

間隙水中の塩分濃度低下が海底土の土質変化に与える影響

Effect of Changes Soil Properties of the Marine Sediments due to the Low Level of Salinity in the Pore Water

片岡 沙都紀 川口 貴之 山下 聰 澄谷 啓
Satsuki Kataoka Takayuki Kawaguchi Satoshi Yamashita Satoru Shibuya

1. はじめに

次世代エネルギー資源として注目されているメタンハイドレートは、低温高圧条件下で水とガスが接触して形成される包接水和物である¹⁾。自然界では海底や湖底の堆積土中、永久凍土域などに広く分布しており、日本近海では図-1に示すように南海トラフや日本海、オホーツク海の海底地盤内部に分布していることが確認されている²⁻⁴⁾。この中でも特に、南海トラフに存在しているメタンハイドレートは、資源開発を中心とした試掘が進められている⁵⁾。メタンハイドレートを回収する方法としては、主に海底地盤内に存在しているメタンハイドレートを減圧させることによって分解し、メタンガスのみを回収する方法が考案されている⁶⁾。ここで、メタンハイドレートは形成時に不純物を排出して生成・成長していくので、内部は純水に近い状態となっている。したがって、もし回収時に海底でメタンハイドレートを分解すると、間隙水中の塩化物イオンやナトリウムイオンなどの濃度が急激に低下することが予想される。実際にメタンハイドレート存在深度では、コア回収によるメタンハイドレートの分解によって間隙水中のイオン濃度が急激に低下することが報告されている⁷⁾。

地盤工学の分野においては、クイッククレイのように間隙水中のイオン濃度が土粒子骨格や地盤強度に影響を与えることが知られている⁸⁾。したがって、海底地盤内でメタンハイドレートを分解して回収すると分解によって生じた水の増加により間隙水中のイオン濃度低下を生じ、この結果地盤強度が低下して海底表層地すべりや斜面の崩壊などメタンハイドレート周辺地盤環境に影響を与える可能性がある。しかし、間隙水中のイオン濃度低下による土質特性への影響という視点から検証した論文は少ないのが現状である⁹⁾。

本研究では、間隙水中の塩分濃度を人工的に低下させた土試料に対して粒度試験、予圧密試験、三軸試験、ベンダーエレメント（以下、「BE」）試験などの各種物理・力学試験を実施し、塩分濃度を変化させることによる堆積土の土質特性の変化について検討した。さらに、塩分濃度の低下による堆積土の内部構造を検討するため、三軸試験前後の供試体を用いて走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」）による試料内部の微視的構造の観察を実施した。

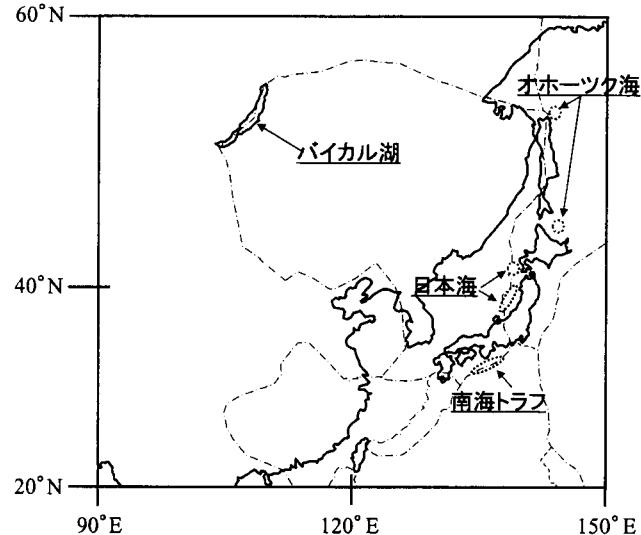


図-1 日本近海におけるメタンハイドレート賦存域

2. 試験条件および試験方法

2. 1 本試験に使用した試料について

図-2に使用した試料の作成方法および実施した試験の簡単なフローチャートを示す。本試験に使用した試料は、神戸港より採取された海底土（初期含水比約300%、塩分濃度3.0%）である。まず始めに試料を約1時間攪拌し、試料の初期含水比の測定およびX線回折（以下、「XRD」）による構成鉱物の測定を行った。

本試験では、塩分濃度の状態による土質特性の変化を検討していくため、塩分濃度が初期状態の試料（以下、「初期試料」）の他に以下の方法で間隙水中の塩分濃度を低下させた試料を準備した。まず、攪拌した試料を別途予圧密（鉛直応力100kPa、予圧密期間7日間）することで試料内から海水を排出し、当初の含水比近くになるように蒸留水を加え再度十分に攪拌して試料をスラリー状にした。この方法を繰り返すことにより、試料内の塩分濃度を3.0%から0.7%，0.0%に変化させた試料を作成した。また、塩分低下試料を作成する際、圧密脱水することによる試料への影響を考慮するために、脱水した試料に再度海水を加えて初期含水比、初期塩分濃度の3.0%まで戻した試料も作成した。以下、このようにして作成した3試料をまとめて「塩分調整試料」と示す。

2. 2 実施した各種試験方法

高含水比状態からの圧密過程において、塩分濃度の違いが間隙比の変化量や試料内部のせん断波速度の変化に与える影響を検討するため、図-3に示すBE付き予圧密装置にスラリー状にした試料を引きこみ、予圧密試験を行った。まず、試料内部の飽和度をより高めることを目的として真空引きした予圧密セル内に、スラリー状態にした試料を所定の量まで少量ずつ引きこみ、真空に近い状態のまま約24時間放置した。その後、セル内を大気圧に解放してピストンを挿入し、試料上部の乾燥を防ぐ目的でピストン上部に注水してセ

ル内に鉛直応力を100kPa載荷した状態で10日間予圧密を行った。ここで、予圧密容器にはピストンと底部、さらには容器側面2箇所にBEが取り付けられており、これによって水平方向に振動しながら鉛直方向に伝播するせん断波速度 V_{vh} と、伝播・振動ともに水平のせん断波速度 V_{hh} が2箇所で測定できる。本試験では、予圧密中のいくつかの時点でのBEを用いてせん断波速度を測定し、各測定点での含水比から供試体の湿潤密度 ρ_s を算出してせん断弾性係数 $(G_{vh}=V_{vh}^2\rho_s, G_{hh}=V_{hh}^2\rho_s)$ を求めている。予圧密試験終了後には容器から試料を抜き出し、サクションの測定を行った。

サクション測定後は、試料を直径5cm、高さ10cmにトリミングし、三軸試験装置にセットした。なお、トリミングした際に生じた切りくずから供試体側面と上下面の含水比 w 、土粒子密度 ρ_s 、粒度、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p を測定している。三軸試験における初期等方圧密圧力は、計測された各試料のサクションがどれも15~20kPaの範囲内にあつ

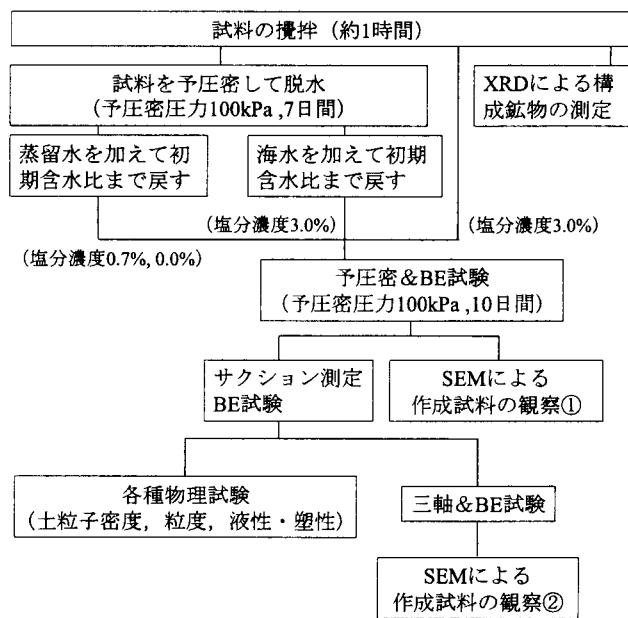


図-2 試料の作成と試験内容のフローチャート

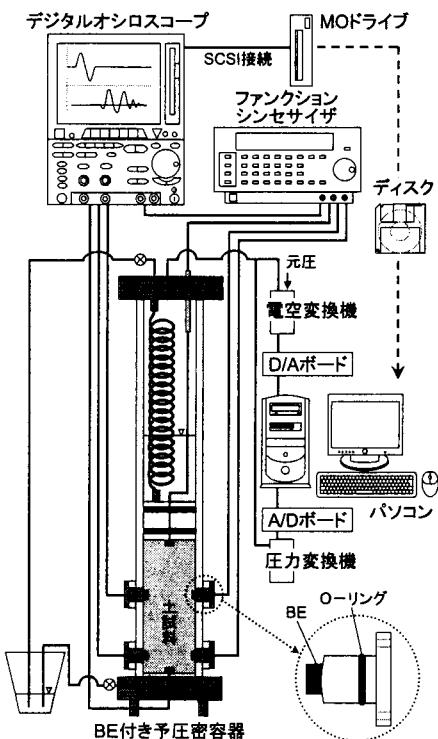


図-3 BE付き予圧密装置の概略図

たため 15kPa とした。その後、鉛直応力 $\sigma_v=50\rightarrow75\rightarrow100\rightarrow125\rightarrow200\rightarrow400\text{kPa}$ での K_0 壓密および軸ひずみ速度 0.2%/min での非排水せん断を実施した。ここで各段階での K_0 壓密は 3t 法で圧密を打ち切り、圧密終了後に BE 試験と軸ひずみ速度 0.2%/min での非排水繰り返し載荷試験を実施した。

実施した全ての BE 試験における送信電圧信号は振幅 ±10V、周波数は 1、2、5、10 kHz の sin 波と 10Hz の矩形波とした。せん断弾性波速度の計算に用いた伝播距離は送・受信一対の BE における先端間の距離 (tip-to-tip) とし、伝播時間は送信波と受信波の立ち上がり点の時間差 (start-to-start) とした¹⁰⁾。ただし、伝播時間については周波数の異なる送信波によって得られた受信波形から near-field-effect などを考慮し、受信波の立ち上がり点は送信用 BE と初動の向きが一致する際の極性に対する振幅の立ち上がりとした¹¹⁾。図-4 は BE 試験における伝播時間同定の例として、鉛直 BE と水平上部 BE で得られた送・受信電圧信号

を示したものである。送信電圧の開始点を基準として整理すると、受信電圧信号において波形や周波数にはほとんどよらない時点に正の振幅が確認できる。本システムでは、送・受信電圧の極性（正・負）が同じ場合に BE の初動の向きが一致するよう配線しているため、この振幅の開始点（図中の実線）をせん断弾性波の到達時点と判断した。

三軸試験前後で試料内部の構造変化を視覚的にも検討していくために、予圧密試験終了後および三軸試験終了後の供試体に対して鉛直・水平方向から採取し SEM 観察を行った。なお、SEM 用試料は液体窒素温度 (-196°C) で凍結した後に約 24 時間真空乾燥させて試料内部の水分を脱水し、表面を金で蒸着させて作成したものを使用した。

3. 試験結果および考察

3. 1 使用した堆積土の構成鉱物

図-5 は本試験に使用した神戸港海底土の XRD 試験結果 (a : 全岩分析, b : 粘土鉱物のみを抽出した分析) を示したものである。全岩分析の結果から、試料内部には石英 (Quartz) や斜長石 (Plagioclase) が多く含有しているのが確認できる。さらに、堆積土中から粘土鉱物のみを抽出して再度測定したところ、イライト (Illite) やクロライト (Chlorite)、スマクタイト (Smectite)、カオリナイト (Kaolinite) などの各種粘土鉱物の含有が確認できた。ここで、スマクタイトは強い膨潤性やイオン交換能をもつ鉱物であることが知られており¹²⁾、間隙水中のイオン濃度の変化に敏感であるため、今回の試験のように試料内の塩分濃度を低下させると、粘土鉱物の配列を大きく変化させることが考えられる。

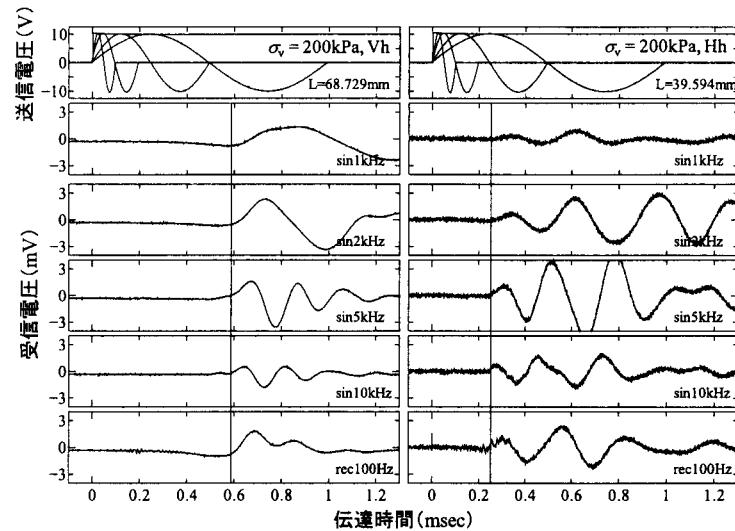


図-4 伝播時間同定の例
(塩分調整試料 (塩分濃度 0.7%), $\sigma_v=200\text{kPa}$)

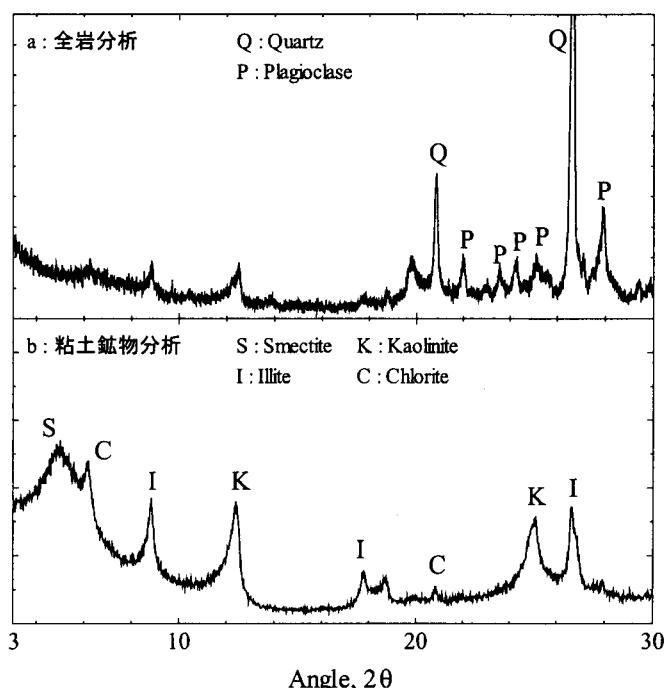


図-5 試験に使用した試料の構成鉱物
(a : 全岩分析結果, b : 粘土鉱物のみを抽出した分析結果)

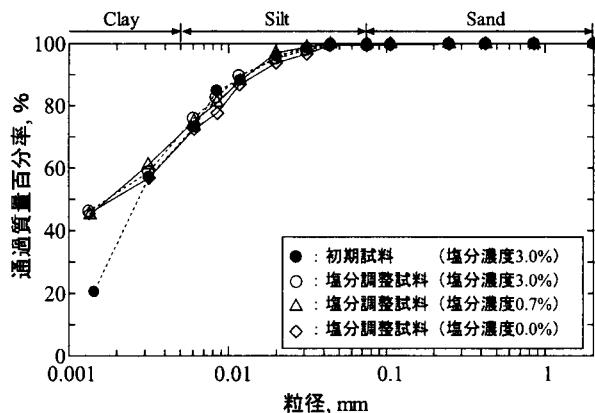


図-6 粒径加積曲線（神戸港海底土）

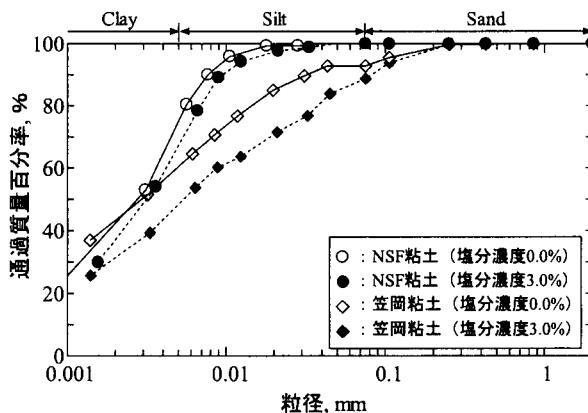


図-7 粒径加積曲線（市販粘土）

3. 2 塩分濃度の変化と物理的性質

図-6は粒度試験によって得られた粒径加積曲線を示している。 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分含有率に着目すると、塩分調整試料ではどの塩分濃度の試料においても約50%を示しており、初期試料に比べて値が大きいことがわかる。間隙水中の塩分濃度と粒径との関係を詳細に確認するために、市販粘土であるNSF粘土（構成粘土: Kaolinite）、笠岡粘土（構成粘土: Illite, Chlorite, Smectite, Kaolinite）にそれぞれ純水と海水を混入した試料を用意し、1日放置したものに対して粒度試験を行った。得られた粒径加積曲線を図-7に示す。これより、どの試料に対しても塩分濃度が低いほど細粒分が多くなる傾向にあり、今回の神戸港海底土と同様な結果が示された。

図-6において、同じ塩分濃度3.0%でも初期試料（●）と塩分調整試料（○）では粒径加積曲線に違いが生じていた。この原因として、一度塩分を低下したのちに再度塩分濃度が増加させたものは短期間では結合力は初期状態までは戻らず、粒度試験時の分散剤によってふたたび分散したことが影響しているものと推測される。なお、表-1は各種物理試験結果をまとめたものであるが、土粒子密度と液性、塑性限界には粒径加積曲線にあるような差は確認できなかった。

図-6において、同じ塩分濃度3.0%でも初期試料（●）と塩分調整試料（○）では粒径加積曲線に違いが生じていた。この原因として、一度塩分を低下したのちに再度塩分濃度が増加させたものは短期間では結合力は初期状態までは戻らず、粒度試験時の分散剤によってふたたび分散したことが影響しているものと推測される。なお、表-1は各種物理試験結果をまとめたものであるが、土粒子密度と液性、塑性限界には粒径加積曲線にあるような差は確認できなかった。

3. 3 予圧密 BE 試験

図-8は各試料の予圧密試験時に得られた沈下曲線と、任意の点で計測したせん断波速度より算出したせん断弾性係数を各々経過時間との関係でまとめたものである。なお、塩分調整試料（塩分濃度0.0%）に関しては、試験時のデータが欠損しておりグラフ上に記載することができなかった。また、予圧密時の沈下量は、試料攪拌時に測定した含水比を初期値として経過時間ごとの排水量からその時間における含水比に換算したもので示している。まず含水比の変化を見ると、各々沈下開始の含水比に若干の違があるのにもかかわらずどの試料も2~3日の間に収束しており、それ以後は含水比が約75%で一定となった。次にせん断弾性係数を見ると、どの試料も含水比が約125%になった時点で容器下端に近い位置にある側面のBE ($G_{bh,lower}$)で計測が可能となったのちに、含水比が100%以下で全ての位置でのBEで計測が可能となっている。このことから、予圧密時における容器内の含水比は主に鉛直方向にばらついていると考えられ、鉛直方向の伝播速度から得られる G_{vh} が測定された時点でせん断波速度の計測が可能となる程度の剛性が生じたものと思われる。塩分濃度の変化による各試料のせん断弾性係数

表-1 試験に使用した試料の物理的性質

	初期試料 (3.0%)	塩分調整試料												
		0.0%	0.7%	3.0%										
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.66	2.56	2.66	2.66										
液性限界 w_L (%)	105		102	102										
塑性限界 w_p (%)	35		35	35										
粘土分含有率 (%)	<table border="1"> <tr> <td>$\sim 2\mu\text{m}$</td> <td>37</td> <td>51</td> <td>52</td> <td>51</td> </tr> <tr> <td>$2\sim 5\mu\text{m}$</td> <td>32</td> <td>18</td> <td>18</td> <td>19</td> </tr> </table>	$\sim 2\mu\text{m}$	37	51	52	51	$2\sim 5\mu\text{m}$	32	18	18	19			
$\sim 2\mu\text{m}$	37	51	52	51										
$2\sim 5\mu\text{m}$	32	18	18	19										

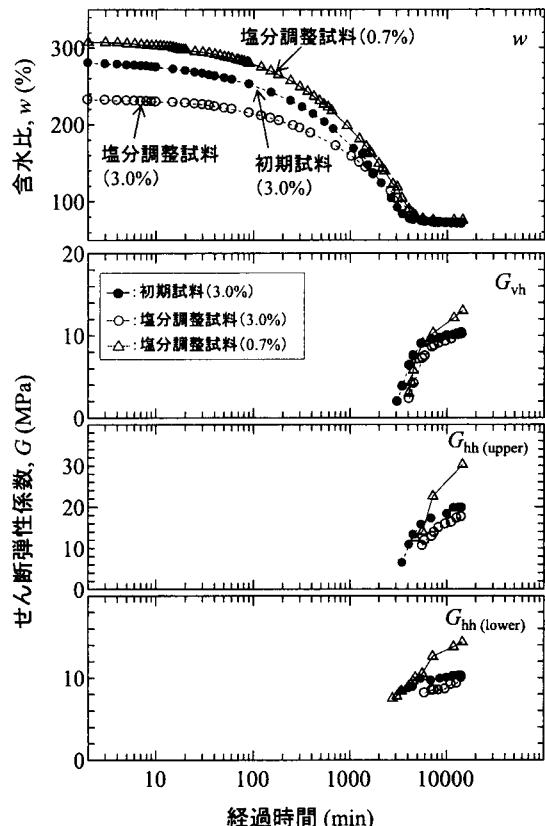


図-8 予圧密 BE 試験結果

の値を比較すると、塩分濃度を低下させるとせん断弾性係数が大きくなつた。この原因として、初期試料の間隙水中は当初電荷を帯びていたが、塩分濃度を低下させることによって粘土粒子の結合力が弱まり、その結果試料の配向性が強まつたことが推測される。また粒度試験結果同様に、一度塩分を低下したのちに再度塩分濃度が増加させたものは短期間では結合力は初期状態までは戻らなく、同じ塩分濃度でも塩分調整試料（塩分濃度 3.0%）のせん断弾性係数のほうが初期試料よりも若干低くなつたことが考えられる。

3. 4 三軸 BE 試験

図-9は各圧密段階最終時点での間隙比 e と鉛直有効応力 $\ln\sigma'_v$ との関係を示したものである。図における傾きを圧縮指数 C_c に換算すると、初期試料で $C_c=0.98$ であったのに対し塩分調整試料では塩分濃度に関係なく3試料ともおおむね $C_c=0.86$ となっており、初期試料で供試体の圧縮性が大きくなることが読み取れる。初期試料で C_c が大きくなつた原因として、自然堆積中に塩分によって団粒化した影響が予圧密終了時においても幾分残っており、試験開始の段階で塩分濃度を変化させた試料に比べて間隙比が大きくなつたことが一因として三軸試験の高い圧力によって大きく圧縮したものと考えられる。

図-10は三軸試験時の応力経路図である。各々の試料の内部摩擦角 ϕ を比較すると、同じ塩分濃度3.0%でも初期試料（ $\phi=37.1^\circ$ ）のほうが塩分調整試料（ $\phi=35.9^\circ$ ）よりも高い値を示していること、塩分調整試料では塩分濃度が高いほど内部摩擦角がわざかではあるが高くなる傾向があることが言える。しかし、圧縮性や応力経路の結果が有意な差であるかは今後更なる検討が必要であるものと思われる。

図-11は予圧密した4試料を抜き出した直後から三軸試験機内での K_0 圧密や非排水単調載荷終了時に至るまでの G_{vh} 、 $G_{hh\text{ upper}}$ 、 $G_{hh\text{ upper}}/G_{vh}$ の推移を示したものである。三軸試験機内での圧密開始から単調載荷開始まで（B→H）の $G_{hh\text{ upper}}/G_{vh}$ をに着目すると、

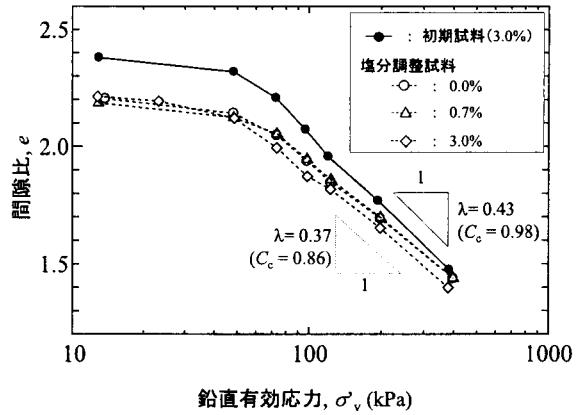
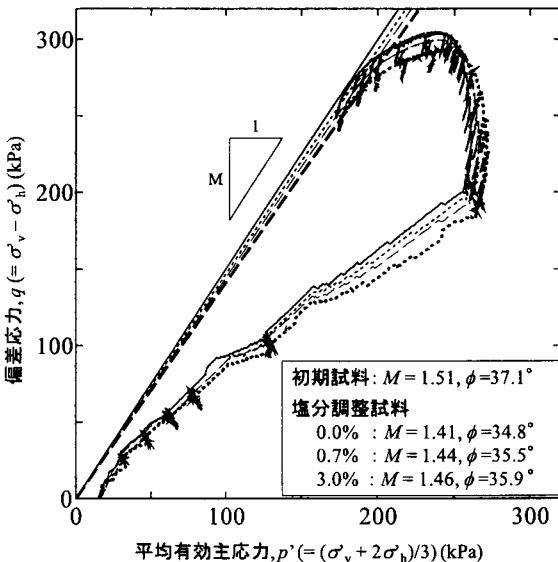
図-9 $e - \ln\sigma'_v$ 曲線

図-10 応力経路図

初期試料では K_0 圧密が大きくなると最初は 1.2 程度だったが最終圧密時には 1.8 近くまで増加しており、 K_0 圧密の増加が粘土粒子の配向性を強める効果があるといえる。しかし、塩分調整試料ではどの試料も K_0 圧密が小さい段階から $G_{hh\text{upper}}/G_{vh}$ が 1.5 以上となっておりその値は塩分濃度が低いほど大きくなっていた。また、塩分調整試料における圧密応力に伴う増加率は塩分濃度が低い試料ほど小さいことが示された。以上の結果から、塩分濃度が低くなると高含水比状態において粘土粒子同士が結合した綿毛構造よりはむしろランダム構造に近くなり、このために小さな圧密応力によって強い配向性を示したものと推測される。また、このことは $G_{hh\text{upper}}$ の値が K_0 圧密全体を通して高いことからも推測される。さらに、単調載荷終了後 (H→I) の $G_{hh\text{upper}}/G_{vh}$ は、いずれの試料も単調載荷前の $G_{hh\text{upper}}/G_{vh}$ に比べて低くなっている。塩分濃度 3.0% の試料において調整試料の $G_{hh\text{upper}}/G_{vh}$ が調整していない初期試料に比べて異方性が大きくなっているが、 $G_{hh\text{upper}}/G_{vh}$ の大きさは 2 μm 以下の粘土分含有率に支配されることがこれまでの研究成果から得られており¹³⁾、本試料で実施した粒度試験の結果からも粘土分含有量が一因となっていることが推察される。

3. 5 SEM 観察により得られた供試体内部の微視的構造の変化

塩分濃度の変化に伴う堆積構造への影響を視覚的にも検討するため、使用した 4 つの試料全てにおける予圧密容器から抜き出した試料（写真-1）と三軸試験が終了した直後の供試体（写真-2）の SEM 観察を行った。ここで、各 SEM 画像は図-12 に示すように供試体に対して鉛直・水平の両方向から観察している。各々の試料作成には、断片を液体窒素に浸して鉛直・水平方向にクラックを生じさせ、その面を観察したものである。

鉛直断面での堆積構造の違いについて比較すると、まず予圧密容器から抜き出した直後の試料では、塩分濃度が 3.0% を示す初期試料（写真-1 (a-1)）や塩分調整試料（写真-1 (b-1)）では内部に観察される土粒子や珪藻が比較的ランダムに堆積していたのに対し、塩分濃度を 0.7, 0.0% に低下させた塩分調整試料（写真-1 (c-1), (d-1)）では若干ではあるが粒子が水平に（=配向性を有して）堆積している様子が見受けられる。塩分濃度の低下によって構造の見え方に差が生じた原因として、塩分濃度が低下したことによって間隙水中の電荷が低くなるために粒子同士の結合力が小さくなり、圧密の進行に伴って配向性が強まったことが考えられる。一方で、三軸試験終了後の試料の鉛直断面（写真-2 (a-1), (b-1), (c-1), (d-1)）を見ると、塩分濃度の差による構造の違いは予圧密容器から抜き出した直後ほどの差は見られず、どの試料ともおおむね水平に堆積していた。三軸試験時の供試体には、圧密過程において予圧密試験にかけた鉛直応力の約 4 倍にあたる応力が上載圧としてかかっているため、予圧密試験終了後の試料では配向性が確認できなかった塩分濃度 3.0% の 2 試料に対しても強制的に配列が綿毛構造から配向構造に移行されたものと考えられる。

なお、水平断面の様子に関しては、予圧密試験後（写真-1 (a-2), (b-2), (c-2), (d-2)）および三軸試験後（写真-2 (a-2), (b-2), (c-2), (d-2)）ともに鉛直断面で見られたような塩分濃度の違いによる差は、今回の結果からは確認できなかった。

- | | |
|----------------------|---------------------|
| A : 抜き出し直後 | F : K_0 圧密 125kPa |
| B : 圧密開始直前（等方 15kPa） | G : K_0 圧密 200kPa |
| C : K_0 圧密 50kPa | H : K_0 圧密 400kPa |
| D : K_0 圧密 75kPa | I : 単調載荷終了時 |
| E : K_0 圧密 100kPa | |

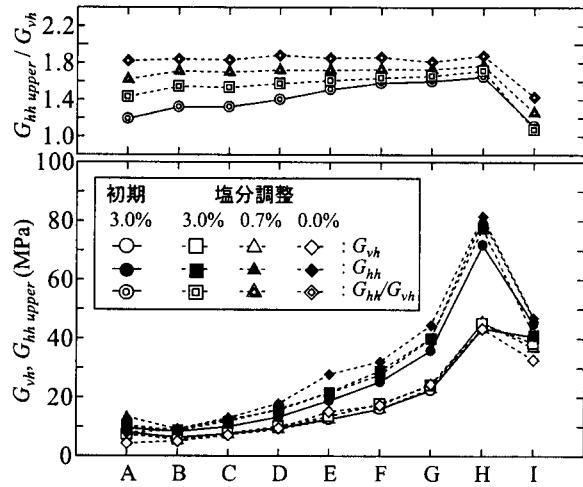


図-11 G_{vh} , G_{hh} , G_{hh}/G_{vh} の推移

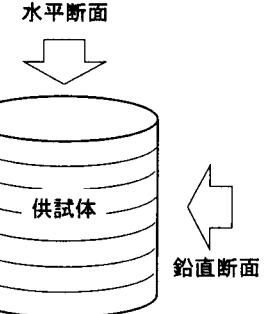
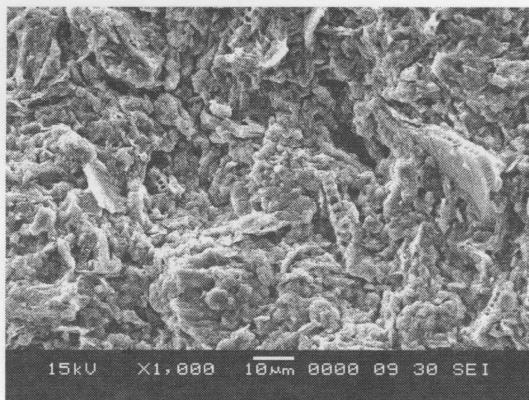
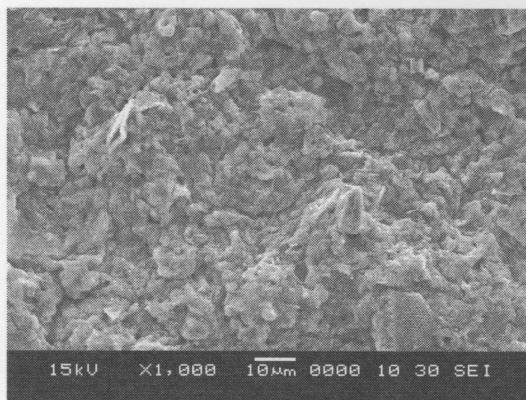


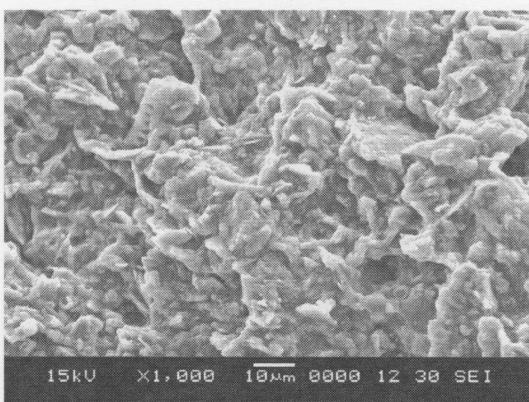
図-12 SEM 画像の観察方向



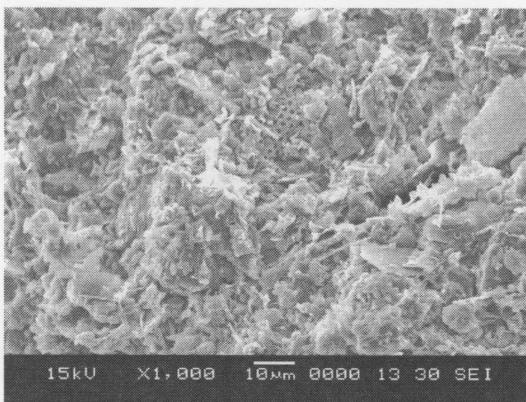
(a-1) 初期試料（塩分濃度 3.0%、鉛直）



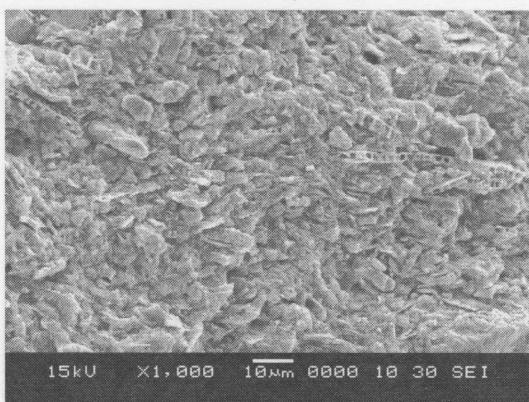
(a-2) 初期試料（塩分濃度 3.0%、水平）



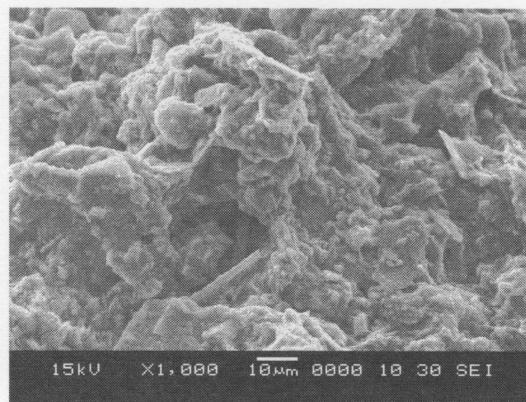
(b-1) 塩分調整試料（塩分濃度 3.0%、鉛直）



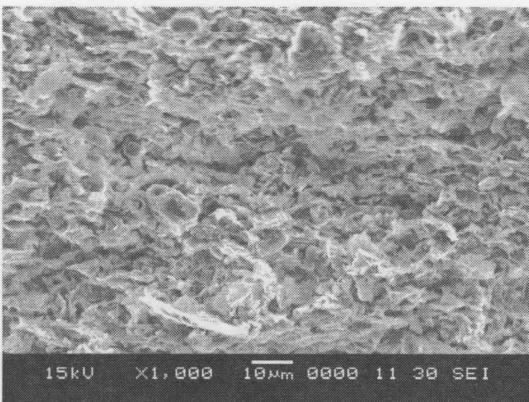
(b-2) 塩分調整試料（塩分濃度 3.0%、水平）



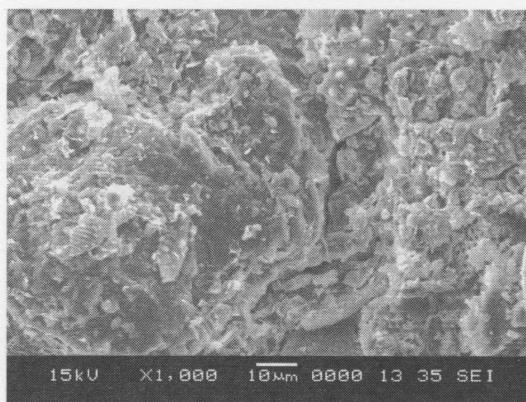
(c-1) 塩分調整試料（塩分濃度 0.7%、鉛直）



(c-2) 塩分調整試料（塩分濃度 0.7%、水平）

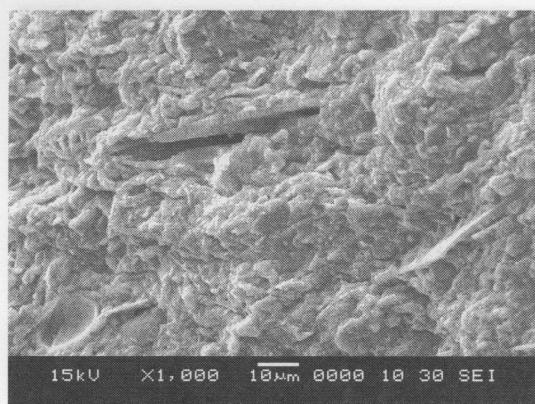


(d-1) 塩分調整試料（塩分濃度 0.0%、鉛直）

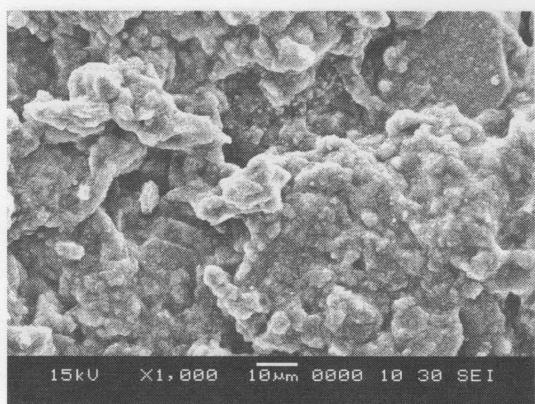


(d-2) 塩分調整試料（塩分濃度 0.0%、水平）

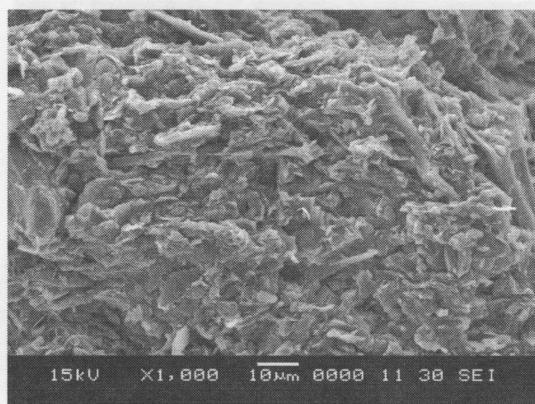
写真-1 予圧密から抜き出した直後の SEM 画像



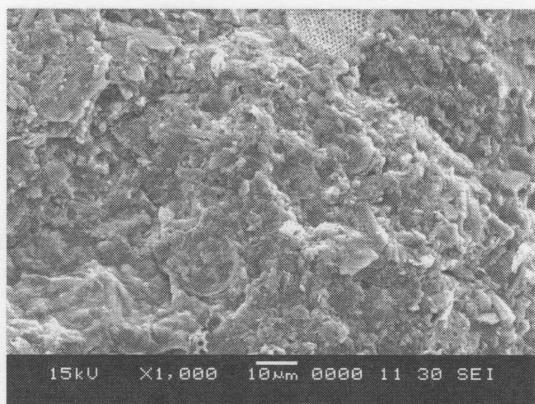
(a-1) 初期試料（塩分濃度 3.0%、鉛直）



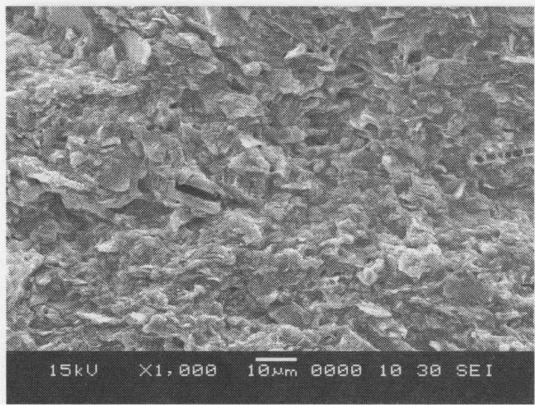
(a-2) 初期試料（塩分濃度 3.0%、水平）



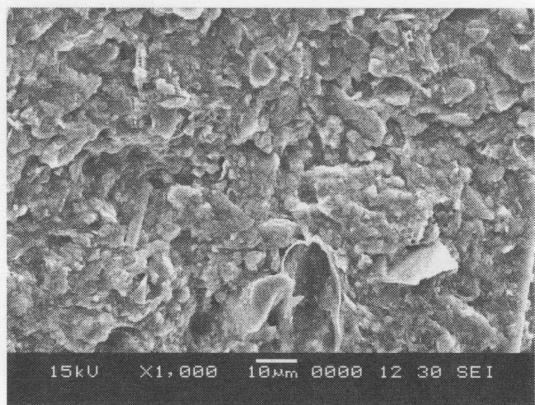
(b-1) 塩分調整試料（塩分濃度 3.0%、鉛直）



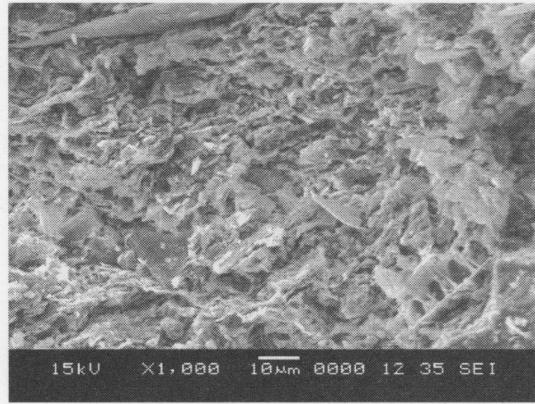
(b-2) 塩分調整試料（塩分濃度 3.0%、鉛直）



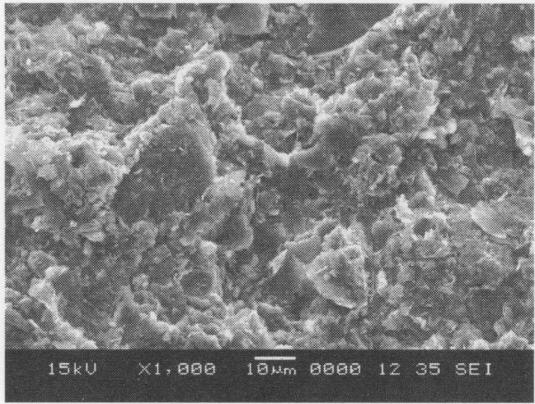
(c-1) 塩分調整試料（塩分濃度 0.7%、鉛直）



(c-2) 塩分調整試料（塩分濃度 0.7%、水平）



(d-1) 塩分調整試料（塩分濃度 0.0%、鉛直）



(d-2) 塩分調整試料（塩分濃度 0.0%、水平）

写真-2 三軸試験後の SEM 画像

4.まとめと今後の展望

本試験では、間隙水中の塩分濃度を人工的に低下させた土試料に対して物理・力学試験やSEM観察等を行い、塩分濃度を変化させたことによる堆積土の土質特性の変化について検討した。得られた知見を以下に示す。

- ・粒度試験の結果から、塩分濃度が低下することによって粘土粒子同士の結合力を弱らせ、結果として $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分含有量が多くなることが示唆された。
- ・三軸 BE 試験から、間隙水中の塩分濃度が変化することでわずかではあるが内部摩擦角に影響を与えることがわかった。また、三軸試験時における K_0 壓密は粘土粒子の配向性を強める効果があることを確認し、塩分濃度を低下させた場合では粘土粒子の結合力の低下（分散していること）により、小さい圧密応力でも強い配向性を示すことが確認できた。
- ・三軸試験前後の供試体内部の微視的構造観察から、塩分濃度を低下させていくことで試験課程における堆積土内部の土粒子等の微視的構造に変化を生じていることが明らかとなった。

今後は、メタンハイドレート賦存地盤から採取した堆積土を用いてデータを蓄積していくことで、実地盤と本試験結果との妥当性について検討していく予定である。

参考文献

- 1) Sloan, E. D.: Clathrate hydrates of national gases -2nd edition-, *Marcel Dekker*, 705p, 1998.
- 2) 松本良：メタンシープとメタンハイドレート；日本海・直江津沖の例－総論－，月刊地球，第27卷，第318号，No.12，pp.897-900，2005.
- 3) Shoji, H., Soloviev, V., Matveeva, T., Mazurenko, L., Minami, H., Hachikubo, A., Hyakutake, K., Kaulio, V., Logvina, E., Obzhirov, A., Baranov, B., Khlystov, O., Biebow, N., Poort, J., Jin, Y. K. and Kim, Y.: Hydrate-bearing structures in the sea of Okhotsk, *EOS*, Vol.86, No.40, pp.13-18, 2005.
- 4) Kataoka, S., Yamashita, S., Kawaguchi, T. and Suzuki, T.: The soil properties of lake-bottom sediments in the lake Baikal gas hydrate province, *Soils and Fundations*, Vol.49, No.5, pp.757-775, 2009.
- 5) Uchida, T., Lu, H., Tomaru, H. and the MITI Nankai Trough Shipboard Scientists: Subsurface Occurrence of Natural Gas Hydrate in the Nankai Trough Area; Implication for Gas Hydrate Concentration, *Resource Geology*, Vol.54, No.1, pp.35-44, 2004.
- 6) 林雅雄，中水勝，長田順子：メタンハイドレート－資源量評価研究の経緯と最新の成果－，石油・天然ガスレビュー，Vol.41，No.5，pp.57-68，2007.
- 7) Minami, H., Krylov, A., Sakagami, H., Hachikubo, A., Hyakutake, K., Tomaru, H., Kida, M., Takahashi, N., Shoji, H., Matveeva, T., Jin, Y. K., Obzhirov, A. and Poort, J.: Geochemistry of Pore Waters from Gas Hydrate-bearing Sediment Cores Retrieved at the Sea of Okhotsk, *Journal of Geography*, Vol.11, No.1, pp.194-206, 2009.
- 8) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, *Géotechnique*, Vol.17, No.2, pp.173-211, 1967.
- 9) 鈴木素之，山本哲朗，笛西孝行，菅原真由美：塩分濃度が異なる純水粘土鉱物の残留強度，山口大学工学部研究報告，第54卷，第1号，pp.11-15，2003.
- 10) Yamashita, S. and Suzuki, T.: Small strain stiffness on anisotropic consolidated state of sands by bender elements and cyclic loading tests, *Proc. of 15th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, pp.325-328, 2001.
- 11) 川口貴之，三田地利之，瀧谷啓，佐野信房：室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価，土木学会論文集，No.694，III-57，pp.195-207，2001.
- 12) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック（第三版），技報堂出版，p990，2009.
- 13) Kawaguchi, T., Yamashita, S., Kataoka, S., Shibuya, S. and Kawajiri, S.: Inherent and induced anisotropy of three natural sedimentary clays reflecting on the elastic shear modulus, *Deformational Characteristics of Geomaterials*, Vol.2, pp.575-579, 2008.

著 者

片岡 沙都紀 研究員，博士（工学），地盤工学
川口 貴之 北見工業大学工学部社会環境工学科，博士（工学），地盤工学
山下 聰 北見工業大学工学部社会環境工学科，博士（工学），地盤工学
澁谷 啓 所員，博士（工学），地盤工学