相対的海水準の急激な上昇イベントが示唆する 養老断層系の完新世活動

— 濃尾平野西縁におけるボーリングコアの解析から —

丹羽 雄一* 須貝 俊彦* 大上 隆史**
田力 正好*** 安江 健一** 藤原 治***

Holocene Activity of the Yoro Fault System, Western Margin of the Nobi Plain, Central Japan, Detected by Rapid Relative Sea-level Rise Recorded in 20 m-long Drilling Cores

Yuichi NIWA*, Toshihiko SUGAI*, Takashi OGAMI**,
Masayoshi TAJIKARA***, Ken-ichi YASUE** and Osamu FUJIWARA***

Abstract

A 6000-year history of relative sea-level change on the western Nobi plain, at the footwall side of the Yoro fault, was reconstructed from three drilling cores based on analyses of sedimentary facies, grain-size distributions and electrical conductivity (EC), as well as $^{20}\text{^{14}C}$ age determination. The Yoro fault comprises the northern part of the Yoro fault system. These cores show a prograding delta sequence. Two intervals characterized by fine deposits, mainly composed of fine sand, and high EC value are identified in sandy delta front deposits showing a general coarsening upward sequence. In synchronous with these changes in the delta front, a rapid rise of EC value is recognized in the abandoned channel fill deposits on the delta plain. These data suggest that temporal sea-level rise events occurred during the progradation process of the delta system. A probable cause of these events is coseismic subsidence. These subsidence events are dated at around 5600–4700 cal BP and 4600–3800 cal BP, respectively.

The above-mentioned subsidence events broadly correspond with previously known faulting events at the Kuwana fault to the south of the Yoro fault. Evidence for the faulting of the Yoro and Kuwana faults associated with two historical earthquakes (AD 745 and AD 1586) accompanied by coseismic subsidence and synchronicity of the subsidence events identified in this study and faulting events at the Kuwana faults suggest that subsidence events identified in this study are caused by faulting at the Yoro fault. These results are consistent with the notion that the Yoro and Kuwana faults comprise a behavioral segment in the Yoro fault system.

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻

** 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター

*** 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

+ 現所属：中央大学理工学部

++ 現所属：地震予知総合研究振興会地震調査研究センター

* Department of Natural Environmental Studies, Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

** Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

*** Active Fault and Earthquake Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

+ Present address: Faculty of Science and Engineering, Chuo University

++ Present address: Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction

Key words : coseismic subsidence, ^{14}C -AMS, relative sea-level rise, Nobi plain, drilling core, Yoro Fault System

キーワード : 地震沈降, ^{14}C 年代, 相対的海水準上昇, 濃尾平野, ボーリングコア, 養老断層系

I. はじめに

日本の活断層を震源とする大地震の長期評価のために、断層直上（オンフォールト）で数多くのトレンチ調査が行われ、多数のイベント認定と年代測定が行われ、それらの成果がまとめられている（地震調査研究推進本部, 2010）。しかし、例えば堆積速度の大きな平野のようにトレンチ調査の適用が困難な場所もある。そのような場所では、断層から離れた場所（オフフォールト）において、過去の大震災発生に関連したさまざまな地表および地下浅部の現象を手掛かりに大地震発生の時系列を解明する必要がある（山崎ほか, 2004）。

養老断層系は濃尾平野の西縁を画する活断層系で、北から養老断層・桑名断層・四日市断層の三条の逆断層からなり、その全長は約 55 km に達する（活断層研究会, 1991; 須貝ほか, 1999; 池田ほか, 2002; 図 1）。この断層系の活動履歴や活動セグメント（固有地震を伴う活動を繰り返す断層の最小単位 behavioral segment; MaCalpin, 1996）区分を明らかにすることは、この断層系から発生する地震の再来間隔と規模を推定し、濃尾平野周辺の地震防災を検討する上でも重要である。

養老断層は西側の養老山地と東側の濃尾平野の地形境界部に位置する。養老山地は主に中・古生界の堆積岩類で構成される（高田ほか, 1979）。一方、濃尾平野の地下には約 1500 m 以上の層厚を有する新第三系-第四系が存在することが知られている（須貝ほか, 1998）。このように、養老断層は濃尾平野西縁地域の地形・地質構造の境界をなす主要な逆断層である（桑原, 1968; Ishiyama *et al.*, 2007）。同断層の歴史時代の活動時期に関しては、群列ボーリング調査に基づいて、AD 745 年天平地震（宇佐美, 1996）と AD 1586 年天正地震（飯田, 1987）の震源断層である可能

性が示されたほか、完新世における平均活動間隔は 1500 年程度と見積もられている（須貝ほか, 1999）。

桑名断層と四日市断層は、中～後期更新世の段丘面を変位させており（貝塚, 1950; 松田ほか, 1977; 岡田, 1979; 活断層研究会, 1980, 1991; 大田・寒川, 1984; 吉田, 1984）、完新世段丘にも変位を与えていることが指摘されている（栗田・吉田, 1991）。養老断層から連続する桑名断層も AD 745 年天平地震（宇佐美, 1996）と AD 1586 年天正地震（飯田, 1987）の際に活動した可能性（須貝ほか, 1998）に加え、4 本のボーリングコア（図 1 の YR200, YR275, YR350, YR800）を使った内湾堆積物の堆積速度変化の詳細な解析によって、平野を沈降させる断層活動が約 6600 年前、約 5700 年前、約 4000 年前、約 3600 年前、約 2100 年前（いずれも暦年）の合計 5 回推定された（鳴橋ほか, 2004; Naruhashi *et al.*, 2008）。四日市断層は、桑名断層とは約 5 km 右ステップして連続する関係にある（図 1）が、過去 7000 年間の上下変位の累積パターンと最近 3 回の断層活動時期・上下変位量は、桑名断層とほぼ一致する（大上・須貝, 2006）。

養老断層系下盤側に位置する濃尾平野は、世界最大級の削剥速度をもつ中部山岳地域（Ohmori, 1983）から流下する木曽三川による碎屑物供給量が非常に多く、平野の地下には完新統が厚く堆積している。このような地域でのオンフォールト古地震学的検討は、河川堆積物の被覆が厚いことや、断層直上（オンフォールト）では撓曲変位が中心であることから、断層イベントの認定が難しい。このような場合、より古い過去の活断層の活動履歴を解明するための方法として、平野の地下に埋もれた地層から、間欠的沈降のようなオフフォールトイベント（MaCalpin and Nelson, 1996）を示す層相変化を読み出し、その年代を

図 1 位置図。

陰影図の作成に際しては国土地理院発行の 50 m メッシュ数値標高地図を使用した。YM(弥富)コア、OYD(大山田)コア、KZN(海津苑)コアは丹羽ほか(2009)、YR(東から汰上 No. 200, 汰上 No. 275, 汰上 No. 350, 汰上 No. 800)コアは鳴橋ほか(2004)、Naruhashi *et al.* (2008) による。

Fig. 1 Index map.

Shaded relief map of study area was prepared using a 50-m mesh digital elevation model (DEM) from Geographical Survey Institute of Japan. Core YM, OYD, and KZN are from Niwa *et al.* (2009). Cores YR (YR200, YR275, YR350, and YR800) are from Naruhashi *et al.* (2004, 2008).

測定することがあげられる。このような方法は、沈降速度の速い堆積平野縁辺の活断層や堆積平野下の伏在活断層の活動履歴を明らかにする上で大変重要であり、養老断層系でも完新世における活動履歴の推定に活用されている。丹羽ほか(2009)では、濃尾平野南部で掘削された 3 本のボーリングコア(図 1 の YM, OYD, KZN)の層相解析、電気伝導度から平野の沈降イベントが検出され、 ^{14}C 年代測定値から 2 回の歴史地震時の養老断層の活動による沈降イベントの可能性が示された。桑名断層については前述のように、鳴橋ほか(2004)、Naruhashi *et al.* (2008) によって

過去 7000 ~ 2000 年前の間に平野を沈降させる断層活動が 5 回推定された。

本研究では、養老断層の沈降側の濃尾平野西部から得られたボーリングコア(図 1 の KZ, KM, AN)の解析からオフフォールトイベントの検出とそれらの時期の特定を試み、同断層の歴史時代以前の活動履歴を推定する。また、その結果を桑名断層の活動履歴と比較することによって、両断層が 1 つの活動セグメントを構成している可能性を検討する。

用いたコアは、木曽川デルタの前進によって形成された地層から構成され(山口ほか, 2003; 大上ほか, 2009)、丹羽ほか(2009)で用いた 3 本のコアよりも上流側に位置することから、堆積物中には有史以前の木曽川デルタの形成過程と養老断層の活動による沈降の特徴(浅海域の一時的な水深増加化および陸上氾濫原の海面下への沈水に伴う層相変化)が記録されていることが期待される。

II. 濃尾平野西部の沖積層層序とコア試料

1) 沖積層層序

濃尾平野は養老断層系を主体とする構造運動により西方へ傾動しながら沈降する傾動盆地であり(桑原, 1968)、その傾動速度は 90 万年前以降約 $0.86 \times 10^{-4}/\text{kyr}$ 、沈降速度は最大約 1 m/kyr と見積もられている(須貝・杉山, 1999)。加えて、木曽川をはじめとする河川による活発な土砂供給のため、濃尾平野には、沖積層が最大で約 50 m 以上堆積している(山口ほか, 2006a)。

調査地域の沖積層の層序は、大半が木曽川デルタの堆積物であり、その層序と層相は井関(1962)、海津(1992)、山口ほか(2003)、大上ほか(2009)などによって研究され、堆積環境とデルタの形成プロセスが復元されてきた。山口ほか(2003)は、海津コア(以下 KZ と略記する)と大山田コア(OYD; 図 1)を用いて堆積構造や粒度の特徴によって、この地域の沖積層を下位から網状河川堆積物である沖積層基底礫層(BG)、蛇行河川~感潮帯堆積物である下部砂泥層(LSM)、プロデルタ堆積物である中部泥層(MM)、デルタフロント堆積物である上部砂層

表 1 既往研究（山口ほか, 2003, 2006b）の堆積相区分.

Table 1 Unit classification of middle to late Holocene in the Kiso River delta (Yamaguchi *et al.*, 2003, 2006b).

Classification	Lithofacies	Sedimentary Environments
TSM	Alternation of Sand/Mud	Delta Plain/Flood Plain (Channel, Abandoned Channel Fill, Natural Levee, Back Swamp, Tidal Flat)
US	Well Sorted Sand Coarsening Upward Silt - Sand	Delta Front
MM	Mussive Mud	Prodelta

表 2 コアの情報.

Table 2 Specifications of cores.

Core name	Drilled year	Ground level (m asl)	Drilling depth (m)	Distance from the Yoro fault (km)	Latitude and Longitude
Kaizu (KZ)	1998	1.90	601.0	5	35°13'31"N 136°40'15"E
Kammaki (KM)	2004	3.25	40.0	10	35°14'33"N 136°43'29"E
Asanishi (AN)	2004	3.30	44.3	5	35°18'45"N 136°34'58"E

(US), 現成の氾濫原堆積物である最上部層 (TSM) に区分した。大上ほか (2009) はさらに, コアデータを追加して, 過去約 6500 年間にわたるデルタの前進過程を明らかにした。これらの研究によると, 完新世木曽川デルタの平均的な前進速度は 5 ~ 10 m/yr と見積もられている。表 1 に本研究で対象とする中部泥層 (MM) 以浅に対して山口ほか (2003, 2006b) で報告されている調査地域周辺の堆積ユニット区分を示す。

2) ボーリングコア試料

研究対象としたコアは, 上記の海津コアに上牧コア (KM), 浅西コア (AN) を加えた 3 本である (図 1)。これらのコアは養老断層の下盤 (沈降) 側かつ中部泥層 (MM) の分布域 (山口ほか, 2006a) に位置する。また, 前述のように, 堆積物中にはより古い時代の木曽川デルタの形成過程と養老断層の活動による沈降の特徴が記録されていることが期待される。各コアの掘削地点の標高と掘削深度, 掘削年, 養老断層地表トレース (活断層研究会, 1991; 須貝ほか, 1999; Ishiyama *et al.*, 2007) からの距離, 緯度経度を表 2 に示す。

III. 分析方法

上述した 3 本のコアのそれぞれ深度 20 m 以浅の部分を対象に, 岩相記載, 粒度分析, 電気伝導度 (EC) 測定, ^{14}C 年代測定を行った。

岩相記載は 5 分の 1 スケールで行った。その際, 粒度, 堆積構造, 生物擾乱, 貝化石や植物片の有無を記載した。粒度分析は各コアの深度方向 5 ~ 20 cm 間隔でレーザー回折散乱式粒度分析装置 (SALD-3000S; 島津製作所) を用いて行った。分析用サンプルは, 生痕部分を避け, 代表的な岩相を示すと思われる部分から採取した。KZ コアの粒度データは, 同様の条件で測定された山口ほか (2005) を用いた。

EC 測定はコア深度方向 5 ~ 200 cm 間隔で EC メータ (ES-51; 堀場製作所) を用いて行った。EC 測定用の試料の作成方法は, 横山・佐藤 (1987) を参考にして, 110℃ で 48 時間以上乾燥させた後に粉碎した試料 5 g に蒸留水 60 ml を加えて混濁水をつくった。混濁水を攪拌して 1 時間後, 5 日後, 7 日後に測定を行い, 5 日後と 7

表 3 ^{14}C 年代測定結果.Table 3 ^{14}C age determination data.

Core	Lab code	Material	depth (m)	Altitude (m TP)	Conventional age(yrs BP)	Calibrated age (2 σ cal BP)
AN	JNC-6288	plant material	4.27	-0.97	1289 $\pm$ 50	1121-1298
AN	JNC-6289	plant material	6.87	-3.57	2052 $\pm$ 51	1896-2143
AN	JNC-7457	shell	11.13	-7.83	4330 $\pm$ 50	4305-4615
AN	JNC-6290	shell	11.36	-8.06	4298 $\pm$ 55	4242-4572
AN	JNC-6291	shell	14.18	-10.88	5103 $\pm$ 60	5313-5576
AN	JNC-6292	shell	18.05	-14.75	6419 $\pm$ 61	6734-7086
*1KM	JNC-7475	plant material	5.03	-1.78	1220 $\pm$ 50	1053-1277
*1KM	JNC-6298	plant material	7.90	-4.65	3759 $\pm$ 57	3965-4297
*1KM	JNC-6299	shell	10.45	-7.20	4526 $\pm$ 55	4555-4853
*1KM	JNC-6300	shell	13.95	-10.70	4657 $\pm$ 60	4764-5059
*1KM	JNC-6301	shell	17.14	-13.89	5128 $\pm$ 60	5320-5592
*2KZ	Beta-128275	organic sediment	5.65	-3.75	2170 $\pm$ 70	2002-2333
*2KZ	JNC-3241	wood	6.15	-4.25	3153 $\pm$ 61	3214-3483
*2KZ	Beta-123387	wood	9.20	-7.30	3170 $\pm$ 70	3240-3562
*2KZ	JNC-3242	wood	10.82	-8.92	3629 $\pm$ 67	3821-4101
*2KZ	JNC-3243	wood	12.10	-10.20	3645 $\pm$ 62	3828-4151
*2KZ	JNC-3244	wood	13.93	-12.03	3707 $\pm$ 66	3868-4241
*2KZ	JNC-3246	wood	16.86	-14.96	3683 $\pm$ 64	3843-4159
*2KZ	Beta-123388	organic sediment	17.80	-15.90	4370 $\pm$ 50	4839-5056
*2KZ	JNC-3247	shell	19.80	-17.90	4067 $\pm$ 62	3907-4294

*1 ^{14}C ages by Ogami *et al.* (2009)*2 ^{14}C ages by Yamaguchi *et al.* (2003)

日後で値がほとんど変化しないことを確認し、7 日後のデータを用いた。KZ コアについては、同様の方法で測定された山口ほか (2001) の EC データを用いた。

^{14}C 年代測定は AN コアに対して合計 6 試料を加速器質量分析 (AMS) 法によって日本原子力研究開発機構で行った。得られた年代値は CAL-IB5.0 (Stuiver and Reimer, 1993) で陸源物質に対しては INTCAL04 (Reimer *et al.*, 2004) を、貝化石に対しては MARINE04 (Hughen *et al.*, 2004) をそれぞれ用いて暦年較正した。調査地域のローカルリザーバ効果が現時点では不明なため、海洋表層水の平均値である 400 年で貝化石の年代値を補正した。また、KZ コアについては、山口ほか (2003) が報告した 9 個の年代値を、KM コアについては、大上ほか (2009) が報告

した 5 個の年代値を用い、同様の方法で暦年較正した。 ^{14}C 年代測定データを表 3 に示す。

IV. 堆積相区分と堆積環境の推定

各コアについて堆積相を区分し、堆積環境を推定した。EC から推定される堆積環境は、珪藻群集組成に基づく古環境との対応を検討した内園・森 (2004) を参考に、0.6 mS/cm 以下であれば淡水性、それ以上であれば汽水～海水性と堆積環境を推定した。図 2 に柱状図、中央粒径、淘汰度、EC、 ^{14}C 年代値の分析結果を示す。

堆積相 1: 本相は、KM コアの深度 18.00 m 以深、AN コアの深度 17.80 m 以深に認められる。この地層は、貝化石を含む泥層からなり、中央粒径と淘汰度はそれぞれ、KM コアで 5.6 ~ 6.4 ϕ 、1.9 ~ 2.1, AN コアで 6.0 ~ 7.0 ϕ 、1.9 ~ 2.0

図 2 ボーリングコアの柱状図と分析結果。
 KZ コア (a), KM コア (b), AN コア (c). ^{14}C 年代値は 2σ の誤差範囲で示した。

Fig. 2 Columnar sections and results of core analyses from Core KZ (a), KM (b) and AN (c).
 Each radiocarbon age covers 2σ age range.

である。EC は KM コアで 1.5 mS/cm 以上, AN コアで 1.1 mS/cm 以上を示す。 ^{14}C 年代値は, AN コアの深度 18.05 m の貝化石からは 6734-7086 cal BP の較正年代が得られた。

細粒で均質な粒子で構成されること, 貝化石を含み, EC が海水成を示す高値であること, 後述のデルタフロント堆積物に覆われることから, 内湾・プロデルタ堆積物と解釈される。

堆積相 2: 本相は, KZ コアの 20.00 ~ 7.90 m, KM コアの深度 18.00 ~ 7.89 m, AN コアの深度 17.80 ~ 9.19 m に認められる。この地層は上方粗粒化を示す砂質シルト~中粒砂層からなる。KM コアと AN コアともに下位層との境界は漸移的である。各コアともに上方粗粒化に伴って中央粒径が 6 ϕ から 1 ϕ へと, 淘汰度は 1.8 ~ 2.2 から 0.5 へと変化する。下部~中部で生物擾乱痕が多く, 中部~上部では植物片, 斜交層理が認められる。AN コアではシルトの偽礫が認められる。KZ コアの深度 13.43 m (図 2 の境界面 I), KM コアの深度 14.70 m (図 2 の境界面 II), AN コアの深度 13.00 m (図 2 の境界面 IV) と深度 11.10 m (図 2 の境界面 V) を挟んでそれぞれ一時的な細粒化が認められる。それぞれの境界面を挟んで中央粒径は 3.0 ϕ から 4.2 ϕ (境界面 I), 4.8 ϕ から 6.1 ϕ (境界面 II), 1.6 ϕ から 4.7 ϕ (境界面 IV), 1.9 ϕ から 3.4 ϕ (境界面 V) へとそれぞれ変化する。

EC は KZ コアで 0.3 ~ 2.4 mS/cm, KM コアでは 0.5 ~ 1.9 mS/cm, AN コアでは 0.2 ~ 1.6 mS/cm をそれぞれ示し, 各コアとも上方に減少する傾向が認められる。また, KZ コアの境界面 I を挟んで 0.7 mS/cm から 1.9 mS/cm へ, KM コアの境界面 II を挟んで 1.4 mS/cm から 1.9 mS/cm へ, AN コアの境界面 IV を挟んで 0.7 mS/cm から 0.9 mS/cm へ, AN コアの境界面 V を挟んで 0.4 mS/cm から 1.1 mS/cm へとそれぞれ一時的に EC が上昇する。

^{14}C 年代値は, KZ コアで 3907-4294 ~ 3240-3562 cal BP, 4839-5056 cal BP の較正年代が, KM コアで 5320-5592 ~ 3965-4297 cal BP の較正年代が, AN コア 5313-5576 ~ 4242-4572

cal BP の較正年代がそれぞれ得られた。

この地層は, 内湾・プロデルタ堆積物を整合的に覆うこと, 上方粗粒化の特徴や EC が下位で海水成を示す高値で上位に向かって減少することから, デルタフロント堆積物と解釈される。植物片が上位ほど増加することは河口からの距離が近づいたことを示しており, これは上方浅海化とも関連していると考えられる。本相の堆積年代は, 上流側ほど古く, 下流側ほど若い。これらのことは, 本相がデルタフロント堆積物であるという見解を支持する。

また, KZ コアの深度 13.43 m の境界面 I を挟んだ上方粗粒化する 2 つの堆積ユニットを DF1・DF2 に細分する。同様に KM コアの深度 14.70 m の境界面 II を挟んだ上方粗粒化する 2 つの堆積ユニットを DF1・DF2 に, AN コアの深度 13.00 m の境界面 IV と深度 11.10 m の境界面 V を挟んだ上方粗粒化する 3 つの堆積ユニットを DF1・DF2・DF3 にそれぞれ細分する。これらの成因については後述する。

堆積相 3: 本相は, KZ コアの 7.90 ~ 1.40 m, KM コアの深度 7.89 ~ 1.13 m, AN コアの深度 9.19 ~ 0.35 m に認められる。この地層は有機物を多く含むシルト層と斜交層理の発達する細粒砂~中粒砂層を主とする。AN コアでは砂礫層が認められる。

EC は KZ コアの深度 5.70 m で 1.6 mS/cm, KM コアの深度 7.80 m, 7.00 m, 6.50 m, 6.00 m で 2.6 ~ 3.7 mS/cm の高値をそれぞれ示す以外はすべて 0.6 mS/cm 以下の低値を示す。

^{14}C 年代は, KZ コアで 2002-2333 cal BP と 3214-3483 cal BP の較正年代が, KM コアで 1050-1293 cal BP の較正年代が, AN コアで 1121-1298 cal BP と 1896-2143 cal BP の較正年代値がそれぞれ得られた。

デルタフロント堆積物を覆うという層位関係から, 氾濫原・デルタプレーン堆積物と解釈される。このことは一部の層準を除いて EC が陸上堆積を示す低値であることから支持される。本相は岩相・EC の特徴から以下の 6 の堆積相に細分される。

堆積相 3.1: 本相は、KM コアの深度 7.89 ~ 7.74 m に認められる淘汰の悪いシルト層（中央粒径 5.2 ϕ ，淘汰度 2.1）である。EC は 2.8 mS/cm を示す。デルタフロント堆積物を覆うこと、EC が約 2.8 mS/cm で海水の影響を示すことから、干潟堆積物（TF）の可能性が考えられる。

堆積相 3.2: 本相は、KZ コアの深度 6.08 ~ 5.70 m，2.00 ~ 1.40 m，KM コアの深度 7.74 ~ 7.41 m，4.20 ~ 2.86 m，1.91 ~ 1.13 m，AN コアの深度 5.12 ~ 3.65 m に認められる細粒砂 ~ 粗粒砂層（中央粒径 0.4 ~ 2.8 ϕ ，淘汰度 0.3 ~ 1.8）である。砂層は上方細粒化を示し，斜交層理やシルトの偽礫が認められる。EC は KZ コアの深度 5.70 m で 1.6 mS/cm を示す以外は 0.6 mS/cm 以下である。上方細粒化を示すことや斜交層理，シルトの偽礫が認められる，という特徴から砂質チャネル堆積物（CH）と解釈される。

堆積相 3.3: 本相は，AN コアの深度 9.19 ~ 5.94 m に認められる砂礫層である。上方細粒化する礫 ~ 極細粒砂層のセットからなる。細礫を主体とし，植物片を含む砂層を挟む。上方細粒化する礫 ~ 極細粒砂層のセットからなるという特徴から，礫質チャネル堆積物（GC）と解釈される。

堆積相 3.4: 本相は，KZ コアの深度 4.00 ~ 4.58 m，KM コアの深度 5.43 ~ 4.20 m，AN コアの深度 5.94 ~ 5.12 m，3.65 ~ 0.35 m に認められる。泥炭層や有機質シルトなど有機物を多く含む粘土 ~ シルト層（中央粒径 4.8 ~ 8.0 ϕ ，淘汰度 1.6 ~ 2.2）からなる。EC は 0.6 mS/cm 以下を示す。有機物を含み，粘土 ~ シルトを主体とすることから，後背湿地堆積物（BS）と解釈される。

堆積相 3.5: 本相は，KM コアの深度 7.41 ~ 5.43 m に認められる。砂質チャネル堆積物を覆う淘汰の悪いシルト層（中央粒径 5.6 ~ 6.7 ϕ ，淘汰度 1.8 ~ 2.1）からなり，植物片を含む。硫黄の析出が肉眼で認められる。EC は 2.6 ~ 3.7 mS/cm を示す。砂質チャネル堆積物を覆う淘汰の悪いシルト層という特徴から，放棄チャネル堆積物（CF）と解釈される。下位の砂質チャネル堆積物との境界（図 2 の境界面Ⅲ）を挟んで本

相が高 EC 値を示す原因については後述する。

堆積相 3.6: 本相は，KM コアの深度 2.86 ~ 1.91 m に認められる。シルト ~ 極細粒砂層（中央粒径 3.3 ~ 6.1 ϕ ）からなる。淘汰が悪く（淘汰度 1.4 ~ 2.2），深度 2.20 m では中央粒径 - 0.8 ϕ の粗粒砂の薄層を含む。EC は 0.6 mS/cm 以下を示す。全体的に淘汰が悪く，粒径の鉛直変化が大きいことから自然堤防堆積物（NL）と解釈される。

V. 考 察

1) 木曽川デルタの発達過程

大上（2009），大上ほか（2009）をもとにデルタの前進過程を模式的に示してみると（図 3），木曽川デルタのデルタフロントは，7000 年前頃に AN コア掘削地点を通過し，約 4000 年前頃には KZ コア掘削地点まで達したことがわかる。デルタフロントが通過した後は，主に河川の氾濫原で堆積した地層がデルタを覆った。

各地点のコアには，デルタが前進して浅海環境から陸へ変化していく過程を反映した地層のサクセッションが期待される。しかし，コアの層相，粒度，化学分析結果の鉛直変化および ^{14}C 年代値からは，木曽川デルタの前進過程は単純ではなく，丹羽ほか（2009）と同様，デルタが前進する途中で相対的海水準の上昇があったことが推定される。

2) デルタフロント堆積物の一時的な細粒化

デルタフロント堆積物（US）が全体として上方粗粒化を示す（図 2）のは，デルタが前進して掘削地点に河口が近づくにつれて粗粒な堆積物が増加したためと解釈できる。その過程で一時的に急激な細粒化と EC の上昇が認められる（KZ コアの深度 13.43 m；図 2a の I，KM コアの深度 14.70 m；図 2b の II，AN コアの深度 13.00 m；図 2c の IV，11.10 m；図 2c の V）。

デルタフロント堆積物においてこのような急激な細粒化が起こる原因としては，（1）掘削地点が一時的に堆積物の供給源から遠くなった，あるいは（2）洪水で泥の供給が増加したことが考え

図3 濃尾平野西部の模式的な地質断面図。ボーリングの位置および投影軸 (A-B) は図1に示す。YM, KZN, KZ, KMの各コアのUS/MM境界以深の堆積層と等時間面は大上ほか(2009)を参照した。ANコアのUS/MM境界以深の堆積層は大上(2009)を参照した。

Fig. 3 Schematic Geologic cross-section of the western Nobi Plain.

The locations of cores and projection line (A-B) are shown in Fig. 1. For the cores (YM, KZN, KZ, and KM), sedimentary facies below the US/MM boundary and isochrones are from Ogami *et al.* (2009). For the AN core, sedimentary facies below the US/MM boundary are from Ogami (2009).

られる。洪水が原因であればコア掘削地点には通常時よりも多量の淡水が流入したはずであるが、それではECが高くなることを説明できない(丹羽ほか, 2009)。したがって、デルタフロント堆積物の細粒化の原因として、掘削地点が一時的に堆積物の供給源から遠くなったことが考えられる。このプロセスは次のように説明される。

すなわち、海面下のデルタフロントでは、河口が近づくにつれて上方粗粒化する地層が堆積し、河川の影響が強まるに従ってEC値は下がりつつあった(図4a)。一時的な相対的海水準上昇により、海岸が内陸に入り込んだ結果、コア掘削地点が河口から遠ざかることになり、粗粒物質が供給されにくくなると同時に海水の影響が強まってEC値が高い地層が堆積した(図4b)。その後再びデルタが前進して河口が近づくにつれて、次第に上方に粗粒で、ECが低い地層が堆積した(図4c)。

3) 放棄チャネル堆積物の高EC値

KMコアの深度7.41～5.43 m(図2bのⅢ)に認められる放棄チャネル堆積物は、上下の地層との位置関係から陸上で堆積したと考えられるにもかかわらず、ECが2.6～3.7 mS/cmを示し海水環境を示唆する。このECの一時的な上昇には、次のようなプロセスが考えられる(図5)。

デルタの前進によって陸化したKMコア掘削

地点では、河道変化によって河道が放棄された(図2bのCHからCFへの岩相変化、図5a)。当時の海面高度は、チャネル堆積物の下位の干潟堆積物の高度付近であったと推定される。一時的な相対的海水準の上昇により放棄された河道の滞筋に海水が侵入した(図2bの境界面Ⅲを挟んだECの上昇、図5b)。その結果、ECの高い地層が堆積した。その後、コア地点が陸化するまでECの高い地層が堆積し続けた(図5c)。

4) 境界面Ⅰ～Ⅴを挟んで認められる相対的海水準上昇イベントの年代

境界面Ⅰ～Ⅳを挟んだ相対的海水準の上昇を示唆する5つのイベントについて、その年代を検討する(図6)。以降、境界面Ⅰ～Ⅴを挟んで認められる相対的海水準上昇イベントをイベントⅠ～Ⅴと呼ぶことにする。

KZコアで得られた較正年代はDF1で3868-4241 cal BP, DF2下部で3828-4151 cal BPであるので、イベントⅠは4200年前から3800年前の間に起こったと考えられる。

KMコアのDF1の較正年代が5320-5592 cal BP, DF2下部の較正年代が4764-5059 cal BPであることから、イベントⅡは、5600年前から4700年前の間に起こったと推定される。KMコアのCFで認められるイベントⅢは、DF2最上部の較正年代(3965-4297 cal BP)とBSの較

図 5 急激な相対的海水準上昇を反映した放棄チャネルへの海水の侵入の堆積モデル。
左図は模式的な氾濫原の微地形と地質断面（山口ほか, 2006b）を、右図は KM コア地点における粒径と EC の模式的な鉛直変化とそれに対応する堆積ユニットを示す。a. 相対的海水準上昇が起こる前；b. 相対的海水準上昇が起こった直後；c. 相対的海水準上昇が起こった後。

Fig. 5 A sedimentary model explaining marine water invasion in abandoned channel reflecting rapid relative sea-level rise.

The left figure shows micro-topography and schematic geologic cross-section of the flood plain (Yamaguchi *et al.*, 2006b). The right figure shows vertical change of grain size and EC and sedimentary facies in the KM core site of the left figure. a. Before rapid relative sea-level rise; b. Shortly after rapid relative sea-level rise; c. After rapid relative sea-level rise.

沈下量は濃尾平野のほとんどの地点で数 cm オーダーと見積もられている（東海三県地盤沈下調査会, 2009）。この値は本研究で検出された急激な相対的海水準上昇を説明するには小さすぎる。また、圧密による地盤沈下は継続的であることから急激な相対的海水準上昇の原因として可能性は低い。

地震沈降については、約 1200 年前と約 500 年前に濃尾平野西部で急激な相対的表面上昇が起こったこと、それらの原因として 2 回の歴史地

震（AD 745 年天平地震・AD 1586 年天正地震）時の養老断層系の活動による地震沈降の可能性が高いことが報告されている（丹羽ほか, 2009）。地震沈降であれば、急激な層相変化・粒度の細粒化・EC の上昇とイベントの同時性を説明することができる。5600 ～ 4700 年前、および 4600 ～ 3800 年前に地震沈降が濃尾平野西縁に発生し、相対的海水準上昇をもたらしたと考えることがもっとも合理的である。

- * Evidence for faulting events of Yoro fault identified by Sugai *et al.* (1999)
 ** Evidence for coseismic subsidence identified by Niwa *et al.* (2009)
 *** Evidence for coseismic subsidence identified by this study
 **** Evidence for faulting events of Kuwana fault identified by Sugai *et al.* (1998) and Naruhashi *et al.* (2004,2008)

図6 養老断層系の活動イベントの時空間ダイアグラム。

左端のコラムは養老断層の活動イベントの時期を、コア名 (YM, OYD, KZN, KZ, KM, AN) のコラムは養老断層の活動に起因する可能性のある沈降イベントの年代推定幅を、右端のコラムは既往研究で推定された桑名断層の活動イベントの時期をそれぞれ示す。

Fig. 6 Space-time diagram of the Yoro fault system.

Columns of YM, OYD, KZN, KZ, KM, and AN show age ranges of subsidence events from faulting of the Yoro fault, whereas the leftmost and rightmost columns show faulting at the Yoro and Kuwana faults, respectively.

6) 養老断層系の活動と活動セグメント

地震沈降の原因としては、養老断層系をはじめとする調査地域周辺の活断層による断層活動があげられる。図6に今回見出した地震沈降イベントと養老断層系で認められた既報の地震イベントを整理した。養老断層ではAD 745年天平地震とAD 1586年天正地震で活動が推定されているほか、約4000～3000年前に1回、約9000～4000年前に約3回の断層活動が推定されている

(須貝ほか, 1999)。

4600～3800年前のイベントIとVは、養老断層で推定された約4000～3000年前の活動、あるいは約9000～4000年前の約3回の活動のいずれかと対比されそうである(図6)。また、イベントIとVは桑名断層で推定された約4000年前の活動(Naruhashi *et al.*, 2008)とも年代的に近い(図6)。5600～4700年前に推定されるイベントIIとIVは、養老断層で推定された約

9000～4000年前の約3回の活動のうちいずれかに対比可能であり、また、桑名断層で推定された約5700年前の活動(Naruhashi *et al.*, 2008)とも年代的に近い(図6)。4300～1000年前に推定されるイベントⅢは、年代推定幅が広すぎて、既知のイベントと対比することが現時点では難しい。

以上から、本研究で検出された時代の異なる2つの地震沈降イベントは、養老断層の活動と矛盾しない時期に発生しており、養老断層の活動に起因する可能性が高い。また、イベントⅠとⅤ(約4600～3800年前)とイベントⅡとⅣ(約5600～4700年前)は桑名断層の活動時期に対比される。これらのことから、養老断層の活動として新たに知られた2つの地震イベントの発生時期は桑名断層の活動時期に対応するものであり、養老断層と桑名断層が同時に活動を繰り返してきた可能性が推定される。桑名断層の活動として知られる約2100年前のイベントも養老断層のイベントⅢに対比される可能性(図6)を考慮すると、それぞれが独立して活動した記録は認められなくなる。すでに、須貝ほか(1999)はAD 745年天平地震、AD 1586年天正地震の際、養老断層と桑名断層が同時に活動した可能性を指摘している。今回の古地震対比の結果からみても養老・桑名断層はこれまで同時に活動した可能性が高く、両断層が同一の活動セグメントをなすと考えることが妥当である。

VI. ま と め

養老断層下盤側(沈降側)に位置する濃尾平野で掘削された3本のボーリングコアの解析に基づいて、同断層の完新世における活動の痕跡を検出することを試みた。その結果以下のことが明らかになった。

1. 養老断層からやや離れた地点の堆積環境の復元から広域的に起こった沈降イベントを認定した。

2. デルタフロント堆積物で水深増加と河口からの距離の増大を示す一時的な細粒化とEC値の増加が約4700～5600年前にはKMコアとAN

コアで、4600～3800年前にはKZコアとANコアで認められた。また、岩相から陸上堆積を示唆する放棄チャネル堆積物で海水の侵入を示す高EC値が4300～1000年前にKMコアで認められた。これらは一時的な相対的海水準上昇が起こった可能性を示し、その原因として地震沈降があげられる。

3. 上記2回ないし3回の地震沈降は養老断層の活動に起因する可能性が示唆され、¹⁴C年代に基づく、これらすべての活動が養老断層の南側に位置する桑名断層の活動と同時に起こったと考えても矛盾しない。

4. この地震イベントの対比が正しければ、養老断層と桑名断層は同一の活動セグメントをなす可能性が高い。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、松島紘子氏、三枝芳江氏、若林 徹氏をはじめとする東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻の院生諸氏、中央大学理工学部の吉田英嗣博士にはさまざまなご議論をいただいた。核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)東濃地科学センターのベレトロン担当スタッフの方々には年代測定に際して便宜を図っていただいた。本研究では、核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)東濃地科学センター、地質調査所(現産業技術総合研究所活断層・地震研究センター)によって掘削されたボーリングコアの一部を使用させていただいた。本稿は匿名の査読者のご指摘・助言によって改善された。以上の方々に深く感謝致します。

文 献

- 栗田泰夫・吉田史郎(1991): 桑名断層および四日市断層の完新世における活動. 活断層研究, **9**, 61-68.
- Hughen, K.A., Baillie, M.G.L., Bard, E., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Bronk Ramsey, C., Reimer, P.J., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. (2004): Marine04 Marine radiocarbon age calibration, 26-0 ka BP. *Radiocarbon*, **46**, 1059-1086.
- 飯田汲事(1987): 天正大地震誌. 名古屋大学出版会, 552p.

- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編 (2002): 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 260p.
- 井関弘太郎 (1962): 沖積平野研究の基礎的問題点. 名古屋大学文学部研究論集, **26**, 51-74.
- Ishiyama, T., Mueller, K., Sato, H. and Togo, M. (2007): Coseismic fault-related fold model, growth structure, and the historic multisegment blind thrust earthquake on the basement-involved Yoro thrust, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B03S07, doi:10.1029/2006JB004377.
- 地震調査研究推進本部 (2010): 今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧. 地震調査研究推進本部, 13p.
- 貝塚爽平 (1950): 桑名市西部の断層地形. 地理学評論, **22**, 352-356.
- 活断層研究会 (1980): 日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会, 363p.
- 活断層研究会 (1991): 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会, 437p.
- 桑原 徹 (1968): 濃尾盆地と傾動地塊運動. 第四紀研究, **7**, 235-247.
- MaCalpin, J. (1996): Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research. in *Paleoseismology* edited by MaCalpin, J., Academic Press, 439-493.
- MaCalpin, J. and Nelson, A.R. (1996): Introduction to paleoseismology. in *Paleoseismology* edited by MaCalpin, J., Academic Press, 1-28.
- 松田時彦・太田陽子・岡田篤正・清水文健・東郷正美 (1977): 空中写真による活断層の認定と実例. 地震研究報, **52**, 461-496.
- Nakada, M., Yonekura, N. and Lambeck, K. (1991): Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: Implications for tectonic histories and mantle rheology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **85**, 107-122.
- 鳴橋龍太郎・須貝俊彦・藤原 治・栗田泰夫 (2004): 完新世浅海堆積物の堆積速度の変化から見た桑名断層の活動間隔. 第四紀研究, **43**, 317-330.
- Naruhashi, R., Sugai, T., Fujiwara, O. and Awata, Y. (2008): Detecting vertical faulting event horizons from Holocene sym-faulting in shallow marine sediments on the western margin of the Nobi plain, central Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**, 1447-1457.
- 丹羽雄一・須貝俊彦・大上隆史・田力正好・安江健一・齋藤龍郎・藤原 治 (2009): 濃尾平野西部の上部完新統に残された養老断層系の活動による沈降イベント. 第四紀研究, **48**, 339-349.
- 大上隆史 (2009): 濃尾平野における最終氷期以降の相対的海水準変動に伴う堆積体発達過程. 東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻博士論文, 123p.
- 大上隆史・須貝俊彦 (2006): 後期更新世以降における四日市断層の活動性評価. 第四紀研究, **45**, 131-139.
- 大上隆史・須貝俊彦・藤原 治・山口正秋・笹尾英嗣 (2009): ボーリングコア解析と ^{14}C 年代測定にもとづく木曽川デルタの形成プロセス. 地学雑誌, **118**, 665-685.
- Ohmori, H. (1983): Erosion rates and their relation to vegetation from the viewpoint of world-wide distribution. *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, **15**, 77-91.
- 岡田篤正 (1979): 活断層—愛知県と周辺地域における活断層と歴史地震—. 愛知県防災会議地震部会, 102p.
- 太田陽子・寒川 旭 (1984): 鈴鹿山脈東麓地域の変位地形と第四紀地殻変動. 地理学評論, **57A**, 237-262.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. (2004): IntCal04 Terrestrial radiocarbon age calibration, 26-0 ka BP. *Radiocarbon*, **46**, 1029-1058.
- 佐藤裕司 (2008): 瀬戸内海東部, 播磨灘沿岸域における完新世海水準変動の復元. 第四紀研究, **47**, 247-259.
- Stuiver, M. and Reimer, P.J. (1993): Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, **35**, 215-230.
- 須貝俊彦・杉山雄一 (1999): 深層ボーリング (GS-NB-1) と大深度地震探査に基づく濃尾傾動盆地の沈降・傾動速度の総合評価. 地質調査所速報, EQ/99/3, 69-76.
- 須貝俊彦・杉山雄一・松本則夫・佃 栄吉 (1998): 深層オールコアボーリングの解析による養老断層の活動性調査. 地質調査所速報, EQ/98/1, 67-74.
- 須貝俊彦・伏島祐一郎・栗田泰夫・吾妻 崇・菊谷愛彦・鈴木康弘 (1999): 養老断層の完新世後期の活動履歴—1586 年天正地震・745 年天平地震震源断層の可能性. 地質調査所速報, EQ/99/3, 77-87.
- 高田康秀・近藤善教・宮村 学 (1979): 津島地域の地質. 地域研究報告 (5 分の 1 地質図幅), 地質調査所, 56p.
- 東海三県地盤沈下調査会 (2009): 平成 20 年における濃尾平野の地盤沈下の状況. 東海三県地盤沈下調査会, 71p.
- 内園立男・森 勇一 (2004): 濃尾平野南部ボーリングコアの粘土混濁水の電気伝導度および pH 測定に基づく堆積環境の推定. 第四紀研究, **43**, 375-382.
- 海津正倫 (1992): 木曽川デルタにおける沖積層の堆積過程. 堆積学研究会報, **36**, 47-56.
- 宇佐美龍夫 (1996): 新編日本被害地震総覧. 東京大学出版会, 493p.
- 山口正秋・須貝俊彦・太田 剛・大森博雄・杉山雄一・藤原 治 (2001): ボーリングコアの総合解析にもと

- づく濃尾平野の堆積環境の推定. 日本地理学会発表要旨集, **60**, 90.
- 山口正秋・須貝俊彦・藤原 治・鎌滝孝信・大森博雄・杉山雄一 (2003): 濃尾平野ボーリングコア解析にもとづく完新統の堆積過程. 第四紀研究, **42**, 335-346.
- 山口正秋・須貝俊彦・藤原 治・鎌滝孝信・大森博雄・杉山雄一 (2005): ボーリングコアの粒度組成と堆積速度からみた木曽川デルタの微地形と堆積過程. 第四紀研究, **44**, 37-44.
- 山口正秋・須貝俊彦・大上隆史・藤原 治・大森博雄 (2006a): 高密度ボーリングデータ解析にもとづく濃尾平野沖積層の三次元構造. 地学雑誌, **115**, 41-50.
- 山口正秋・須貝俊彦・藤原 治・大上隆史・大森博雄 (2006b): 木曽川デルタにおける沖積最上部層の累重様式と微地形形成過程. 第四紀研究, **45**, 451-462.
- 山崎晴雄・衣笠善博・佐竹健治 (2004): オフ・フォールト・パレオサイスモロジーの意義と必要性. 日本地球惑星科学連合 2004 年大会予稿集 (CD-ROM), J063-001.
- 横山卓雄・佐藤万寿美 (1987): 粘土混濁水の電気伝導度による古環境の推定—千里山丘陵東端部および琵琶湖湖底におけるボーリング・コアの場合—. 地質学雑誌, **93**, 667-679.
- 吉田史郎 (1984): 四日市地域の地質. 地域地質研究報告 (5 分の 1 図幅). 地質調査所, 154p.
- (2009 年 10 月 16 日受付, 2010 年 5 月 17 日受理)