の解析から. *地形*, **28**, 365-379. [Masuda, F. (2007): Formation of depositional sequences and landforms controlled by relative sea-level change: The result of the Holocene to upper Pleistocene study in Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **28**, 365-379. (in Japanese with English abstract)]
- 増田富士雄・宮原伐折羅 (2000): 大阪湾地域の完新統海成粘土層の特徴と形成過程. 第四紀研究, **39**, 349-355. [Masuda, F. and Miyahara, B. (2000): Depositional facies and processes of the Holocene marine clay in the Osaka Bay area, Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **39**, 349-355. (in Japanese with English abstract)]
- 増田富士雄・齋藤文紀 (1995): プログラデーションによる地層の特徴とテクトニクス的説明. 月刊地球, **17**, 671-674. [Masuda, F. and Saito, Y. (1995): Stratal formation by progradation depositional system and the tectonic interpretation. *Chikyū Monthly (Gekkan Chikyū)*, **17**, 671-674. (in Japanese)*]
- Masuda, F., Irizuki, T., Fujiwara, O., Miyahara, B. and Yoshikawa, S. (2002): A Holocene sea-level curve constructed from a single core at Osaka, Japan (A preliminary note). *Memoirs of Faculty of Science, Kyoto University, Series of Geology & Mineralogy*, **59**, 1-8.
- 増田富士雄・石原与四郎・佐藤智之・谷口圭輔・高田将志 (2010): 沖積層: その堆積物・堆積システム・堆積シーケンスの解析法の基礎. 日本第四紀学会講習会資料, 5部, 221p. [Masuda, F., Ishihara, Y., Sato, T., Taniguchi, K. and Takada, M. (2010): Basis of analytical method for the deposits, depositional system and depositional sequence of the Chuseki-so. *Literature of Workshop by the Japan Association for Quaternary Research*, 221p. (in Japanese)*]
- 三田村宗樹・橋本真由子 (2004): ボーリングデータベースからみた大阪平野難波累層基底礫層の分布. 第四紀研究, **45**, 253-264. [Mitamura, M. and Hashimoto, M. (2004): Spatial distribution with the drilling database on the basal gravel bed of the Namba Formation in the Osaka Plain, Southwest Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **45**, 253-264. (in Japanese with English abstract)]
- Murakoshi, N. and Masuda, F. (1992): Estuarine, barrier-island to strand-plain sequence and related

- ravinement surface developed during the last interglacial in Paleo-Tokyo Bay, Japan. *Sedimentary Geology*, **80**, 167-184.
- 中川要之助 (1993): 人と暮らしと大地の科学—土地の成り立ちを知り、暮らし方を考える—。法政出版, 220p. [Nakagawa, Y. (1993): *Sciences of the Earth and Human Life (Hito To Kurashi To Daichi No Kagaku)*. Hosei Publisher, 220p. (in Japanese)*]
- Nummedal, D. and Swift, D.J.P. (1987): Transgressive stratigraphy at sequence bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. in *Sea Level Fluctuation and Coastal Evolution* edited by Nummedal, D., Pilkey, O.H. and Howard, J.D., *SEPM Special Publication*, **41**, 223-240.
- Rich, J.L. (1951): Three critical environments of deposition and criteria for recognition of rocks deposited in each of them. *Geological Society of America, Bulletin*, **62**, 1-20.
- 櫻井皆生・増田富士雄・伊藤有加 (2012): 海進期の波食面痕跡 (ラビーンメント面) から地盤の昇降傾向を推定する試み: 大阪平野の表層地質情報での例. 日本地質学会講演要旨, R5-P-14, 236. [Sakurai, M., Masuda, F. and Ito, Y. (2012): A preliminary study for the estimation of relative tectonic movement using by transgressive ravinement erosion surface: Case study for the subsurface geology of the Osaka Plain. *Abstracts of Annual Meeting of the Geological Society of Japan*, R5-P-14, 236. (in Japanese)]
- Selley, R.C. (1970): *Ancient Sedimentary Environments*. Chapman and Hall LTD, London, 237p.
- Swift, D.J.P., Parsons, B.S., Foyle, A. and Oertel, G.F. (2003): Between beds and sequence stratigraphic organization at intermediate scales in the Quaternary of the Virginia coast, USA. *Sedimentology*, **50**, 81-111.
- 田村 亨・増田富士雄 (2004): 多数の年代値を入れた波浪卓越型堆積シーケンスの研究—千葉県九十九里浜平野と宮城県仙台平野の完新統から得られた最近の成果—。地学雑誌, **113**, 1-17. [Tamura, T. and Masuda, F. (2004): Recent studies on wave-dominated depositional sequences using the high-resolution ^{14}C dating analysis: the Holocene in the Kujyukuri and Sendai coastal plains, eastern Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **113**, 1-17. (in Japanese with English abstract)]
- Tamura, T., Saito, Y. and Masuda, F. (2008): Variations in depositional architecture of Holocene to modern prograding shorefaces along the Pacific coast of eastern Japan. in *Recent Advance in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy* edited by Hampson, G.J., Steel, R.J., Burgess, P.M. and Dalrymple, R.W., *SEPM Special Publication*, **90**, 191-205.
- 田中眞吾・井上 茂・辻村紀子 (2001): 伊丹台地南縁の地表・地下の段丘地形. 尼崎市立地域研究史料館紀要, **30**, 2-19. [Tanaka, S., Inoue, S. and Tsujimura, N. (2001): Land surface and buried terraces in the southern margin of the Itami Upland. *Bulletin of the History of Amagasaki (Chiikishi Kenkyu)*, Amagasaki Municipal Archives (Amagasaki Shiritsu Chiiki Kenkyu Shiryokan Kiyō), **30**, 2-19. (in Japanese)*]
- Thorne, J.A. and Swift, D.J.P. (1991): Sedimentation on continental margins, VI: A regime model for depositional sequences, their component systems tract, and bounding surfaces. *Special Publications, International Association of Sedimentologists*, **14**, 189-255.
- 東京都港湾局 (2001): 新版 東京港地盤図. 89p. [Bureau of Port and Harbor, Tokyo Metropolitan Government (2001): *Underground Geological Map of the Tokyo Bay*, 2nd ed (Shinpan Tokyo Jiban-zu). 89p. (in Japanese)*]
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchem, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Louit, T.S. and Hardengol, J. (1988): An overview of the fundamental of sequence stratigraphy and key definition: Sea level change- and integrated approach. *SEPM Special Publication*, **42**, 39-45.
- Vail, P.R., Audemard, F., Boeman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Cruz, C. (1991): The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: An overview. in *Cycles and Events in Stratigraphy* edited by Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., Springer-Verlag, Berlin, **6**, 617-659.
- Walker, R.G. (1984): *Facies Models*. Geoscience Canada, Reprint Series, **1**, 317p.
- Willis, B.J., Bhattacharya, J.B., Gabel, S.L. and White, C.D. (1999): Architecture of a tide-influenced river delta in Frontier Formation of central Wyoming, USA. *Sedimentology*, **46**, 667-688.
- 山口正秋・須貝俊人・大上隆史・藤原 治・大森博雄 (2006): 高密度ボーリングデータ解析に基づく濃尾平野沖積層の3次元構造. 地学雑誌, **115**, 41-50. [Yamaguchi, M., Sugai, T., Ogami, T., Fujiwara, O. and Ohmori, H. (2006): Three-dimensional structures of the latest Pleistocene to Holocene sequence at Nobi Plain, central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **115**, 41-50. (in Japanese with English abstract)]

* Title etc. translated by F.M