報 告

堆積物の分布形態解析における統合的手法論序章

—堆積学から震探地形学・地球統計学へのリンク—*

高 野 修**

(Received September 27, 2005 ; accepted January 13, 2006)

Perspectives in integrated reservoir-distribution analysis:
a linkage from sedimentology to seismic geomorphology and geostatistics

Osamu Takano

Abstract : This paper attempts to seek an effective methodology for integrated sedimentological, seismic geomorphological and geostatistical reservoir-distribution analysis. Recent developments in sedimentology (e.g., depositional systems and sequence stratigraphy) and 3D seismic geomorphology have improved our understanding of three-dimensional reservoir distributions on the basis of genetic and deterministic concepts. As geologic constraints, the sedimentological and seismic geomorphological information is used for a geostatistical reservoir characterization to obtain realistic distribution maps on reservoir properties. In this characterization flow, it can be efficient that known facts derived from sedimentological concepts are dealt with deterministically, whereas unknown territories (e.g., internal heterogeneity) are dealt with stochastically.

Key words : reservoir distribution, reservoir characterization, sedimentology, sequence stratigraphy, 3D seismic technology, seismic geomorphology, geostatistics

1. はじめに

近年、さまざまな手法の開発や進展により、石油・天然ガスの探鉱や貯留層キャラクタリゼーションにかかる貯留層分布解析技術が大きく向上しつつある。近年広く用いられている貯留層分布解析手法は多岐多分野にわたるが、基本概念の観点からすると、定性的・確定論的手法、定量的・確率論的手法、物理データ（直接解析）手法の3つの基本手法に区分することが可能である(図1)。定性的・確定論的手法は、堆積相モデル、シーケンス

層序学など、地質学的・堆積学的概念を基本とした定性論・確定論に基づくモデリング手法である。定量的・確率論的手法は、地球統計学的モデリングなど、定量データ解析や確率論を基本とするモデリング手法である。物理データ手法は、震探アトリビュートデータ、坑井物理検層による岩石物性データなどによる分布形態解析手法を指す。近年の地震探査技術、坑井物理検層技術の向上により、確定論、確率論などの概念が無くとも物理データ単独で分布形態解析が可能な場合（三次元震探アトリビュートデータと物理検層による岩石物性データの融合による貯留層物性分布三次元表示など）が実現していることから、物理データ手法は、1つの独立したアプローチ手法として捉えることが可能である。

これら3つの基本手法は、それぞれ単独でも貯留層分布形態解析が可能である。しかしながら、それぞれの手法には独自の長所や短所があること、実際の解析事例においては、対象データの質にばらつきがあったり、対象とするオーダーを変えながら解析をする必要がある場合

*平成17年6月1日、平成17年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「多様な貯留層を対象にした特性解析技術の進展」で講演 This paper was presented at the 2005 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Recent progress in characterization and analysis for various types of reservoirs" held in Tokyo, Japan, on June 1, 2005.

**石油資源開発株式会社 JAPEX Research Center および石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

図1 堆積物の分布形態解析における3つの基本的アプローチ手法（確定論的モデリング、確率論的モデリング、物理データ解析）およびこれらのリンクによる統合的解析を表すダイアグラム。高野（2004）を改変。

が多いことから、それぞれのケースに適した手法を選択し、必要に応じて複数の手法を組み合わせながら解析を行うことが、最適な結果を得るために最も有効かつ効率的であると考えられる。したがって、質やオーダーの異なるさまざまなケースに対応して、いかに最適な手法を選択し、効率的に統合（相互リンク）して解析が行えるかが、今後の貯留層分布解析技術の進展の鍵となるであろう（図1）。

本論では、今後の研究やケーススタディを通して進められるべき統合的手法論の検討の序章として、3つの基本的解析手法のうち、定性論・確定論に基づく堆積学的手法を中心として取り上げ、a) 貯留層分布形態解析における堆積学的手法の基本概念と意義をまとめ、b) 近年進展がめざましい震探地地形学（物理データ手法）や地球統計学（定量的・確率論的手法）へのリンク手法についての考察を通じて、c) 統合的手法における確定論的・堆積学的手法の役割について考察を試みることにする。

2. 貯留層分布形態解析における堆積学的手法の基本概念と意義

堆積学的モデリング手法は、実際の堆積環境や地球表層現象に適合した成因論的な概念に基づき、対象を定性論的、確定論的にモデル化する堆積物の分布形態解析手法であり、堆積環境や堆積システムの概念を主体とした堆積相モデル（Walker, 1992 など）、シーケンス層序モデル（Posamentier and Vail, 1988 ; Vail *et al.*, 1991 など）などが代表例としてあげられる。堆積学的モデリングの手法としては、地震探査データ、物理検層ログ、カッティングス、微化石、コアなどの坑井データ、地表露頭データなどを用いて、堆積相、堆積システム、シーケンス層序を認定し、堆積モデルやシーケンスモデルを構築した上で分布形態の解明もしくは推定を行う帰納法的な手法

が通常用いられる。

堆積学的モデリング手法による貯留層分布形態解析技術は、20世紀後半において、堆積学自体の進展と密接な関連を持ちながら進展してきた（図2）。1960年代～1980年代における堆積相や堆積システムの概念の進展（Allen, 1963; Reading, 1978; Walker, 1979; Miall, 1984 など）は、貯留層を実際の堆積環境（堆積システム：網状河川システム、蛇行河川システム、デルタシステム、バリア島～浅海システム、陸棚システム、海底扇状地システム、炭酸塩岩ランプシステム、炭酸塩岩独立プラットフォームシステムなど）に対応させることで、成因論的な貯留層の分布や性状の予測を可能にした。一方において、1930～1960年代に進展したサイクロセム（Wanless and Shepard, 1936）、Wheeler ダイアグラム（Wheeler, 1958）、Sloss シーケンス（Sloss, 1963）などの概念によって、堆積物をサイクル性の観点から解析する手法が進展し、1970年代後半には、二次元地震探査データを基礎としたサイスミック層序学（Payton, 1977; Mitchum *et al.*, 1977）へと進展した。続く1980年代後半の、堆積相・堆積システムの概念とサイスミック層序学との統合によるシーケンス層序学（Posamentier *et al.*, 1988）への進展は、地震探査データおよび坑井データをベースにして構築された時間層序学的な枠組みのなかで、成因論的な貯留層分布の予測や評価を三次元的に行うことを可能にした。

以上のような堆積学およびシーケンス層序学の概念の進展が貯留層分布形態解析にもたらした影響をまとめると、以下の2つの点に集約できると考えられる。1点目は、堆積システム・シーケンスなどの成因と規制要素を考慮することによって、有意な地質・堆積モデルの構築が可能になったという点である。従来、砂岩、泥岩、砂岩泥岩互層など記載学的に区分していた地層を、河川、デ

図2 堆積学的貯留層分布形態解析技術進展の歴史的背景。堆積相・堆積システムなどの地層の成因論とサイクル性の概念の統合により、シーケンス層序学概念・手法が進展した。高野 (2004) を改変。

図3 シーケンス層序学概念に基づく堆積物の成因論的階層性およびモデリングにおける3つの階層オーダー。貯留層分布形態解析は、アプローチ手法が何であれ、この成因論的階層性を考慮して行われるべきである。高野 (2004) を改変。

ルタ、海底扇状地などの堆積システムに結びつけ、なおかつ、それぞれについて相対的海水準変動などのさまざまな規制要素を勘案することによって、より現実的な地質・堆積モデルを構築することが可能になった。2点目は、成因論的階層性や、時間層序学的枠組みの中で堆積モデルを考えるようになったという点である。シーケンス層序学概念では、堆積物には、堆積相 (facies) ~ 堆積組相 (facies association) ~ 堆積システム (depositional system) ~ システムズトラクト (systems tract) ~ 堆積シーケンス (depositional sequence) ~ テクトノシーケンスユ

ニット (tectono-sequence unit) といった成因論的階層性があると考え (図3)。これらの堆積物単位および階層性は成因的な意味を持つものであるため、さまざまなオーダーでの貯留層分布や物性・性状の評価において有効であり、物理データ解析や確率論的解析においても地質学的基本カテゴリーもしくはフレームワークユニットとして重視されるようになってきている。例えば、堆積組相区分は、性状分布に関する定量的・確率論的シミュレーションを行う場合に性状や物性を代表する基本ユニットとして有用である場合が多い。また、堆積シーケ

図4 堆積学的貯留層分布解析の事例：メキシコチコンテベック堆積盆の海底扇状地タービダイト砂岩貯留層の例。シーケンス層序区分→ログファシス区分とプロットによるマッピング→三次元地震探査データ解析によるマッピング→堆積モデルの構築の順に解析が行われた。

ンスは、成因論的に有意でおかつ震探・坑井データ間対比にも有効な基本層序フレームワークユニットとして有用である。

堆積学的手法による定性的・確定論的な貯留層分布形態解析の事例として、図4にメキシコの古第三系チコンテベック堆積盆の海底扇状地タービダイト砂岩貯留層分布解析の例を示す(Yazawa *et al.*, 2001; 山本ほか, 2002; Abbaszadeh *et al.*, 2003)。本事例では、まず、三次元地震探査データによるサイスミック層序解析や約250の坑井における解析対象区間のログパターン解析によってシーケンス層序区分がなされ、13のシーケンス境界面と12の堆積シーケンス(層序ユニット)が認定された(図4A)。次に、各坑井の解析対象区間のログファシスが認定され、坑井位置にプロットすることによって堆積シーケンスごとのファシスマップの作成と堆積システムの解釈が行われた(図4B)。図4Bは解析対象区間上部のある堆積シーケンスにおけるログファシスプロットによる堆積システム解釈の例であり、分布形態と坑井位置の堆積相から、海底扇状地の一タイプであるチャンネル・レベースystem(狭長なチャンネルとその両脇に発達したレベースからなる)であると解釈される。坑井掘削エリア外については、三次元地震探査データのサイスミックファシスや振幅データを用いて分布形態解析が行われた(図4C)。この結果とログファシスマップ(図4B)とを統合

することによって、各シーケンスの海底扇状地システムの詳細と貯留層分布形態がマッピングされ(図4D)、海底扇状地の形態がシーケンスごとに砂質ラジアルファンタイプ～チャンネルレベースystemタイプ間で変化していることが明らかにされた(図4D)。

以上のように、堆積学的解析は、基本層序ユニット(シーケンス)区分情報、基本堆積相情報、性状情報、堆積システム情報など、基本的な地質情報を提供するものであるため、さまざまな手法の統合による解析を行う場合には、最も初期段階に位置づけられるべきと考えられる。図5は、貯留層分布形態解析における定性的・確定論的手法、物理データ解析、定量的・確率論的手法の統合ワークフローの一例であるが、このケースでも、最も基本となるのはシーケンス層序区分による層序フレームワークと堆積モデルであり、これらの結果をもとに震探アトリビュート解析、物理検層解析や地球統計学的貯留層モデリングが行われている。

次章では、定性的・確定論的手法の主体をなす堆積学的解析の結果から、どのように物理データ解析や定量的・確率論的手法(地球統計学的貯留層モデリング)へとリンクすべきかを考察するために、堆積学と地震探査技術間および堆積学と地球統計学間の境界領域の研究動向やデータ情報の提供手法について議論を行う。

図5 貯留層分布形態解析における定性論的・確率論的手法、物理データ解析、定量論的・確率論的手法の統合ワークフローの一例。

図6 二次元から三次元地震探査技術への進展、および堆積学的・シーケンス層序学的地層観とのリンクによる「seismic geomorphology (震探地形学)」新領域への発展を示す概念図。

3. 堆積学から三次元地震探査技術へのリンク：震探地形学の概要と進展

近年、三次元反射法物理探査技術およびこれに伴う三次元可視化技術が著しく進展し(図6)、堆積物の分布形態や性状、地質構造形態に関する三次元データの取得が可能になっている。従来型の解析、すなわち一次元坑井データ、二次元地震探査データのみによる解析では、データでカバーされていない領域に対して必ず「推定」

を行うことが必要であったのに対し、三次元地震探査技術および三次元可視化技術の進展によって、容易に貯留層の三次元形態に関するデータを取得することが可能となった。

三次元地震探査データによる貯留層分布・性状解析においては、アトリビュート解析とともに、堆積相・堆積システム・シーケンス層序学の概念を用いた解釈・解析が必要不可欠となっている。これは、三次元地震探査データに現れる堆積物の形態を実際の堆積システムに関

連づけ、シーケンス層序のフレームワークに組み込むことで、分布形態の成因論的意味付けや堆積物内部の性状評価がより容易になるからである。このような三次元地震探査技術と堆積学的な時間層序学的・成因論的地層観の融合に関連して、1980年代後半に始まる三次元地震探査技術の進展の流れと、シーケンス層序学の進展の流れがリンクすることによって、「seismic geomorphology (震探地形学: Posamentier and Kolla, 2003)」や「seismic sedimentology」という新たな学問・技術領域が、現在発展しつつある(図6)。Seismic geomorphologyは、「三次元地震探査データを用いた古地形形態、堆積形態、地層形態の分類学もしくは解析技術、およびこれから派生する堆積プロセスや石油地質学的スタディ」であり、これまでの研究によって、過去の堆積体の河川チャネル、開析谷、海底チャネル、斜面崩壊、海底扇状地、炭酸塩岩リーフ、シーケンス境界面地形などが、適性アトリビュート表示と三次元可視化技術によって克明に復元され、形態や堆積プロセスが議論されるようになってきている(Davies *et al.*, 2004; Posamentier, 2004; Cartwright and Huuse, 2005など)。Seismic geomorphology 関連技術は、単に地震探査データ上の堆積形態・堆積地形の解析のみならず、シーケンス層序学の三次元版発展形と捉えることが可能であり、本技術により堆積物の分布形態の時間層序学的変化プロセス研究のさらなる進展が期待されている。

以上のような特徴から、石油探鉱開発業界にとって seismic geomorphology の概念・手法は、貯留層分布形態解析の正確化、定量化を可能にする、つまり推定なしで

決め打ちができてしまう(最善と思われる解析結果を導く)という点で大きなインパクトを持つものであるといえる。さらに、本概念は貯留層分布形態解析における定性論・確定論的手法と物理データ手法を緊密にリンクさせる役割を持つと同時に、堆積物の定量データの提供が可能であるという点において、定量的・確率論的手法とのリンクを促進する役割も担っている。

4. 堆積学から地球統計学的解析へのリンク

4.1 石油地質学における地球統計学的モデリングの目的と性質

石油地質学における地球統計学的モデリングは「貯留層情報の欠如による地質学的不確実性を定量化するとともに、多種多様な既存データの統合により確率論的シミュレーションを行い、データによって満たされたモデルを構築する」ことを目的としている。地球統計学的解析は、多様なデータの統合ツールであり、シミュレーション(二点間法および多点間法からなるピクセルベースモデリングおよびオブジェクトベースモデリングが代表例)によって三次元的な不均質性を表示できると同時に、複数のリアライゼーション間のパリエーションとして不確実性の範囲を表現可能であるという特質を持っている(Dubrule, 1998)。このような特性・特質から、現在、地球統計学的貯留層キャラクタリゼーションの一般的手法として、三次元震探アトリビュートと物理検層データを数学的にデータ統合して確率論的シミュレーションを行い、リアライゼーション(マップ)を得るという手法

図7 代表的地球統計学的貯留層キャラクタリゼーションフロー(震探アトリビュートと坑井ログデータの統合と確率論的シミュレーション)およびこれに対する地質学的パラメータ規制(堆積学的情報提供)概念図。

が広く採用されている (図7)。

上記のように、地球統計学的手法は、地震探査データや物理検層データなどの定量値を使った貯留層キャラクタリゼーションに威力を発揮するが、一方において地質状況を正確に反映した結果を得るためには、モデル化される変数のタイプ、堆積システム、スケールに応じて、適切な手法とパラメータを選択する必要がある。すなわち、地球統計学的貯留層キャラクタリゼーションフローにおいては、適宜、適切な確定論的な地質学的制約 (geological constraints) を堆積学や震探地形学の観点から与えていく必要がある (図7)。これら地質学的情報提供において鍵になるのは、既知の情報を確定論的に、未知の情報を確率論的に扱う、すなわち、明瞭に分かっているところは確定論的に決めて、分からない部分を確率論的に扱うという点にあると考えられる (Dubrule, 1998)。

4.2 堆積学から地球統計学的モデリングへの制約情報

次に、どのような情報が地質学的制約として、堆積学から地球統計学的モデリングへ供給されるべきなのかについて議論を試みる。これらの情報はモデリングのスケール、すなわち対象とする堆積物の階層オーダーに依存するため、大スケール、中スケール、小スケールに3分して考察を行う。

(1) 大スケール (フレームワーク) モデリング

大スケール (large scale) モデリングは、堆積盆～堆積シーケンス～システムズトラクトなど、堆積物の入れ物としての堆積盆や層序フレームワークオーダーのモデリングを指す (図3)。このオーダーのモデリングに対しては、堆積盆のテクトニックセッティング情報、シー

ケンス層序情報、堆積システム情報などが堆積学的情報として提供される。

(2) 中スケール (堆積体) モデリング

中スケール (medium scale) モデリングは、堆積システムやこれらを構成する堆積相組 (FA) オーダーを対象とするもので、おもに堆積体の形状・分布のモデリングを目的としている (図3)。このオーダーのモデリングに対しては、堆積システムごとの堆積相組み合わせ情報、堆積物の形態・サイズ情報が堆積学的情報として提供される (図8)。これらの堆積学的情報は、オブジェクトベースモデリングにおける堆積体オブジェクトの作成、ピクセルベース多点間法におけるトレーニングイメージの作成、ピクセルベース二点間法におけるパラメータの設定やシミュレーション結果の検証などに通常用いられる (図8)。

現在、堆積学分野では、地球統計学スタディに情報を提供することを目的とした、堆積形態の単純モデル化や定量化に関するスタディが盛んに行われつつある (図8)。堆積形態の単純モデル化に関するスタディとしては、堆積モデルや現世アナログ、堆積実験などを利用して行われている (エクソンモービルの Shape Stratigraphy プロジェクトなど: 図8)。図9は、堆積形態の単純モデル化の一例として、堆積物の形態区分と対応する堆積システムや貯留層形状をまとめたものである。堆積物の形態としてはシート状、舌状、狭長、パッチ状、樹枝状、蛇行チャネル状などが存在し、それぞれ形成される堆積システムがおおよそ決まっている。シート状、舌状の堆積体はレイヤーケーキパターンに近く単純で、確定論的に分布が決め易いのにに対し、パッチ状、樹枝状、蛇行チャネル状になるにつれて、より形状が複雑なジグソー

MEDIUM-SCALE (SEDIMENT BODY) MODELING

図8 中スケール (堆積体) モデリングにおける堆積学・震探地形学からの供給情報、および地球統計学的モデリングにおける堆積学的情報適用例 (堆積体オブジェクト、トレーニングイメージ、パラメータ設定)。

堆積物形態	模式パターン	堆積システム例	貯留層形態	モデリング手法
シート状		下部海底扇状地	Layer Cake	Deterministic
舌状		中部扇状地舌状体 デルタ		
狭長		バリア島	Jigsaw	
パッチ状		陸棚サンドリッジ		Probabilistic Object- Pixel- Based
樹枝状		開析谷 分枝状チャネル	Labyrinth	
蛇行 チャネル状		蛇行河川		

図9 堆積物形態の模式パターンと関連する堆積システム、貯留層形態、および最適モデリング手法 (Dubrule (1998) の資料を用いて作成)。

SMALL-SCALE (INTERNAL HETEROGENEITY) MODELING

図10 対象スケールによる最適モデリング手法の違いを示す概念図。大スケール～中スケールは確定論的に決めることができても、小スケール（堆積体内部不均質性）は確定論的に決められず、確率論的モデリングが必要である場合が多い。

パターンやラビリンスパターンになるため、分布解析には確率論的モデリング手法が必要になる (図9)。

堆積物の定量化に関するスタディとしては、堆積物のディメンジョンに関するスタディ、フラクタル次元に関するスタディ、三次元地震探査データを用いた堆積体の定量化やパラメータ値の取得に関するスタディ (Quantitative Seismic Geomorphology)、堆積形態のシステムストラクチャー間変化に関するスタディなどが行われている (図8)。

(3) 小スケール（内部不均質性）モデリング

小スケール (small scale) モデリングは堆積体内部の不均質性に関するモデリングであり、堆積相情報、堆積相単位の性状情報、物性情報などが堆積学的情報として

このオーダーのモデリングに対して提供される (図3)。大スケール、中スケールのモデリングでは、堆積学、震探地形学の情報によって確定論的に堆積物分布形態が決定できる場合も多いが、小スケールの内部不均質性のモデリングでは、確定論的に決められるケースに限られるため、確率論的手法への依存度がより高くなる (図10)。図10は海底扇状地舌状体の例であるが、この場合、舌状体の堆積体の位置と形、および舌状体の内部に存在する堆積相・堆積組相は、震探地形学および堆積学の情報により確定論的に決定できる。しかしながら、内部の堆積相の詳細な分布状況や、続成作用の程度と分布 (内部不均質性) は決定できないため、確率論的モデリングが必要になる。

5. ま と め

本論では、統合的貯留層分布形態解析手法の検討の序章として、堆積学的手法の基本概念と意義をまとめ、堆積学から震探地形学および地球統計学へのリンク手法について議論を行った。その結果、以下の点が今後の多分野統合解析において重要であると考えられる。

- 1) 地質状況に忠実なモデリングを行う場合には、確定論的手法、確率論的手法の特性を十分把握した効率良い組み合わせによるモデリングが望まれる。
- 2) 地球統計学による貯留層分布・性状のモデリングを行う際には、堆積学的解析によってすでに確定論的に分布が決定されている部分との兼ね合いが問題になる場合がある。この点に関しては、基本的には既知の情報を確定論的に、未知の情報を確率論的に扱うことが望ましい。すなわち、確定論的に分かること、堆積学の進展により分かりうることは最大限取り入れた上で、分からない部分もしくは分からないオーダーについて確率論を展開すべきである。
- 3) 地質学・堆積学と地球統計学を効率的に組み合わせた解析手法についての今後の進展が待たれる。

謝 辞

本論は、著者が研究メンバーの一員となっている石油資源開発株式会社の技術開発課題「地質・貯留層モデリング技術の確立」、および石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) とメキシコ国営石油公社 (PEMEX) との共同研究「チコンテベックプロジェクト (通称)」を通じて得た知見をもとにまとめたものである。技術開発課題「地質・貯留層モデリング技術の確立」のメンバーの皆さま (とくに石油資源開発株式会社技術研究所の辻隆司博士、同社開発本部の山田知己博士) には、常日ごろから貯留層分布形態解析技術について討論をいただいているうえに、地球統計学に関する概要や手法について詳しくご教示いただいた。「チコンテベックプロジェクト」のメンバーの皆さま (とくに IPS 社 Maghsood Abbaszadeh 博士、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の大野健二氏、高橋 悟氏、加藤文人氏、国際石油開発の矢澤仁徳氏、帝国石油の島本辰夫氏、石油資源開発の山本浩士氏) には、プロジェクト遂行に際してご協力や議論をいただいている上に、地球統計学を用いた貯留層キャラクター化に関する概念、手法についてご教示頂いた。以上の方々に深く御礼申し上げる。

さらに、石油技術協会地質・探鉱部門シンポジウムにおいて発表の機会を与えていただいたシンポジウム世話

人の方々にはこの場を借りて深くお礼申しあげたい。

引 用 文 献

- Abbaszadeh, M., Takano, O., Yamamoto, H., Shimamoto, T., Yazawa, N., Murguia, F.S., Zamora, D.H.G. and Rodriguez, F.G., 2003 : Integrated geostatistical reservoir characterization of turbidite sandstone deposits in Chicotepec Basin, Gulf of Mexico. *Proceedings of Society of Petroleum Engineering 2003 Denver*, SPE84052.
- Allen, J.R.L., 1963 : Henry Clifton Sorby and the sedimentary structures of sands and sandstones in relation to flow conditions. *Geologie en Mijnbouw*, 42, 223-228.
- Cartwright, J. and Huuse, M., 2005 : 3D seismic technology: the geological 'Hubble'. *Basin Res.*, 17, 1-20.
- Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M. and Underhill, J.R., 2004 : *3D Seismic Technology -Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geol. Soc. Memoir, No.29.
- Dubrule, O., 1998 : *Geostatistics in Petroleum Geology*. AAPG Continuing Education Course Note Series No. 38.
- Miall, A.D., 1984 : *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. Springer Verlag, New York.
- Mitchum, R.M.Jr., Vail, P.R. and Thompson, S.III., 1977 : Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part II, The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In Payton, C.E., ed., *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir, no.26, 53-62.
- Payton, C.E. ed., 1977 : *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir, no.26.
- Posamentier, H.W., 2004 : Seismic geomorphology: imaging elements of depositional systems from shelf to deep basin using 3D seismic data: implications for exploration and development. In Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M. and Underhill, J.R., eds., *3D Seismic Technology -Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geol. Soc. Memoir, No.29, 11-24.
- 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*. Spec. Pub.SEPM, no.42, 109-124.
- Posamentier, H.W. and Kolla, V., 2003 : Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water

- settings. *J. Sediment. Res.*, **73**, 367–388.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988 : Eustatic controls on clastic deposition II - Sequence and systems tract models. 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*. Spec. Pub. SEPM, no.42, 125–154.
- Reading, H.G. ed., 1978 : *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Science, Oxford.
- Sloss, L.L., 1963 : Sequences in cratonic interior of North America. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **74**, 93–113.
- 高野 修, 2004 : 堆積相・シーケンス解析から統合的堆積盆解析へ：堆積環境・プロセス・分布解析手法の新たな展開. 堆積学研究, No.58, 13–31.
- Vail, P.R., Audemart, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Cruz, G., 1991 : The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentation -an overview. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and Events in Stratigraphy*, 617–659, Springer-Verlag, New York.
- Walker, R.G., 1979 : Facies and facies models : general introduction. In Walker, R.G., ed., *Facies Models*. Geol. Assoc. Canada, 1–8.
- Walker, R.G., 1992 : Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In Walker, R.G. and James, N.P., eds., *Facies Models -Response to Sea Level Change*, 1–14, Geol. Assoc. Canada.
- Wanless, H.R. and Shepard, E.P., 1936 : Sea level and climatic changes related to Late Paleozoic cycles. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **47**, 1177–1206.
- Wheeler, H.E., 1958 : Time-stratigraphy. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **42**, 1047-1063.
- 山本浩士・高野 修・島本辰夫・矢澤仁徳・Maghsood Abbaszadeh, 2002 : 地球統計学手法によるメキシコ、チコンテベック堆積盆油田群のタービダイト油層評価. 石技誌, **67**, 529–537.
- Yazawa, N., Yamamoto, H., Takano, O., Shimamoto, T., Abbaszadeh, M., Murguia, F.S. and Zamora, D.H.G., 2001 : PEMEX/JNOC Collaborative Research Project, Geostatistical modeling of Agua Fria, Coapechaca and Tajin area, Chicontepec Basin. *Proceedings of 2001 AIPM Meeting* (Villaermossa, Mexico; June 2001).