



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003年から10年の成果 —

## 地層形成と海水準変動： IODP, 317次航海，ニュージーランド 南島カンタベリー平野沖陸棚・斜面掘削

保 柳 康 一  
中 村 めぐみ  
山 田 桂

Sea level change and strata formation :  
Drilling on shelf and slope offshore  
Canterbury Plain, South Island of New  
Zealand, IODP, Exp. 317

Koichi Hoyanagi, Megumi Nakamura,  
Katsura Yamada

はやなぎ こういち : 信州大学理学部地質科学科  
なかむら めぐみ : 信州大学大学院理工学系研究科  
地球生物圏科学専攻  
やまだ かつら : 信州大学理学部地質科学科

海水準変動の影響を直接受ける陸棚は、粗粒な砂質・礫質堆積物が陸上侵食面を伴って地層を形成しており、連続試料の採取が困難である。ニュージーランド南島東方沖陸棚・斜面の掘削によって、氷河性海水準変動の時期と振幅を高解像度で見積もり、海・陸の相互作用の研究を進展させる上で重要な試料を得ることが出来た。

### 1. はじめに

統合国際深海掘削計画 (IODP) 317次航海は、縁辺海域における堆積サイクルを支配する汎世界的海水準変動と地域的なテクトニクスの相対的重要性の理解を目的として計画された。特に地質時代の海水準変動の変動幅を直接知るため、海水準低下期に海面上に露出する陸棚堆積物の連続コア試料を得ることが最大の目的である。砂、礫など粗粒な堆積物を含む海・陸境界域である陸棚上の地層の掘削は、掘削自体の困難さとコアの回収率の悪さから、1997年にニュージーランド沖の陸棚及び斜面を掘削した国際深海掘削計画 (ODP) 174A次航海 (Austin, *et al.*, 1998)以降試みられなかった。しかし、Fulthorpe *et al.* (2009)は陸棚から斜面の高解像度地震波断面 (Lu and Fulthorpe, 2004)を示し、ここの前進する陸棚縁での掘削が

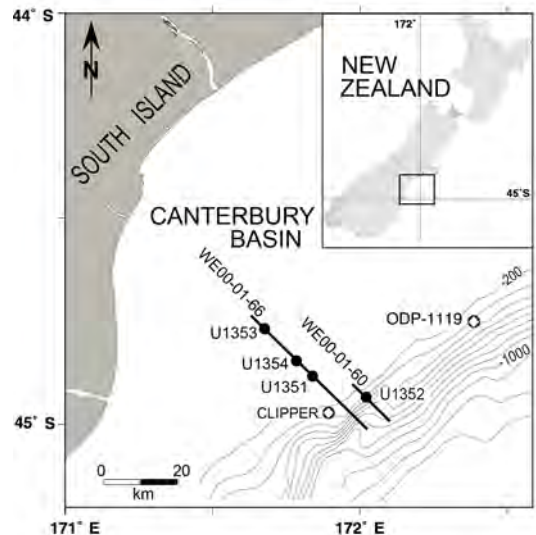


図1 位置図. Fulthorpe *et al.* (2011)より作成.

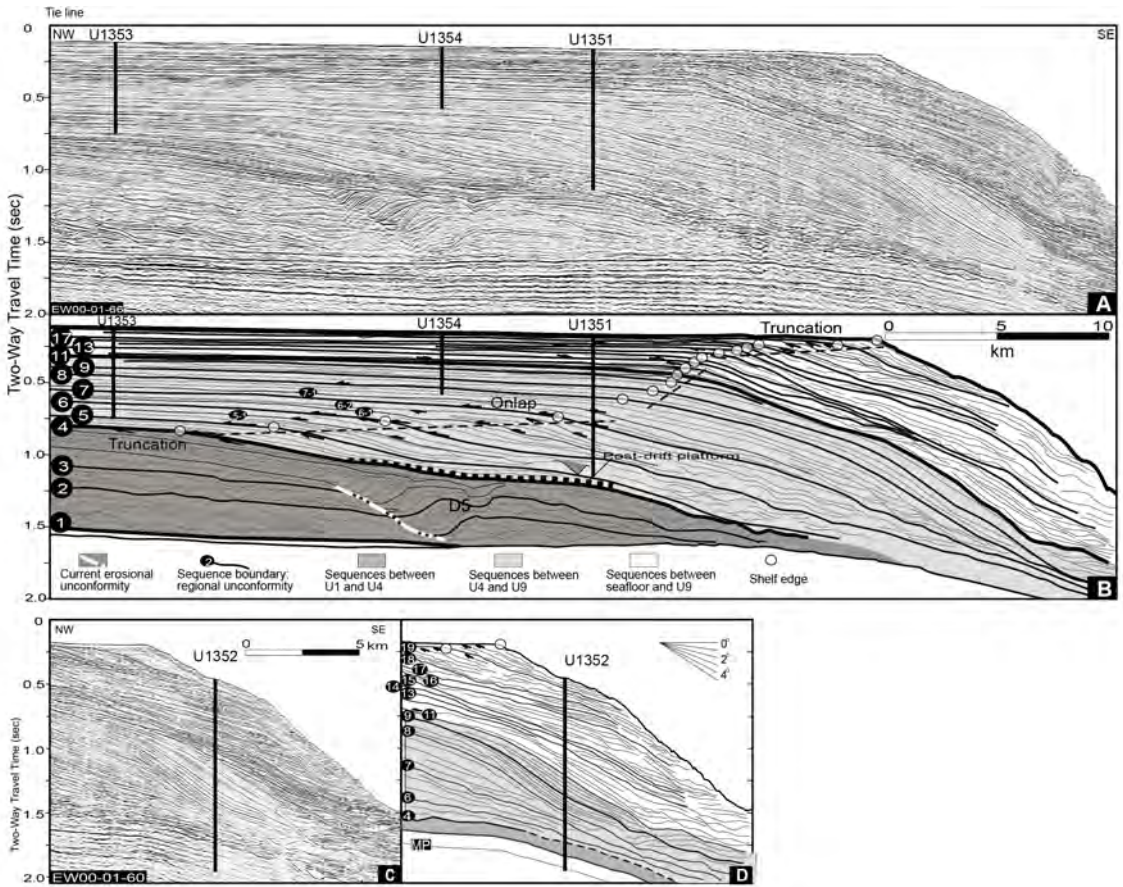


図2 地震波断面図. Fulthorpe *et al.* (2011) より作成.

地層形成プロセスと海水準の関係を明らかにするために重要であるとして、2009年11月4日から2010年1月4日までの掘削航海が実現した。なお、ニュージャージー沖についてもジャッキアップ式の掘削リグを用いた陸棚上の掘削がIODP, 313次航海としてほぼ同時期に実施されている。

ニュージーランド沖のExp. 317では、ニュージーランド南島カンタベリー平野東方沖の陸棚上で、陸側からU1353（水深85 m）、U1354（水深113 m）、U1351（水深122 m）の3つのサイトと水深344 mの上部斜面の1サイトで掘削がおこなわれた（図1）。これらのサイトを通る地震波断面には、中新統以降19のサイズミックシーケンス境界が認識されており（Lu and Fulthorpe, 2004）、今回

の掘削でこれらのサイズミックシーケンス境界を貫いてコアを採取した（図2）。陸棚の3サイトでは、上部中新統から完新統までの堆積物を得ることができ、特に上部鮮新統以上に関しては、ミランコヴィッチサイクルに対応した数万年周期の海水準変動の震幅を研究するに十分な回収率でコアを得た。一方、沖側の水深344 mの斜面上の掘削サイト（U1352）では、海底下1927.5 mまで掘削して始新統に到達した。その上部550 mは100%近いコアの回収率で、この区間では高精度の年代モデルを作成することが可能であり、地震波断面に示されたシーケンス境界を陸棚サイトと対比することで、この地域全域に高精度の時間面を設定することが可能である。なお、斜面サイトU1352

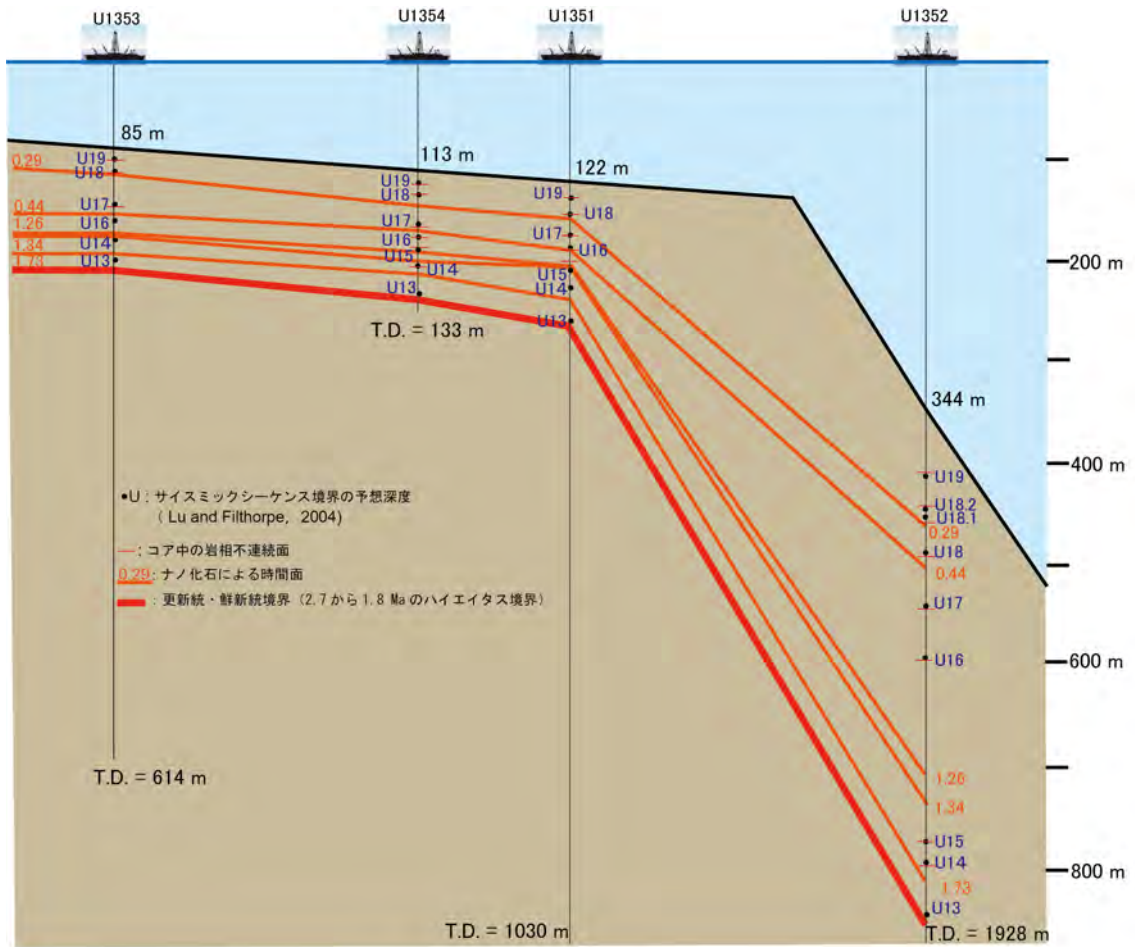


図3 サイスマミックシーケンス境界の予想深度とコア中の岩相不連続面、およびナノ化石基準面の関係

の上部 550 m までには、地震波断面中に U13 から U19 の 7 つのサイスマミックシーケンス境界が認められている (Fulthorpe *et al.*, 2011). 一方、陸棚上の 3 つのサイトでもこれら U13 より上の予想深度は比較的コア回収率の高い部分に位置している (Fulthorpe *et al.*, 2011).

この小論では、コアの回収率が良い後期鮮新世以降の堆積物を用いた地層形成、海水準変動、古海洋循環研究の進行状況について報告する。

## 2. 陸棚-斜面間のシーケンス境界の対比

シーケンス層序学の基本単位である堆積シーク

ンスは、陸側の不整合面とそれに連続する海側の整合面により上下を区切られた地層のパッケージをいう (Van Wagonor *et al.*, 1988). したがって、一つの堆積シークスは相対的海水準変動の 1 サイクルに対応して形成される (Posamentier *et al.*, 1988). しかし、シーケンス層序学は、地震波断面をもちいたサイスマミック層序学 (Vail *et al.*, 1977) から発展したため、地震波断面のもつ解像度と露頭やコアなど実際の地層観察の持つ解像度の違いがしばしば問題にされてきた (例えば Miall, 1997). そのためこの掘削の最大の目的は、地震波断面に見えているシーケンス境界を掘り抜いて





図 4 U1352Bの深度 200 m付近に見られる U17 に相当すると思われる生物擾乱を伴う岩相境界 (赤矢印).

コアを採取し、得られたコアを基に地層形成と海水準変動との関係を直接高解像度で考察することである。そして、今回の掘削では鮮新統以上の地層について、その目的を達成できる回収率でコア試料の採取がなされた。

図 3 はサイズミックシーケンス境界の掘削サイトにおける予想深度 (Fulthorpe *et al.*, 2011) とコア中でのその深度付近の岩相不連続面 (図 4) の位置、それにコアのナノ化石分析に基づく年代基準面である。このことから、解釈されたいくつかのサイズミックシーケンス境界は、ナノ化石基準面と斜交しており、これは地震波断面中の反射面の対比に問題がある可能性を示している。そこで、地震波断面だけでなく、粒度分析や蛍光 X 線分析結果なども参照してシーケンス境界の対比を再考している。このように、実際にコアを得て微化石などによる時間面や様々な分析がおこなわれることによって、地震波断面中の反射面として認識されているシーケンス境界の対比がより確かなものとなると考えられる。

また、U13 がその上位の他のシーケンス境界 (U14 から 19) と異なる性格を持つことを第 3 図は示している。全てのサイトの U13 の予想深度付近には微化石層序に基づく 2.7 から 1.8 Ma の 0.9 m.y. の地層欠如と粗粒な砂質堆積物を伴う岩相不連続がコア中に見られる (Fulthorpe *et al.*, 2011)。陸棚上ではこのハイエイタスは、陸上侵食すなわち不整合と考えられるが、海水準が下がっても陸上に露出しない水深 344 m のサイト U1352 においてもこのハイエイタスと岩相不連続は認められる。これが地震波断面で見えている U13 の実態であり、これより上位ではこのような長い時間を示すハイエイタスは認められない。このことから、U13 はシーケンス層序学で数 m.y. の時間幅を持って作られる第 3 オーダー堆積シーケンス (Vail *et al.*, 1991) を区切るシーケンス境界である。一方、U14 から 19 はそれぞれの形成間隔が数万年から数 10 万年で、第 4 次ないし 5 次オーダーの堆積シーケンス (Vail *et al.*, 1991) を形成している。

### 3. 氷期-間氷期サイクルと年代モデル

斜面上部の U1352B 孔の深度 500 m 付近にはシーケンス境界 U13 (1.8~2.7 Ma のハイエータス) が存在し、これより上位は 100% に近い回収率でコアを得ることが出来た。そのため現在から 1.8 Ma までの 180 万年間の連続記録をもつコアが採取されたことになる。このコアについて、約 1.5~2 m 間隔 (堆積速度から 7 千年から 1 万年の精度になる) で底棲有孔虫化石 *Nonionella flemingi* を採取し、その酸素同位体比と安定炭素同位体比を測定した (Hoyanagi, *et al.*, submitted)。この結果をこのコアのナンノ化石時間面 (Fulthorpe *et al.*, 2011) を利用して LR04 スタック (Lisiecki and Raymo, 2005) と対比し、MIS3 と 4 を除いた MIS1 から 63 までの氷期-間氷期ステージをすべて確認した (図 5)。なお、MIS3 と 4 は、コア深度 10.7~63.3 m の *Nonionella flemingi* が産出しなかった区間にあると思われる。その結果を基に 1.8 Ma から現在までの堆積速度曲線 (年代モデル) が作成されている (Hoyanagi, *et al.*, submitted)。

### 4. 古水深変動と海水準変動

斜面上部のコアから求められた氷期-間氷期サイクル (図 4) は、海水準の上下と一致する。したがって、これらとコア中に認められるシーケンス境界を示す岩相不連続面との対比によって、海水準変動の海面の位置とシーケンス境界形成の関係の議論に明確な答えを出すことが可能である。すなわち、シーケンス境界はユースタシーの低下速度の最も早い時期 (eustatic inflection Point) に形成される (Posamentier *et al.*, 1988) のか、最も海水準が低くなった時に形成される (Plint and Nummedal, 2000) のかという問題である。この問題についての詳細な議論は別途準備中である。

さらに、氷河性海水準変動の上下幅、すなわち振幅を見積もることも重要な課題である。珊瑚礁段丘と酸素同位体比との対比で海水準変動の振幅を見積もった研究 (Fairbanks and Mathews, 1978; Chappell and Shackleton, 1986) は、現在から過去

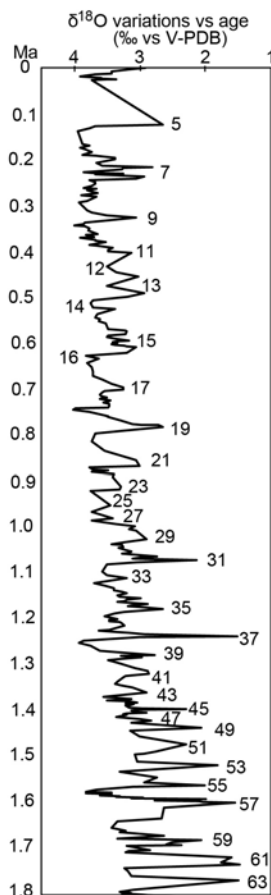


図 5 U1352B の上部 500 m の酸素同位体比変動と MIS 番号 (Hoyanagi *et al.*, submitted)。

底棲有孔虫 *Nonionella flemingi* から得られた酸素同位体比変動曲線を LR04 スタック (Lisiecki and Raymo, 2005) との対比をもとに年代軸に変換した。

20 万年の復元であり、一方、底棲有孔虫分析にもとづく水深変動から振幅を見積もった研究 (Naish, 1997; Naish and Wilson, 2009) は鮮新世の一部の時代を対象にしている。Miller *et al.* (2005) は後期白亜紀からの酸素同位体比変動を海水準変動量に換算しているが、底棲化石などにより見積もられた個々の古水深変動記録から求めたものではない。

陸棚上のサイト U1354 は、U13 の 2.7 から 1.8 Ma までのハイエータスを挟むが、上部鮮新統まで良い回収率でコアを得ている。今、このコアを

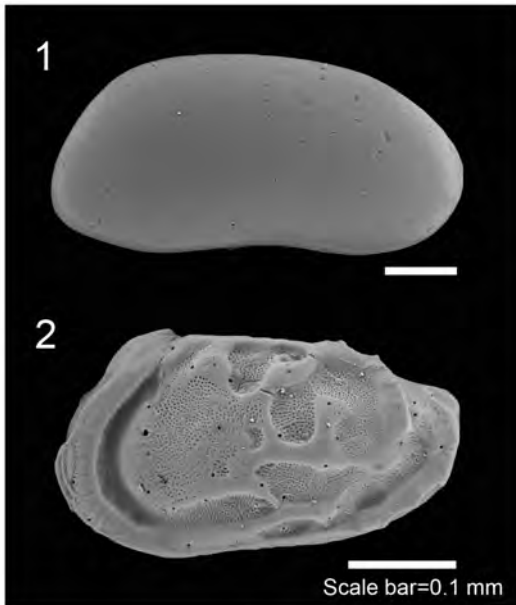


図6 卓越して産出する貝形虫化石の電子顕微鏡写真。スケールバーはそれぞれ0.1 mmを示す。1: *Argilloecia* sp., U1354B深度48.4 m付近の試料から、2: *Munseyella brevis*, U1354B 深度15 m付近の試料から。

用い底棲有孔虫と貝形虫化石の群集解析から、古水深変動を求めている。今回のように陸棚などの比較的浅い海域では、貝形虫化石(図6)が古水深指標として極めて有効である。また、このサイトでも底棲有孔虫化石 *Nonionella flemingi* を用いて酸素同位体変動曲線を作成している。さらに掘削地点は堆積速度、堆積盆地沈降速度などの研究(Browne and Field, 1988)がなされているので、この掘削で得られたサイトU1354の連続コアから古水深変動を求めて、そこから1.8 Ma以降と後期鮮新世(3.2~2.7 Ma)の氷河性海水準変動量の見積をおこなった。これについても詳細は報告を準備中である。

### 5. 古海洋循環と海水準変動

縁辺海域での掘削であるが、この海域は古海洋循環を考察する上でも重要な位置にある。すなわち、北から暖かい亜熱帯水塊の分流がニュージーランド南島の南端をまわってカンタベリー沖の陸

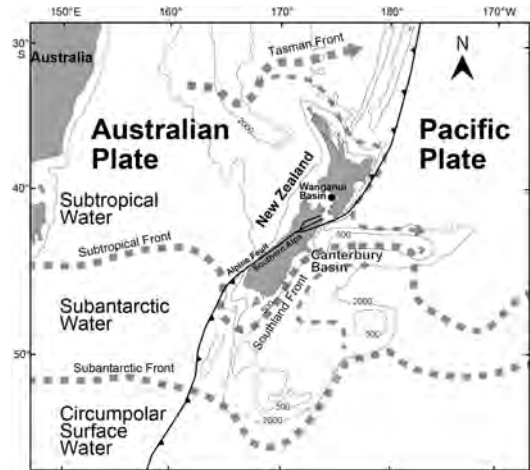


図7 ニュージーランド周辺の水塊構造。Fulthorpe *et al.* (2011) より作成。

棚上を北上している。その沖には亜南極水塊が存在しており、掘削地点付近の陸棚斜面がその境界部に位置している(図7)。このことから、この陸棚と斜面サイトの浮遊性、底棲生物はこれらの水塊の影響の時間的増減を記録しており、コア中のこれらの化石の分析によってこの海域での海流変化を知ることが出来る。これらの陸棚-斜面サイトの有孔虫化石と貝形虫化石の群集解析、さらに有機炭素の安定同位体比分析をここで示した氷期-間氷期サイクル(図5)と対比することで、1.8 Ma以降の気候変動、海流変動そして海水準変動の相互関係に関する考察を進めている。

### 6. まとめ

陸棚-斜面の掘削によって、これまで私たちが得ることが出来なかった陸域と海域の境の貴重な連続試料を得ることが出来た。この場所では地球変動に支配された海水準変動によって海域と陸域のせめぎ合いが起こっており、そこで形成された地層を連続的に解析することによって、海・陸の相互作用を考察できる。採取された試料の分析はまだ途中であり、やらなければならないことが多々残されている。この掘削によって得られたコア

に興味ある方は、IODP の HP などからコア写真やデータにアクセスして、私たちの研究に加わって頂ければと考えている。この小論が、海・陸境界域での地層研究の発展に寄与し、将来の日本周辺海域も含めた新たな陸棚-斜面域での掘削の挑戦に繋がっていくことを願っている。

謝辞：研究の遅れによりこの小論の執筆に時間がかかってしまい、川幡穂高先生はじめ世話人の先生方にご迷惑をおかけした。また、河瀉俊吾博士はじめ7名の乗船研究者の皆さまと長谷川四郎先生、池原 実博士はじめ陸上研究者の皆さまには、継続的にこの研究を進めて頂いている。海洋研究開発機構、日本学術振興会、信州大学理学部から研究費の援助を頂いた。これらの方々と機関に感謝いたします。

#### 参考文献

- [ 1 ] Austin, J. A., Jr., *et al.* (1998) : Proc. ODP, Init. Repts., 174A, 324p.
- [ 2 ] Browne, G. H., and Field, B. D. (1988) : CSPG, Memo., 15, 37-48.
- [ 3 ] Chappell, J., and Shackleton, N. J. (1986) : Nature, 324, 137-140.
- [ 4 ] Fairbanks, R. G. and Mathews, R. K. (1978) : Quaternary Research, 10, 181-196.
- [ 5 ] Fulthorpe *et al.* (2009) : IODP Sci. Prosp., 317.
- [ 6 ] Fulthorpe, C. S. *et al.* (2011) : Proc. IODP, 317.
- [ 7 ] Hoyanagi, *et al.* (submitted) : Proc. IODP, 317.
- [ 8 ] Lisiecki, L. E., and Raymo, M. E. (2005) : Paleocceanography, 20, pa1003.
- [ 9 ] Lu, H., and Fulthorpe, C. S. (2004) : G. S. A. Bull., 116, 1345-1366.
- [10] Miall, A. D. (1997) : The geology of stratigraphic sequences, 433p.
- [11] Miller, K. G. *et al.* (2005) : Science, 310, 1293-1298.
- [12] Naish, T. R. (1997) : Geology, 25, 1139-1142.
- [13] Naish, T. R. and Wilson, G. S. (2009) : Philo. Trans. Roy.Soc. Ser. A, 367, 169-187.
- [14] Plint, A.G. and Nummendal, D. (2000) : Geol. Soc. SP 172, 1-17.
- [15] Posamentier H. W. *et al.* (1988) : SEPM SP., 42, 109-124.
- [16] Vail, P. R. *et al.* (1977) : AAPG, Memo. 26, 49-212.
- [17] Vail, P. R. *et al.* (1991) : Cycles and events in stratigraphy, 617-659.
- [18] Van Wagoner J. C. *et al.* (1988) : SEPM SP., 42, 37-45.

