

地震被害軽減を目的とした浅海底活断層の活動履歴研究(II) —伊予灘東部海域MTL活断層系における実践例—

大塚 一広¹⁾・七山 太²⁾・三浦健一郎¹⁾・山本 高司³⁾・安間 恵³⁾
・三宅川 靖⁴⁾・長谷川 正⁴⁾・杉山 雄一²⁾・佃 栄吉²⁾

1. はじめに

平成13年度の独立行政法人化の際設立された活断層研究センターは、社会資本整備の充実を図るため、国内の活動性の高い98の活断層の活動履歴とその性状を明らかにすることによって長期的視野からの地震予知、将来引き起こされる地震の規模の想定、それに伴う強振動被害予測に寄与することを目的とした基礎研究を現在進行中である(杉山ほか, 2000)。その一貫として陸上の活断層調査以外にも本邦沿岸域の浅海底断層調査にも着手し、既に大阪湾断層や紀淡海峡中央構造線活断層系において成果をあげている(七山ほか, 1999, 2000)。

前報においては、最初に我々が行っている音波探査と長尺不攪乱コア試料解析を複合した浅海底活断層の研究手法を概説した。本稿においては、引き続き同手法によって得られた平成12年度伊予灘中央構造線活断層系の研究成果(三浦ほか, 2001; 大塚ほか, 2001)の概要を、その実施例として紹介する。

2. 調査目的および概要

愛媛県北西部、伊予灘海域には、四国を東西に分断する中央構造線(MTL)活断層系の西方延長部が伏在することが既存の音波探査で知られていた(緒方, 1975; 大野ほか, 1997; 松岡・岡村, 2000)。しかし本海域の断層系の活動履歴の解明を含めた総括的な研究は、過去に行われてこなかった。これら伊予灘の未知の浅海底断層系が一度活動すれば、四国最大の都市である松山市やその

周辺の平野部、さらに伊予市を含めた伊予灘沿岸の市町村に直下型地震災害をもたらす危険性が十分に示唆され、その最終活動時期、活動周期やこれらの起震断層から生じうる地震規模の特定が急務とされていた。

唯一、岡村 眞教授を中心とする研究グループは、伊予灘東部海域のMTL活断層系上灘沖北断層(堤ほか, 1990)においてピストンコアを用いて過去6,000年間の活動履歴を論じ、概ね2,000年の活動周期を報告しているが(小川ほか, 1992)、最新活動時期の議論も含めて伊予灘MTL活断層系全体の評価を行うには、これらは十分なデータとはいえない。

そこで活断層研究センターと(株)四国総合研究所は、伊予灘MTL活断層系総合調査の一環として、平成12年夏に伊予灘東部海域において広域シングルチャンネル音波探査を実施し、反射面の広域対比に基づいて同海域に分布する活断層の分布の掌握と活動セグメントの検討を行った。さらに、音波探査の結果から、最も明瞭な累積変位が認められた上灘沖北断層を対象として、海上ボーリングを実施して長尺不攪乱コアを採取した。さらに採取したコアを高精度で解析した結果、同断層を含めた伊予灘東部海域MTL活断層系の完新世における活動履歴を明らかにすることができた。

3. 伊予灘東部海域におけるシングルチャンネル音波探査の成果

シングルチャンネル音波探査は、愛媛県伊予市～西宇和郡伊方町の沖合約180km²(幅約5km×延長約37km)の伊予灘東部海域において広域に実

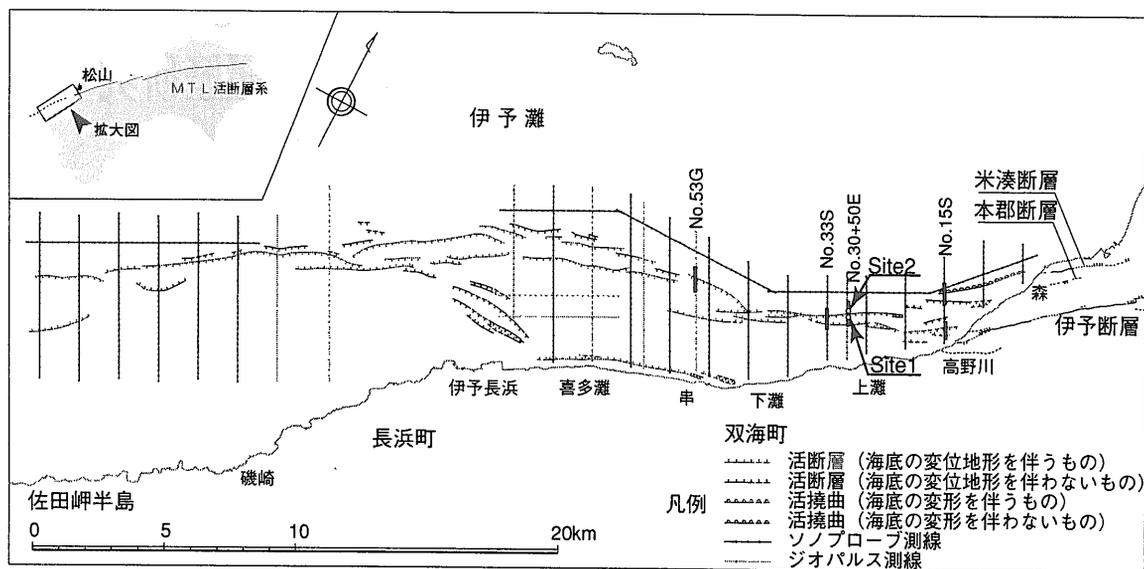
1) 産総研 活断層研究センター NEDO養成技術者

2) 産総研 活断層研究センター

3) 川崎地質(株)

4) 総合地質調査(株)

キーワード: 浅海底活断層, 伊予灘中央構造線活断層系, 完新世, 活動履歴, 音波探査, 海上ボーリング, 高精度コア解析, 地震イベント



第1図 音波探査測線図。作図の際に参照した文献は三浦ほか(2001)にある。

施した(第1図)。なお、音波探査には磁歪振動子方式のソノプロープ地層探査機を主に使用し、部分的に電磁誘導方式のジオパルス地層探査機を併用した。

今回得られた音波探査記録を解析した結果、音響基盤面以浅の堆積物(≒完新統)中に複数の反射面の存在が確認された(第2図)。特に、調査海域東部の上灘沖～串沖においては完新統が厚く分布し、しかもその中には大規模な浸食構造が認められず、解像度の高い良質の記録が得られた。この結果、a面(海底面)～1面(音響基盤面≒完新統基底面)までの総計12枚の反射面が確認された。このうちg面は、本海域全般において特に明瞭な反射面であり、後述する鬼界アカホヤ火山灰層(約7,300年前に降灰)にほぼ対比される。一方、長浜沖以西の海域においては、g面以浅の地層が潮流や海流の影響で欠落し、同海域への反射面の追跡は難しいことが判明した。

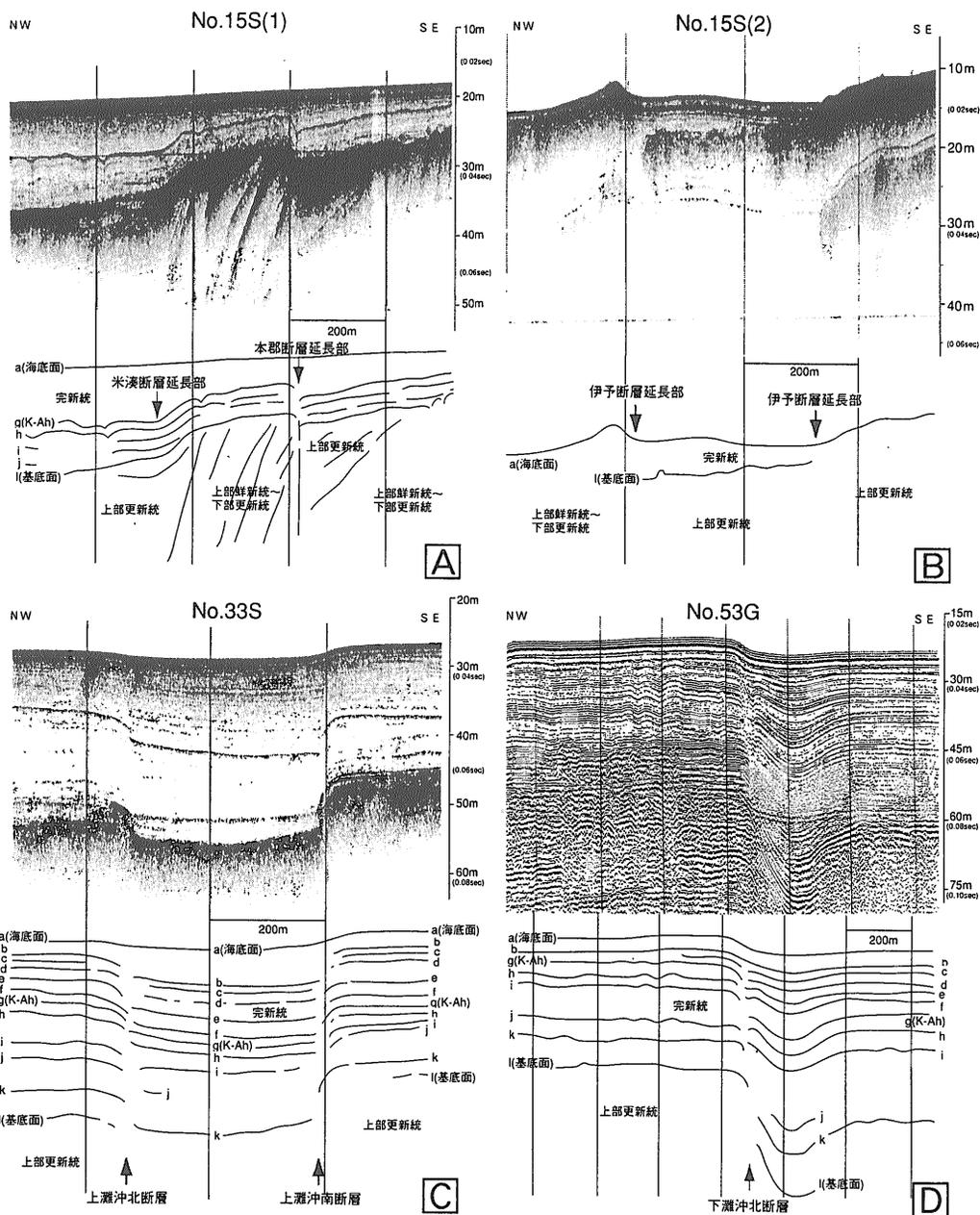
上灘沖～串沖において確認された12枚の反射面を用いて、調査海域における活断層の抽出をおこなった(第2図)。その結果、伊予灘東部海域のMTL活断層系は東北東-西南西の一般走向を有し、喜多灘～下灘の沖合で緩く逆S字状に屈曲していること。伊予長浜沖ではこの主断層系の南側に、ほぼ東西に延びる断層群が分布し、その東側の喜多灘～串の沿岸には東北東走向の断層が分

岐することが分かった(第3図)。これらの断層をさらに詳しくみると、南落ちと北落ちの対をなす断層が地溝や地塁を形成しているところと、南落ちもしくは北落ちの断層群からなるところがある。この屈曲部と分岐断層とに挟まれた部分は、右横ずれ断層運動に伴うプルアパートベースンに当たると推定できる。ゆえに当海域の活断層系は、その分布形態と性状から地下深部の横ずれ断層の運動が海底下浅部に伝播することによって形成されたと解釈される。

中田・後藤(1998)を参照し今回の音波探査データを概観してみるならば、伊予灘東部海域の活断層系は、このプルアパートベースンを境界として2つの活動セグメントに区別されることが明確となった(第3図)。そこで今回、東側の活動セグメントを上灘セグメント、西側を長浜セグメントと命名した。なお、断層系の連続性から判断するならば、東方延長の陸域に分布する伊予断層、米湊断層および本郡断層は上灘セグメントに含まれる可能性が高いことも判明した(第3図)。

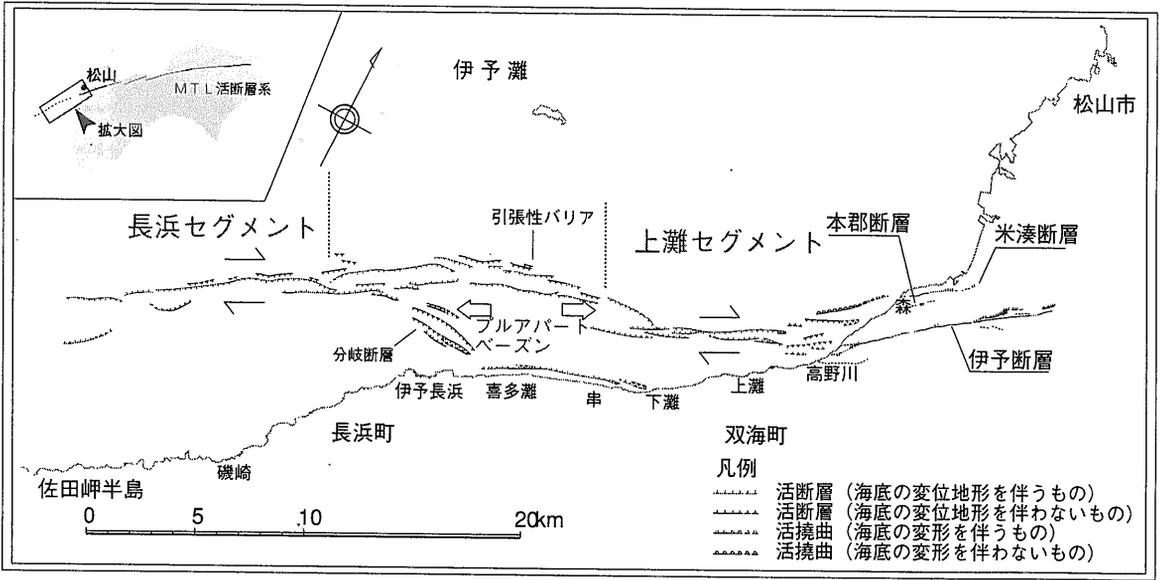
4. 台船を足場とした上灘コアの採取

広域音波探査の結果最も明瞭な累積変位が認められた上灘沖北断層をターゲットとして、再度ソノプロープ探査を実施した(口絵：第4図)。その結

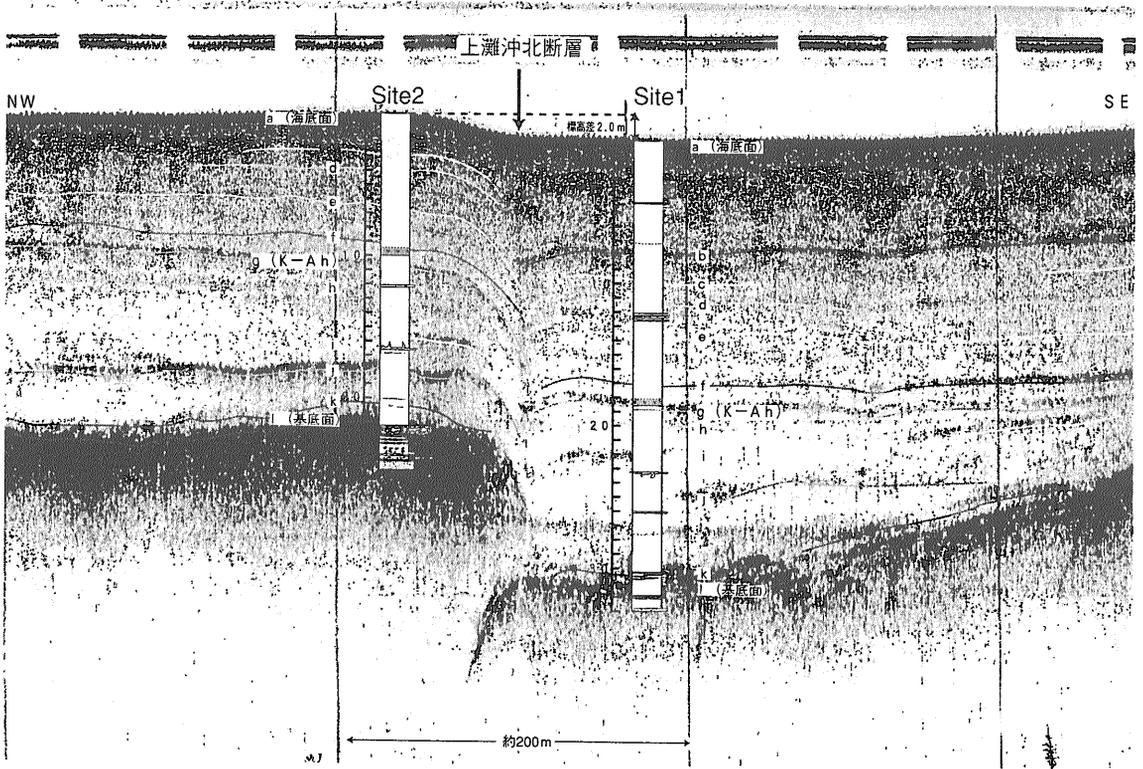


第2図 伊予灘東部海域における音波探査断面の代表例。測線位置は第1図にある。

- A) 調査海域東縁，森沖のソブローブ探査記録。南落ちの断層と北落ちの撓曲によって，それぞれ南縁と北縁を限られた地壘状の構造が伏在する。これらは，その位置と走向から，それぞれ陸域の本郡断層と米湊断層に連続すると考えられる(第1図)。
- B) 高野川沖のソブローブ探査記録。東北東方向に延びる幅300～500m程度の地溝が分布する。この地溝は，その位置と延びの方向から，陸域の伊予断層の海域延長に当たると考えられる(第1図)。
- C) 上灘沖のソブローブ探査記録。上灘沖から下灘沖にかけての海底には，東北東に延びる顕著な地溝が形成されている(第1図)。
- D) 串沖のジオパルス探査記録。下灘沖-串沖海域では，地溝の北縁を限る南落ちの断層の走向が東西に変化し，地溝の幅が西へ向かって急激に広がっている(第1図)。



第3図 伊予灘東部海域におけるMTL活断層系の分布とセグメント区分。作図の際に参照した文献は三浦ほか(2001)にある。



第4図 No.30+50E測線の音響断面上に投影されたSite 1およびSite 2コアの柱状図。a～lは音響反射面を示す。

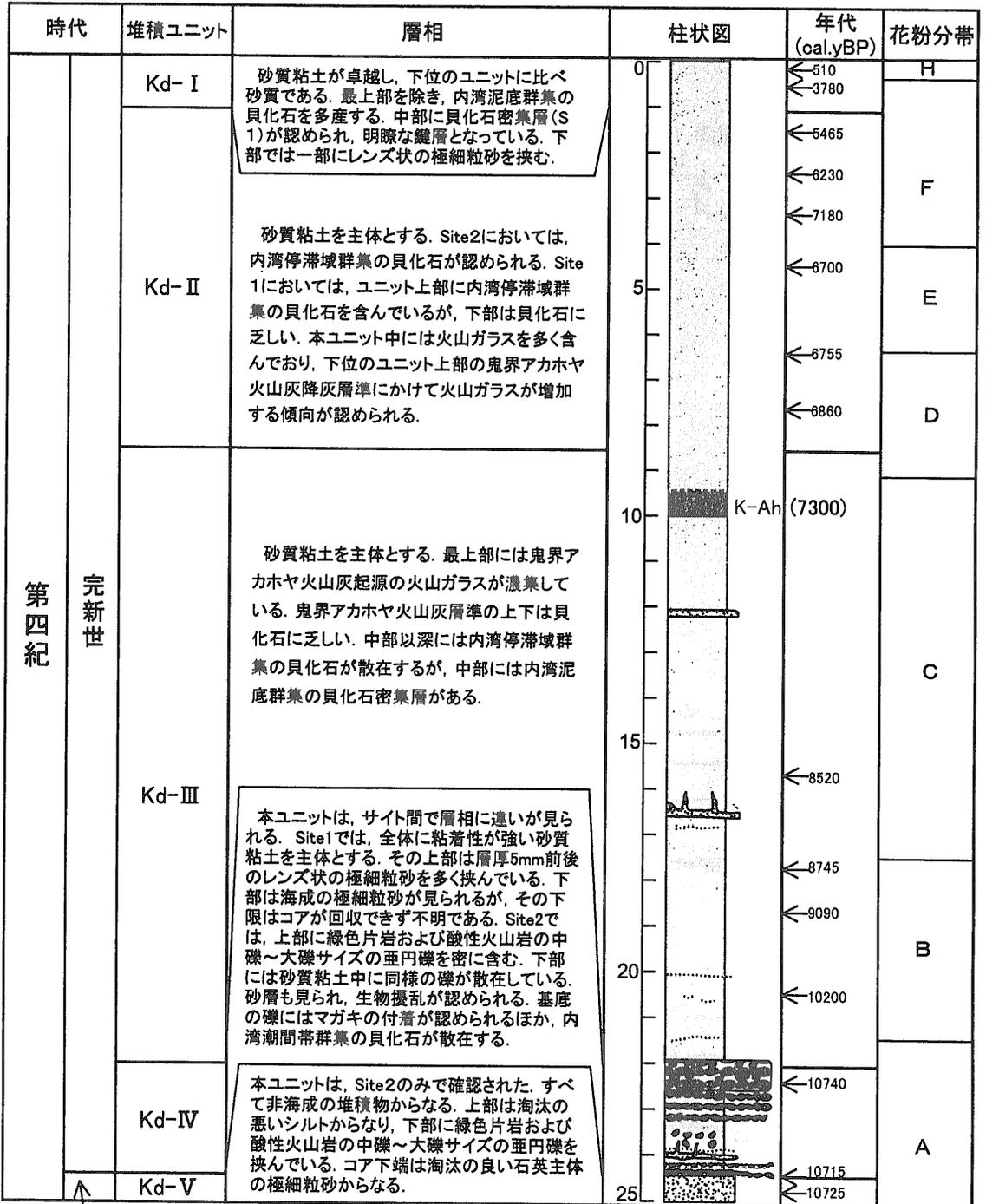
果, No.30+50E測線において, a面(海底面)～l面(音響基盤面)の各反射面が欠損無く確認され, しかもl面の上下変位量が断層の両翼で約12m程

度と明瞭な変位量を持つことが確認された(第4図)。

これを受けて, 台船を足場とした長尺不攪乱コ

ア試料採取作業を本測線上において実施した(第4図;口絵:第3図)。その結果,断層の下盤側(Site 1)と上盤側(Site 2)において,それぞれ掘削長

32.9mと24.5mのコアが95%以上の回収率で採取された(第4図)。また各地点において,重力式採泥(コア径11cm)を別途実施した。以下に採取された



第5図 上灘コアの層序総括図。

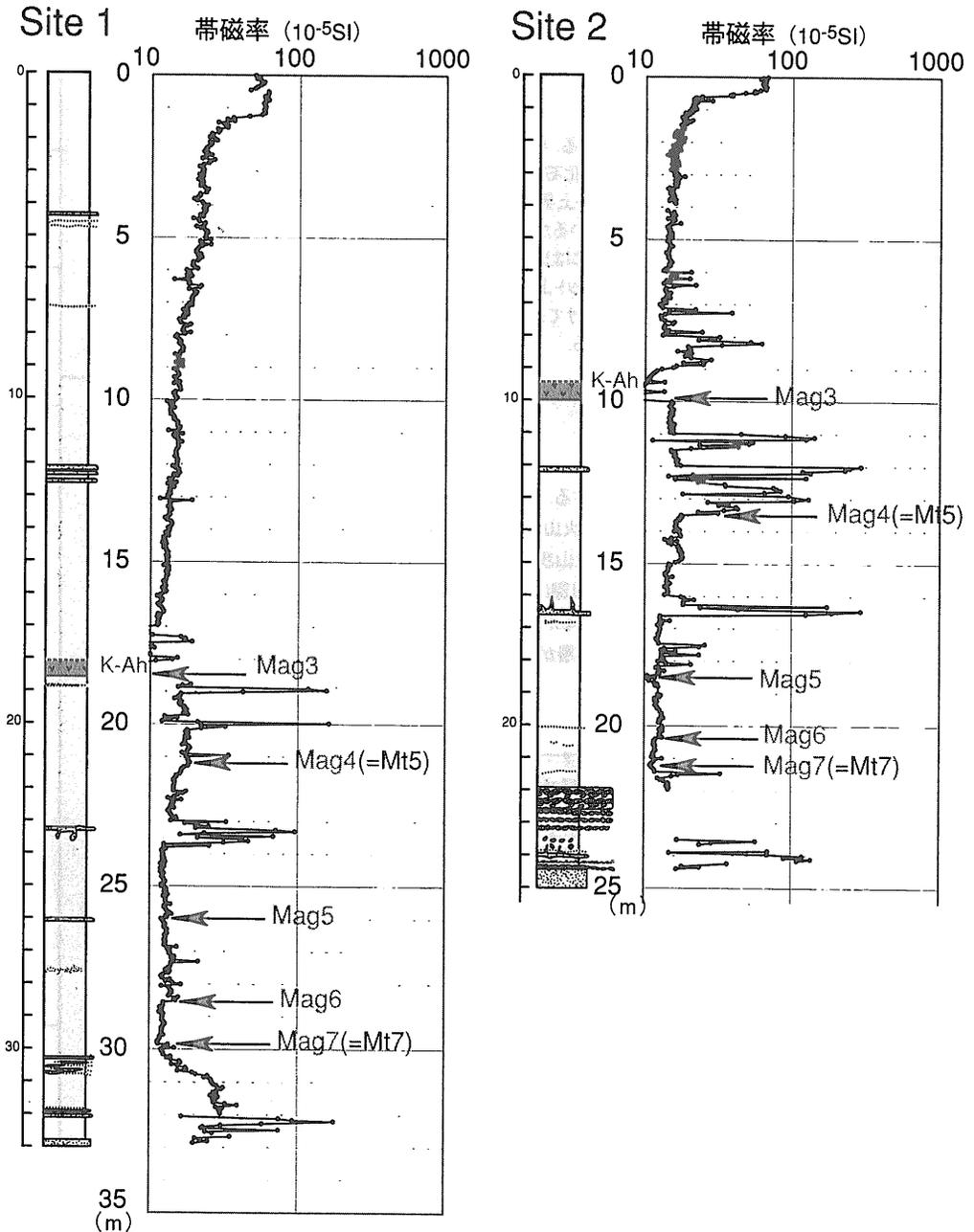
コアを総称して上灘コアと呼称する。

5. 上灘コアの層相解析

現地で採取された上灘コアは、研究室に搬入後、三浦ほか(2001)に準じてグラインダーによるア

クリルパイプ半割、引き続き写真撮影と層相記載が行われた(口絵：第5図)。

上灘コアは2地点ともほぼ共通した層相および層序を示す。Site 1の深度30.0mおよびSite 2の深度21.3mから各コア基底にかけては砂礫層が認められ、一部に大～中礫を伴っている。このうち Site



第6図 帯磁率測定結果とこれに基づくSite 1およびSite 2コアの対比基準面(Mag3-Mag7)。

2の深度24.3m以深には非海成砂が認められ、その上面の浸食面が海進面、浸食面の直上に位置するカキの付着した礫層が海進礫層に相当すると判断された。したがって、深度24.3mの浸食面より上位の部分が概ね完新統に当たると判断される(第4図)。

上灘コアの完新統は全体に海成の砂質粘土を主体とし、所々に極細粒砂の薄層や貝殻密集層を伴うものの総じて塊状を呈するが、軟X線写真の観察によると、各種底生生物による生物擾乱が著しいため堆積構造が破壊されているためと判断された。さらにSite 1の深度18.5mおよびSite 2の深度10.0m付近には火山ガラスの濃集層準が認められ、約7,300年前に降灰した鬼界アカホヤ(K-Ah)火山灰(福澤, 1995)に同定された(第5図)。

実体鏡観察およびスミアスライドを用いた鏡下観察の結果、砂質粘土中には貝殻片、ウニの針、有孔虫、貝形虫、海綿の骨針、海生および淡水種の珪藻、火山ガラス、材片が認められ、それぞれが系統的に増減することが判明した。砂粒子は細粒～極細粒を示す緑色を帯びた円磨度の低い石英粒子が主体であり、これらは、伊予灘沿岸に広く露出する三波川変成帯の緑色片岩起源と類推される。

上灘コアから産出する貝化石としては、ヨコヤマミミエガイ(*Striaca interplicata*)等の内湾泥底群集およびシズクガイ(*Theola lubrica*)等の内湾停滞域群集に属する種が多く確認された。特にSite1の深度2.6～3.0mおよびSite2の深度0.5～0.7mには内湾泥底群集の密集層が認められ、対比基準面S1として認定した。

上述の層相区分および貝化石群集の解析結果を参照して、上灘コアを5つの堆積ユニット(Kd-I～Kd-V)に区分した(第5図)。

6. 各種分析結果とそれに基づく対比面の設定

コア試料の記載後、5～10cmピッチで古地磁気測定用キューブを用いて採取した定容試料を用いて堆積物物性値の測定を行った。さらに別途、1mピッチで花粉分帯を実施し、これらの指標を用いて両サイトのコアの高精度層準対比を試みた。

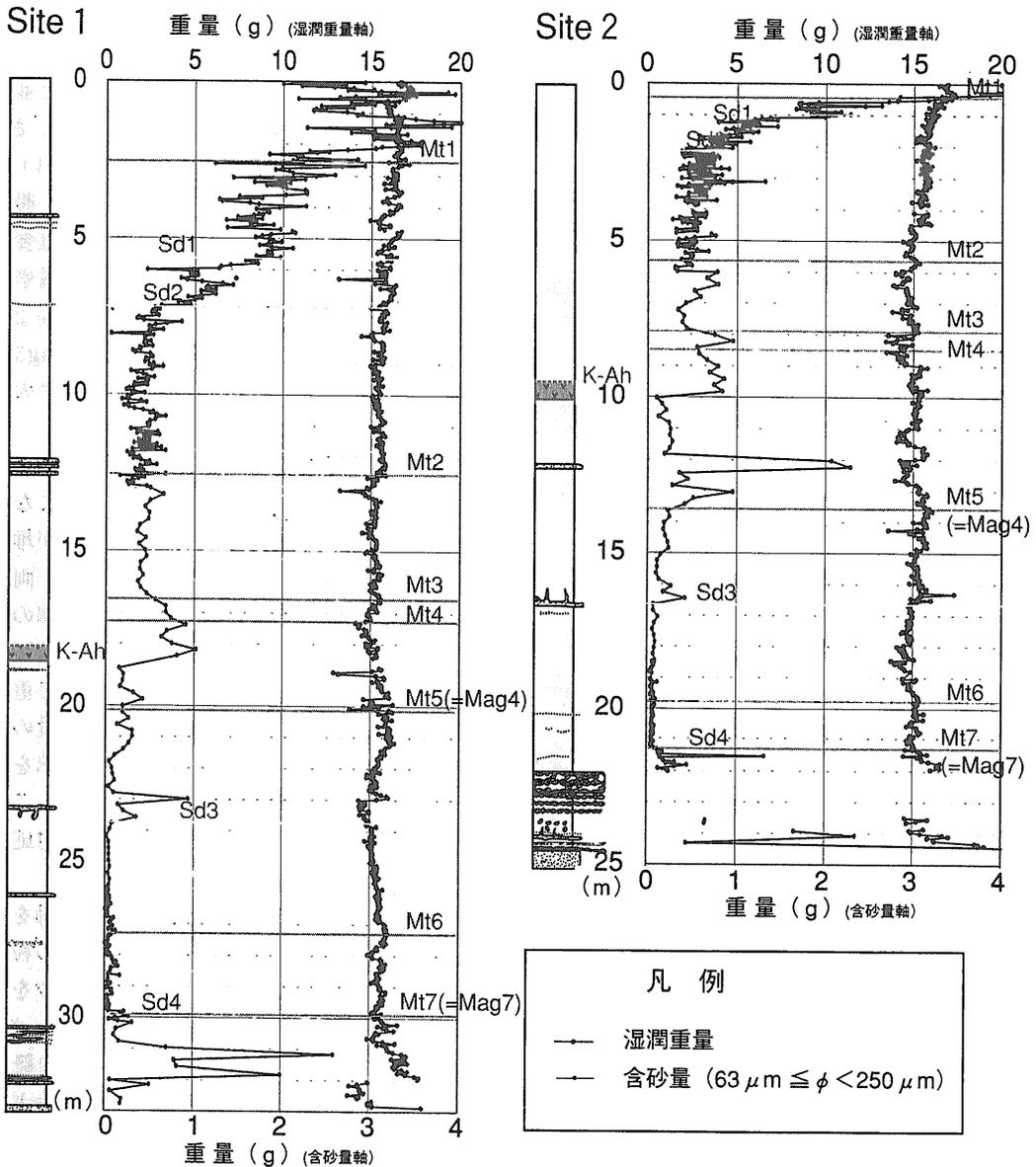
帯磁率測定の結果、上灘コア全体としては概ね

10～30×10⁻⁵(SI)程度の値を示すことが明らかになった。両コア基底の粗粒部(Site 1: 29.8m以深, Site 2: 21.3m以深)では、上方細粒化と並行して、帯磁率が上位に向かって減少している。さらに見かけ含砂量の多い両コアの最上部において、50～70×10⁻⁵(SI)のピークを示す。よって、帯磁率の変動は、上灘コアの含砂量や粒度の垂直変化によって規定されていると推定される。帯磁率の変動パターンと比較に基づいて、Site 1とSite 2の5つの層準を対比し、それぞれ対比基準面Mag3～Mag7とした。このうちMag3は鬼界アカホヤ火山灰の降灰層準と一致する(第6図)。

湿潤重量と乾燥重量を測定した結果、両コアは相似した変動パターンを示すことが明らかになった。この事実は、コア試料の重量のほとんどが堆積物によって占められていることを示している。両コアの基底部から鬼界アカホヤ火山灰降灰層準の上位約1mまでの間では、湿潤・乾燥重量とも増減を繰り返し、これより上位では海底面直下まで重量が次第に増加している。この湿潤・乾燥重量の変動パターンに基づいて、両サイトの7つの層準を対比し、それぞれ対比基準面Mt1～Mt7とした。このうちMt5はMag4、Mt7はMag7にそれぞれ対応する(第7図)。

含砂重量測定は250 μmおよび63 μmの篩を用いて水洗して求めた。このうち63～250 μmの粒子はSite 1の最下部層準において2.6gのピークを持つものの、29.86mにおいて急激に減少する。さらに23.81m層準で大きなピークを示すものの概ね0.4g以下で数値は安定している。鬼界アカホヤ火山灰降灰層準直下にあたる18.55mより上位においては0.2～0.7gで推移している。7.23mより上位においては、急激に重量が増加し、2～4.6gにまで達する。Site 2においても同様の変動が認められた。この結果を用いてSd1～Sd4の4つの対比基準面を設定した。このうちSd4はMt7およびMag7と明確に対応する(第7図)。

Site1の34試料とSite2の26試料に関して花粉分析を行った。その結果、主要構成要素(タクサ)の消長に基づいて、花粉帯区分を行い、Site1をA～Hの8帯に、Site2はG帯を除く7帯に区分した(第8図)。



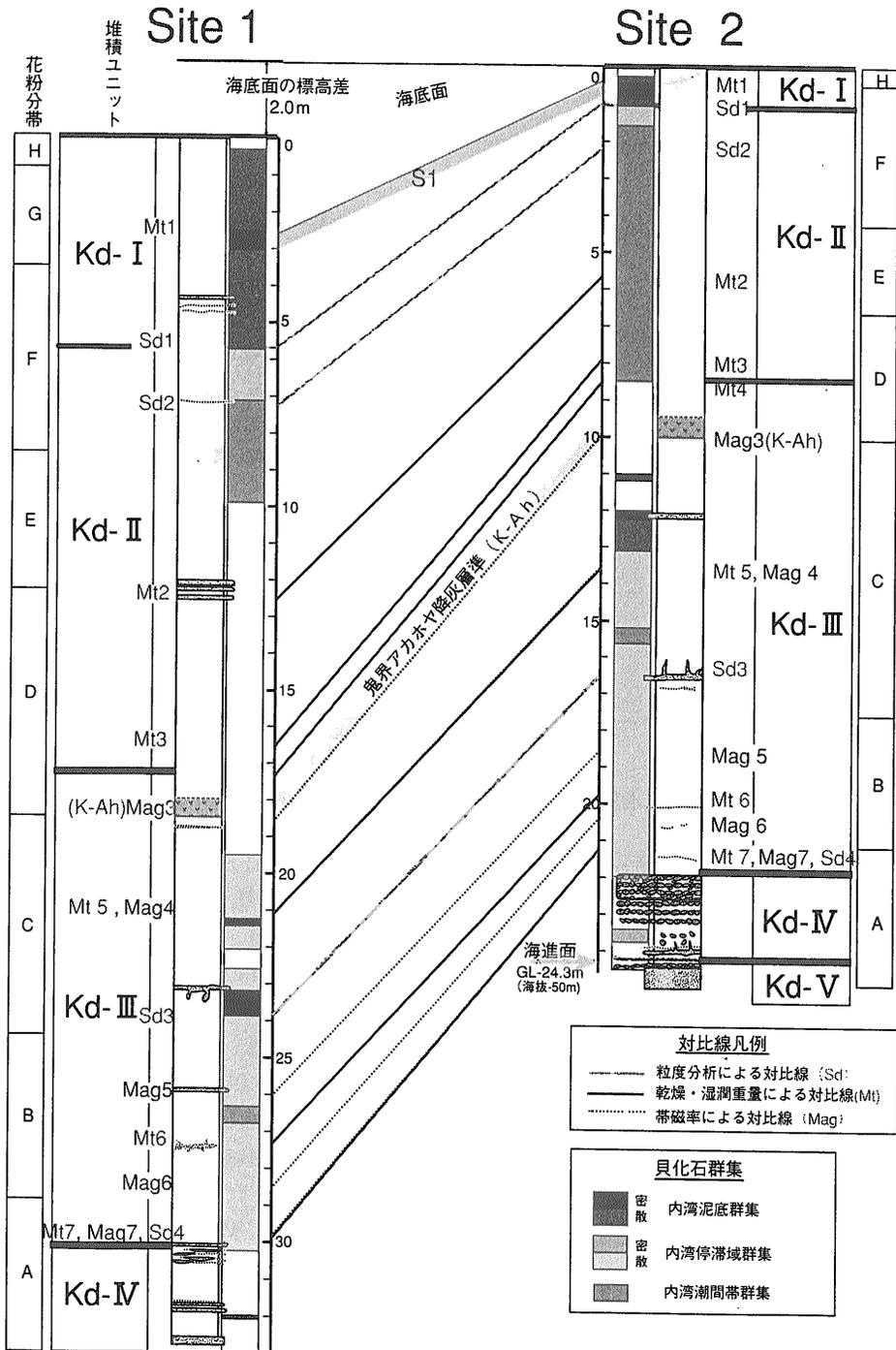
第7図 湿潤重量, 含砂量の測定結果とこれらに基づくSite1およびSite2コアの対比基準面 (Mt1-Mt7およびSd1-Sd4)。

7. 伊予灘東部海域MTL活断層系で発生した過去4回の地震イベント

上述した各対比基準面の年代を特定するため全40試料のAMS¹⁴C年代測定を実施し, 両サイトの堆積速度曲線を作成した。その際, 上灘コアでは内湾成の砂質粘土が卓越することならびに音波探査記録には顕著な浸食構造が認められないことから,

この海域の完新統中には大きなダイアステムは存在していないと推定した。なお, 上灘コアには分析に適した陸源の炭質物は少なく, 今回の分析には全て海成生物遺骸を用いた。海水のリザーバー効果(池原, 2000)を考慮するならば, 今回得られた年代数値は数100年程度ぐめにでていることは否めない。

Site 1の堆積速度曲線を例としてみるならば, 概

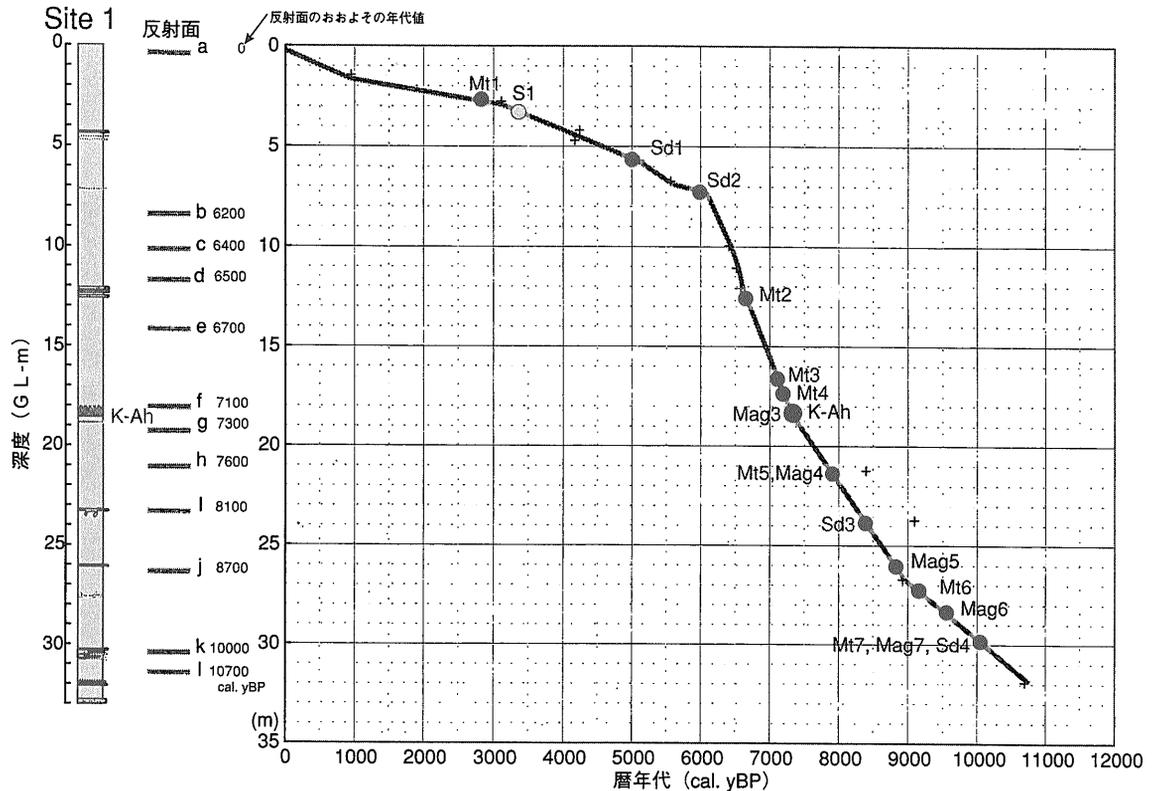


第8図 層序、貝化石群集組成、花粉層序および堆積物物性値の各基準面に基づくSite1およびSite2コアの対比総括図。

ね6,000暦年前を境として、堆積速度が大きく減少する。これは10,000～6,000年前は海進期にあたり、海進に応じて堆積速度が増大したが、それ

以降は海水準が概ね停滞し、これに伴って堆積速度が減少したためと解釈される(第9図)。

上述したコア解析の結果設定された対比基準面



第9図 過去11,000年間に於ける堆積速度曲線とこれに基づく各対比基準面および音響反射面の推定年代。

とSite 1～Site 2間の標高差を上位から順に示すと、Mt1：4.1m、S1：4.1～4.3m、Sd1：6.7m、Sd2：7.1m、Mt2：8.9m、Mt3：10.7m、Mt4：10.8m、Mag3（鬼界アカホヤ火山灰層に対応）：10.5m、Mt5=Mag4：9.6m、Mag5：9.4m、Mt6：9.6m、Mag6：10.2m、Mt7=Mag7：10.7mとなる（第9図）。対比基準面の標高差は、全体として、下位のものほど大きくなっており、これは上灘沖北断層の累積変位量を反映したものと解釈される。

さらに対比基準面の標高差の変化を詳しくみると、標高差が急激に大きく変化するところ、複数の基準面で標高差がおおむね等しくなっているところが交互に認められる。前者は断層活動による標高差の急減を、後者は断層活動間の“平時”の堆積状況を、それぞれ反映していると考えられる。この考え方に基づくと、上灘コアからは次の3つの地震イベントが推定される（第10図）。

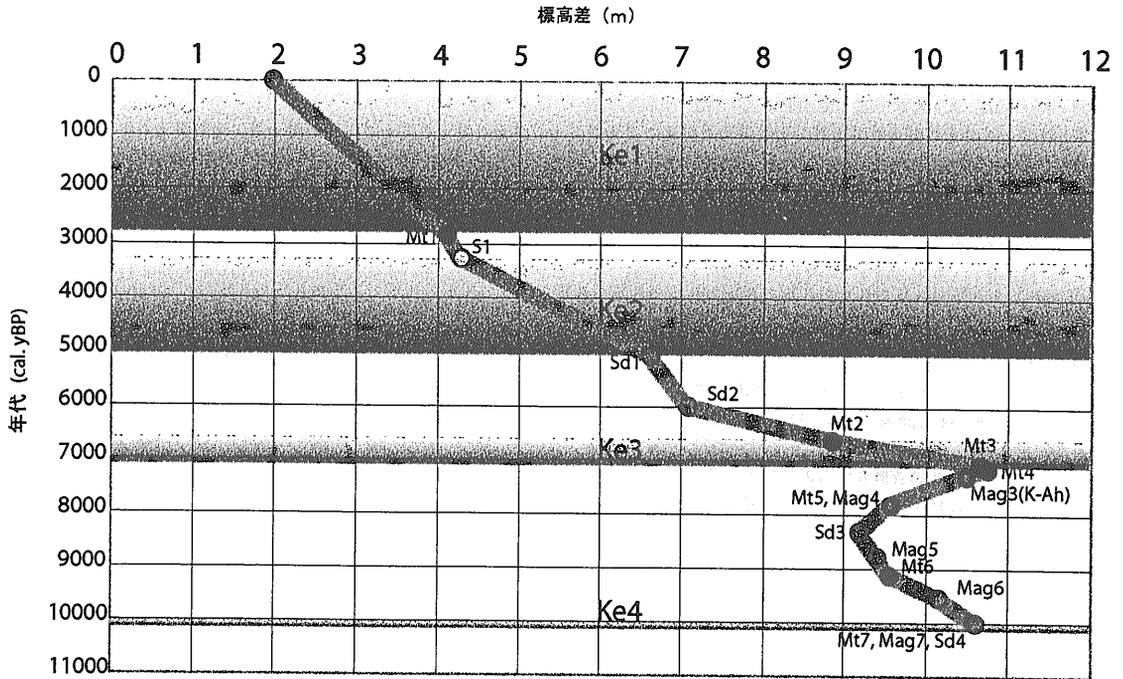
Ke1 イベント：Mt1と現海底面との間に推定される地震イベントであり、その年代は約2,900暦年前以降と推定される。

Ke2 イベント：Sd1とその上位のS1との間に推定されるイベントであり、約3,300～5,100暦年前に発生したと推定される。

Ke3 イベント：Mt3とその上位のMt2との間に推定されるイベントであり、約6,600～7,100暦年前に生じたと推定される。

上記3イベント以外に音波探査記録を詳細に解析すると、反射面k（Mt7とほぼ同層準～その直下）と反射面j（Mag5とほぼ同層準）との間に地震イベントが推定される（第4図）。一方、上灘コアの解析結果からは、Mt7の上位の層準には標高差の急減は認められず、地震イベント後の断層下盤側の埋積過程を暗示する標高差の軽微な減少が認められる。したがって、音波探査記録から推定された完新世初期のイベントは、Mt7の直下の層準で発生したものと推定される（Ke4 イベント；第10図）。

伊予灘東部海域のシングルチャンネル音波探査と上灘コアの高精度解析の結果から、上灘沖北断層は完新世に4回の活動を行ったと推定され、平均活動間隔は2,500～3,300年、一回あたりの垂直変



第10図 各対比基準面の年代-標高差の関係とこれから推定される4つの地震イベント(Ke1-Ke4)の発生時期。

位置は2~4mと見積もられた(第10図)。さらに広域音波探査の結果と照らし合わせてみるならば、これらの4つの地震イベントは伊予市周辺のMTL活断層系を含めた上灘セグメント全体に同時に生じたと解釈される。

Ke1イベントは陸上のトレンチ調査結果を参照するならば、中世の地震イベント(長谷川ほか, 1999)に対応する可能性が示唆されよう。

8. 最後に

浅海底断層の研究方法について、我々が現在検討を行っている伊予灘MTL活断層系の実例を交えて紹介した。前報でも触れたように、浅海底活断層調査の場合、音波探査によって広範囲に渡って断層の形態を明確にすることができること、この際、比較的自由に測線が設定でき、任意の断面が得られること、ならびに断層の変位速度が堆積速度を上回る海域においては複数の地震イベントが保存されやすく、Time-predictable recurrence model (Shimazaki and Nakata, 1980)の適用により再来周期や発生する地震の規模の検討が可能となるこ

とが最大のメリットと考えられる。但し、この手法で得られる断層の変位量は垂直成分のみであり、中央構造線活断層系のような横ずれ成分の卓越した断層の実変位量(ネットスリップ)を正確に見積もることは現在のところ難しい。

末尾ながら、活断層研究センターならびに(株)四国総合研究所の諸賢には日常的にご議論ご指導いただいている。高知大学の岡村 眞教授には、本研究実施にあたって、多数のご指導を頂いた。また、伊予灘海域調査に際し、海上保安庁水路部、松山海上保安部、愛媛県、双海町、関係漁業関係者の皆さまにはご協力いただいた。ここに記して謝辞としたい。

引用文献

- 福澤仁之(1995):天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物。第四紀研究, no. 34, 135-149.
- 長谷川修一・岡田篤正・大野裕記・小林修二・池田倫治・横田 裕(1999):中央構造線活断層系米湊断層の地下構造と活動度。四国総合研究所研究期報, no. 72, 44-55.
- 池原 研(2000):海底堆積物中の浮遊性有孔虫と有機炭素を用いた放射性炭素年代測定値の比較。地調月報, 51, 299-307.
- 松岡裕美・岡村 眞(2000):中央構造線系海底活断層の分布形態とその特徴。月刊地球号外, no. 31, 110-116.

- 三浦健一郎・七山 太・大塚一広・池田倫治・金山清一・長谷川正・杉山雄一・佃 栄吉(2001):伊予灘海域の中央構造線活断層系の完新世活動性評価(I)-シングルチャンネル音波探査の成果-。活断層・古地震研究報告, no. 1, 199-214.
- 三浦健一郎・七山 太・大塚一広・杉山雄一・佃 栄吉(2001):地震被害軽減のための浅海底活断層の活動履歴研究(I)-その研究手法概説-。地質ニュース, no. 568, p. 13-28.
- 中田 高・後藤秀昭(1998):活断層はどこまで割れるのか?-横ずれ断層の分岐形態と縦ずれ分布に着目したセグメント区分モデル-。活断層研究, no. 17, 43-53.
- 七山 太・杉山雄一・北田奈緒子・竹村恵二・岩淵 洋(2000):大阪湾断層及び和田岬断層の完新世活動性評価。地質調査所速報, no.EQ/00/2, 古地震研究調査概要報告書(平成11年度), 179-193.
- 七山 太・佃 栄吉・水野清秀・石井久夫・北田奈緒子・竹村恵二(1999):中央構造線活断層系, 友ヶ島水道断層の完新世における活動履歴調査。地質調査所速報, no. EQ/99/3(平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 235-252.
- 緒方正虔(1975):佐田岬半島北岸地域の地質構造-音波探査による海底地質の考察-。電力中央研究所報告(375006), 35p.
- 小川光明・岡村 真・島崎邦彦・中田 高・千田 昇・中村俊夫・宮武 隆・前空英明・堤 浩之(1992):伊予灘北東部における中央構造線活断層系の完新世活動。地質学論集, no.40, 75-92.
- 岡村 真・島崎邦彦・中田 高・千田 昇・宮武 隆・前空英明・堤 浩之・中村俊夫・山口智香・小川光明(1992):別府湾北西部の海底活断層-浅海底活断層調査の手法とその成果-。地質学論集, 40, 65-74.
- 大野裕記・小林修二・長谷川修一・本荘静光・長谷川 正(1997):四国西部伊予灘海域における中央構造線活断層系の深部構造とセグメンテーション。四国電力株式会社研究期報, no. 68, 48-59.
- 大塚一広・七山 太・三浦健一郎・池田倫治・金山清一・横山芳春・杉山雄一・佃 栄吉(2001):伊予灘海域の中央構造線活断層系の完新世活動性評価(II)-上灘沖ボーリングコアの解析結果-。活断層・古地震研究報告, no. 1, 215-232.
- Shimazaki, K. and Nakata, T. (1980): Time-predictable recurrence model for large earthquakes. Geophys. Res. Lett., 7, 279-282.
- 杉山雄一・寒川 旭・下川浩一・粟田泰夫・佐竹健治・水野清秀・吉岡敏和・小松原 琢・七山 太・苅谷愛彦・吾妻 崇・伏島祐一郎・佃 栄吉・須貝俊彦(2000):近畿三角帯における活断層調査-主要活断層の活動履歴と地震危険度-。第四紀研究, 39, 289-301.
- 堤 浩之・中田 高・小川公明・岡村 真・島崎邦彦(1990):伊予灘北東部海底における中央構造線。活断層研究, no. 8, 49-57.
-
- OTSUKA Kazuhiro, NANAYAMA Futoshi, MIURA Kenichiro, YAMAMOTO Takashi, ANMA Kei, MIYAKEGAWA Yasushi, HASEGAWA Tadashi, SUGIYAMA Yuichi and TSUKUDA Eikichi (2001): Historical activity of active faults in shallow marine for mitigation of earthquake damages (II): an example of active fault system of the Median Tectonic Line beneath the eastern part of Iyonada Inland sea, Southwest Japan.

<受付:2001年11月16日>