

# 関西国際空港の建設と地盤工学的諸問題

## 3. 地盤調査 (その1)

竹村 恵二 (たけむら けいじ)

京都大学大学院理学研究科 教授

水谷 崇亮 (みずたに たかあき)

関西国際空港㈱建設事務所 技術・設計グループ

利藤 房男 (りとう ふさお)

応用地質㈱ 技術本部

### 3.1 ボーリング調査

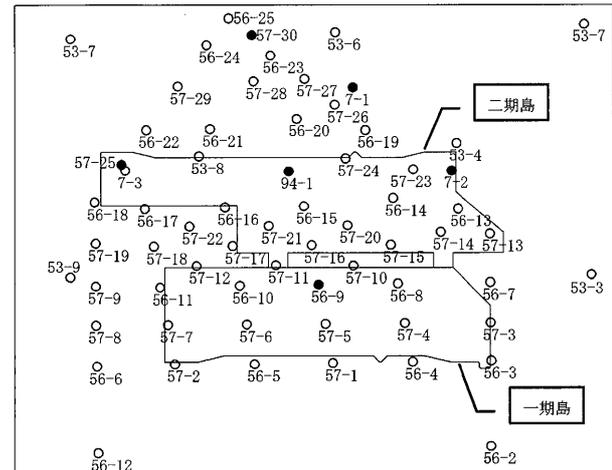
関西空港建設予定地の海底地盤は、軟弱な沖積粘土層の下に洪積粘土層および洪積砂層が互層状に深層に至るまで堆積している。このような地盤上に大規模な空港島を建設することから、埋立土による荷重はほとんど分散せずに深層に達することになる。また、この海域の水深は約20mであることから、埋立土の荷重は400 kN/m<sup>2</sup>を超える大きさとなるため、洪積層の深層部における土質特性、特に圧密特性を十分把握しておくことが重要な課題となる。一般に、洪積粘土層は過圧密状態にあり、ある程度の荷重以下ではほとんど沈下の発生がみられないが、埋立荷重が大きく応力増加分が圧密降伏応力を超える可能性があるときには、圧密沈下に十分な注意が必要となる。以上のことから、深層部の乱れの少ない試料採取を伴うボーリング調査が重要な意味合いを持つてくる。

関西空港のボーリング調査では、洪積粘土層の圧密沈下の検討が必要な地層として、大阪層群海成粘土層であるMa3層を把握する必要があると考えられ、大阪市による平野部でのボーリング(OD-1)の結果を参照して、最大-400mまでのボーリング調査が計画された。

#### 3.1.1 ボーリング調査の概要

##### (1) ボーリング調査内容

関西空港における「計画段階の調査」は、空港島建設海域の地盤・土質特性を把握することを目的として、昭和52年～57年にかけて、65本のボーリング調査と土質試験を、当時の調査実施主体である運輸省第三港湾建設局が実施した(ボーリング位置は図-3.1参照)。これらの大部分は-150mまでのものであるが、-400mの深度のボーリングが2本実施された(図-3.1の56-9および57-30地点)。更に、二期空港島建設前の平成6年度～7年度にかけて、関西国際空港㈱により、-400mのボーリングが更に4本実施された(図-3.1の94-1, 7-1, 7-2, 7-3地点)。これら合計6箇所ので-400mボーリングおよび56-3(-200m), 57-9(-150m)に関しては、港研ワイヤーライン工法が用いられており、その他の-100m～-150mのボーリングは普通工法が用いられている。すなわち、普通工法でのサンプリングの限界が、ほぼ-150mである。



注1) ●掘削深さ-400m, ○掘削深さ-100～-200m

注2) ボーリング地点の左の添字は、ボーリング実施年度

図-3.1 ボーリング位置図

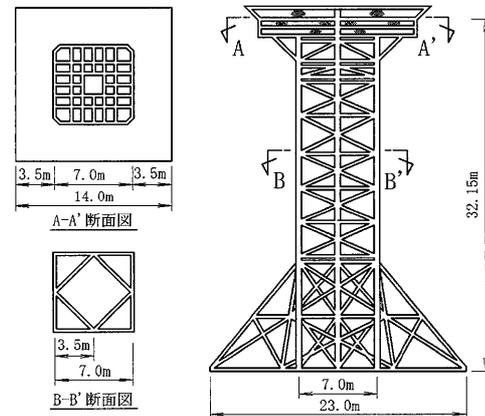


図-3.2 足場やぐら

##### (2) 足場やぐら<sup>1)</sup>

水深が20mと深く、しかも掘進深度が-400mと、従来の港湾分野での調査に比較して格段に深いため、足場やぐらも非常に規模が大きくなった。図-3.2および口絵写真-4に足場やぐらの詳細を示すが、重量は約150t、高さは32mで、図-3.2のA-A'断面上に鉄塔(試錐マスト12×12×16m)を設置したときの全長は約50mに達する。

##### (3) 機械・資材・諸設備の配置<sup>1)</sup>

港湾地域におけるボーリング調査では、陸上の調査に

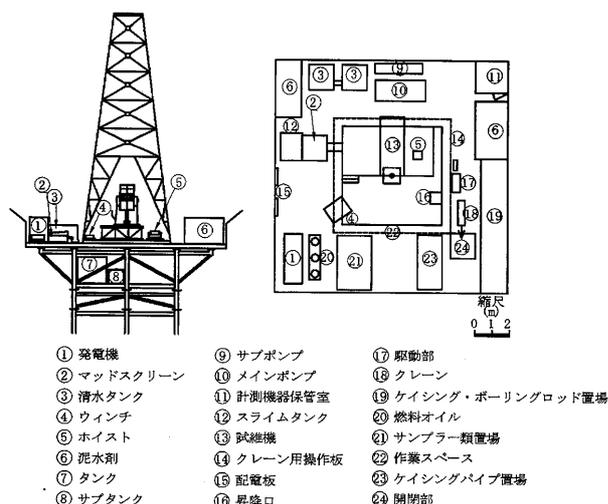


図-3.3 足場やぐらステージ面の機械配置

比べ足場やぐらを用いるため、ステージ面での作業面積が限定され、やぐらの高さ分だけ余分な掘削用資機材を必要とする。特に、本調査のように深層まで掘進する場合には、調査深度の浅い場合と比較して、大型ボーリングマシンをはじめ資機材が大きかりなものとなる（口絵写真-5に大型ボーリングマシンを示す）。

図-3.3は、足場やぐらの上段ステージおよび下段ステージ面における諸機材の配置の詳細を示したものである。-400 m ボーリングでは、上段ステージ14×14 m、下段ステージ7×7 m と一般的なボーリングに比べ、約10倍のステージ面積となっている（口絵写真-6に上段ステージでの作業状況を示す）。

### 3.1.2 ボーリング技術の変遷<sup>1)</sup>

#### (1) 港研ワイヤーライン工法開発の背景

関西空港の建設が始まる前の高度成長期の港湾構造物の傾向として、防波堤・海上空港・廃棄物処分場・石油備蓄基地など沖合大水深海域への進出が著しく、必然的にこれらの構造物の規模も大型化されている。このため、構造物の荷重は深層まで達することとなり、これに伴ってボーリング調査深度も増大する傾向を示していた。更に、沖合の水深が20~30 m に及ぶ海域でのボーリング調査の実施比率が高まるにつれ、足場やぐらを用いた従来方式の調査では、得られた不攪乱試料の品質に問題がある場合が見受けられた。従来方式の調査により、これらの海域で大深度の掘削を行えば、ボーリングロッド(φ40.5 mm)、ピストンロッド(φ16~19 mm)の伸びや湾曲に起因して、高品質の不攪乱試料の採取には限界があり、精度の高い調査結果が得られないことが判明した。ただし、この程度の中間的な水深では、大水深用(50 m 以上)として開発した海底着座型調査機を使用するには経済的に不利であるので、足場やぐらを用いた調査方法で、高品質の不攪乱試料採取方法を確立することがもっとも適切であると考えられた。このような理由から、港湾技術研究所(現在の港湾空港技術研究所)では、ワイヤーライン方式のボーリングに着目し、これを港湾地域のボーリング調査に適用すべく種々の改良を試み

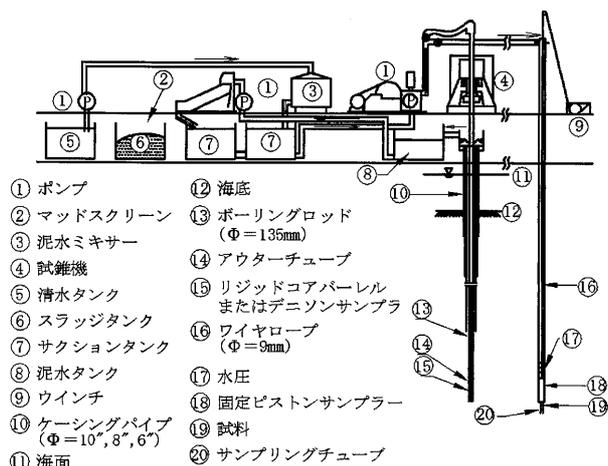


図-3.4 港研ワイヤーライン工法のシステム

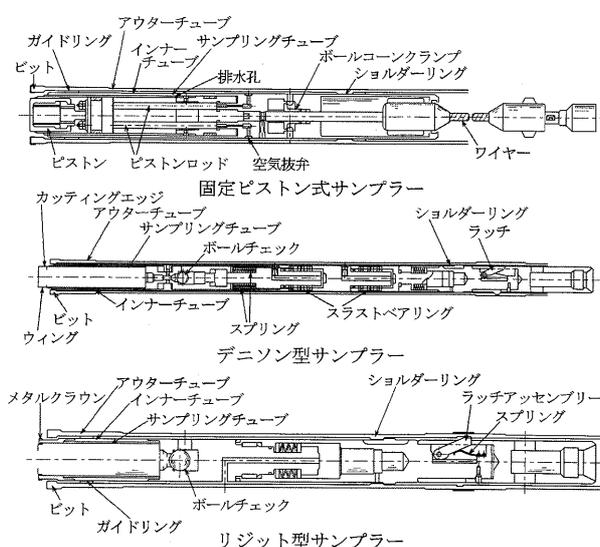


図-3.5 港研ワイヤーライン方式のサンプラーの構造

た<sup>2)</sup>。

#### (2) 港研ワイヤーライン工法

港研ワイヤーライン工法は、深層岩盤コアリング専用開発されたワイヤーラインコアラの原理を応用して、軟弱粘性土から岩盤まで幅広い種類の土質に適用できるように改良開発されたものである。この方式の原形ワイヤーラインコアラと異なる特徴は、軟弱粘性土および硬質粘性土が乱れの少ない状態で採取できる点にある。すなわち、剛性の高いワイヤーラインロッド(ボーリングロッド)内に各種の土質に適合した着脱自由なサンプラーをセットし、不攪乱試料の採取が可能となっている。図-3.4に港研ワイヤーライン工法のシステムを示す<sup>3)</sup>。

#### (3) サンプラー

図-3.5、表-3.1にサンプラーの構造および諸元を示す。これらのサンプラーは、対象地盤の状態により使い分けられる。

粘性土(一軸圧縮強さ  $q_u \leq 2 \text{ MN/m}^2$ )には、水圧式固定ピストンサンプラーを用いて、ポンプの送水圧によりサンプラーの貫入を行う(口絵写真-7~8参照)。硬質粘性土(一軸圧縮強さ  $q_u \geq 2 \text{ MN/m}^2$ )には、サンプラーの外管のみを回転させて周囲の土を削りながらサ

表—3.1 使用サンプラーの諸元

対象土層	サンプラー				サンプリングチューブ						
	機種	外径 (mm)	長さ (mm)	特徴	材質	内径 (mm)	肉厚 (mm)	刃先角度 (度)	内径比 (%)	長さ (mm)	備考
軟質粘性土	固定ピストン式薄肉サンプラー	108	4358 (2753)	水圧式サンプラー	ステンレススチール SUS-304	90	2	6	0	1250	
硬質粘性土	固定ピストン式厚肉サンプラー	108	4358 (2753)	水圧式サンプラー	同上	81.1	4	6	0	1170	刃先部取替可能
硬質粘性土	デニソン式サンプラー	108	2850	刃先突出量 20~50mm	同上	81.1	4	6	0.5	1000	刃先部取替可能
硬質砂質土 礫質土	リジットサンプラー	108	2875		同上	90	2	-	-	1000	

ンプリングするデニソン型サンプラーを用いる。砂や礫質土地盤では、リジットサンプラーを用いる。このサンプラーは、一種のダブルコアチューブで、内外管が一体で回転し、土をビットで切削して採取するものである。

3.1.3 採取試料の品質評価

-400 m という大深度から採取した試料は、ボーリングによる機械的な攪乱のほかに、大深度から取り出すことによる応力開放の影響を受ける。前者の攪乱はサンプリング技術の向上である程度回避できるが、後者の攪乱は避けようがない。このため、圧密試験結果の解釈に際しては、試料の品質を定量的に評価する必要がある。

試料の品質評価は定ひずみ速度圧密試験に基づき、表—3.2に示す Andersen and Kolstad<sup>4)</sup>による方法（原地盤の有効応力まで再圧密した時の体積ひずみ  $\epsilon_{v0}$  で評価）および表—3.3に示す Lunne ほか<sup>5)</sup>による方法（原地盤の有効応力まで再圧密した時の間隙比の変化  $\Delta e$  と、初期間隙比  $e_0$  の比  $\Delta e/e_0$  で評価）を用いて実施した。

更に、静的コーン貫入試験を実施して、コーン指数と圧密降伏応力の関係を比較検討することで試料品質を検討した。

(1) 定ひずみ速度圧密試験に基づく試料の品質評価

関西空港二期地区の-400 m ボーリング（港研ワイヤーライン工法で施工）で採取した不攪乱試料を用いて実施した定ひずみ速度圧密試験結果から、 $\epsilon_{v0}$ 、 $\Delta e/e_0$  を求め、図—3.6に深度分布図を、図—3.7に過圧密比 (OCR) との関係をもとめた。なお、サンプリング方法は、深度150 m 付近までは水圧式固定ピストンサンプラーを、それ以深にはデニソン型サンプラーを用いている。

図—3.6によると、 $\epsilon_{v0}=2\sim4\%$ 、 $\Delta e/e_0=0.04\sim0.07$  と良質試料の範囲にはほぼ収まっているとともに、深度的にもほぼ一定の試料品質を有しており、サンプリング方法の違いによる影響も現れていない。また、図—3.7からは、どの試料も  $\epsilon_{v0}$ 、 $\Delta e/e_0$  の値に関係なく、過圧密比はほぼ一定である。試料の品質が圧密降伏応力に影響しているとすれば、 $\epsilon_{v0}$ 、 $\Delta e/e_0$  が大きくなるにつれ圧密降伏応力は低下するはずである。したがって、今回の試料品質の範囲内では、乱れの影響が圧密降伏応力の値にはほとんど影響していないと考えられる。

(2) 静的コーン貫入試験に基づく試料の品質評価<sup>6)</sup>

不攪乱試料採取位置に近接した位置で、静的コーン貫入試験を実施した。試験機の概要を図—3.8に示す。先

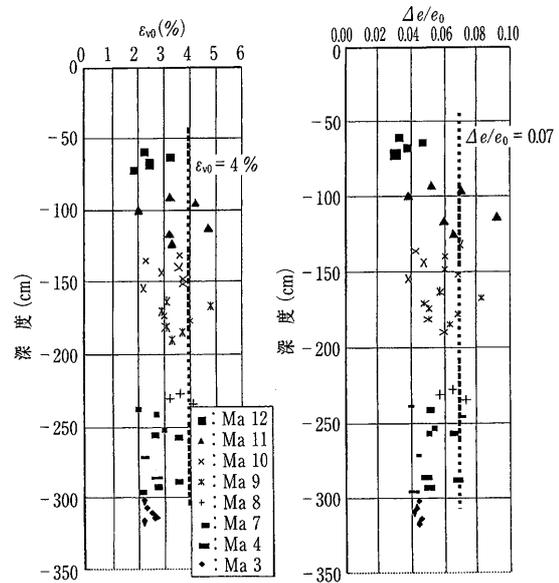
表—3.2 再圧密時の体積ひずみ ( $\epsilon_{v0}$ ) と試料の品質

$\epsilon_{v0}$ (%)	試料の品質
< 1	非常に良い (very good)
1~2	良い (good)
2~4	まあまあ (fair)
4~10	わるい (poor)
> 10	非常にわるい (very poor)

表—3.3 再圧密時の間隙比変化率 ( $\Delta e/e_0$ ) と試料品質

Overconsolidation ratio	$\Delta e/e_0$			
	Very good to excellent	Good to fair	Poor	Very poor
1-2	<0.04	0.04-0.07	0.07-0.14	>0.14
2-4	<0.03	0.03-0.05	0.05-0.10	>0.10

For particular clay multiply  $\Delta e/e_0$  by  $e_0/(1+e_0)$  to get the criteria in terms of  $\epsilon_{v0}$



図—3.6  $\epsilon_{v0}$ 、 $\Delta e/e_0$  深度分布図

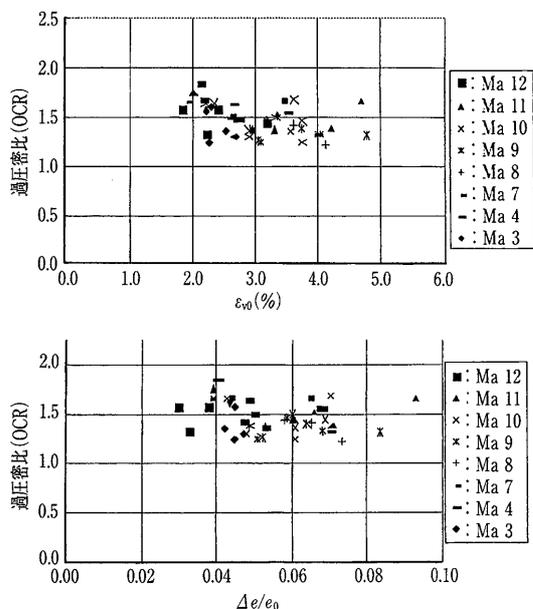
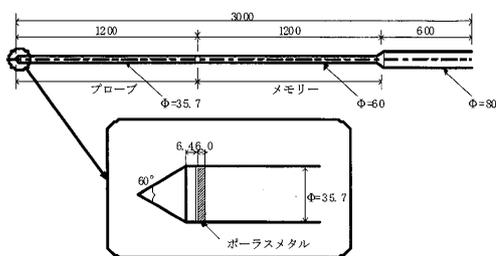
端角60°、底面積が1 000 mm<sup>2</sup>、先端抵抗と間隙水圧測定範囲はそれぞれ30 MPaと20 MPa、非直線性はそれぞれ0.18% $F_s$ と0.05% $F_s$ 以内で、データはコーン直上のメモリー部に記録される。

静的コーン貫入試験から得られるコーン先端抵抗  $q_t$  と定ひずみ速度圧密試験より得られる圧密降伏応力  $p_c$  には、以下の関係が成り立つ。

$$p_c = (q_t - p_{v0}) / Np_c \dots\dots\dots (1)$$

$p_{v0}$  : 原地盤の全応力

$Np_c$  : コーン係数 ( $p_c$  に対する)

図—3.7 過圧密比 (OCR) と  $\varepsilon_{v0}$ ,  $\Delta e/e_0$  の関係

図—3.8 静的コーン貫入試験機の概要

定ひずみ速度圧密試験の  $p_c$  と同深度でのコーン先端抵抗  $q_t$  を基に、試験を実施した各地層 (Doc5, Ma7, Ma4, Ma2 層) の平均コーン係数  $Np_c$  を求めると、それぞれ 2.5, 2.8, 2.6, 2.6 が得られた。得られた  $Np_c$  を基に、コーンの全データから  $p_c$  を求め、過圧密比と標高の関係として図—3.9 にまとめた。図中には、定ひずみ速度圧密試験から得られた  $p_c$  も併記した。

この結果をみると、各地層で  $p_c$  の深度的な傾向が異なることが分かる。すなわち、Doc5 および Ma4 層では細かく  $p_c$  がばらつくこと、Ma7 層では上、下部を除いた中央部のデータがきれいな弓なりを呈すること、Ma2 層は深度方向にあまり変化がないことがあげられる。また、コーンと定ひずみ速度圧密試験から求めた過圧密比は、全体に非常に良い対応を示している。

以上の品質評価結果を総合的に判断すると、採取された試料の品質はほぼ良好で、図—3.9 に示す  $p_c$  のばらつきの理由は、試料品質の違いによるばらつきではなく地盤本来の強度の違いを反映したばらつきと判断される。

### 3.1.4 ボーリング調査のまとめ

関西空港でのボーリング調査は、-400 m の大深度が調査対象となること、空港島の沈下を正確に予測するために採取された試料の品質が非常に重要性を持つことから、港研ワイヤーライン工法によるサンプリング方法が開発、使用された。この工法により採取した試料の品質は、応力開放が大きいにもかかわらずほぼ良好で、正確

な沈下解析を実施するために十分な役割を果たしたものと考える。

## 3.2 地質調査

### — 関空地盤の地質特性と堆積環境 —

#### 3.2.1 地質調査の概要

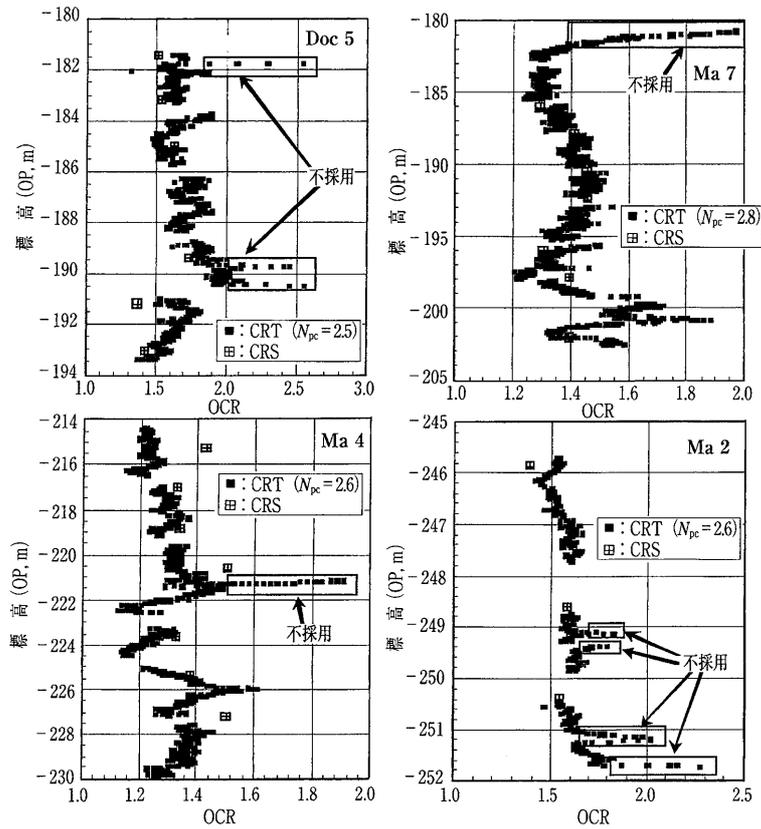
関西空港建設の地質調査において特筆されることは、それが広範囲の地層構成を同定する技術として提案され、確立されたことと、その調査成果が“沈下予測”等の地盤工学的検討に有効に活用されたことである。

調査では、広域的な概況調査としての反射法地震探査と、82本にもおよぶボーリング調査が実施された。ボーリングで採取された試料のほとんどは物理試験・力学試験に用いられたが、一部の試料は、微化石・ナノ化石・珪藻化石等の調査、火山灰・火山ガラス調査、古地磁気調査などの地質学的調査にあてられた。大阪湾周辺の表層地盤を構成する地層は、粘土層と砂礫層がリズムカルに繰り返す。これらの層は、氷河期に陸化した際に河川から供給された砂礫と、間氷期 (温暖期) に海が拡大した際に堆積する海成粘土が主たる構成物であり、層の繰返しは氷河期・間氷期の繰返しを反映したものである。地層の面的な広がりや層厚、各地層の特徴を知る上で、堆積環境を明らかにすることは、地盤工学的な検討にも活用することが可能であるということから堆積環境調査が実施された。堆積環境調査を実施することの大きな目的は二つある。一つは、堆積年代を火山灰調査や古地磁気調査によって特定し、ボーリング間で同じ時代の地層を正確に対比すること、もう一つは、堆積環境を微化石分析やナノ化石分析、珪藻化石分析によって明らかにし、堆積環境の違いが地盤工学的な要素 (強度や圧密などの特徴) に与える影響を含めて検討することである。そのため、基本的に粒度によって区分される地層 (粘土層や砂層など) がどのように鉛直方向および水平方向に分布するかを明らかにするために、反射法地震探査も格子状にのべ200 km 実施された (図—3.10)。これらの地質学的な調査と反射法地震探査などの結果により、地層の連続性や特徴、そして地層の広がりなどが明らかになった。調査結果は、関西空港周辺の地下地質のモデルとして構築され、最終的にこのモデルを用いての沈下予測が行われた。ここでは、関空地盤の地質特性と堆積環境について述べる。

#### 3.2.2 詳細な地下地質層序の確立と対比

##### (1) 調査方法

関西空港の地下地質層序は中世古ほか<sup>8)</sup>によって、70本にのぼるボーリングコア (昭和53年度、昭和56年度、昭和57年度に実施された) の微古生物学的調査や火山灰層序学的調査に基づいて詳細にまとめられた。ここで導入された微化石総合調査を中心とした地質学的調査は、海成堆積物を含む層序のコア間対比に非常に有効な役割を果たし、現在でも継続されている。本地質調査における主な目的は、堆積時期を決めることと、堆積環境を知ることである。堆積時期を決める場合には、大阪地域で

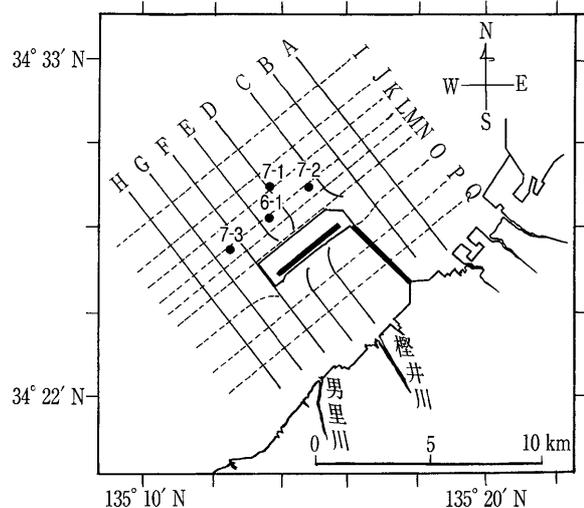


図—3.9 過圧密比 (OCR)～標高関係図

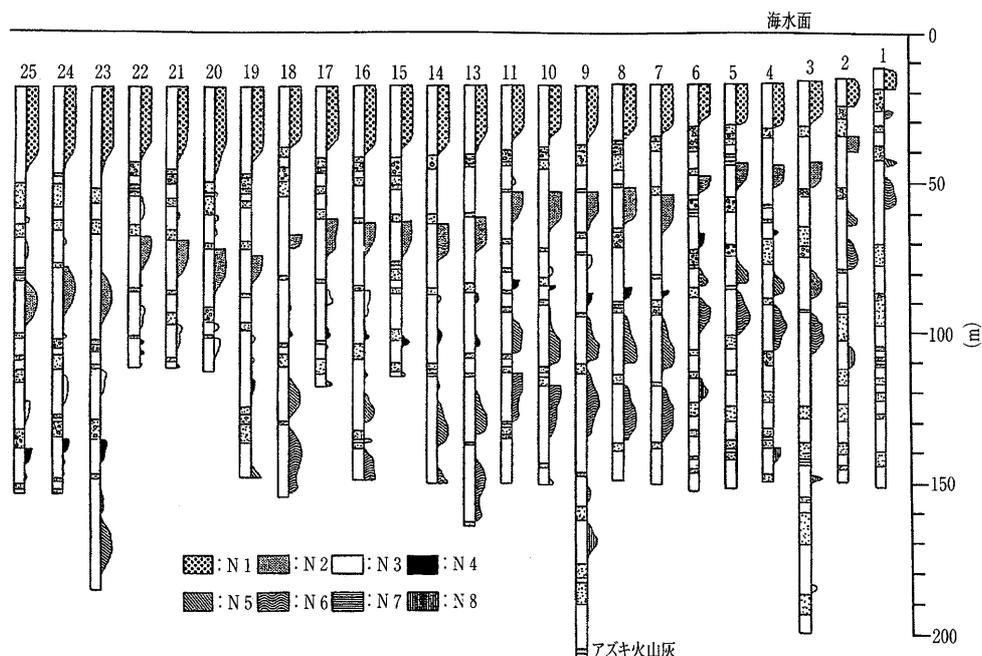
堆積時期を示唆する指標となる火山灰層の特定や古地磁気層序による磁化逆転境界の特定による堆積時期の決定が有効である。堆積環境の特定には、微化石総合分析を中心にその堆積環境を推定した。微化石のうち主に、有孔虫、貝形虫、ウニ（以上、海の環境で見られる）、貝殻片、火山ガラス（火山灰層特定に有効）、植物片、雲母（陸源供給物と考えられる）、黄鉄鉱、ナンノ化石、珪藻種を中心に含有微化石の相対的産出量から海成層と非海成層の区分を行った。特にナンノ化石が出現する地層は、海流の影響を受けるような沿岸部よりも外洋側の堆積環境であると考えられていることから、海成の環境をより詳細に区分することが可能である。試料の処理方法は調査対象により少し異なる点もあるが、基本的には、土試料をビーカーに分取し、超音波洗浄器を用いて粘土などの細かい土粒子を少しずつ取り除き、その沈殿物を顕微鏡下で観察する。ナンノ化石は顕微鏡でも見えないほどの小さな（ナンノサイズの）化石であるが、土試料を薄くのばしてプレパラートを作成し、偏光顕微鏡で観察すると、その有無を検鏡することができる（口絵写真—9参照）。火山ガラスなど火山灰層を確認できれば、ガラスや鉱物の構成割合やその屈折率を測定することで、これまでの研究で作成された火山灰のデータベースからその給源や降灰年代を知ることができる。古地磁気測定は、コア試料から試料用キューブ（測定容器）に上下方向を正確にサンプリングし、磁化測定器を用いて測定を行う。

## (2) 第一期調査による層序対比

第一期の地盤調査ボーリングのコアのうち、掘削深度

図—3.10 平成6年と平成7年実施の深層掘削地点と反射法地震探査測線<sup>7)</sup>

400 mに達するコア（56-9, 57-30）は重要な標準層序コアとしての役割を果たしている。調査の結果、海底地下層序は上部と下部の大きく二つに区分してまとめられた。上部は、海成粘土と非海成堆積物の互層が繰り返す空港島累層であり、その最下部にS10（またはDs10）と呼ばれる厚い砂礫層が含まれる。S10は下位層と一部不整合関係で接していると考えられることから、これを境界とし、下部を泉南沖累層と命名した。上部の空港島累層には8層の塊状の海成粘土層が挟まれ、石灰質微化石（特にナンノプランクトン）の含有の情報に基づき、上位からN1-N8と命名された（口絵写真—10参照）。



図—3.11 昭和56年度実施コアの対比<sup>8)</sup>

また、N6、N7層準間に特徴的な珪藻土層準の存在を確認し、この層をメロシラ層と命名した。さらに、海進～海退の海水準変動にあわせてナンノ化石の産出量が連続的に増減する特徴を用いることで、個々の海成粘土層が海進～海退まで一連にそろっているのかどうかを検討した。図—3.11にナンノ化石の産出量の深度方向分布を示す。図では、柱状図の右側にナンノ化石の産出量をグラフ化しており、右側に飛び出しているほど産出量が多いことを示している。図—3.11中、粘土層の下端側から上端側に向かって増→減と円弧状に化石が産出している粘土層は、海進から海退までのフェーズをすべて記録している。これに対し、粘土層の上部でナンノ化石の産出量が減じることなく粘土層が消滅する場合は、海成粘土が堆積した後に、その粘土層の上部が何らかの侵食を受けて削剥されたことを意味する。このような検討手法を確立したことは、その後堆積環境の変化を検討する上で非常に有効であった。

大阪層群に挟まれる火山灰のうち、重要な年代対比指標であるアズキ火山灰層は泉南沖累層の上部に挟まれることも明らかにされた。また、各ボーリングをつないだ断面が作成され、陸から海へむけての岩相分布の様相が明らかにされた。この後、菅野ほか<sup>9)</sup>は、大阪平野部での標準層序であるOD-1掘削地点と近接した地点での新しいコアを、中世古ほか<sup>8)</sup>と同様の手法で分析・解析して、関西空港の海底地盤層序を大阪層群の海成粘土番号と対比させ、空港島累層の各海成粘土がMa7～Ma13層に対応することを示した。

### (3) 第二期調査による層序対比

平成6年度と平成7年度には、第二期工事と関連した掘削コアが採取され、一期工事の時の層序対比とともに、海底地盤の堆積学的な特徴や地盤工学的な検討調査が実施され、反射法地震探査も実施された(図—3.10)。

関西空港の海底地盤の層序は、それまでの成果と平成6年度と平成7年度に実施された400 m級ボーリング4本の結果をあわせて、改めて整理された。その結果を、中世古ほか<sup>8)</sup>でまとめられた層序と比較したのが図—3.12である<sup>10)</sup>。全体層序が上部(空港島累層)と下部(泉南沖累層)に区分されるのは同じであり、上部の最下部にS10(Ds10)が重なる。また、古地磁気測定により、泉南沖累層の最上部にブルンヌーマツヤマ境界(現在と同じ磁北である正帯磁期と逆帯磁期の境界)の存在が確認された。ブルンヌーマツヤマ境界は大阪層群のMa4層準に含まれており、したがって、関西空港の地下においてMa4層準に対比される地層の存在が確認できたことになる。同様にMa1付近にあるハラミヨイイベントと呼ばれる磁気反転も確認された。また、従来の調査結果との大きな違いは、海成粘土層の上下に海進・海退時期の漸移的な地層の存在を確認し、それらを‘tr’として位置づけたことである。これによって、塊状の厚い粘土層(海成粘土部)とそれ以外の粘土・シルト層(tr部)を区別する詳細な地層区分が可能となり、沈下予測計算に用いる地盤モデルの作成に反映された。

以上のように、第二期工事前の調査・検討の結果、関西空港の海底地盤の詳細な層序・年代が確立されるとともに、海進・海退に伴う漸移的な地層が新たに認められ、層序学的に区別して表現された。また、層序の年代的な位置づけや堆積環境の変遷の考察のために、氷期・間氷期サイクルとの対比が議論された。

### 3.2.3 堆積環境を考慮した砂層分布等の検討

関西空港海域においては、各海成粘土が鍵層になって対比されている。粘土層間に見られる砂層の分布特性等を地質学的視点(特に堆積環境)から評価することは、沈下計算などを実施する際に帯水層がどのような層厚と広がりを持つかを判断するために重要な要素である。し

講座

かしながら、堆積環境による地層構成や化石の産出などは一般的には数量化されておらず、地質データを考慮して、検討を行うことは意外に難しい。そこで、海成粘土層間の粗粒層を中心に、微化石・堆積物総合調査、柱状図およびコア観察による堆積相解析に基づいて堆積環境解析を試みるとともに、反射法地震探査および柱状図による砂層分布特性について検討した。これにより粗粒層の堆積環境を明らかにし、分布方向や広がり形態の考察を行い、砂層分布の形態情報を加味して、透水性も含めた各粗粒堆積物層の評価を広域的に行った。

砂層がどのような環境下で堆積したかによって、その分布の形態等の基本的形状に関する考え方が異なる。たとえば、海面上昇時に海岸に並行する砂堆として堆積した砂体と、海面降下時に河川や氾濫原に堆積した砂体では、地形に対して分布する方向が大きく異なり、また粒径、粒度も異なる。これらの砂層に関する堆積環境情報の整理が分布方向や広がりを考察する重要な情報であり、各砂層堆積時の古地理・古環境の復元が可能となる。砂層の堆積物は、一般に海水面低下時期の生成物か、あるいは高海面時期の砂浜などに対応する場合が多い。高海面時期には、微化石総合調査の整理などの堆積環境区分で検討できるが、海水面低下時期には、非海成の砂層も含み、微化石総合調査では、堆積環境を決定できない。そこで、堆積物分析結果から整理した指標（粒度組成など）を数値化し、堆積環境区分に追加して定量化を実施した（口絵写真—11参照）。

砂層の広がりや連続性については、広範囲に均質な情報を得ることが望ましい。そこで、反射法地震探査で得られる時間断面の顕著な反射面を基に、その広がりを検討した（図—3.13）。さらに、時間断面を深度断面に変換し、顕著な反射面とボーリングに基づく層序を対比した。反射法地震探査で現れる反射面は音響インピーダンスの境界面にすぎないが、関西空港の海底地盤ではそれが粘土層と砂礫層の境界に対応することが確認された。

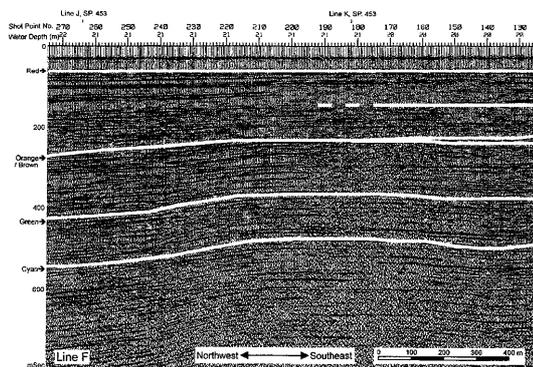
反射法地震探査断面には7層の反射面が確認され、上位から Red, Yellow, Orange, Brown, Purple, Dark Green, Blue と名づけられた<sup>11)</sup>。また、これらの反射面と地質学的境界面との対比から、Red horizonはS1（沖積層の下位の砂礫層）、Orange horizonはS7, Brown horizonはS8, Purple horizonはS10（空港島果層の最下部砂礫層）に対応し、これらの連続性のよい粗粒層は、ある程度の層厚と広がりを持って分布していることが推定された。

以上の結果に基づき、各砂層（S1～S10）について地質学的な堆積環境解析と分布特性の検討が行われ、第6章で述べる沈下予測のための砂層分布モデルが構築された。各層準の詳細な堆積環境は、次のように推定される。

- S1 …河川流路, 自然堤防, 氾濫原, 土石流
- S2 …干潟（砂質）
- S3 …河川流路, 氾濫原, 三角州
- S4 …三角州

中世古ほか(1984)		模式層序	
岩層ユニット	ナン化石ユニット	火山灰, 古地磁気層序	層序区分
C1	N1	V1 (K-Ah)	Ac (Ma 13)
S1		V2 (AT)	tr S1
C2			tr Ma Dtc
S2			tr S2
C3	N2		tr Ma 12
S3			tr S3
C4	N3		tr Ma 11 (U)
S4			tr S4
C5	N4	V7 (Ata-Th)	tr Mn 11 (L)
S5			tr S5
C6	N5		tr Ma 10
S6		V10 (Kkt)	tr S6
C7	N6		tr Ma 9
S7			tr S7
C8			Melosira
S8			tr S8
C9	N7		tr Ma 8
S9			tr S9
C10	N8		tr Ma 7
S10		(Uo.)	tr S10 (M)
			tr Ma 4
			tr Ma 3
		Azuki VA	tr Ma 2
		Pink VA	tr Ma 1

図—3.12 中世古ほか<sup>8)</sup>と二期調査を含めて整理された地下地質層序<sup>10)</sup>との比較



図—3.13 反射法地震探査断面の一例<sup>11)</sup>

- S5 …河川流路, 氾濫原, 干潟（泥質）, 三角州
- S6 …三角州
- S7 …河川流路
- S8 …氾濫原
- S9 …河川流路
- S10…河川流路, 氾濫原, 三角州

**S1…Ma13層と Dtc 層の間**

大阪平野の天満礫層など最終氷期の海面低下時期の堆積物である。関西空港だけでなく、現在の大阪湾海岸に沿って連続性が高いと推定できる。沖合い方向には、反射法探査の範囲では分布がはっきりしており、粒径は細くなる可能性があるが、ある程度の広がりには推定できる。したがって、関西空港を取り巻く範囲から沖合い、陸方向、海岸方向に分布が広がると推定できる。

**S2…Dtc 層と Ma12層の間**

最終間氷期の高海面期における一時的な海面低下時期または停滞時期に海域に堆積した砂層である。分布は、海岸に並行に幅も狭いと推定できる。

### S3…Ma12層と Ma11層の間

河川流路、氾濫原などの海面低下期の地層を含んでいる。顕著な反射の分布は二期地区にみられ、ここから海岸に並行に分布が広がることが推定される。

### S4…Ma11U層と Ma11L層の間

顕著な海面低下期の地層が認められていない。S3と同様な分布傾向になるが、規模は小さいと推定される。

### S5…Ma11層と Ma10層の間

河川流路、氾濫原などの海面低下期の地層を含む。顕著な反射の分布範囲は二期地区を中心として見られ、ここから海岸に並行に分布が広がることが推定される。

### S6…Ma10層と Ma9層の間

河川流路、氾濫原などの海面低下期の地層を含んでいるが、S5層より分布域が狭いと推定される。分布形態はS5層と類似する。

### S7…Ma9層と Doc5層（メロシラ層）の間

海面低下期の淡水成水域を含む環境変化なので、大規模の粗粒物供給は少ない。分布範囲は、隆起帯をこえて海岸沿いに広がりを持つ。沖合いには大きく広がりをもたない。

### S8…Doc5層と Ma8層の間

氾濫原などの海面低下期の堆積物を含んでいる。二期地区を中心に顕著な反射が見られる。南西の隆起帯の規制により堆積したと考えられ、空港島南西近くで南西への分布境界が存在する。陸域にむけては空港島南方からのはっきりとした分布が予想される。より広域では小規模の河川流路堆積物が陸側から運ばれる状況が推定される。沖合いに向けては大きく広がらない。

### S9…Ma8層と Ma7層の間

河川流路などの海面低下時期の地層を含んでいる。層準がS8とS10の間であり、南西側に分布の境界が存在する。S8と類似の分布が推定される。

### S10…Ma7層と Ma4層の間（基底礫層）

海成環境を示す薄い粘土層が挟まれるが、全体をS10として評価する。氾濫原などの海面低下期の堆積物を含んでいる。空港島海域に顕著な反射がみられ、また南西の隆起帯の規制により堆積したと考えられ、空港島南西近くで南西への分布境界が存在する。陸域にむけては空港島南方からのはっきりとした分布が予想される。沖合いに向けての広がり、S1の次に大きいと予想される。

#### 3.2.4 地質調査結果のまとめ

関西空港の地質学的調査は基本的に土質用試料を活用することで実施されてきた。しかしながら、地質学的検討では、本来、堆積物の連続的な観察・試料採取、岩相や岩質が変化する過程の検討が重要であり、この点について試料の不足から十分な検討ができていなかった。これを受け、2006年から2007年にかけて実施された基盤

岩に達する深層ボーリング調査<sup>12)</sup>では、連続堆積物観察が実施され、多くの重要な火山灰の検出と対比が可能になった。調査の結果次第では、本稿で報告した大阪湾内での広域対比（海成粘土番号など）や地質年代の構築に変更の必要性が生じる可能性がある。また、これまで未知であった400 m以深の地質学的な情報が得られることも地質学的情報のまとめとして重要であり、今後の解析が待たれるところである。

#### 参考文献

- 1) 堀江宏保・善 功企・石井一郎・松本一明：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質（その1）ボーリング及びサブプリング、運輸省港湾技術研究所，pp. 1～45，1984。
- 2) 松本一明・堀江宏保・善 功企・石井一郎：ワイヤーライン方式サンプラーによる乱さないサブプリングについて、昭和56年度サブプリングシンポジウム発表論文集，土質工学会，1981。
- 3) 奥村樹郎・松本一明・善 功企：関西国際空港における土質調査工事—大深層土質調査—，建設の機械化，1982。
- 4) Andresen, A. and Kolstad, P.: The NGI 54-mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials, State of the Art on Current Practice of Soil Sampling, Progressing of The International Symposium of Soil Sampling, Singapore, pp. 13～21, 1979.
- 5) Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S.: Sample disturbance effect in soft low plastic Norwegian clay, Symposium on Recent developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, pp. 81～102, 1997.
- 6) Tanaka, H., Tanaka, M., Suzuki, S. and Sakagami, T.: Development of a New Cone Penetrometer and its Application to Great Depths of Pleistocene Clays, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 6, pp. 51～61, 2003.
- 7) Itoh, Y., Takemura, K., Kawabata, D., Tanaka, Y. and Nakaseko, K.: Quaternary tectonic warping and strata formation in the southern Osaka Basin inferred from reflection seismic interpretation and borehole sequences. Journal of Asian Earth Science, Vol. 20, pp. 45～58, 2001.
- 8) 中世古幸次郎・竹村恵二・西脇二一・中川要之助・古谷正和・山内守明：大阪湾泉州沖海底地盤の層序。関西国際空港地盤地質調査，災害科学研究所報告，pp. 191～198，1984。
- 9) 菅野耕三・中世古幸次郎・山内守明：大阪西部で掘削されたボーリング“港—B”における生層序学的研究。大阪教育大学紀要，第Ⅲ部門，Vol. 35, pp. 75～87，1986。
- 10) Takemura, K. and Nakaseko, K.: Subsurface geology of Kansai International Airport, central Japan. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport, Osaka, Japan, pp. 17～22, 2005.
- 11) Itoh, Y., Takemura, K., Ishiyama, T., Tanaka, Y. and Iwaki, H.: Basin formation at a contractional bend of a large transcurrent fault: Plio-Pleistocene subsidence of the Kobe and northern Osaka Basins, Japan. Tectonophysics, Vol. 321, pp. 327～341, 2000.
- 12) 水谷崇亮・池田俊文・江村 剛・田端竹千穂・岡本憲三・岩根清信：関西国際空港2期空港島深層ボーリング（KIX18—1）調査実施速報，土と基礎，Vol. 56, No. 1, pp. 36～39，2008。