



Marine



洋上風力発電のための地質調査

～ 川崎地質の取り組み ～

Laboratory



R&D

Disaster



加盟団体
JWEA(一般社団法人日本風力エネルギー学会)
JWPA(一般社団法人日本風力発電協会)

Kaw



Ground



私たち、アースドクターです。

会社概要

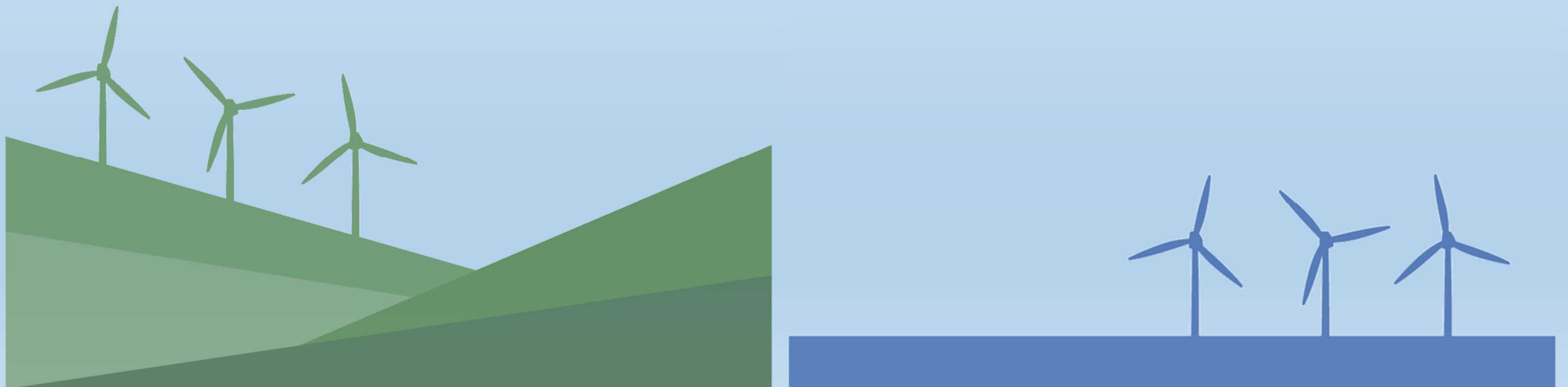


| | | | |
|-------|--|----------------------|-------------|
| 社名 | 川崎地質株式会社 | | |
| 英文名 | Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd. | | |
| 本社所在地 | 東京都港区三田 2-11-15 三田川崎ビル | | |
| 電話番号 | 03-5445-2071 (代表) | | |
| 創業 | 昭和18年7月22日 | | |
| | 代表取締役社長 | 栃本 泰浩 | |
| 従業員数 | 347名 (令和4年11月末日現在) | | |
| 保有資格数 | 理学博士：11名 工学博士：4名 技術士：112名 RCCM：71名 測量士：35名 ／一級土木施工管理技士：49名 (のべ人数) | | |
| 業者登録 | 地質調査業者登録 | ： 質 04 | 第1号 |
| | 建設コンサルタント登録 | ： 建 01 | 第9号 |
| | 測量業者登録 | ： | 第(13)-2477号 |
| | 建設業許可 国土交通大臣 | ： 特3 (土木工事業 とび土木工事業) | 第390号 |
| | | ： 般3 (さく井工事業) | 第390号 |



プロローグ 1

．．．何を調べるのか？
～ 全体工程を考える前に ～



■ 陸上の風力発電：何を調査すべきか



関連法

- ✓ 電気事業法
- ✓ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令(R5.3最新)



◎風力発電所の設置又は変更の
工事計画の審査に関する実施要
領(R3.5最新)



技術基準及び指針内容を踏まえ
つつ、ClassNK等の**第三者認証
機関の「支持構造物設計評価」**に
よる評価を満足すること

技術基準と指針

- ✓ 発電用風力設備の技術基準の解釈(R5.3版,鉄塔や電線に関する記載)
- ✓ 建築物の構造関係技術基準解説書(2020版,最新)
- ✓ 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2010版,地盤や耐震に関する詳細な内容)

■ 陸上の風力発電：基準類と審査の流れは？



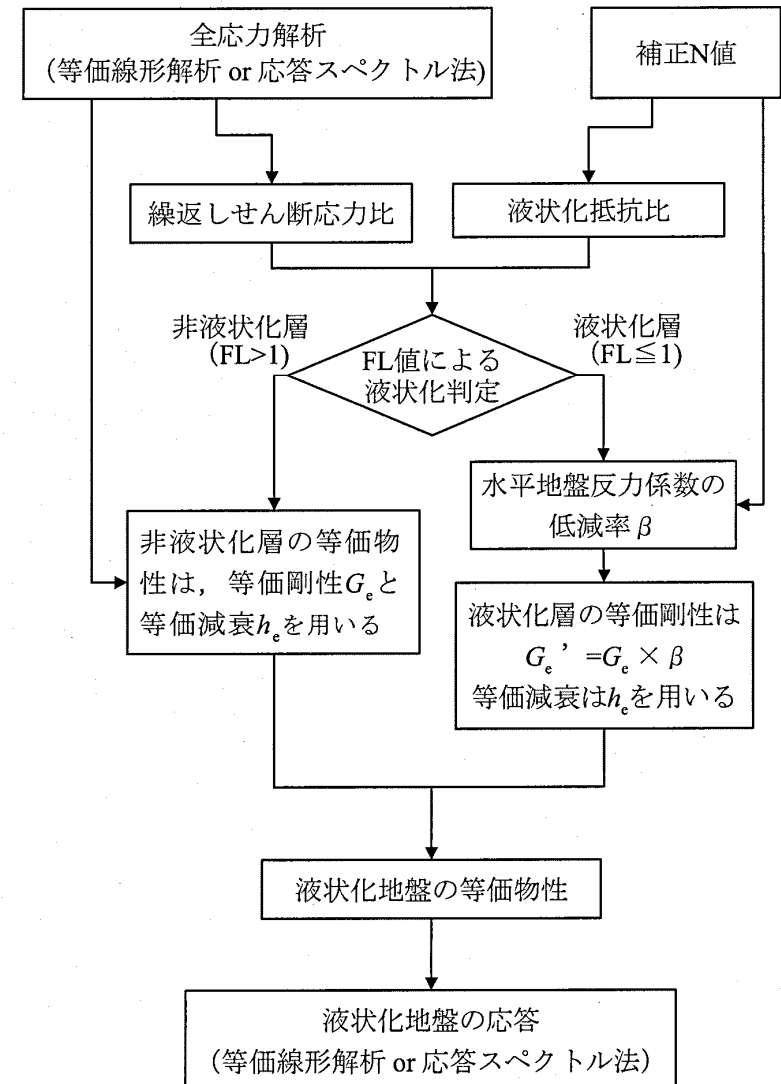
➤ 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2010版)(抜粋)

5章 地震荷重

9章 基礎の構造計算

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部工編，2002
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，1996
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書構造性能照査編，2002
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999，2010
- 6) 日本道路協会：道路土工－擁壁工指針，2001
- 7) 建築基準法および同施行令
- 8) 平成12年5月31日建設省告示第1450号
- 9) 平成12年12月26日建設省告示第2464号
- 10) 平成13年7月2日国土交通省告示第1113号
- 11) 昭和59年9月5日付け建設省住指発第324号建設省住宅局建築指導課長通達
- 12) 鉄道総合技術研究所：鉄筋フレア溶接継ぎ手設計施工指針
- 13) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS5 鉄筋コンクリート工事，2003
- 14) 近代図書株式会社：鉄筋コンクリートの新しい計算図表 [RG]，1981
- 15) 電気協同研究会：電気協同研究 第58巻 第3号 2002
- 16) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 17) コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭 基礎構造設計マニュアル，
- 18) 日本道路協会：杭基礎設計便覧 H18 年度改訂版，2007
- 19) 時松孝次：耐震設計とN値（建築），基礎工，Vol.25，No.12，pp.61～66，1997



図解 5.11 液状化地盤の応答計算フロー³⁾

▶ 「支持構造物設計評価」ClassNKの例

G.3 地盤の地震応答解析に係る取扱い

- 1. 地盤の地震応答解析の結果において、せん断歪が 1%を超えている場合，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05]に記載の液状化地盤の応答計算フロー（p.170，図解 5.11）に従うことは認められないため，該当する地点では等価線形解析及び液状化層に対して剛性低下率を乗じた等価剛性を設定する簡易液状化解析を適用することは認められない。
- 2. 前-1.の場合，液状化の考慮の有無に応じて以下に掲げる解析を行わなければならない。
 - (1) 液状化を考慮しない場合：逐次非線形－全応力解析
 - (2) 液状化を考慮する場合：逐次非線形－有効応力解析（せん断歪みの増大と過剰間隙水圧の上昇に伴う土の非線形性を考慮した時刻歴非線形解析）
- 3. 前-2.において逐次非線形－有効応力解析を行う場合，地盤モデル（応力－ひずみモデル）の設定根拠とその妥当性を示さなければならない。
- 4. 地盤の地震応答解析の結果においてせん断歪が 1%を下回るが，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05]に記載の液状化地盤の応答計算フロー（p.170，図解 5.11）によらず逐次非線形－有効応力解析を適用する場合，その解析結果が妥当であることを示さなければならない。（例：代表ケースについて，等価線形解析及び液状化層に対して剛性低下率を乗じた等価剛性を設定する簡易液状化解析との比較を行うなど。）
- 5. 工学的基盤の傾斜が 5 度以上となる場合，基盤面の傾斜の影響の有無を確認しなければならない。（例：有限要素解析（2次元）で評価した風車地点の地盤応答を用いて地震応答解析を行い，1次元平行成層地盤モデルの地盤応答を用いて評価した設計時の地震応答解析結果と比較するなど。）

■ 陸上の風力発電：基準類と審査の流れは？



➤ 「支持構造物設計評価」ClassNKの例

課題1

解放工学的基盤面の傾きの確認方法

- ① ボーリング追加
- ② 高密度電気探査
- ③ 弾性波探査
- ④ 微動アレイ探査
- ⑤ その他

いろいろあるが一番確実なのは...

解放工学的基盤面

⇒傾きが5度以上の場合は基盤面の傾斜の影響を確認する

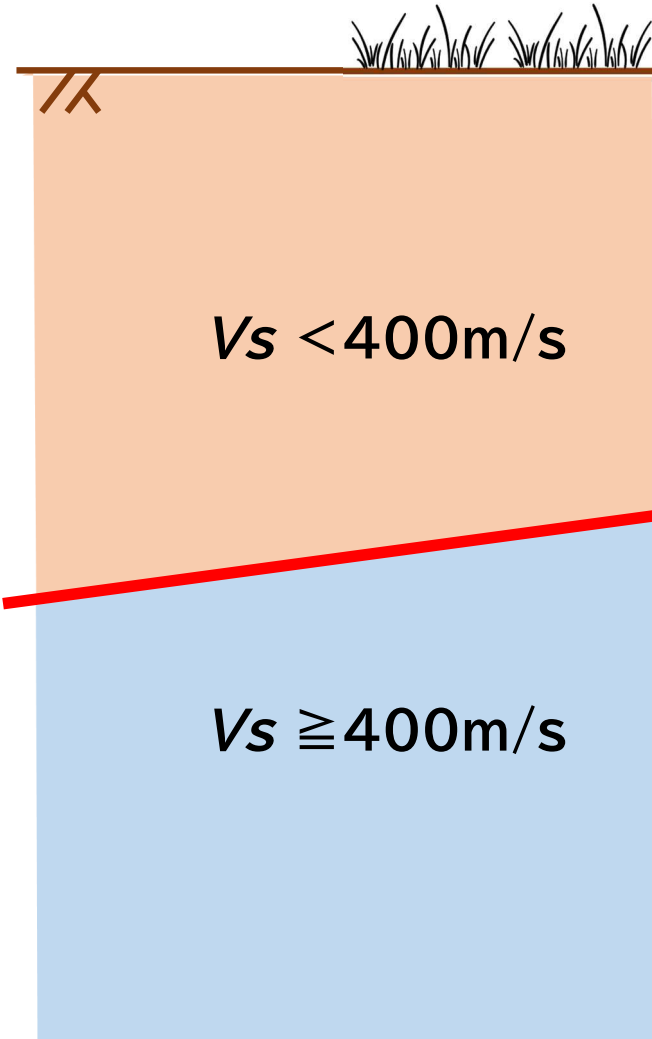
課題2

解放工学的基盤面の傾きの影響確認方法

- ・等価線形解析(一次元)と逐次非線形解析(二次元)の結果を比較しなければならない

等価線形解析:SHAKE

逐次非線形解析:FLIP



■ 洋上の風力発電：何を調査すべきか



関連法

- ✓ 電気事業法
- ✓ 港湾法
- ✓ 再エネ海域利用法



共通の技術的審査基準

◎ 洋上風力発電設備に関する
技術基準の統一的解説
(R2.3改訂)

港湾区域 ※1

- ✓ 電気事業法
- ✓ 港湾法37条関連
- ✓ 港湾法56条関連

一般海域 ※2

- ✓ 電気事業法
- ✓ 港湾法56条関連
- ✓ 再エネ海域利用法

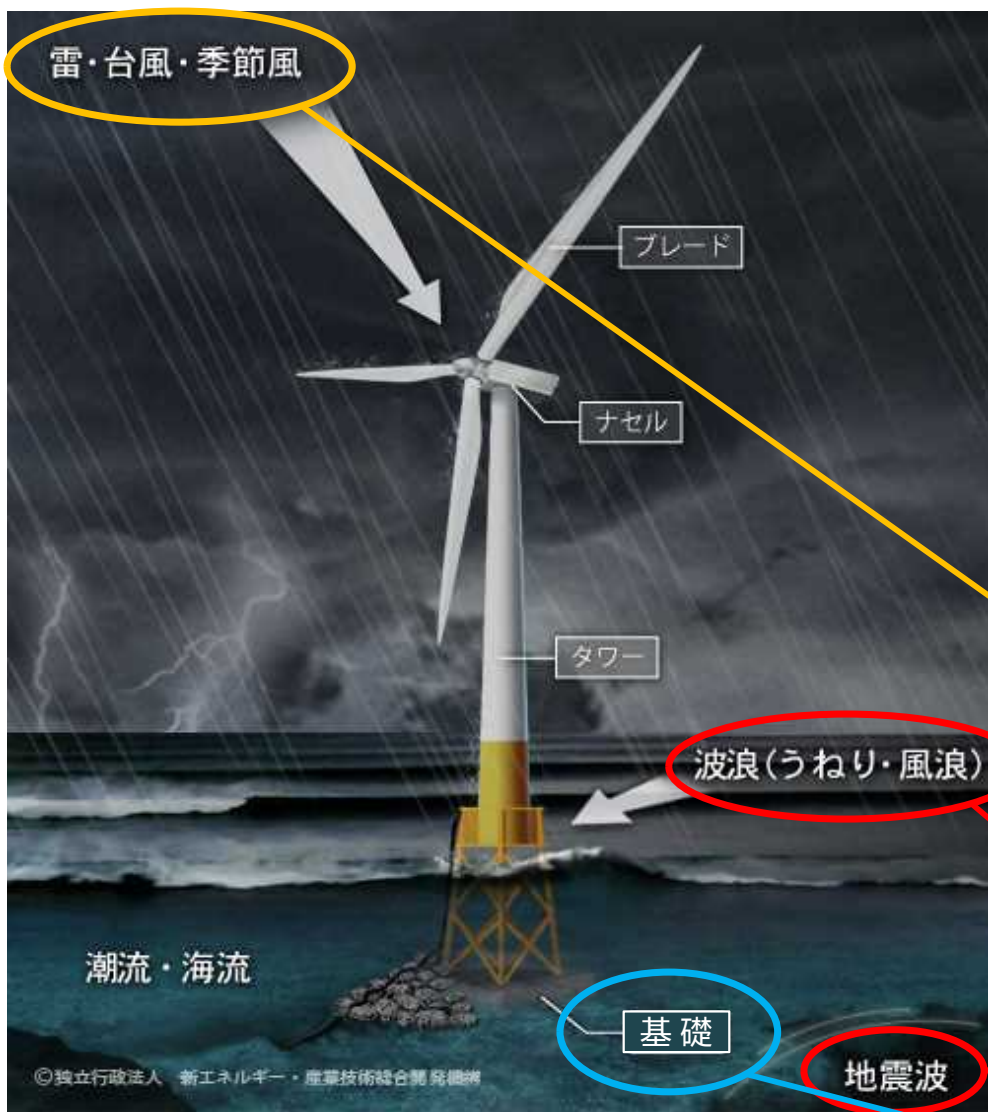
※1 港湾法37条

⇒ 港湾区域内の工事等の許可

※2 港湾法56条

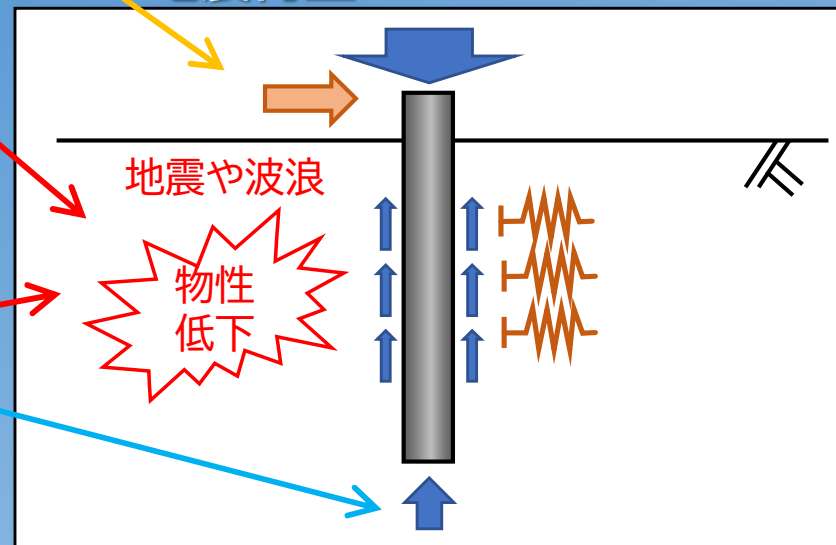
⇒ 港湾区域の定めのない港湾

洋上の風力発電：海域の地盤調査とは？



調べていること

- ① 杭基礎の支持力
 - ・N値
 - ・内部摩擦角 ϕ
 - ・粘着力 c
- ② バネ定数
 - ・変形係数 E
- ③ 地震応答解析
 - ・S波速度構造
 - ・強度低下特性
 - ・地震荷重



洋上の風力発電：基準類と審査の流れは？



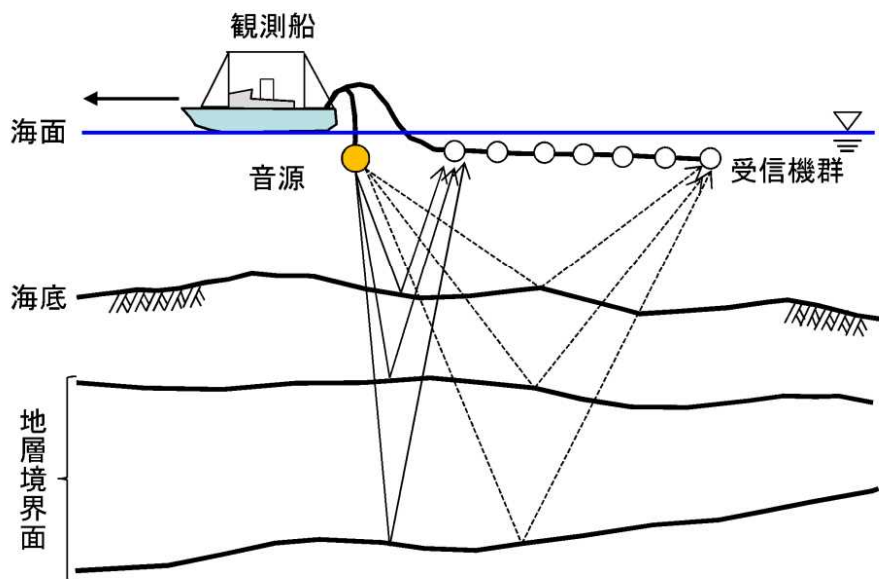
洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説(抜粋)

○ 地盤調査に当たっては、洋上風力発電設備の構造や規模に応じて、当該設備を設置する地点周辺の地盤の性状を適切に評価、地盤の物理的性質、力学的特性、工学的基盤面を設定する。

【解説】

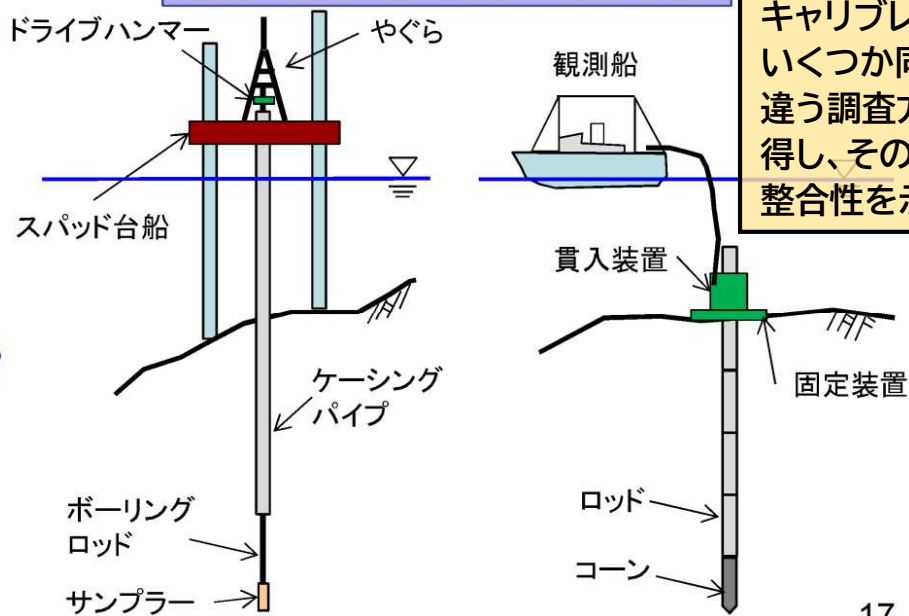
- 原位置試験や室内試験を実施するために地盤ボーリングを実施する必要があるため、調査位置や間隔について、予備調査や音波探査結果等を踏まえ、地層の均一性・一様性を考慮して決定することが望ましい。
- 原位置試験については、洋上風車設置位置ごとに行うこととし、標準貫入試験(SPT)及びコーン貫入試験(CPT)を併用してもよいが、CPTを用いる場合、SPTによるデータとの突き合わせを実施することが望ましい。
- また、CPTにより地盤の物理的性質、力学的特性を設定する際には、サンプリングによる室内試験の結果と突き合わせを実施することが望ましい。

音波探査による海底地盤面下の地層探査



↑ 音波探査のイメージ

地盤ボーリング、原位置試験の実施



↑ 標準貫入試験のイメージ

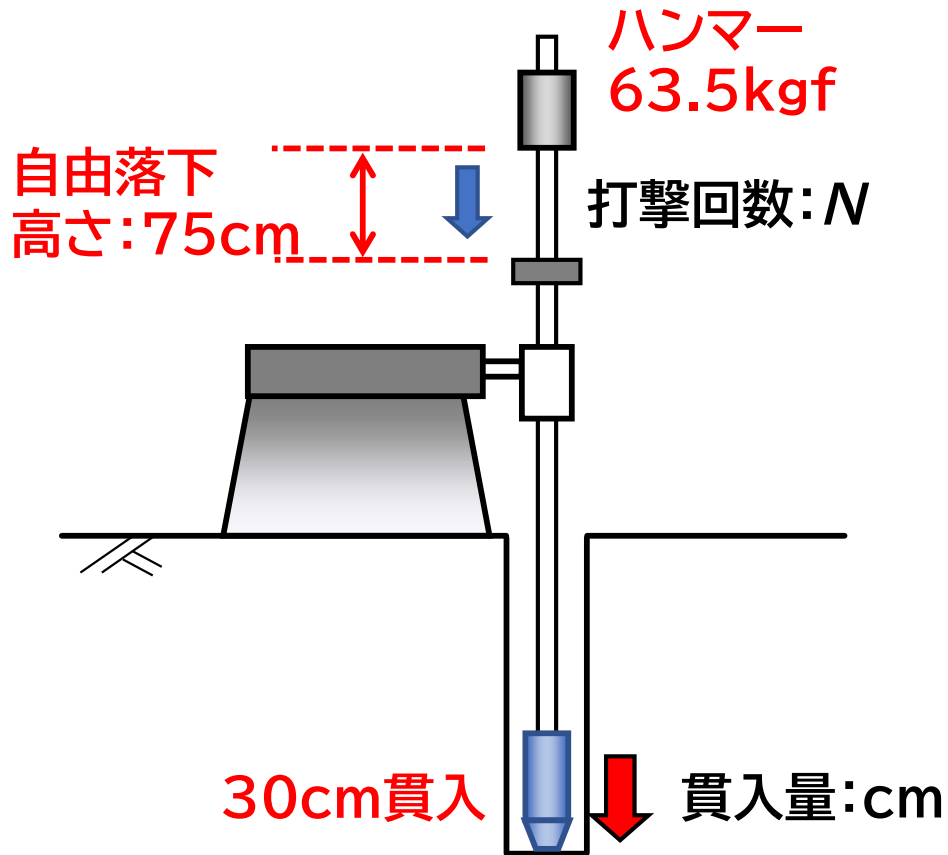
↑ コーン貫入試験のイメージ

キャリブレーションとして、いくつか同一地点において違う調査方法でデータを取得し、その結果を比較して整合性を示す必要がある

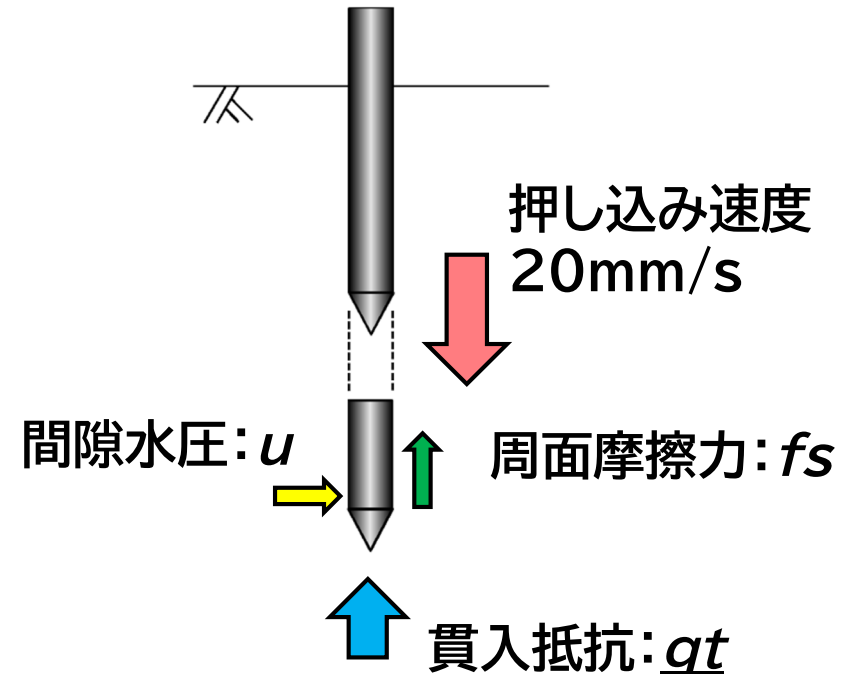
■ SPTとCPTの測定方法の比較



SPT



CPT



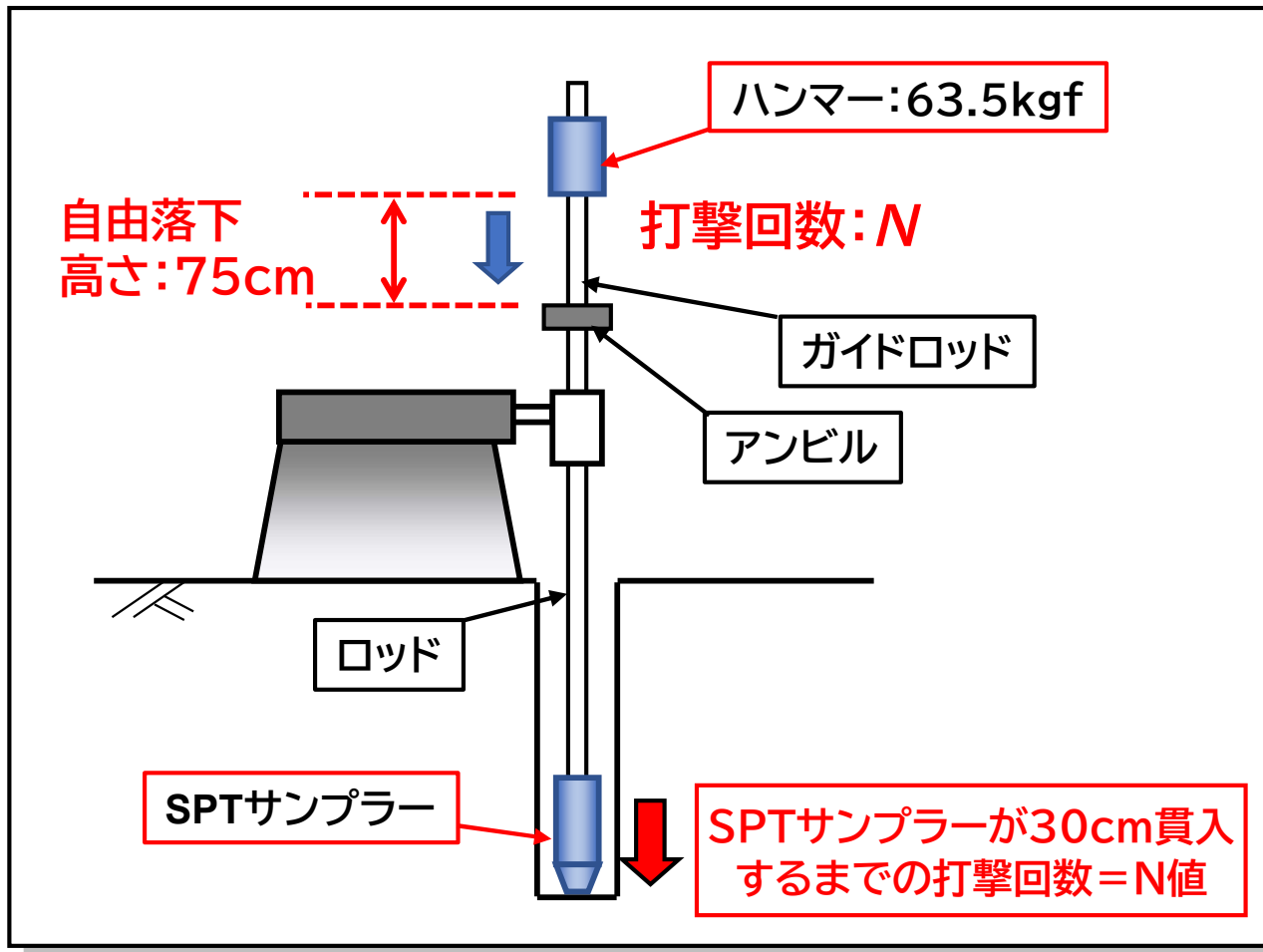
■ SPT : N値とは



➤ 標準貫入試験(Standard Penetration Test)

N値の定義: JIS A 1219

→ 63.5kgfの重錘を高さ75cmで自由落下させ、
先端が土に30cm貫入するまでの打撃回数のこと



<SPT(N値)の特徴>

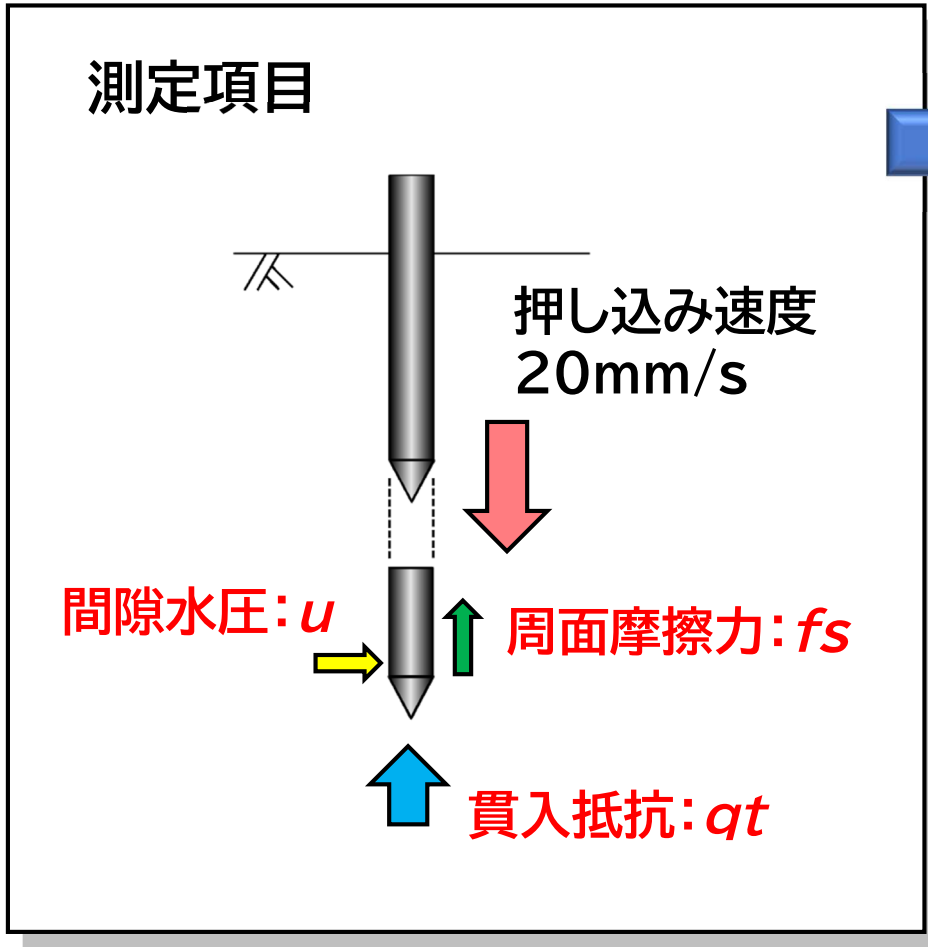
- ・最も普及した土の試験
- ・土の硬さの指標値
- ・打撃回数が大きいほど固い
- ・ $N=0$ の軟弱土も存在
- ・支持層は $N=50$ 回以上が目安
- ・設計に多く用いられる
- ・いろいろな換算式がある
- ・ツールのサイズに規定あり

<ボーリングと標準貫入試験>

- ・ボーリングは孔を掘削する作業
- ・標準貫入試験(SPT)は孔内の試験
- ・その結果 = 打撃回数が N 値

➤ CPT (Cone Penetration Test)

現場測定値から土質定数へ換算



<一次換算値等>

- ・土質判別: Q_t , F_r , I_c (Robertson他)
- ・換算N値: N_c (Robertson他)
- ・非排水せん断強さ: S_u (港湾式他)
- ・内部摩擦角: ϕ (風力指針)
- ・圧密降伏応力: P_c (深沢2004)
- ・S波速度: V_s (Robertson他) など

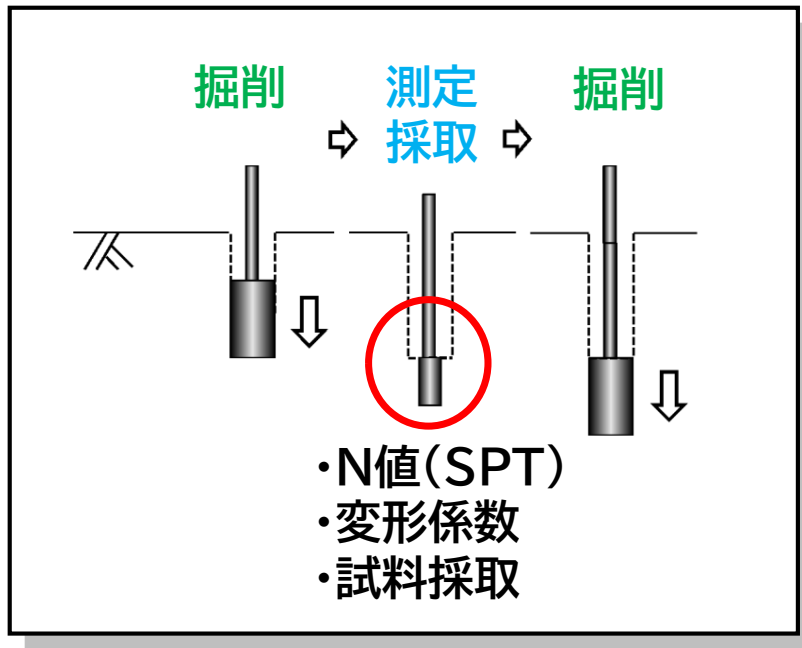
<二次換算値等(換算N値: N_c から)>

- ・変形係数: E (JGS他)
- ・S波速度: V_s (道示)
- ・粘着力: c (JGS他)
- ・内部摩擦角など: ϕ (建築指針他)
- ・初期剛性率: G_0 (V_s より換算) 他多数

➤ 調査方法の概念を比較

✓ ボーリング掘削

◎掘削と試験の繰り返し



現地測定

- ・N値(SPT): N
- ・変形係数: E
- ・S波速度など: V_s

採取試料(室内土質試験)

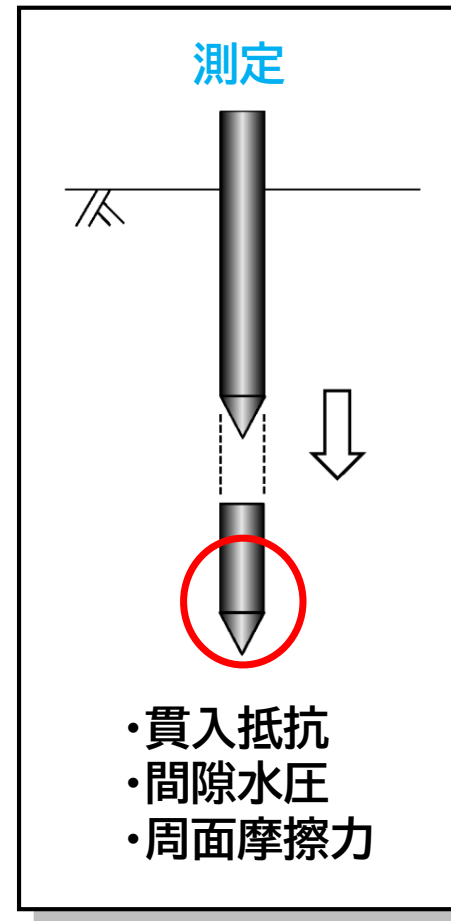
- ・粘着力: c
- ・内部摩擦角: ϕ その他



現地測定や土質試験で**設計定数を直接計測する。**

✓ コーン貫入(CPT)

◎静的にコーンを連続貫入させる



測定項目

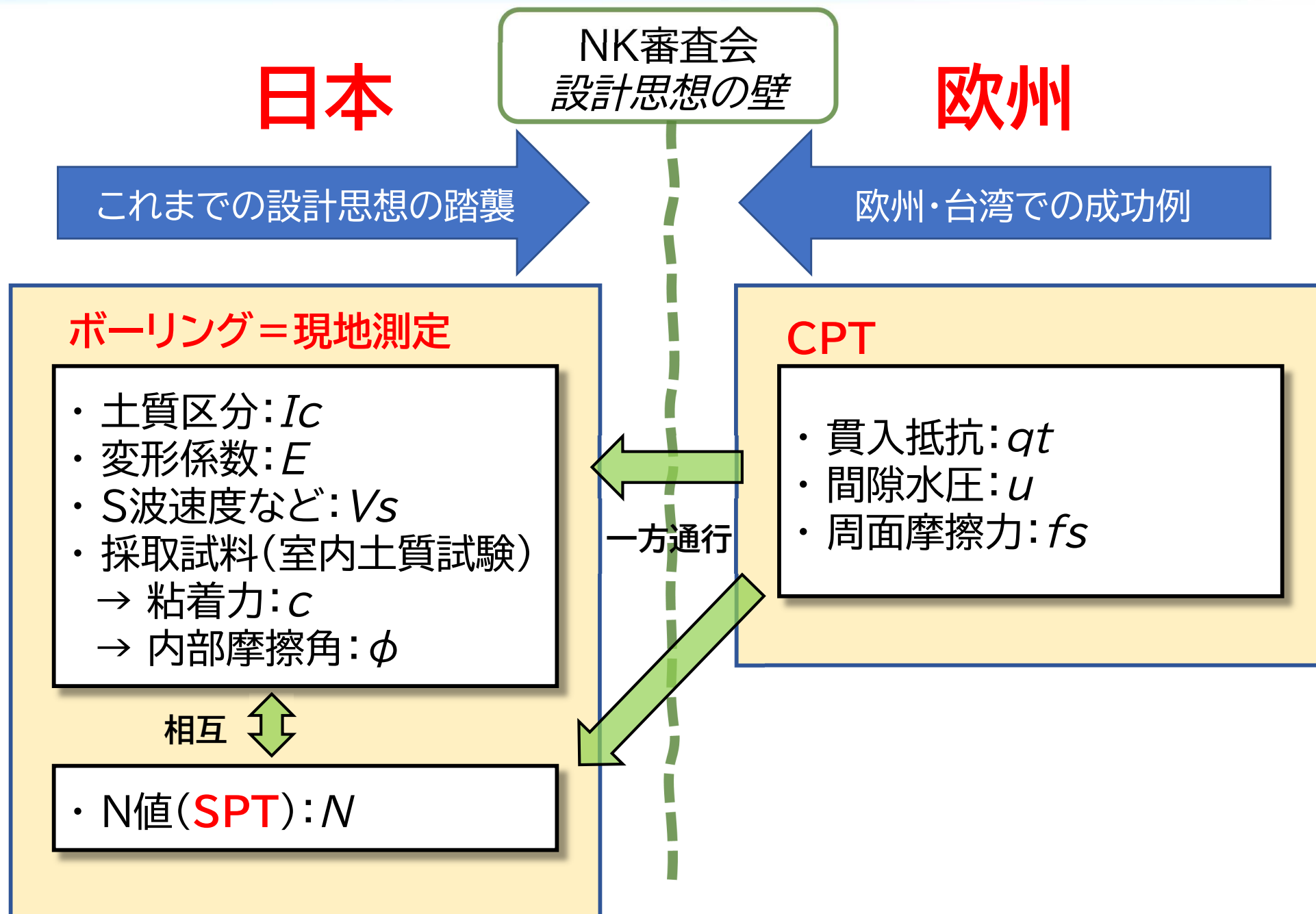
- ・貫入抵抗: qt
- ・間隙水圧: u
- ・周面摩擦力: f_s



測定結果から**換算式を用いて設計定数を推定する。**

- ・N値: N
- ・土質区分: I_c
- ・粘着力: c
- ・内部摩擦角: ϕ
- ・変形係数: E
- ・S波速度: V_s

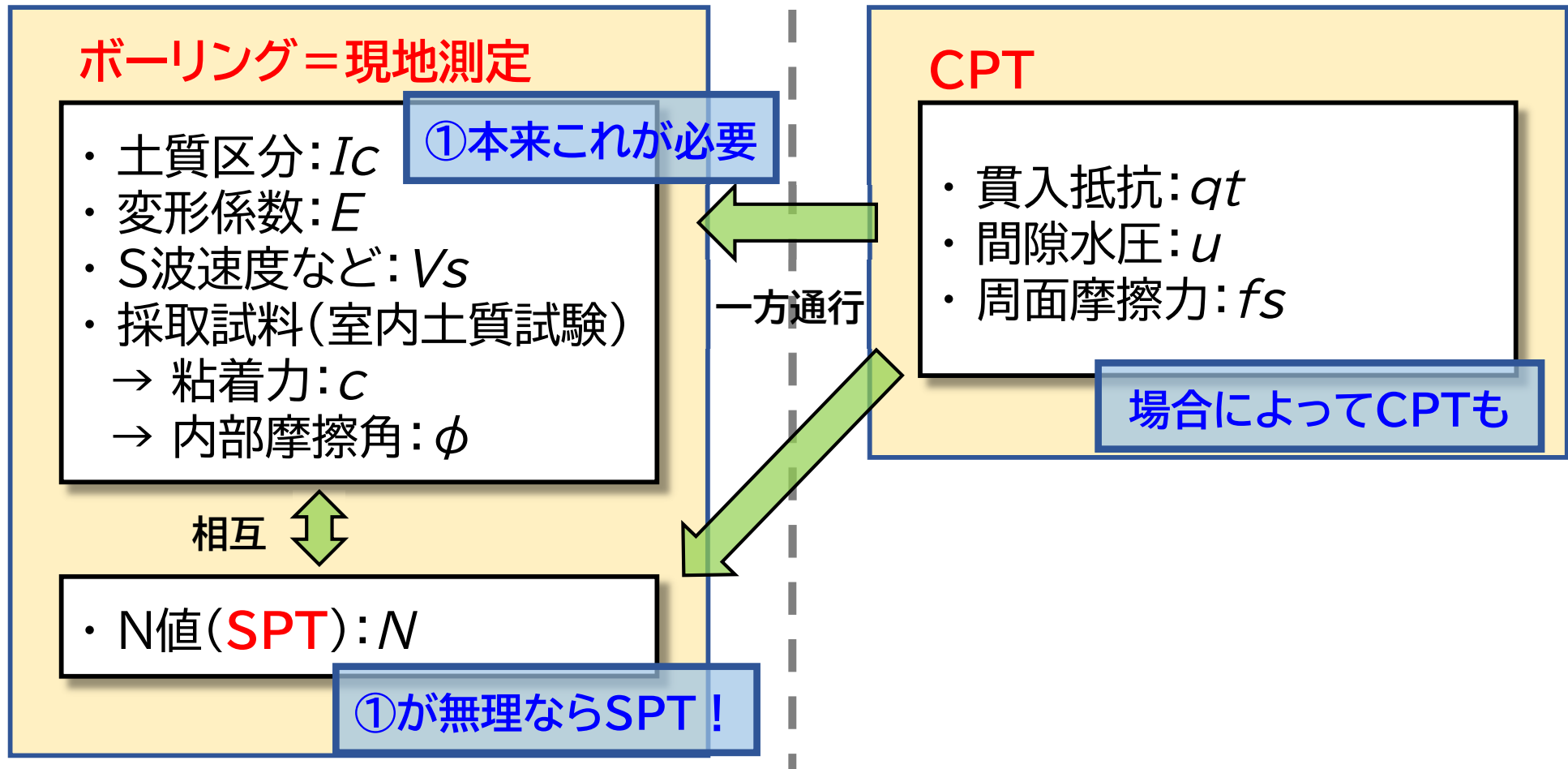
■ 日本と欧州のせめぎあい



■ 統一的解説における物性値の取り扱い



キャリブレーションとして、ボーリングとCPT
を同地点で実施し、得られた結果を比較する

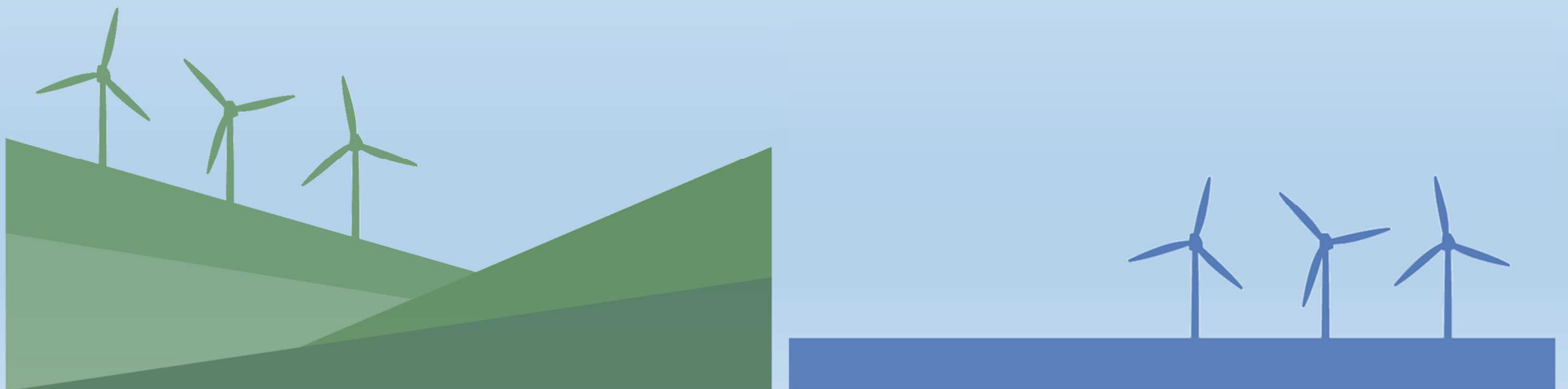


SPTやCPTは点の試験、物理探査がこれを面的に広げる

プロローグ2

地盤調査の重要性

～ 全体工程を考える前に ～



洋上の風車の配置イメージ



- 500MWクラスのWindfarmを想定すると、5km×20kmに10MWの風車を50基建設することになる → たとえば25基を2列配置(上図)
- 約800m毎に高さ300mの風車が並ぶ。
→ たとえらなら、東京の地下鉄の駅毎に東京タワーが立つようなイメージ
- 地質調査を怠ること
= 隣町の地質データをもとに、わが町に高層ビルを建設するようなもの

事前調査の一般的な調査地点配置例

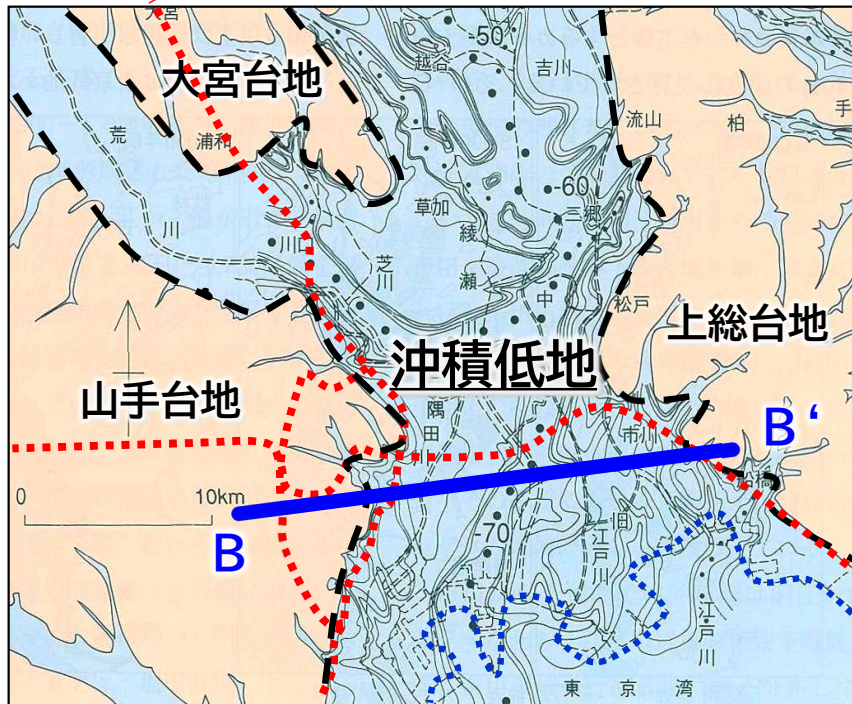


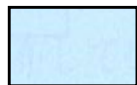
○ この広さに対してボーリング5地点は、多いか少ないか…。

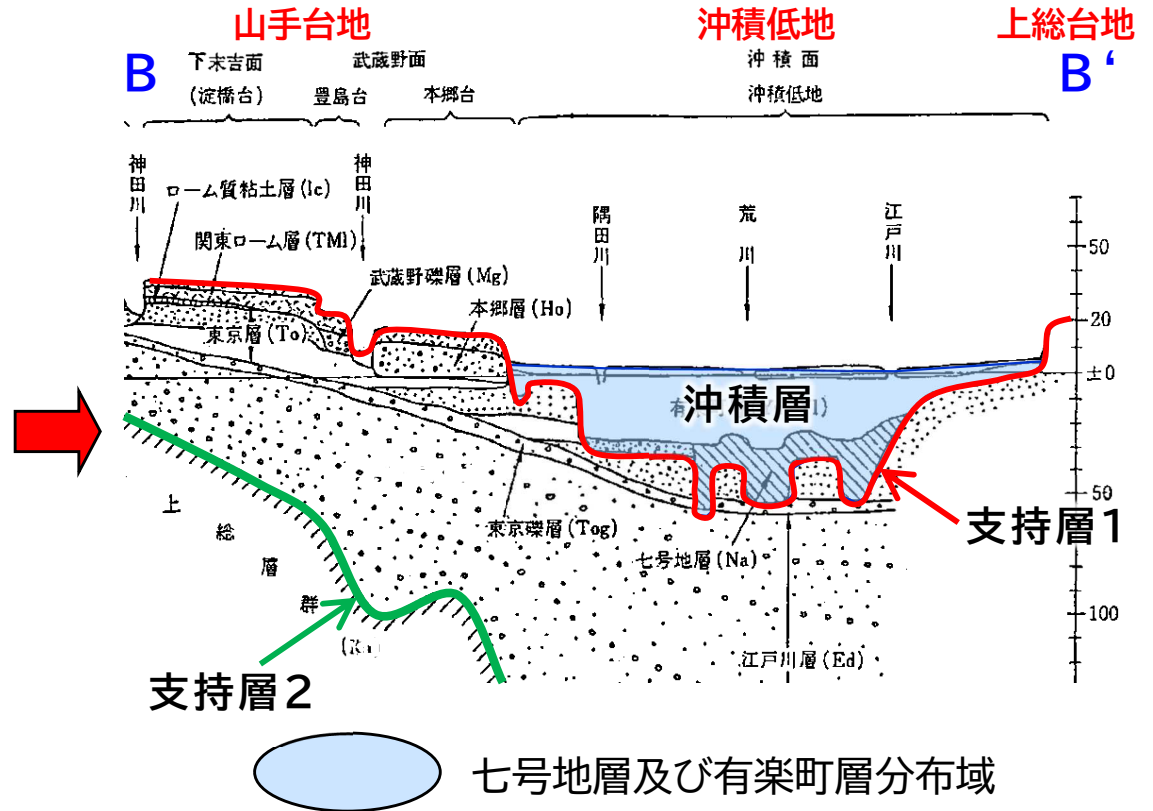
○ 地盤は元々不均質で、堆積状況によって土質分布は変化する。


→ その実例を次頁以降に示す。

■たとえば、支持層の分布深度も元々複雑



 沖積軟弱層分布域

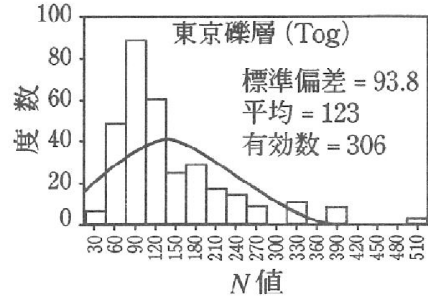
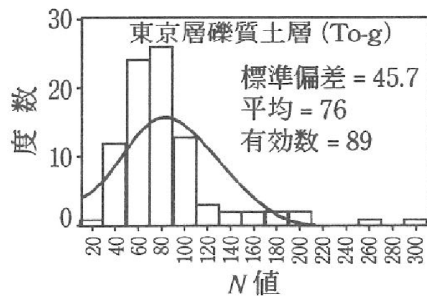
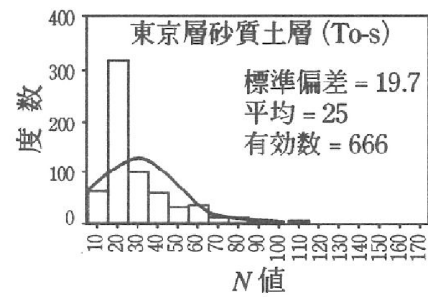
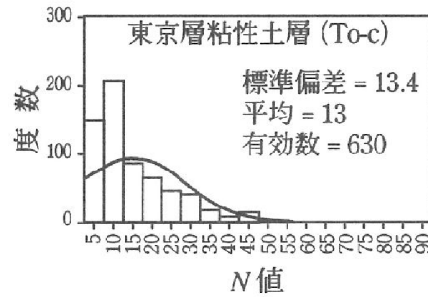
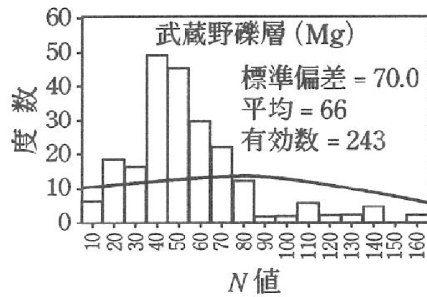
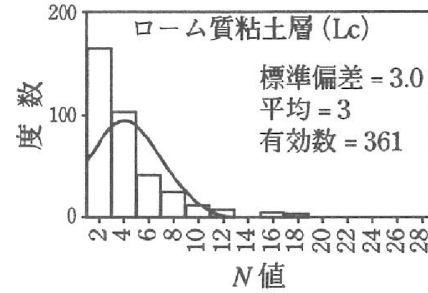
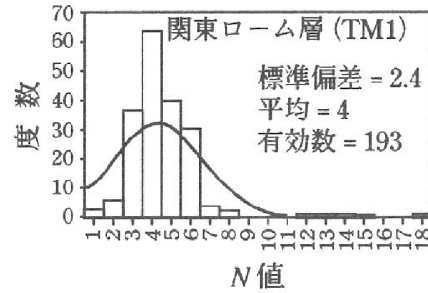
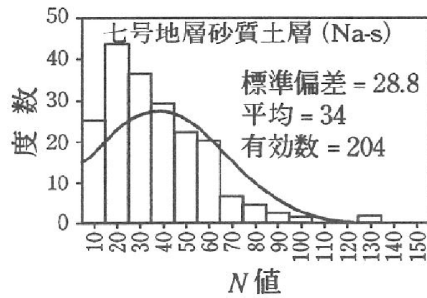
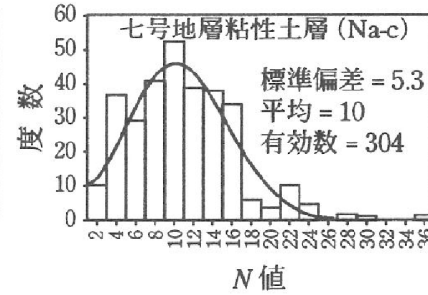
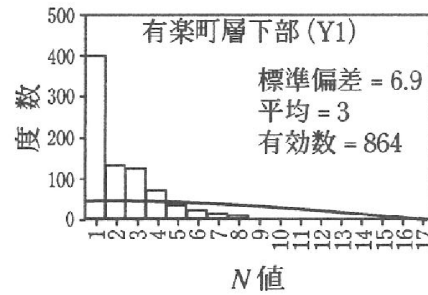
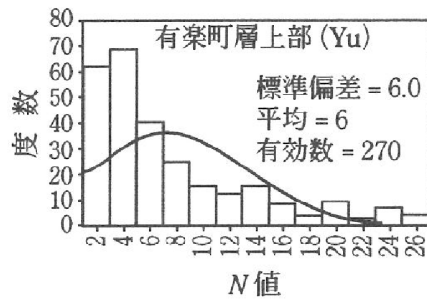


 七号地層及び有楽町層分布域

地下の地層境界面は複雑に変化している

出典:東京地盤図を編集

■たとえば、地層毎のN値も元々ばらつく

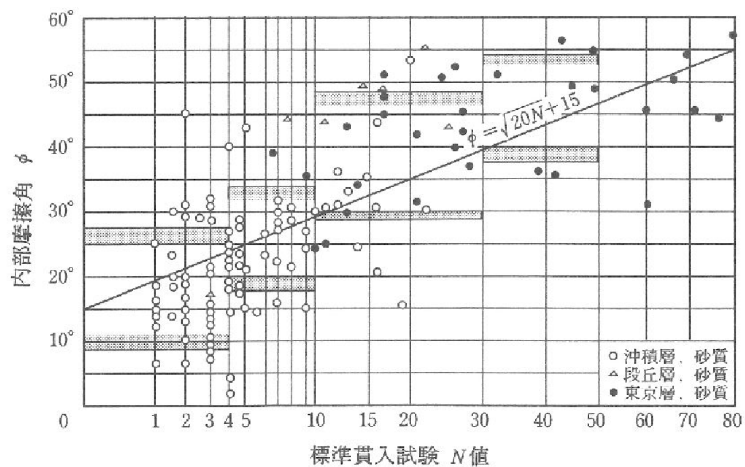


出典:N値と $c \cdot \phi$ の利用法(JGS)

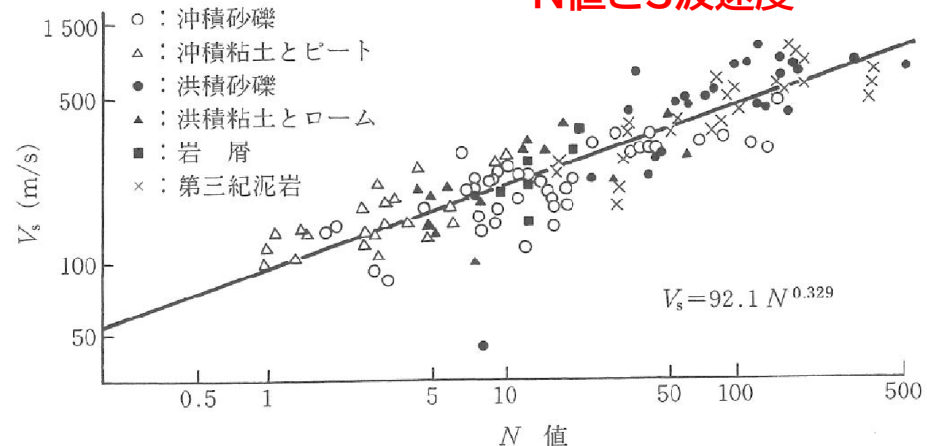
■地盤の物性値は元々ばらついている



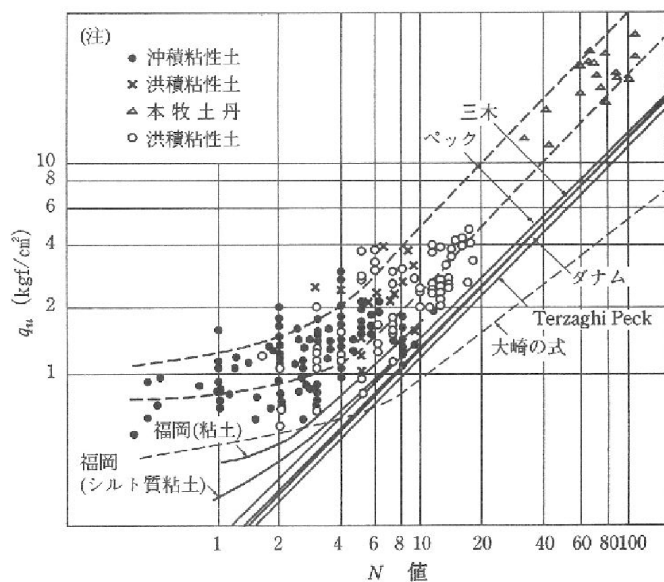
N値と内部摩擦角



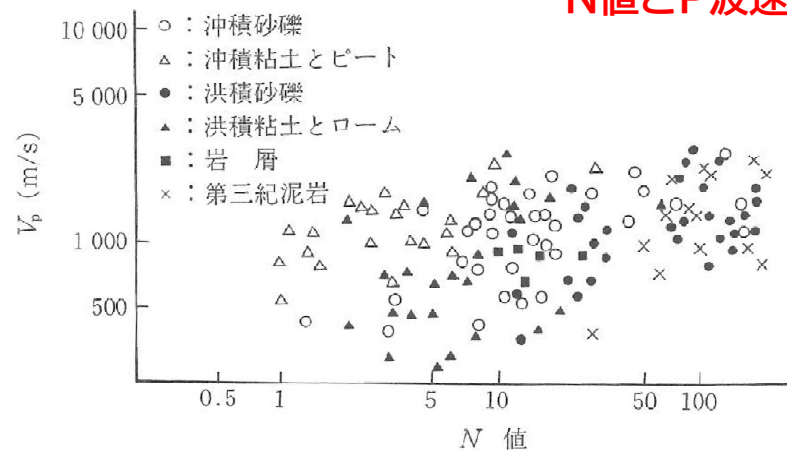
N値とS波速度



N値と一軸圧縮強さ



N値とP波速度

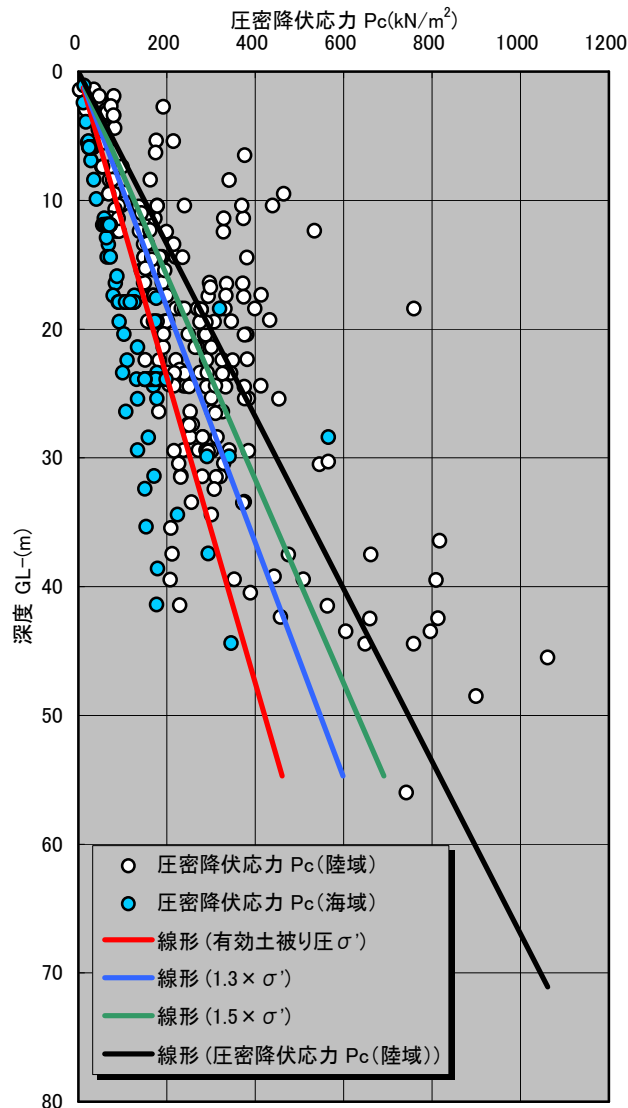


出典:N値と $c \cdot \phi$ の利用法(JGS)
地盤工学への物理探査技術の適用と事例

■地盤の物性値は元々ばらついている



➤ 圧密降伏応力の例

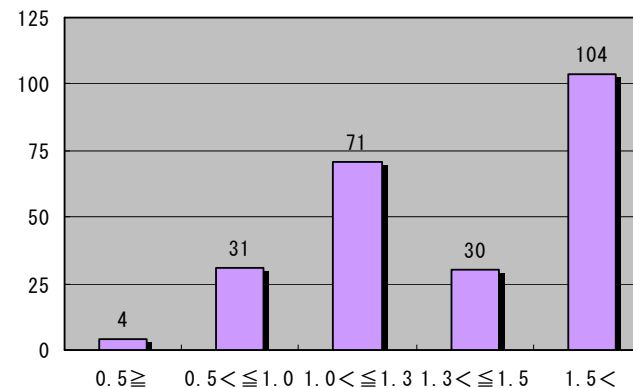


関東平野南部における沖積層の圧密降伏応力は、海域と陸域で明確な差異があり、

$$P_c \text{ 陸域} \doteq 1.0 \sim 1.7 \times P_c \text{ 海域}$$

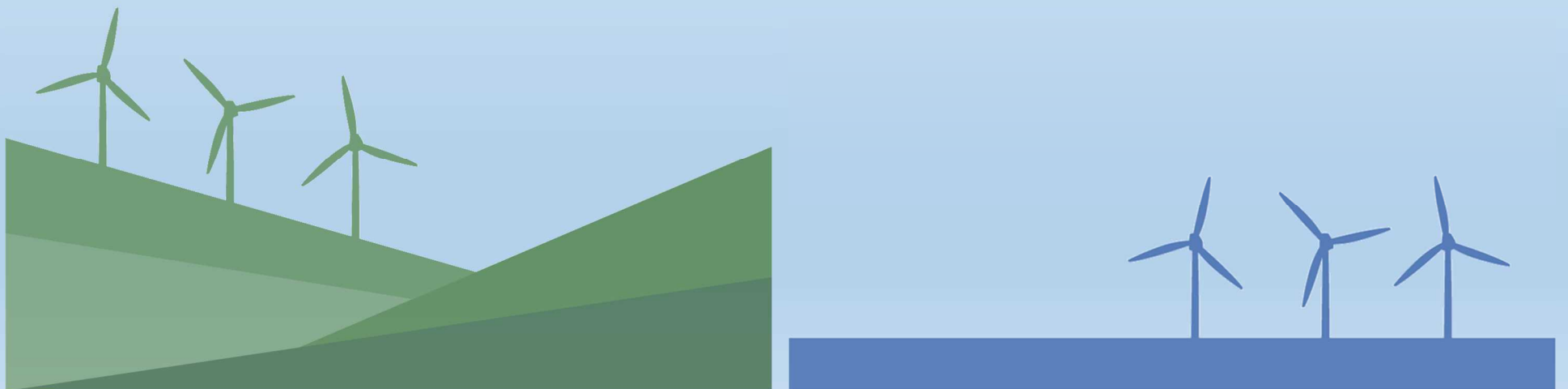
程度の関係を示している。

陸域のデータを参考にする場合は、十分な検討が必要である。



| OCR 値の区間 | 頻度 (個) | 比率 | 標準偏差 | 0.75 |
|------------------|--------|-------|---------|------|
| 0.5 \geq | 4 | 1.7% | 平均値 | 1.58 |
| 0.5 < \leq 1.0 | 31 | 12.9% | 標本数 (個) | 240 |
| 1.0 < \leq 1.3 | 71 | 29.6% | 最大 | 5.8 |
| 1.3 < \leq 1.5 | 30 | 12.5% | 最小 | 0.0 |
| 1.5 < | 104 | 43.3% | 最頻値 | 1.12 |

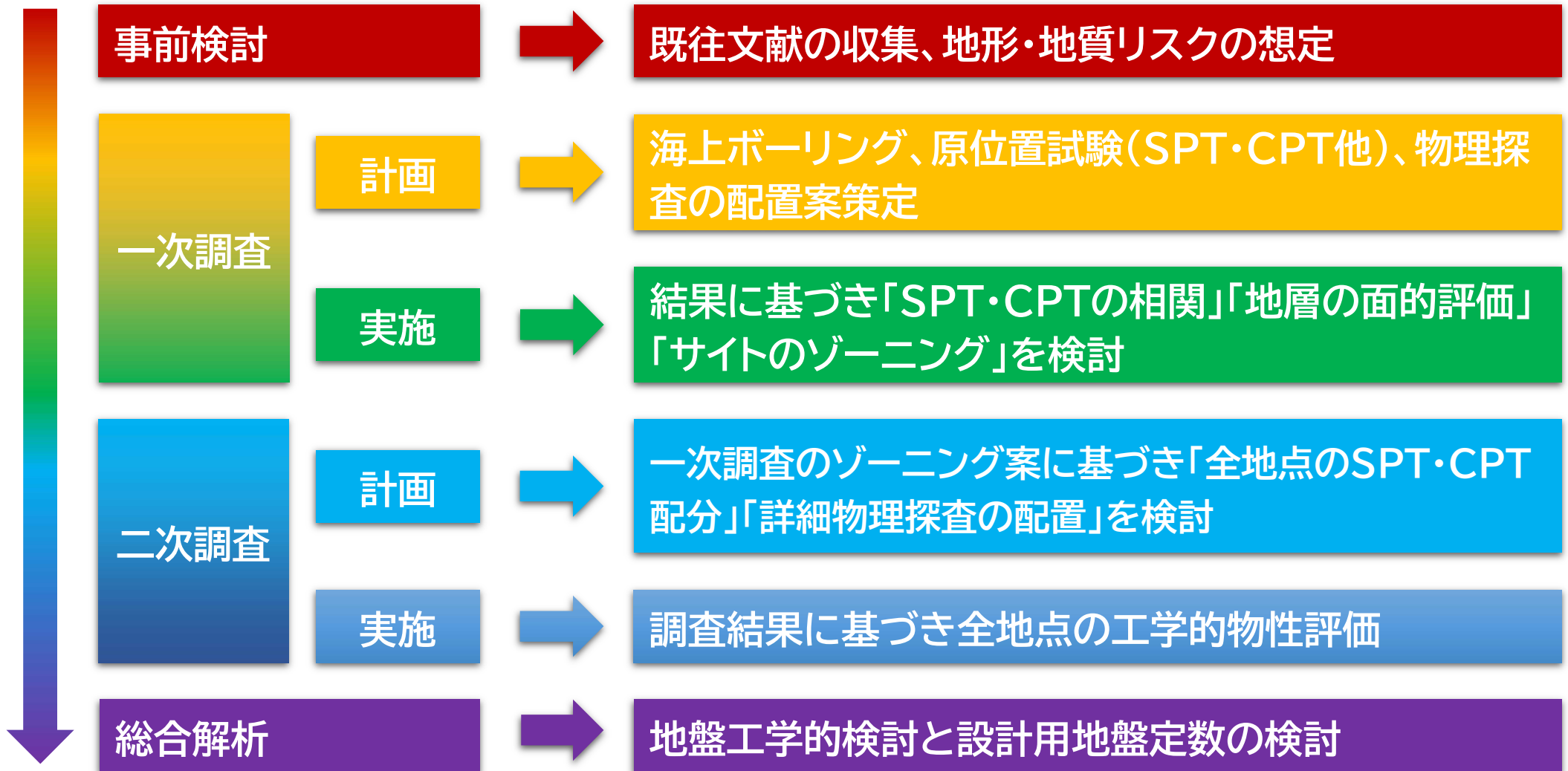
全体工程の考え方



■ 計画



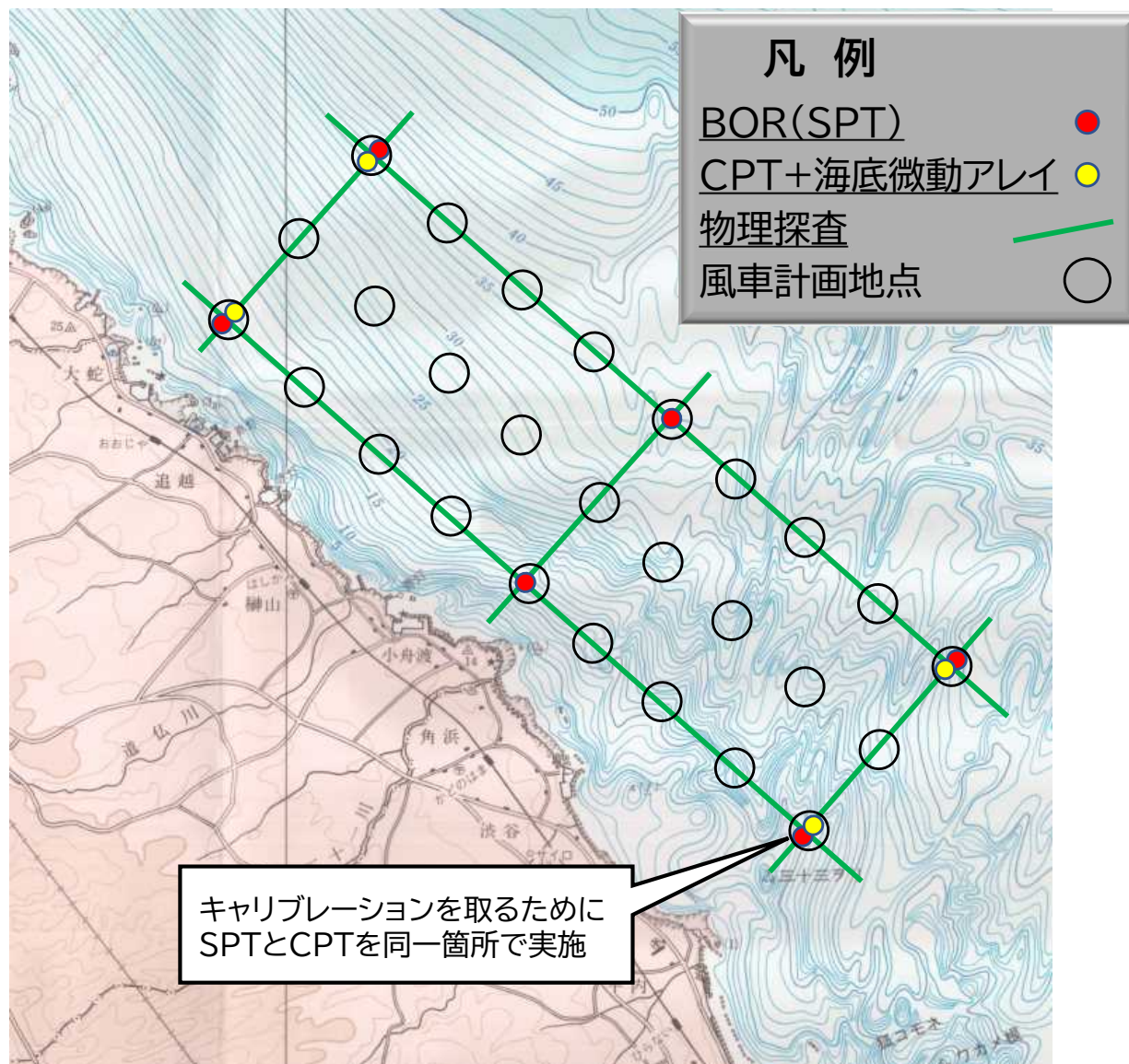
- 一次(概略)調査から二次(詳細)調査へ
キーワードは『ゾーニング』にあり



■ 計画：一次調査のイメージ



一次調査の平面配置の例 ⇒ 概略調査を行った後サイトのゾーニングを実施



<計画>

配置案

- ・海上ボーリング
- ・原位置試験(SPT・CPT他)
- ・物理探査



一次調査の実施



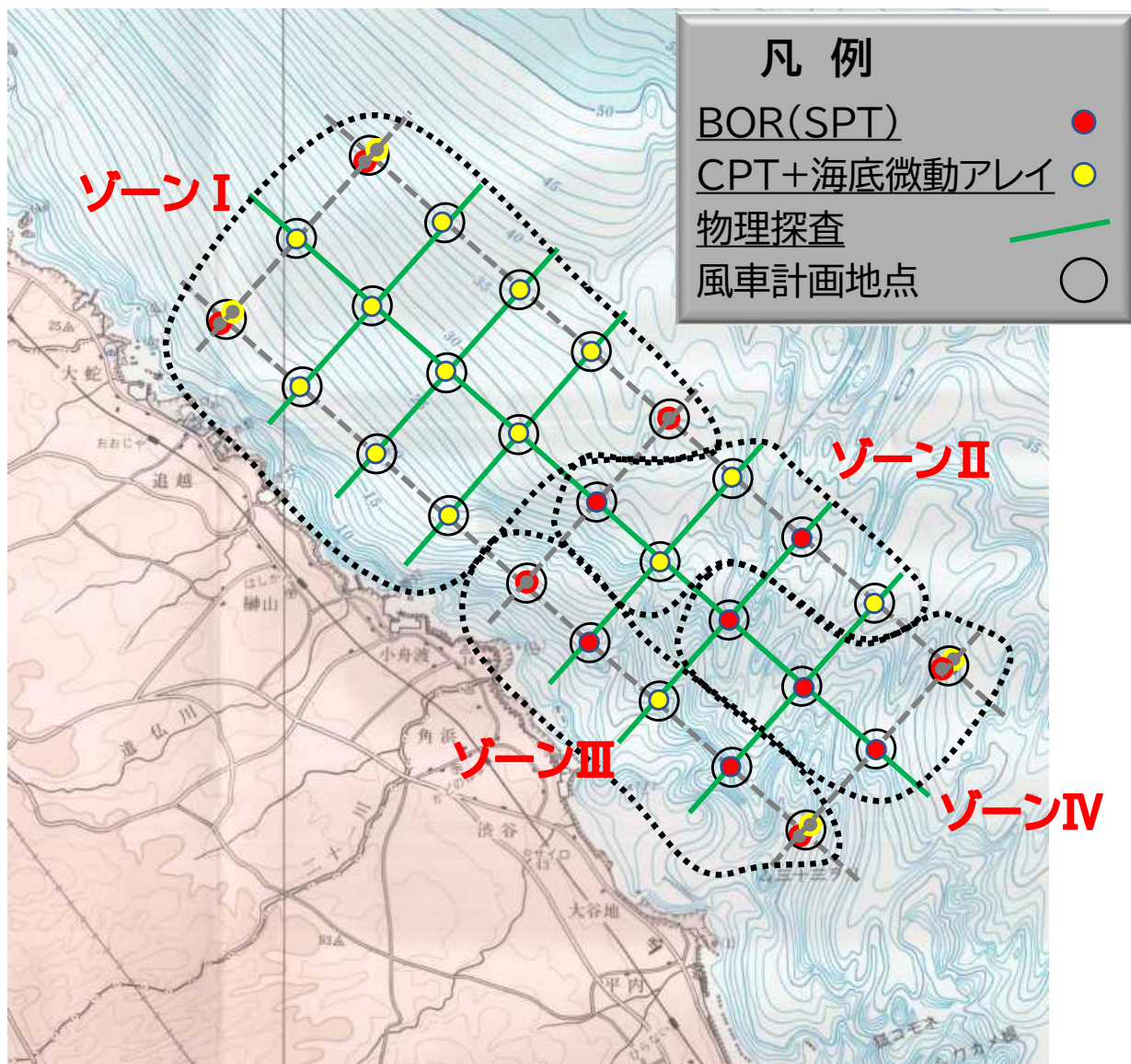
<検討>

- ・SPT・CPTの相関
- ・地層の面的評価
- ・サイトのゾーニング

■ 計画：二次調査のイメージ



二次調査の平面配置の例 ⇒ ゾーニング結果に基づくメリハリのある調査案



<計画>

ゾーニングに基づく配置案

- ・全地点のSPT・CPT配分
- ・物理探査の配置

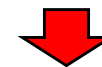


二次調査の実施



<検討>

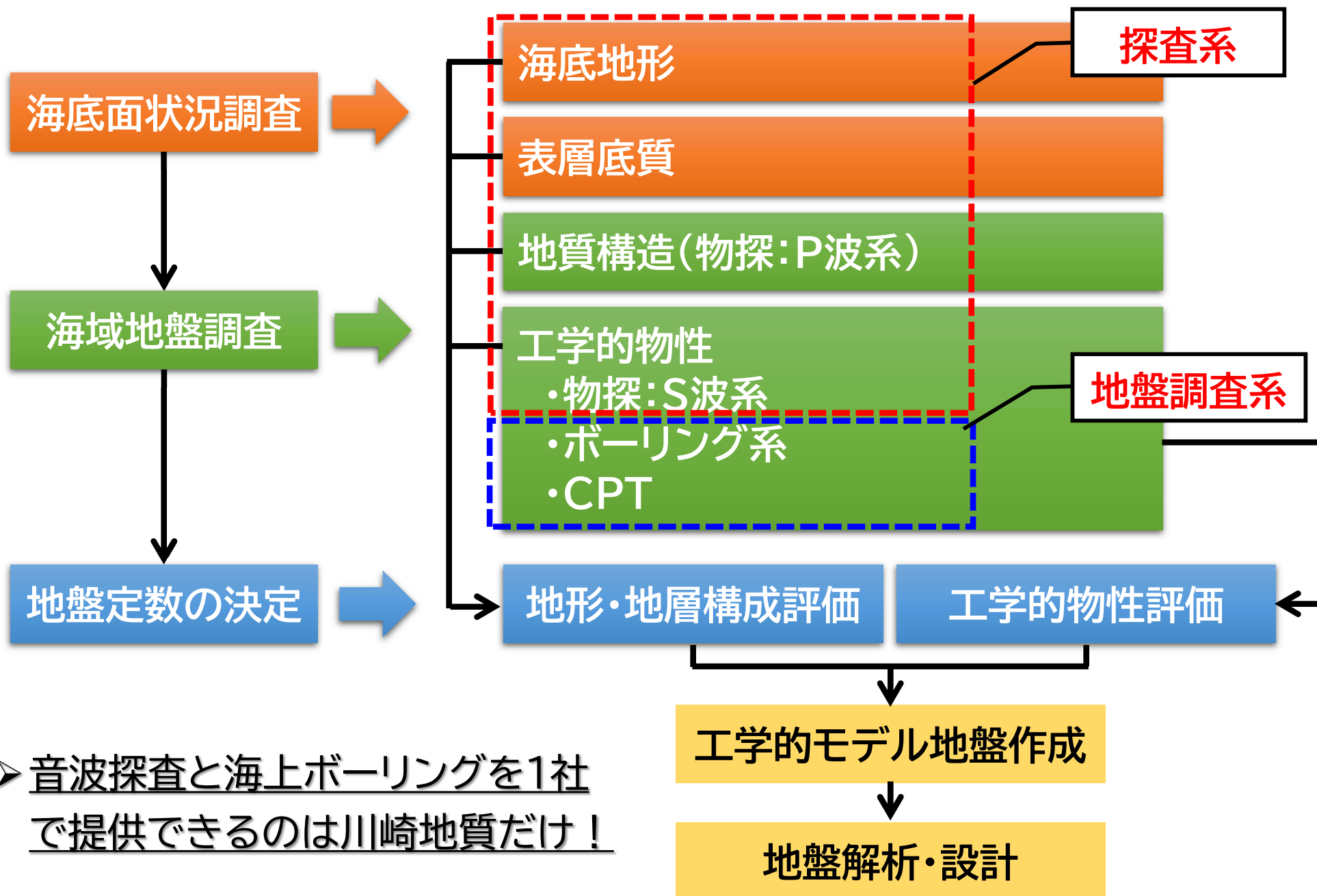
- ・全地点の工学的物性評価



<総合解析>

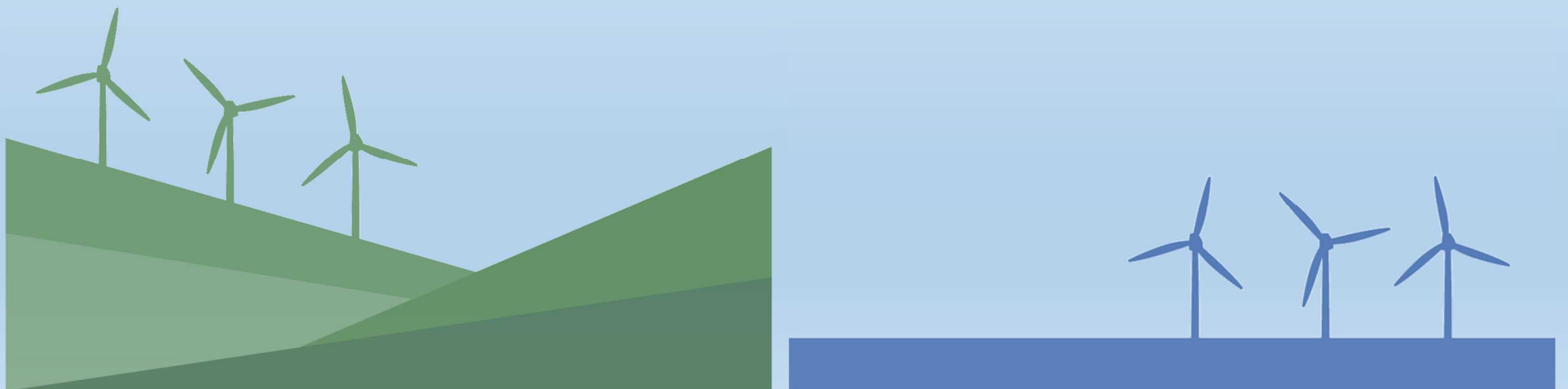
- ・地盤工学的検討
- ・設計用地盤定数の検討

■ 調査全体の流れ



➤ 音波探査と海上ボーリングを1社で提供できるのは川崎地質だけ!

安全衛生



■ 洋上の地質調査で特に留意すべき点



➤ 洋上の調査の特徴

- ✓ 炎天下の作業 ⇒ 熱中症
- ✓ 海上作業 ⇒ 落水による溺水・低体温症
- ✓ 乗り移り作業 ⇒ 船との挟まれによる負傷
- ✓ 救助隊が来るまで時間がかかる ⇒ 応急処置の必要性
- ✓ 通常のボーリング作業における安全管理も必要

➤ 川崎地質の職員はGWOのトレーニング受講済み

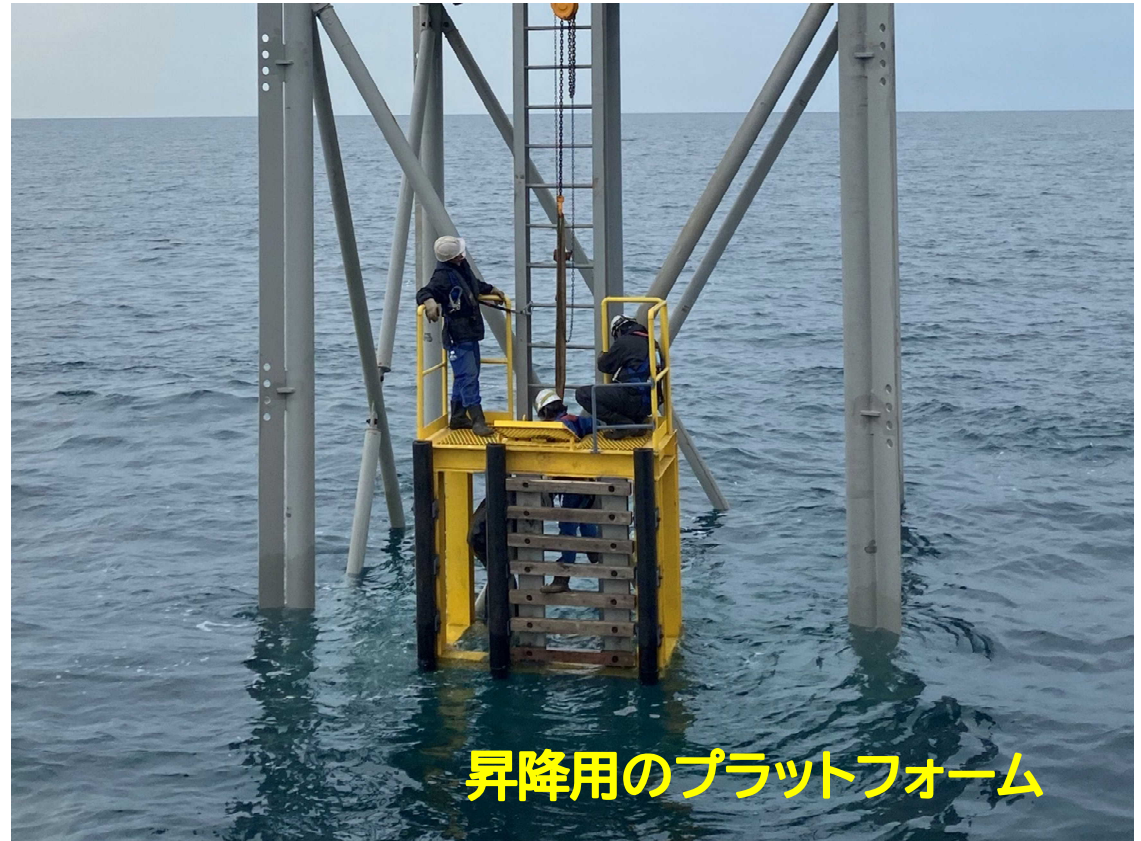
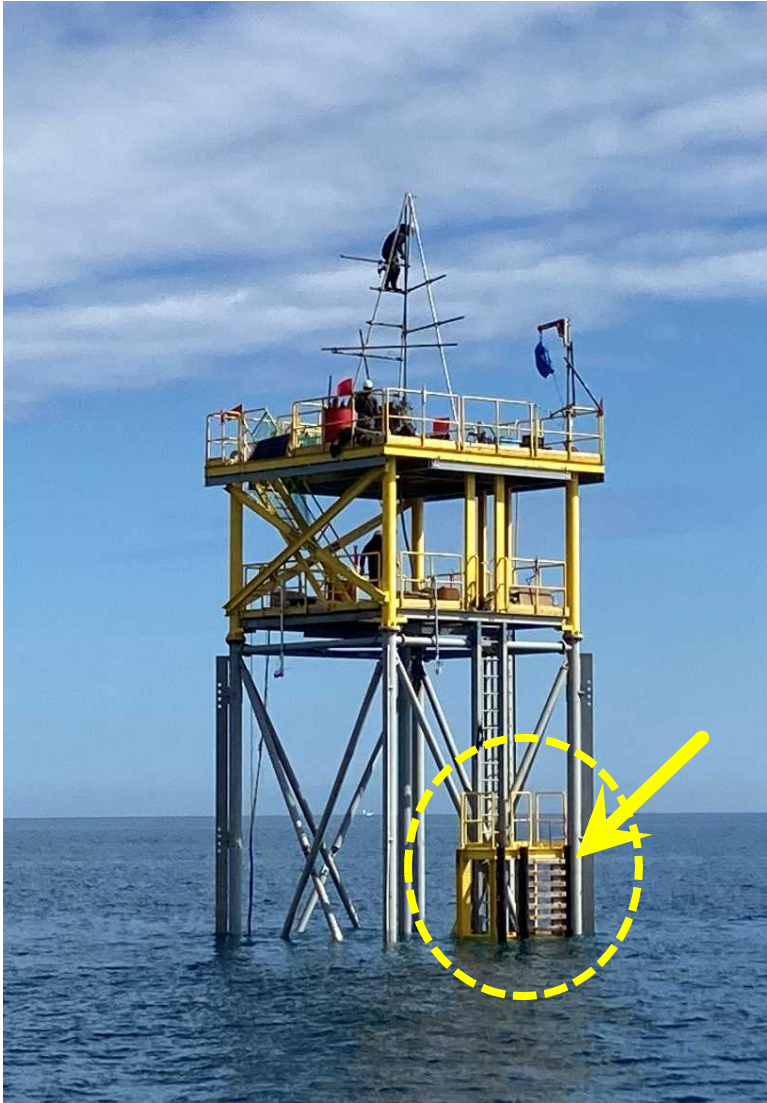
| コード | コース名 | 内容 | 有効期間 |
|--------|-----------|-----------------------|------|
| GWOBST | GWO基本安全訓練 | GWO MANUAL HANDLING | 2年間 |
| | | GWO FIRST AID | 2年間 |
| | | GWO SEA SURVIVAL | 2年間 |
| | | GWO FIRE AWARENESS | 2年間 |
| | | GWO WORKING AT HEIGHT | 2年間 |

■改善を続けています

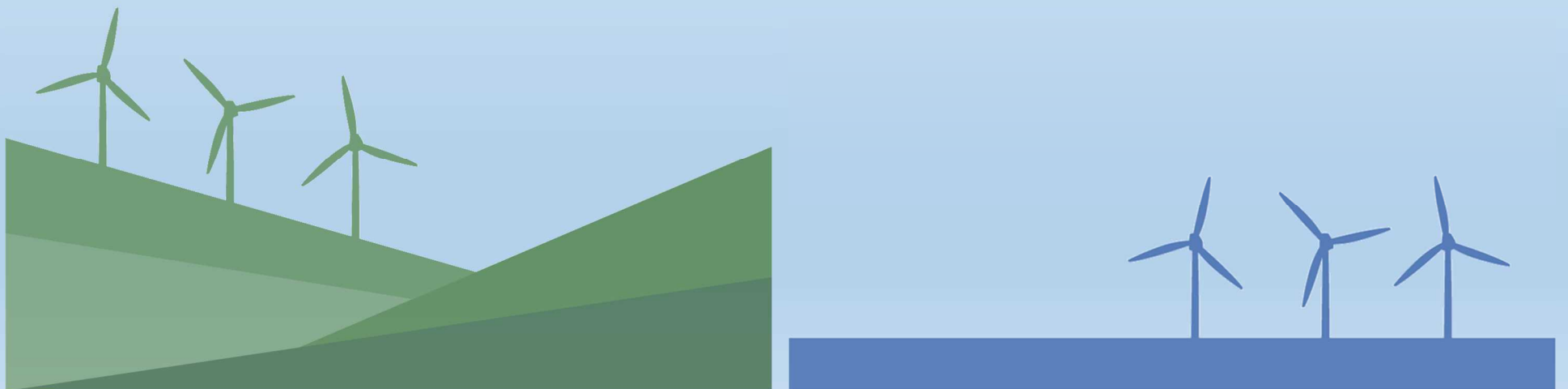


➤ プラットフォームの設置

たとえば鋼製櫓へのアクセス手段を改良



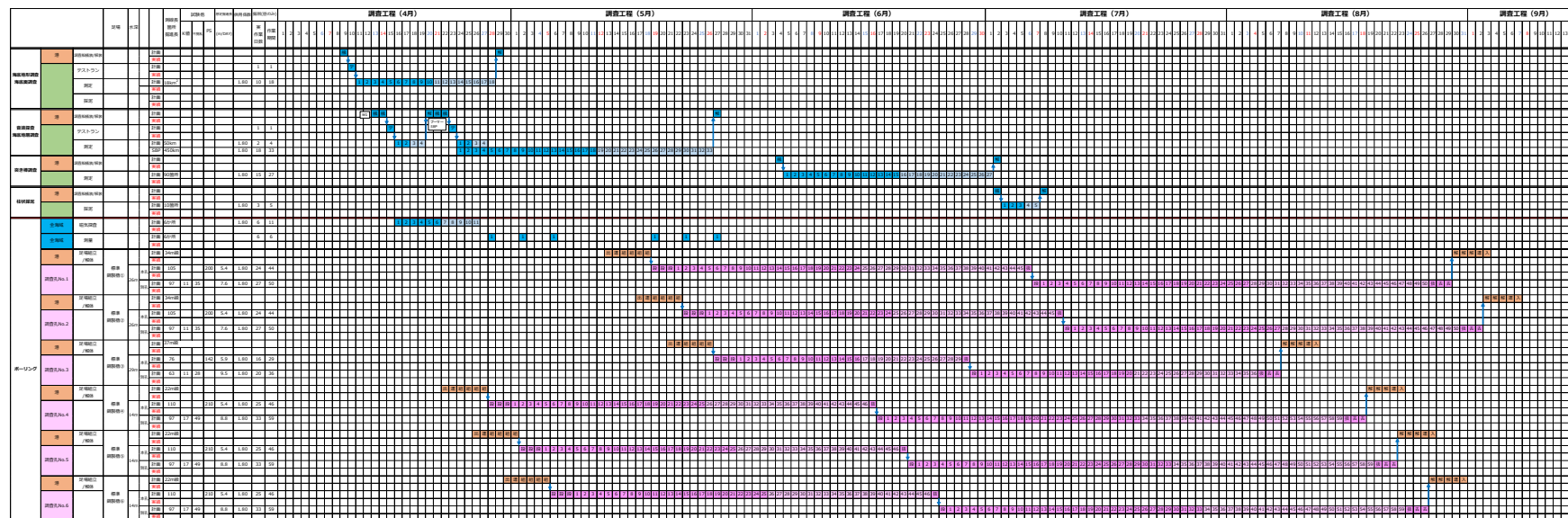
工程計画策定



■ 工程計画策定の要素



➤ 計画工程表の例



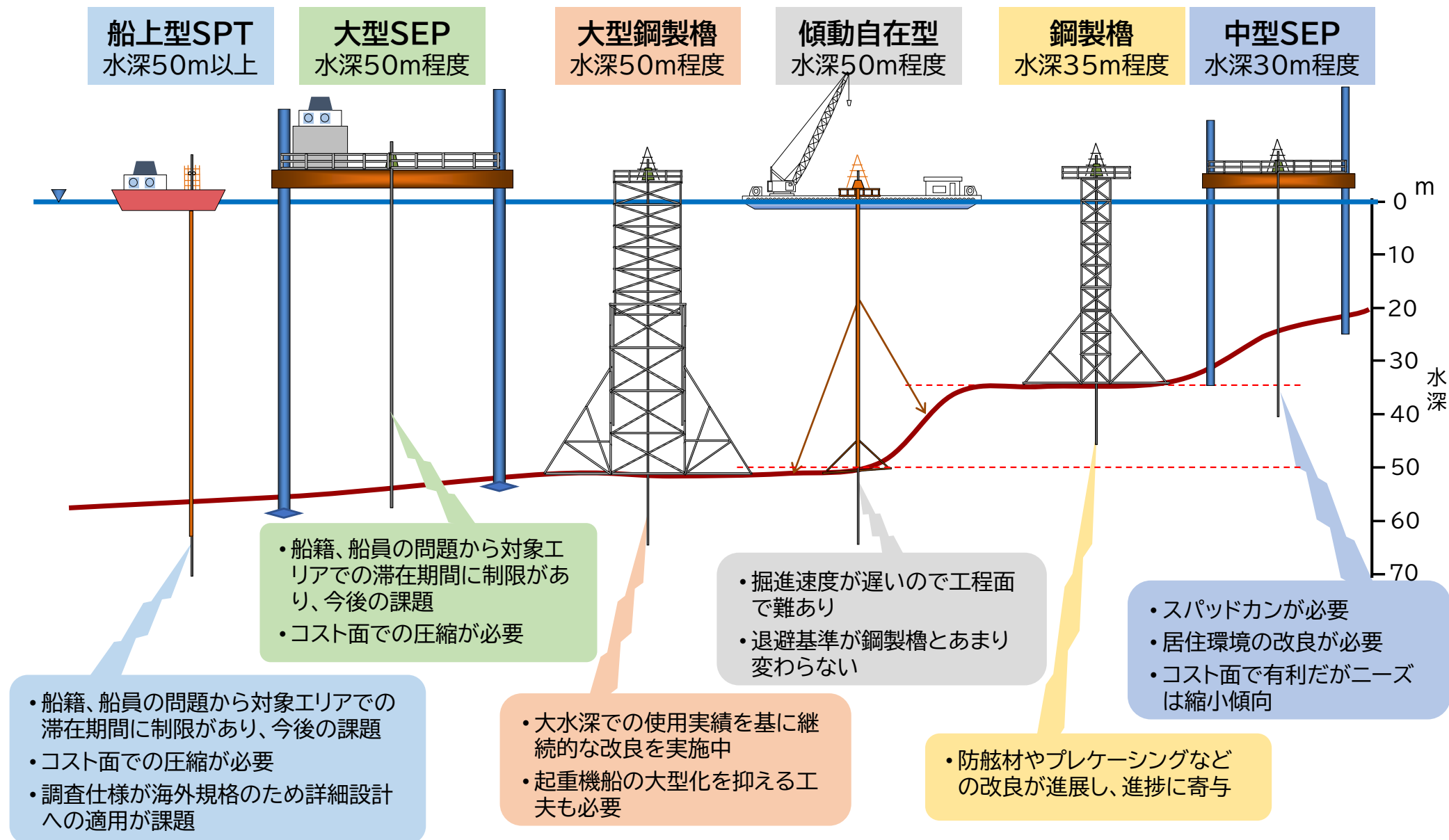
➤ 工程計画策定の要素

- ✓ 海上ボーリング → 作業足場の選定
- ✓ 海底地形調査、音波探査 → 調査機器の選定
- ✓ 共通 → 供用係数

■ 海上ボーリング：作業足場の選定



➤ 水深と海上ボーリングの作業足場



■海上ボーリング：作業足場の選定

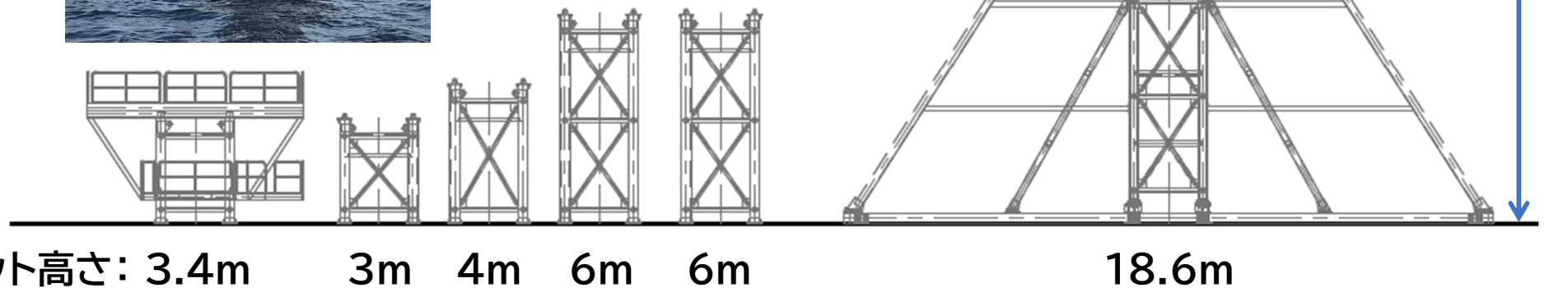


➤ 標準型鋼製櫓

- ✓ ユニットを組み合わせることで水深22mから41mまで対応
- ✓ 櫓の高さは水深+7m程度に設定する



約7m



■ 海底地形調査・音波探査：調査機器の選定



➤ 海底地形調査、海底面状況調査、音波探査等

✓ 調査内容(機器)によって作業に必要な調査船の大きさが異なる

コスト

安

漁船または小型作業船

- ・海底地形・海底面調査
- ・ブーマー音波探査
- ・スパーカー音波探査
- ・海底微動アレイ探査



漁船(5~9t程度)



小型作業船(20t未満)

小型作業船または台船+曳船

- ・ウォーターガン音波探査



台船+曳船

高

台船+曳船またはタグボート

- ・エアガン音波探査



タグボート(200t級)

■ 共通：供用係数



➤ 国土交通省港湾局の供用係数を使う場合

国土交通省港湾局 監修
「港湾土木請負工事積算基準」を用いる場合

$$\begin{aligned} \text{供用係数} &= \text{供用日数} / \text{運転日数} \\ &= (\text{運転日数} + \text{待機日数}) / \text{運転日数} \end{aligned}$$

(参考:稼働率 = 運転日数 / 供用日数 = 1 / 供用係数)

| 海域区分 | 海域境界 | 係数の適用期間 |
|-------------|--------------|------------|
| ①オホーツク海沿岸 | 根室半島～宗谷岬 | 5月～10月の6ヶ月 |
| ②日本海沿岸 | 宗谷岬～対馬韓岬・波戸岬 | 5月～10月の6ヶ月 |
| ③太平洋沿岸(北海道) | 根室半島～汐首岬 | 5月～11月の7ヶ月 |

※太平洋沿岸(北海道以外)は適用期間なし ⇒ 夏も冬も変わらない(悪い)

別表—3 全国主要港湾の供用係数

| 係数 ランク | 船舶 供用係数 (α) | 換算年間 荒天日数 | 摘要港湾の明細 |
|-----------|-------------------|--------------|---|
| | | | 東北地方 整備局管内 |
| 1 | 1.65 | 24日以下 | 青森港 仙台塩釜港 (塩釜地区) |
| 2 | 1.80 | 25～72日以下 | 宮古港 |
| 3 | 2.05 | 73～120日 | 大船渡港 |
| 4 | 2.25 | 121～144日以下 | 深浦港 能代港 秋田港 酒田港 仙台塩釜港 (仙台湾区) (石巻港区) |
| 5 | 2.45 | 145～168日以下 | 釜石港 |
| 6 | 2.65 | 169～192日以下 | 相馬港 |
| 7 | 2.90 | 193～216日以下 | 小名浜港 |
| 8 | 3.20 | 217～240日以下 | むつ小川原港 八戸港 久慈港 |
| 9 | 3.70 | 241～264日以下 | |

■ 共通：供用係数



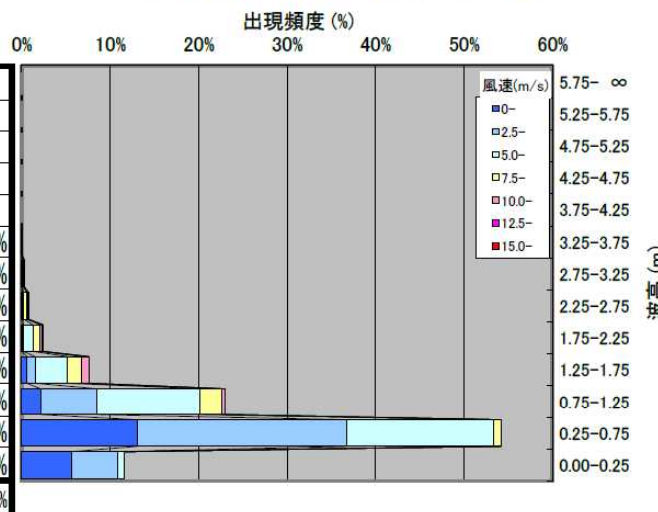
➤ 気象・海象のデータベースを使う場合

| | | |
|---------------|-----------------|-------------|
| 海域: [八峰能代沖海域] | 平均波高 0.71 [m] | 待機率 = 34.2% |
| 期間: 6月 | 平均風速 4.29 [m/s] | 稼働率 = 65.8% |

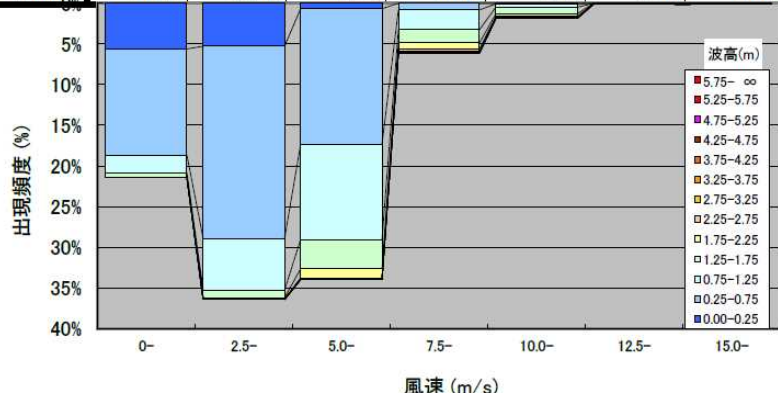
波高一風速 相関出現頻度 一覧表

| 波高 [m] | 風速 [m/s] | | | | | | TOTAL |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | 0- | 2.5- | 5.0- | 7.5- | 10.0- | 12.5- | |
| 5.75-∞ | | | | | | | |
| 5.25-5.75 | | | | | | | |
| 4.75-5.25 | | | | | | | |
| 4.25-4.75 | | | | | | | |
| 3.75-4.25 | | | | | | | |
| 3.25-3.75 | | | 0.0% | 0.0% | 0.0% | | 0.1% |
| 2.75-3.25 | | | 0.0% | 0.2% | 0.1% | 0.0% | 0.3% |
| 2.25-2.75 | 0.0% | 0.0% | 0.2% | 0.3% | 0.1% | 0.0% | 0.7% |
| 1.75-2.25 | 0.0% | 0.2% | 1.1% | 0.8% | 0.3% | 0.1% | 2.4% |
| 1.25-1.75 | 0.6% | 0.9% | 3.6% | 1.6% | 0.9% | 0.0% | 7.6% |
| 0.75-1.25 | 2.1% | 6.3% | 11.7% | 2.4% | 0.4% | 0.0% | 23.0% |
| 0.25-0.75 | 13.1% | 23.6% | 16.6% | 0.8% | 0.1% | 0.0% | 54.3% |
| 0.00-0.25 | 5.6% | 5.3% | 0.7% | | | | 11.6% |
| TOTAL | 21.4% | 36.4% | 33.9% | 6.1% | 1.9% | 0.1% | 100.0% |

“波高”出現 頻度グラフ (風速別 色分け表示)



使用データ
Lon-Lat/period
16-40/jun



“風速”出現 頻度グラフ (波高別 色分け表示)

— = 作業基準範囲※

※波高0.75m未満かつ風速10.0m未満の場合

待機率 = 34.2% : 稼働率 = 65.8%

⇒ 供用係数 1.52

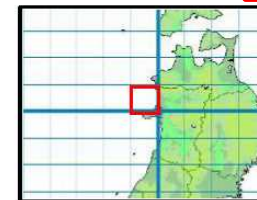
対象範囲:

Lon. = 40.0 ~ 40.5° N

Lat. = 139.5 ~ 140.0° E

対象時期:

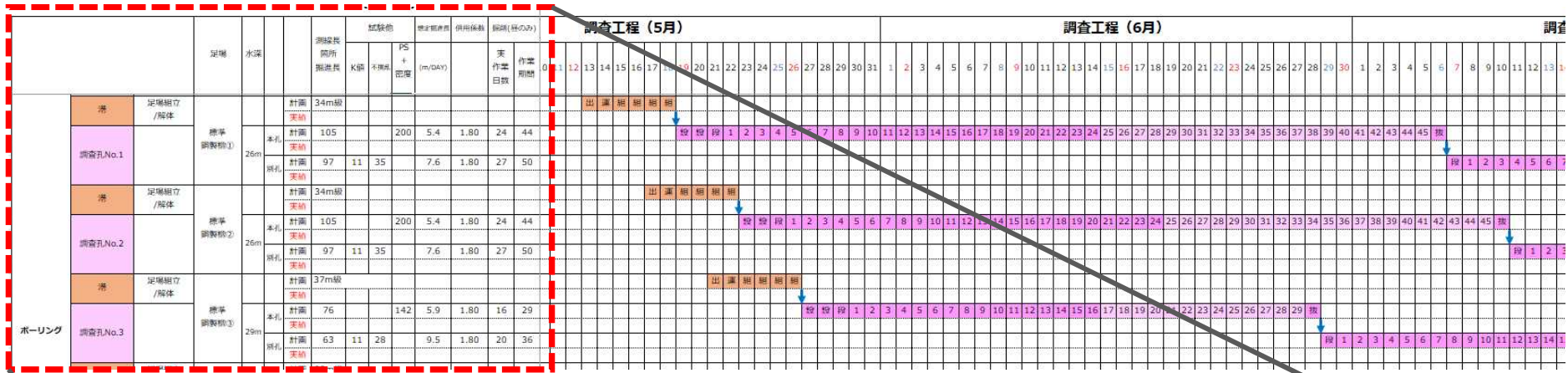
6月



データ出典: 日本近海の波と風のデータベース 詳細版 [(独)海上技術安全研究所]

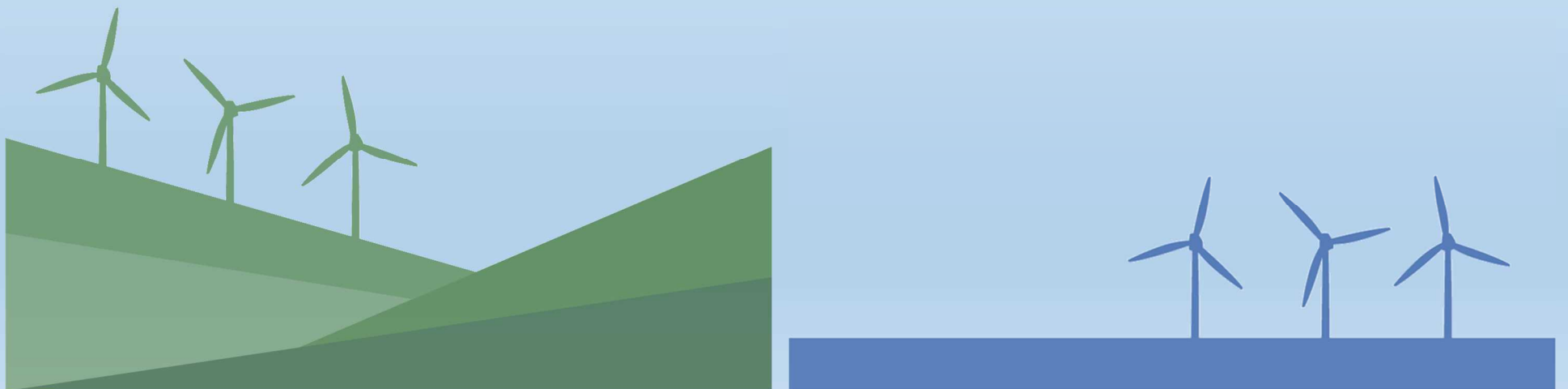
http://www.nmri.go.jp/oldpages/wjapan/namikaze_main.h

■ 工程表の作成



| 足場 | 水深 | 測線長 箇所 掘進長 | 試験他 | | | 想定掘進量 (m/DAY) | 供用係数 | 掘削(昼のみ) | | 0 | |
|---------|-------------|------------------|------|-----|---------------|------------------|------|---------------|----------|----|----|
| | | | K値 | 不攪乱 | PS + 密度 | | | 実 作業 日数 | 作業 期間 | | |
| 港 | 足場組立 /解体 | 計画 | 34m級 | | | | | | | | |
| | | 実績 | | | | | | | | | |
| 調査孔No.1 | 標準 鋼製櫓① | 26m | 本孔 | 計画 | 105 | | 200 | 5.4 | 1.80 | 24 | 44 |
| | | | 実績 | | | | | | | | |
| | 別孔 | 計画 | 97 | 11 | 35 | | 7.6 | 1.80 | 27 | 50 | |
| | | 実績 | | | | | | | | | |
| 港 | 足場組立 /解体 | 計画 | 34m級 | | | | | | | | |
| | | 実績 | | | | | | | | | |
| 調査孔No.2 | 標準 鋼製櫓② | 26m | 本孔 | 計画 | 105 | | 200 | 5.4 | 1.80 | 24 | 44 |
| | | | 実績 | | | | | | | | |
| | 別孔 | 計画 | 97 | 11 | 35 | | 7.6 | 1.80 | 27 | 50 | |
| | | 実績 | | | | | | | | | |
| 港 | 足場組立 /解体 | 計画 | 37m級 | | | | | | | | |
| | | 実績 | | | | | | | | | |
| 調査孔No.3 | 標準 鋼製櫓③ | 29m | 本孔 | 計画 | 76 | | 142 | 5.9 | 1.80 | 16 | 29 |
| | | | 実績 | | | | | | | | |
| 別孔 | 計画 | 63 | 11 | 28 | | 9.5 | 1.80 | 20 | 36 | | |
| | 実績 | | | | | | | | | | |

見積



■見積



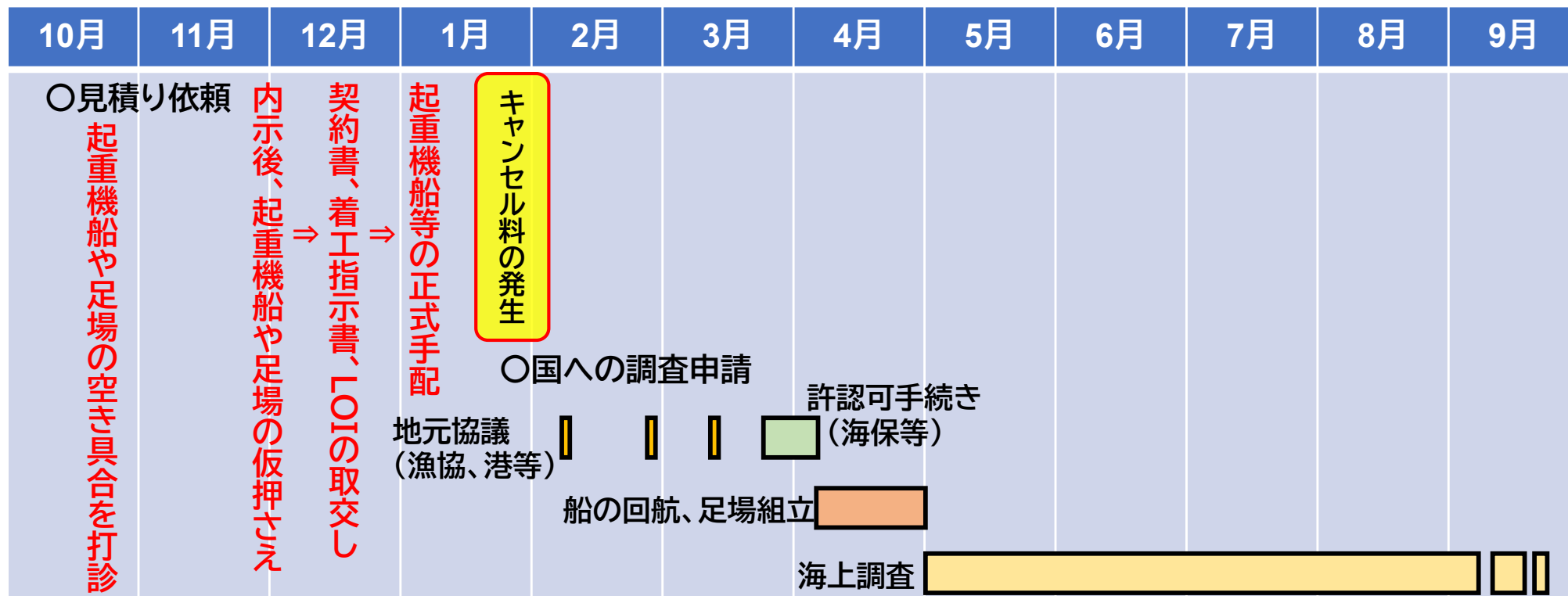
➤ 洋上風力調査の現状

海上作業の適期は限られるため、調査が集中(特に日本海側)

↳ 起重機船や鋼製檣の数、人員は限られる

↳ 早くご契約いただいた事業者様ほど好条件となる

➤ タイムスケジュールのイメージ



➤ 見積条件

✓ ランプサムか出来高精算か

ランプサム: 備船費や供用係数を大きめに設定せざるを得ないため、割高となる。

出来高精算: 事業費が読めない。

✓ 船舶は施主様支給か

起重機船、大型SEP、CPT船、監視船、交通船、調査船他

✓ 着手金、中間金の有無

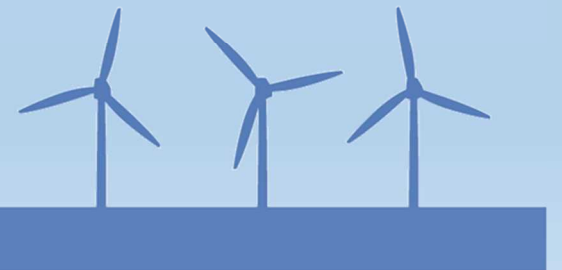
全地点調査では調査費用が数十億円規模となる。

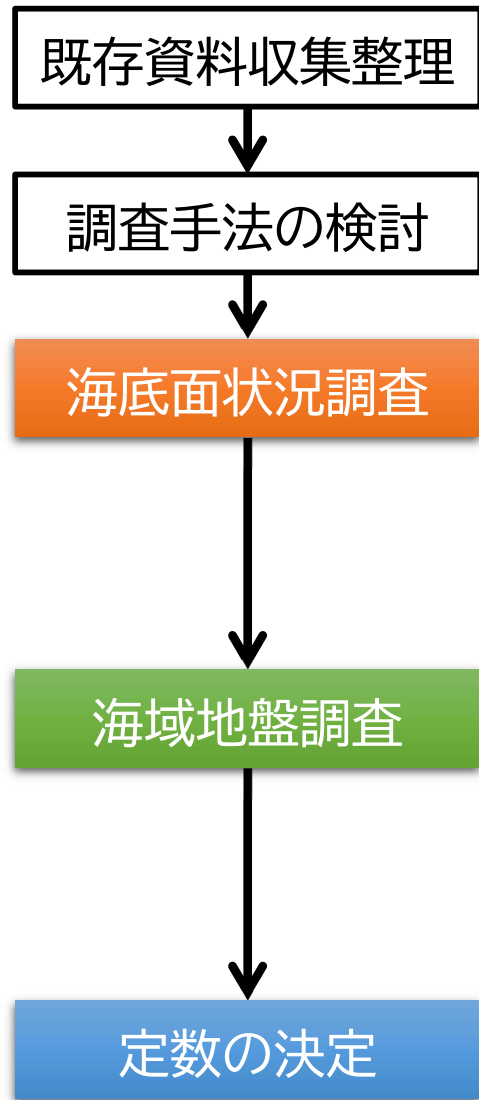
弊社規模では業務完了後一括払いでは負担が大きい。

✓ キャンセル料

海域の物理探査

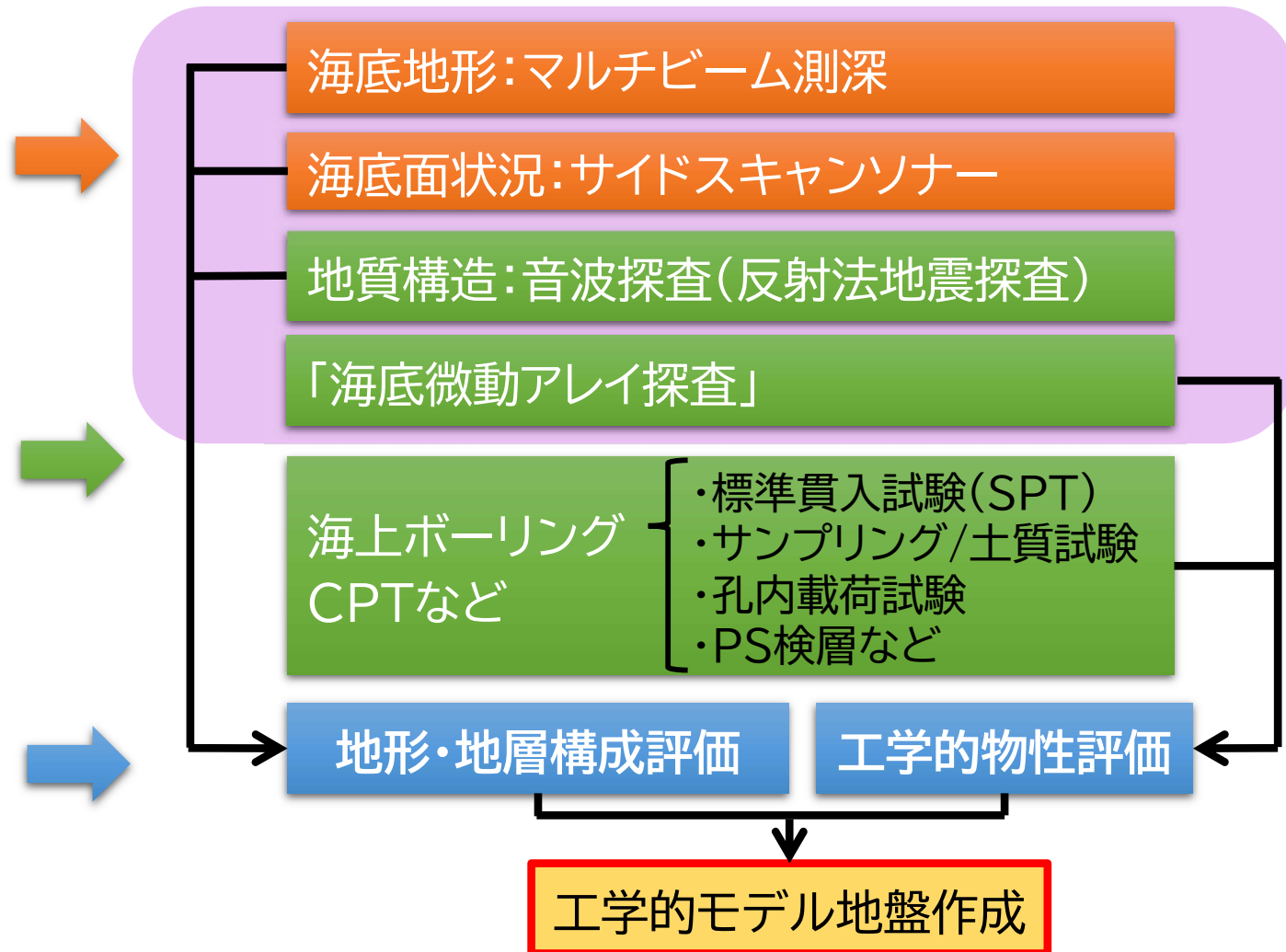
- 海底地形調査
- 海底面状況調査
- 音波探査
データ処理、音波探査記録の解釈など
- 海底微動アレイ探査





様々な調査手法の組合せにより、海底の状況・地質構造の評価に留まらず、工学的地盤モデルの作成に寄与する。

「海底微動アレイ探査」で得られるS波構造は、海上ボーリングでのPS検層結果やサンプリング試料による力学試験結果を面的に補完する技術として活用が期待されている。



海域の物理探査

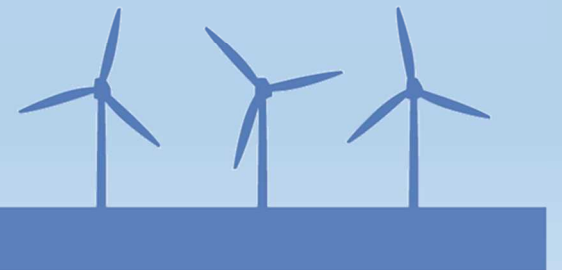
- **海底地形調査**

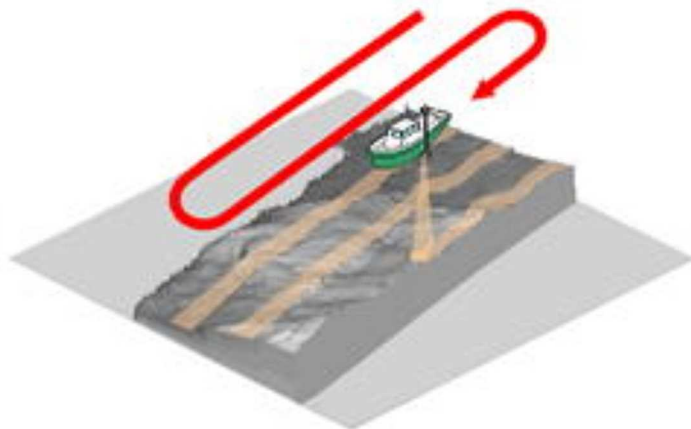
- **海底面状況調査**

- **音波探査**

データ処理、音波探査記録の解釈など

- **海底微動アレイ探査**





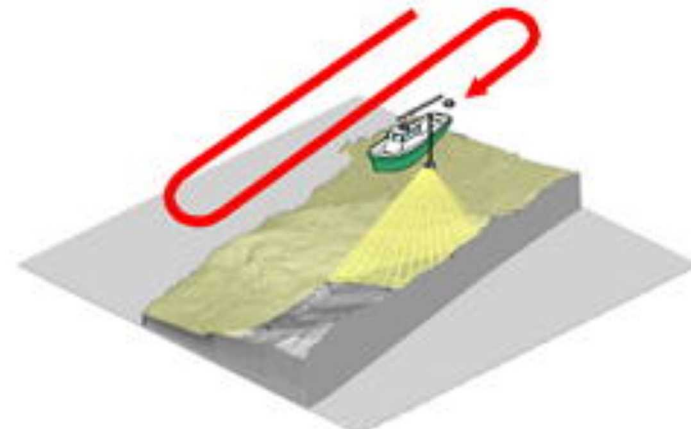
シングルビーム測深

- 送受波機から直下に音響ビームを照射して、直下の水深を測定する。
- 設定した測線の水深値から未測域を推定して海底地形図とする。
- 概略の海底地形を把握するのに適する。

○： 機器は小型で簡便

△： 水深値は線としての情報となる

×： 未測域は推定となる



マルチビーム測深

- 送受波機から下方へ扇状に指向角の小さな音響ビームを多数照射し、幅広く水深を測定する。
- 調査範囲の水深値が面的に得られ、詳細な海底地形を把握するのに適する。

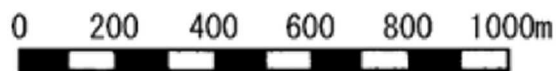
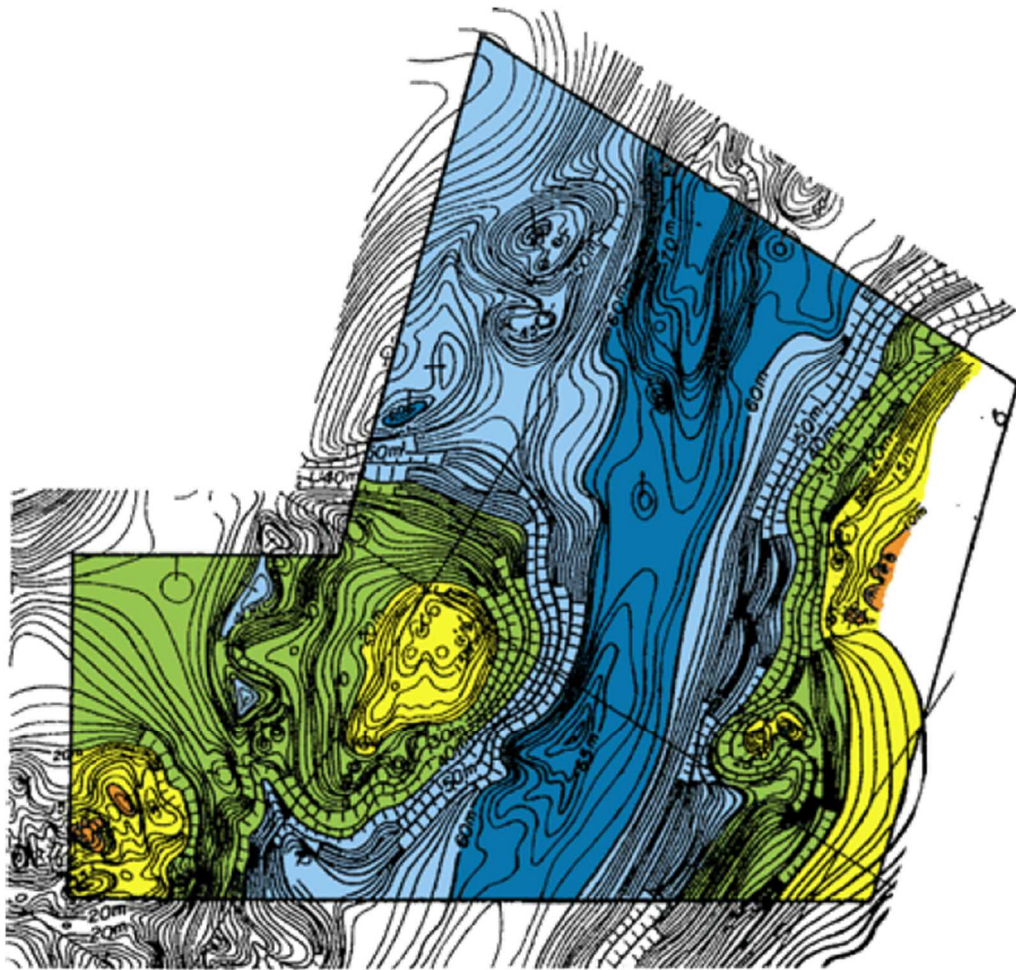
△： 機器は各種センサーの組み合わせが必要

○： 水深値は面的に得られる

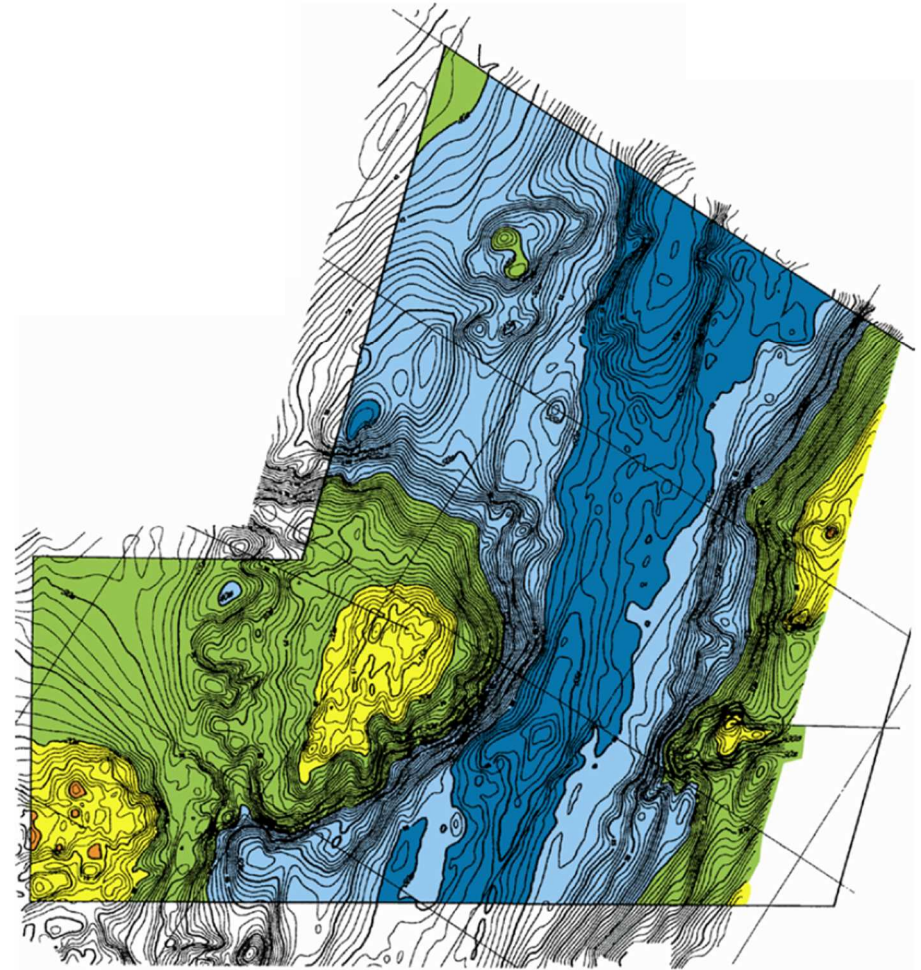
△： 全域の水深値を得るのに時間を要する

△： データ処理に時間を要する

シングルビーム測深の成果



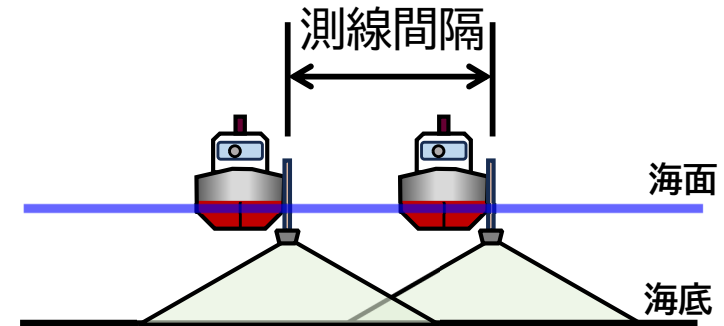
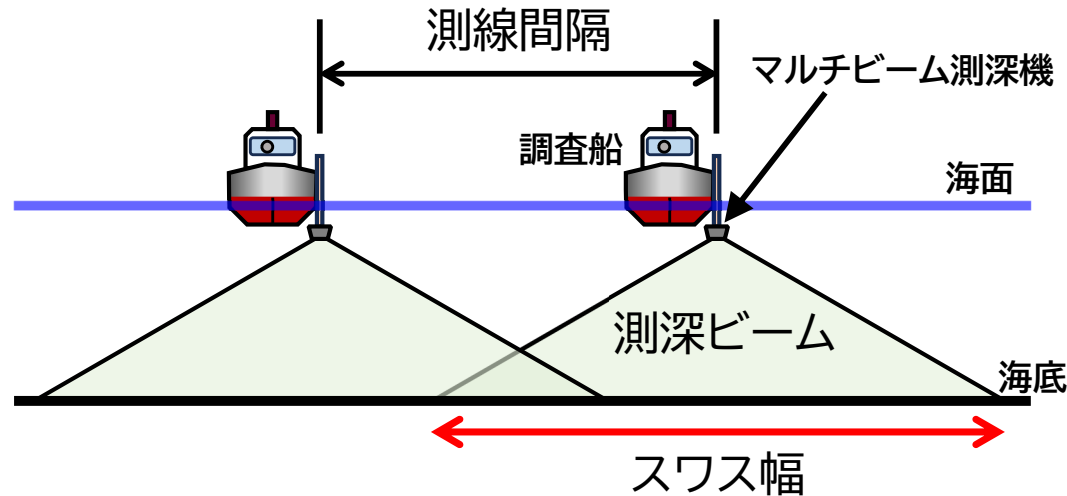
マルチビーム測深の成果



より詳細な海底地形が表現されている

■ 海底地形調査

✓ マルチビーム測深は、水深によって測線間隔(測定データの有効幅)が変わる



水深が浅くなると、スワス幅が狭くなり、測線間隔が狭くなる

⇒ 測定距離(作業日数)が増える

海底地形

- ◆ 砂・泥が広く平坦に分布する範囲では、シングルビーム測深とサイドスキャンソナーの併用を基本とする。
- ◆ 岩礁など複雑な地形が分布するエリアなどでは、マルチビーム測深による面的把握が必要と考えられる一方、費用が高額となることを踏まえ実施の有無を検討する。実施の場合には、測深範囲および測線間隔(スワス角)の設定などを検討し、効率的な方法で実施する。

※各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ(抜粋)
(2022年6月 新エネルギー・産業技術総合開発機構)t

水深が深くなると、スワス幅は広がるが、測深ビームの斜距離が長くなってデータ品質が低下する。

⇒ 測深データの有効幅が狭くなる

⇒ 作業効率が下がる

海域の物理探査

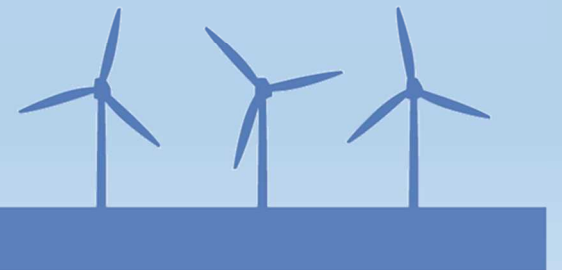
- 海底地形調査

- 海底面状況調査

- 音波探査

データ処理、音波探査記録の解釈など

- 海底微動アレイ探査



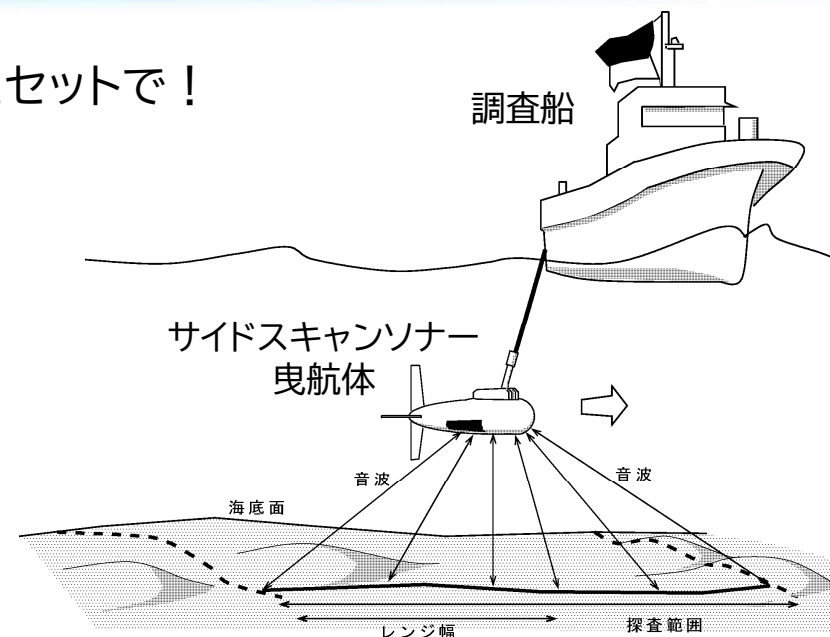
■ 海底面状況調査



サイドスキャンソナー

※底質採取(採泥)とセットで!

- 曳航体から下方へ扇状に音波を発して、海底などの反射強度を測定する。
- 反射強度を濃淡表示にして、**モザイク図**を作成する。
- 海底の構造物や細かな起伏などを読み取って、**海底面状況図**を作成する。



海底構造物の例

- 魚礁
- 沈船
- 異常物(特定できないもの)

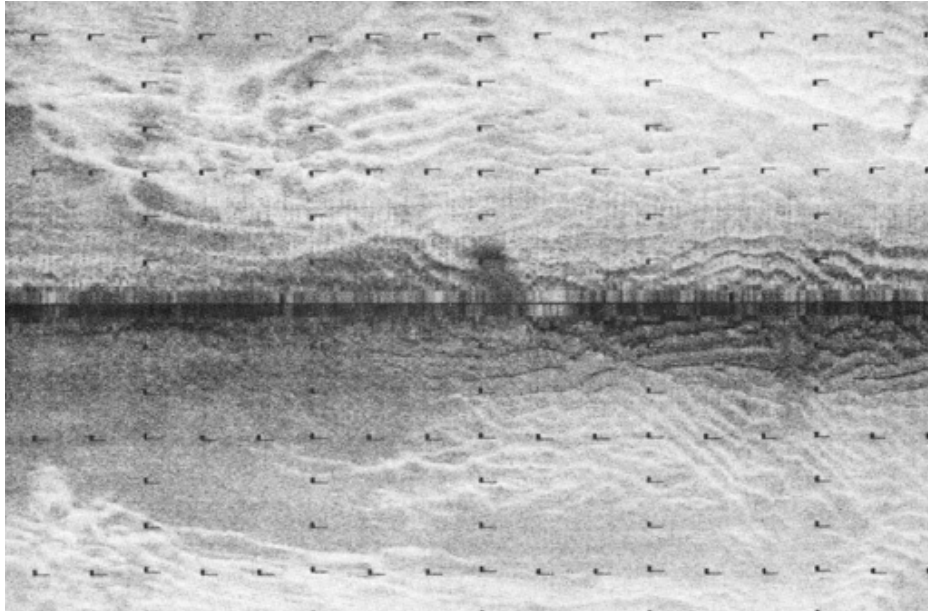
底質に関する情報の例

- 露岩
- サンドウェーブや砂蓮
- 人工改変地形

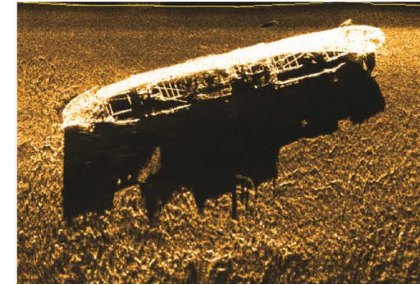


- 風車の計画地点の近辺に障害物はないか?
- 施工時に障害となるものはないか?
- ケーブルルートに障害となるものはないか?

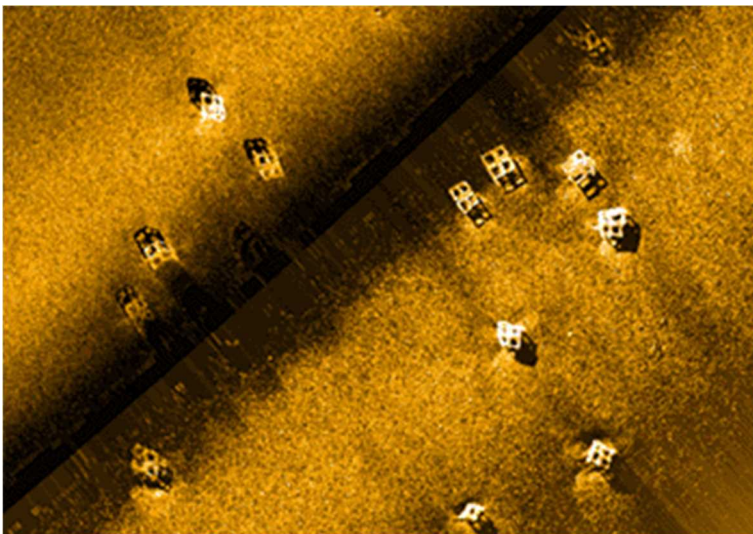
■ 海底面状況調査



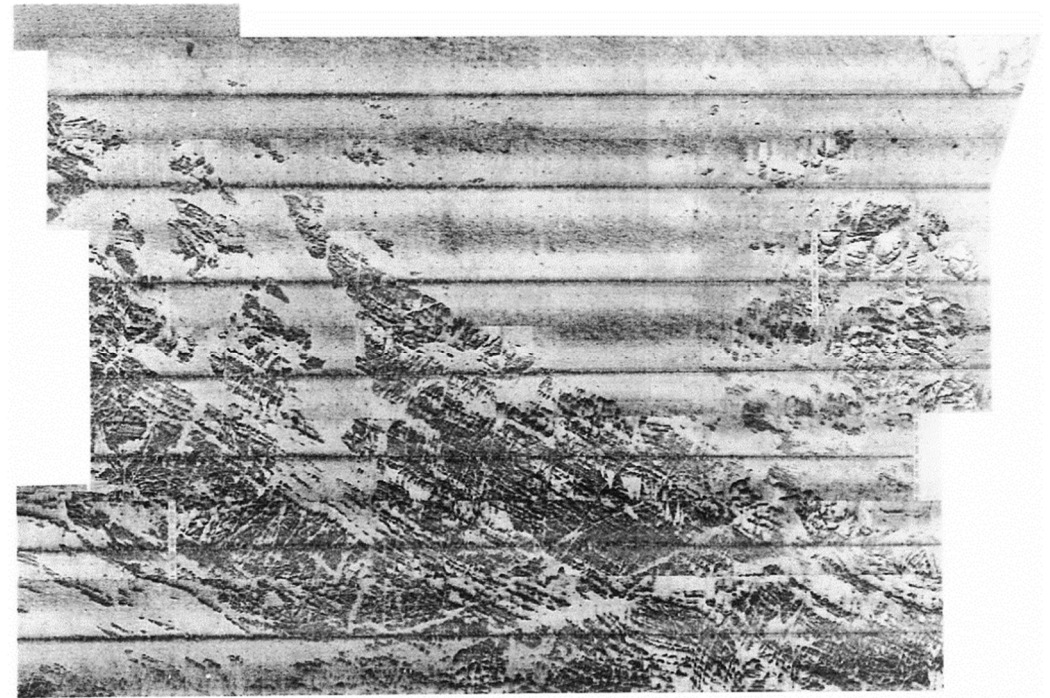
砂蓮が発達した海底状況



沈船



魚礁



露岩状況

海域の物理探査

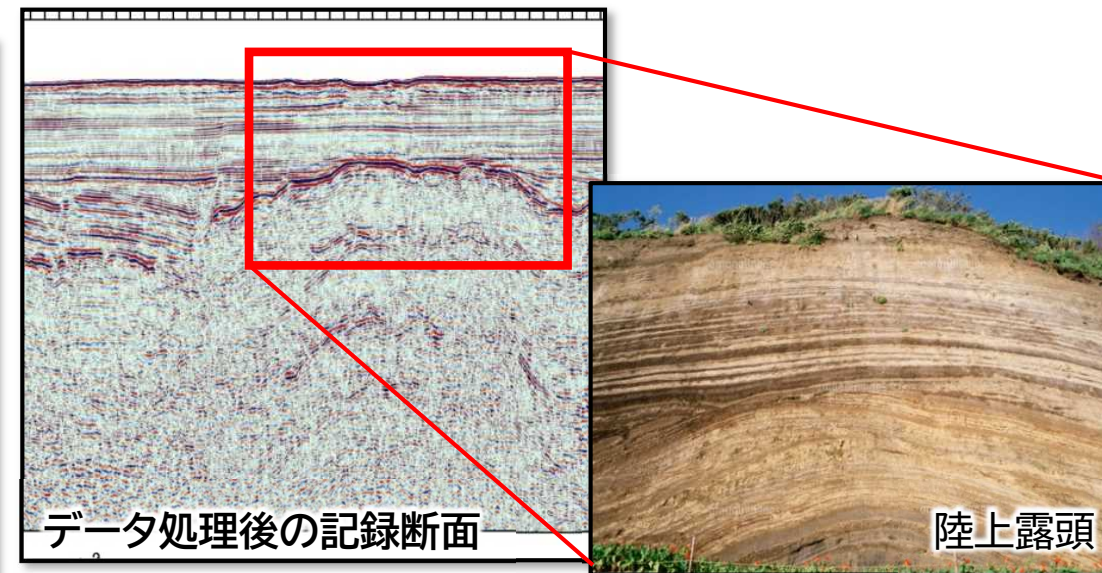
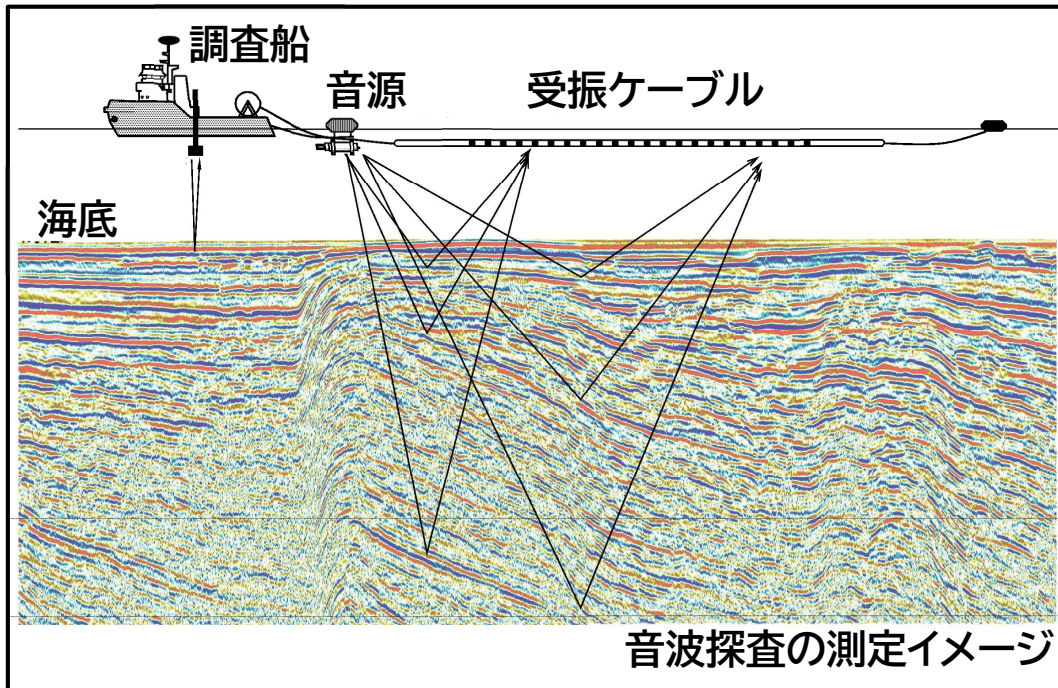
- 海底地形調査
- 海底面状況調査
- 音波探査
データ処理、音波探査記録の解釈など
- 海底微動アレイ探査



■ 音波探査



- ✓ 音波探査とは、**海域の反射法地震探査**のこと
- ✓ 調査船から音源と受振ケーブルを曳航し、測線を低速で航行しながら一定間隔で音波を発生させて、海底や地層境界などからの**反射波を測定**する
- ✓ 得られたデータは、**データ処理を行って記録断面**とし、それを**解析・解釈**して、地層分布や地質構造を明らかにする。

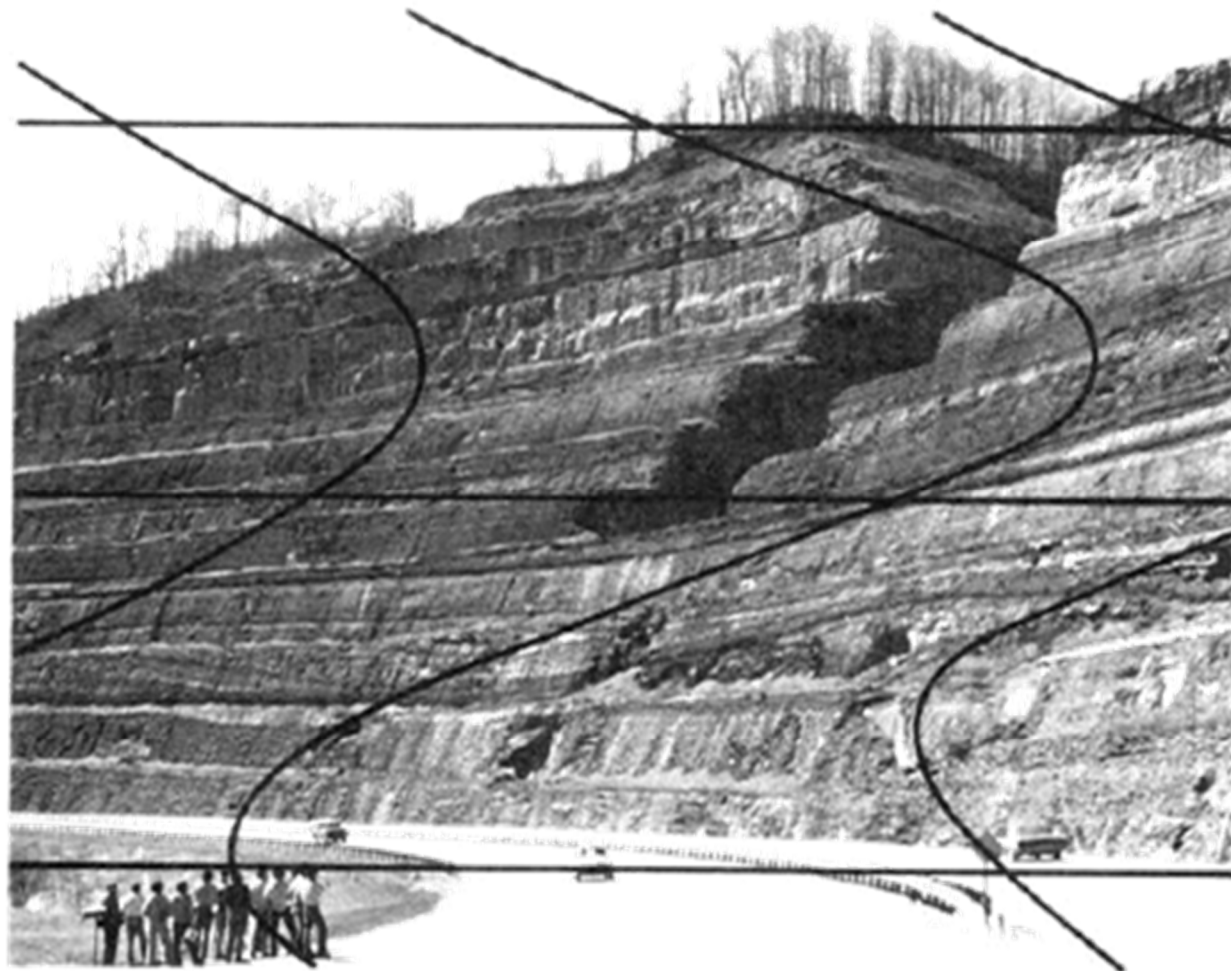


■ 音波探査の垂直分解能



音波探査は、解像度の限界を理解して、調査結果を活用することが重要

例えば、周波数40Hzのエアガンを使用した場合の解像度は、約10mとなる



音波探査で表現される一波の中にも、さらに細かな層相変化がある。
特にボーリング柱状図の対比時には留意が必要である。

■ 音波探査：音源の適応性



| 地質・土質 | | 音源 | 表層探査機 (SBP) | ブーマー (200J) | スパーカー (2000J) | ウォーター ガン | エアガン GIガン |
|-------------------------|-----------|-------|----------------|----------------|------------------|-------------|--------------|
| | | | | | | | |
| 沖積地盤 | 粘性土 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 砂質土 | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 砂礫 | × | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 洪積地盤 | 粘性土 | △ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 砂質土 | × | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 砂礫 | × | △ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 軟 岩 | 堆積岩(半固結) | × | △ | △ | △ | ○ | ◎ |
| | 堆積岩(固結) | × | × | △ | △ | △ | ○ |
| | 火成岩 | × | × | × | × | × | × |
| 硬 岩 | 堆積岩 | × | × | × | × | △ | △ |
| | 火成岩 | × | × | × | × | × | × |
| 探査深度※ | シングルチャンネル | 10m | 30m | 100m | -不適- | -不適- | |
| | マルチチャンネル | - | 50m | 250m | 400m | >750m | |
| 垂 直 分 解 能 | | 0.1m | 0.5-1.0m | 1-2m | 3-5m | >15m | |
| 探査精度の目安 (機器や手法による誤差) | | ±0.3m | ±0.6m | ±1m | ±1.5m | >±2m | |

※探査深度は地盤状況によって大きく変わることがある

■音波探査：マルチチャンネル音波探査



マルチチャンネル音波探査は、配列した受振チャンネル(受振ケーブル)を用いて測定することで、共通反射点重合処理が可能となる。この重合処理によって、深部の微弱な信号を検出・強調することができる。また、海底の“多重反射”や音源や受振チャンネルの無指向性に起因する“回折波”などの偽像を低減、あるいは真の構造に戻すことができる。

《利点》

- ① S/N 比が向上し、品質の高いデータ(記録)が得られる
- ② 多重反射を抑制・除去できるため、深部の反射面の判別が可能となる
- ③ 回折波を抑制・除去できるため、真の反射形状が得られる
- ④ 地層の音波伝播速度を推算できる
- ⑤ その速度を用いて深度を推算することができる

《欠点》

- ① 現場の調査規模が大型化する傾向がある
- ② 受振ケーブルが長くなり、警戒船(監視船)が複数必要となる
- ③ シングルチャンネル音波探査より調査費用が高い

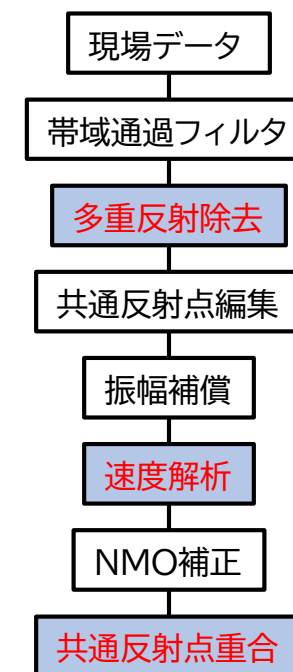
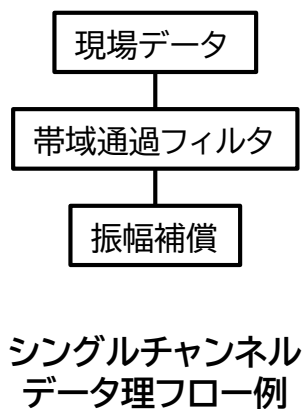
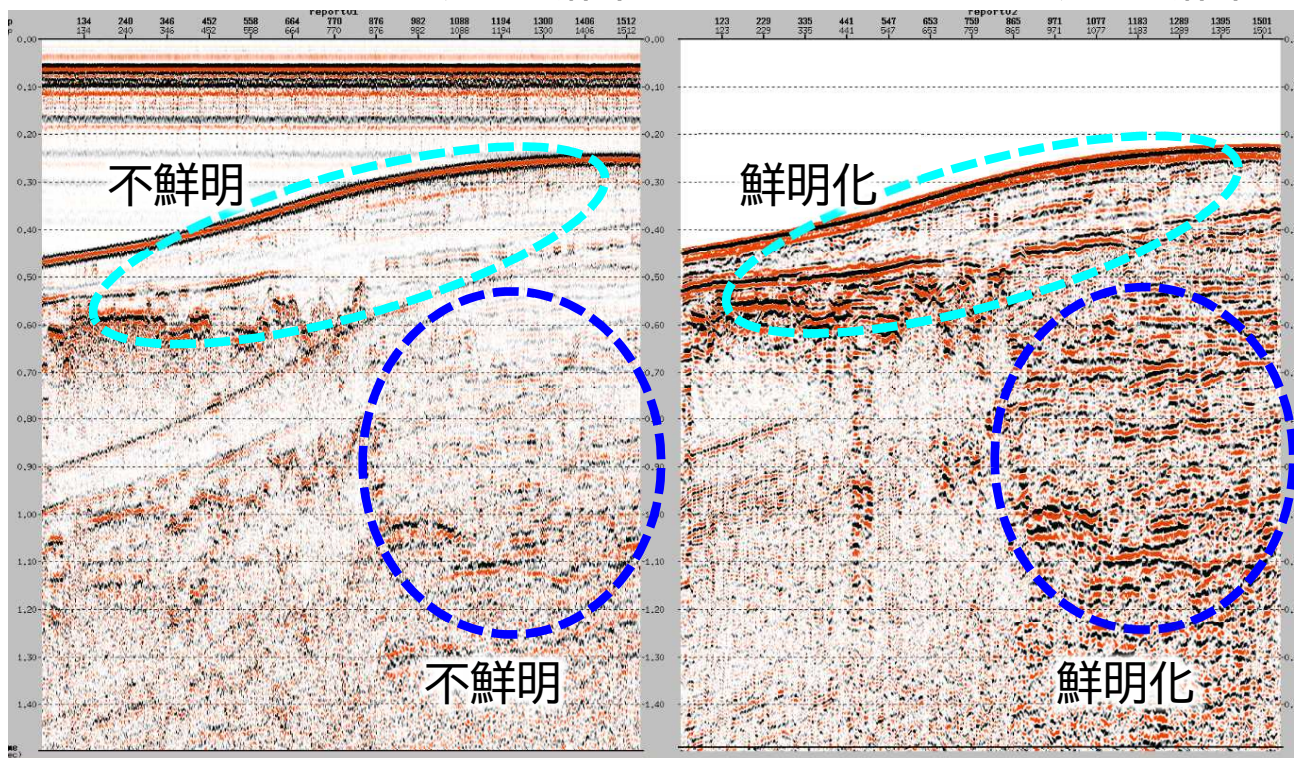
■ 音波探査：データ処理



✓ 様々なデータ処理によって鮮明な断面となる

シングルチャンネル処理断面

マルチチャンネル処理断面



赤字はマルチチャンネル特有の処理

マルチチャンネルの
データ処理フロー例

※マルチチャンネル音波探査では、様々なデータ処理が選択できる。
それにより記録品質が向上し、記録断面の解析・解釈の信頼度が向上する。

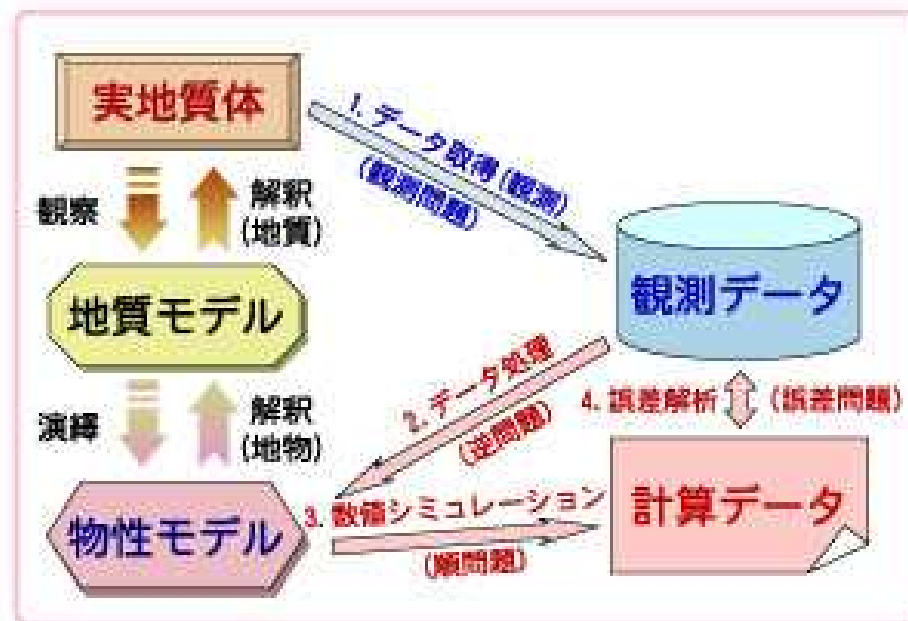
■ 音波探査：音波探査記録の地質解釈



- ✓ 音波探査記録を解釈して得られた「地層イメージ」から「地質モデル」を構築する。

地質調査では「地質モデル」の構築が最終的な成果になる。したがって「地質解釈」の過程が不可欠となる。

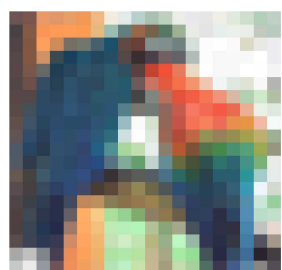
データを解釈するには、現場のデータ取得の知識やデータ処理の知識のほか、地質学や地盤工学に関わる知識も必要である。



物理探査の過程と物性・地質モデル

※土木研究所HPより

**“解釈”作業は、オリジナルの現象・構造を類推すること。
元の実体を知らないとは解釈できない。**



画像データ
(音波探査記録)



解釈



実際の写真
(実際の地層)

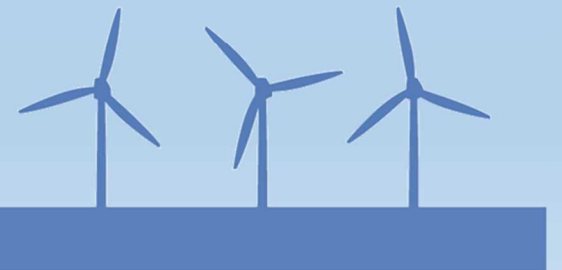
音波探査記録の地質解釈イメージ

海域の物理探査

- 海底地形調査
- 海底面状況調査
- 音波探査

データ処理、音波探査記録の解釈など

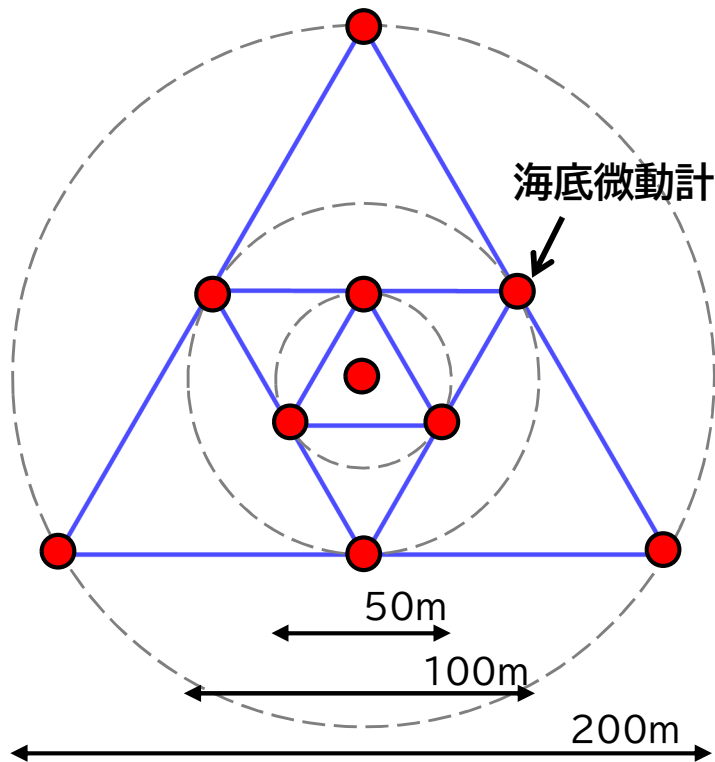
- 海底微動アレイ探査



■ 海底微動アレイ探査

- ✓ 海底微動アレイ探査とは、海底に設置した地震計で常時微動を測定し、得られたデータから海底地盤のS波速度構造を推定する探査手法である。

※地盤は常に微振動しており、この振動を“常時微動”という。



海底微動計の配置例

◆ 測定方法

海底微動計を配置して常時微動を測定

◆ 観測網(アレイ)

三角形配置が基本

◆ 得られる成果

S波速度の深度分布図

◆ 結果活用

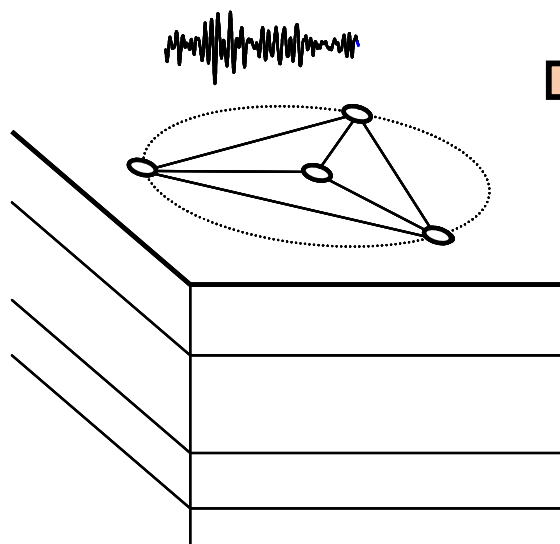
“工学的基盤”の深度を推定

■ 海底微動アレイ探査



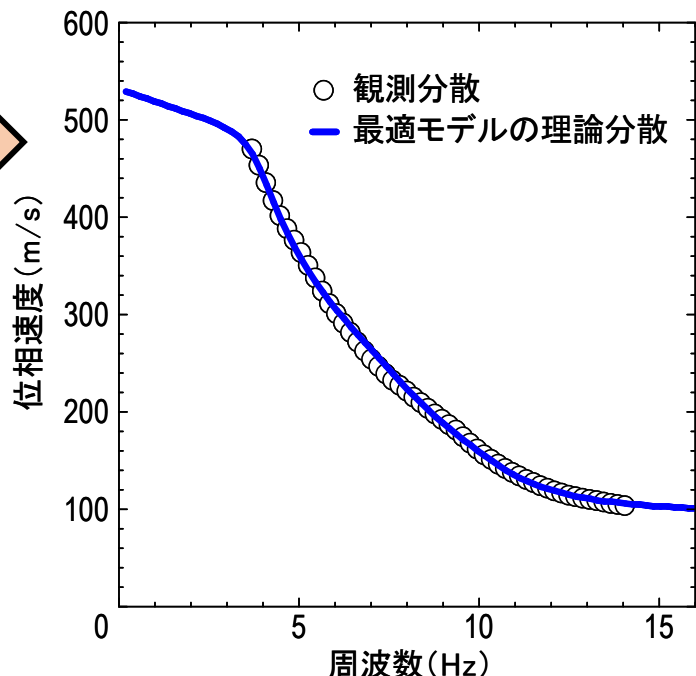
◆ 解析手法

① 測定



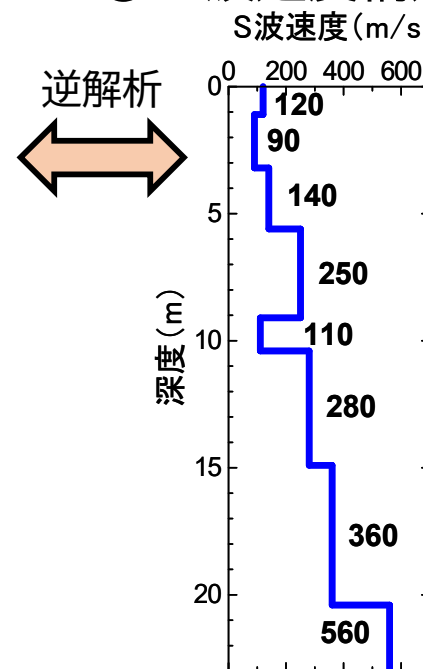
常時微動(表面波)を
微動計によって測定

② 位相速度を検出



分散曲線: 周波数ごとの速度曲線

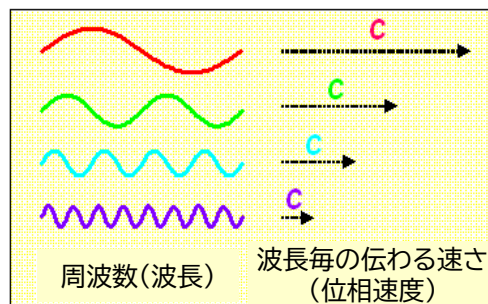
③ S波速度構造を推定



成果

< 表面波の分散性 >

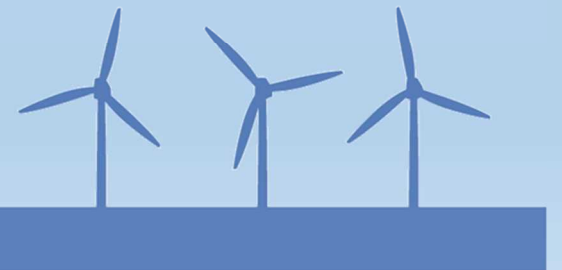
- 波長が長い波(周波数が低い)
→ 深層部を伝播して速度が速い
- 波長が短い波(周波数が高い)
→ 浅層部を伝播して速度が遅い



- 海域での占有時間が短い
1日あたり1地点の測定
- △ 直径200m範囲(最も外側の
アレイ)の平均値が得られる

地盤調査

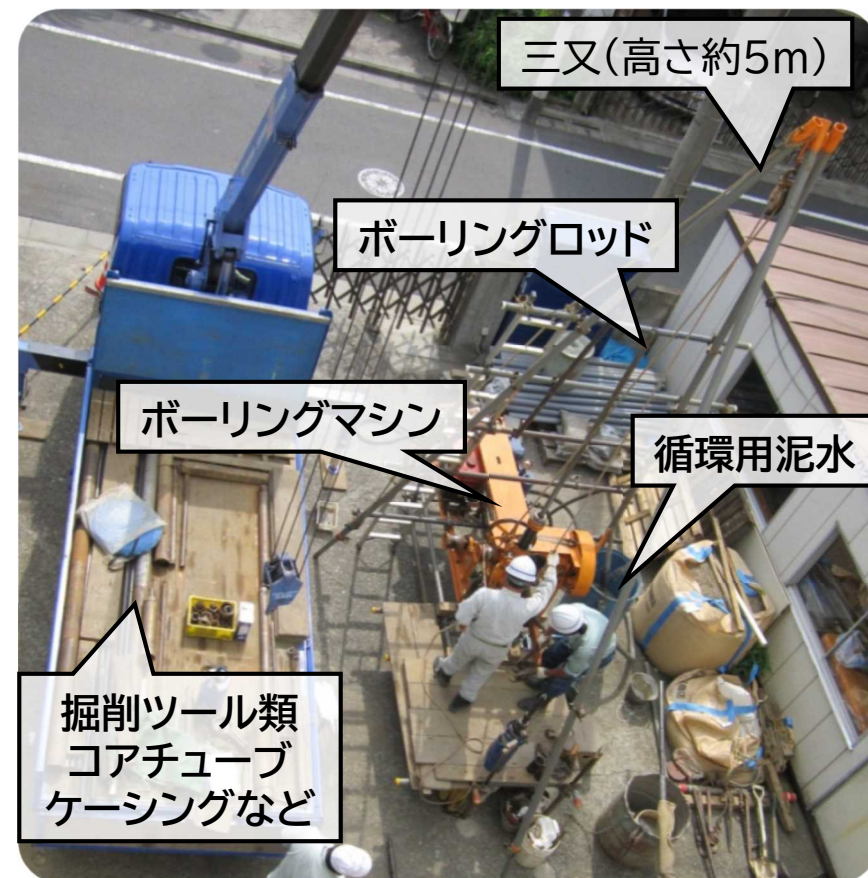
- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ その他の原位置試験
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取



▶ ボーリング作業とは

ボーリングの目的

- ① 地質構成や支持層の深さなどを調べる
- ② 室内土質試験の試料を採取する(サンプリング)
- ③ ボーリング孔を利用する原位置試験を実施する
※ 原位置試験: 標準貫入試験・孔内载荷試験・PS検層・現場透水試験など
- ④ 種々の計器を埋設する孔を提供する
※ 地下水位の観測、地震計の設置など

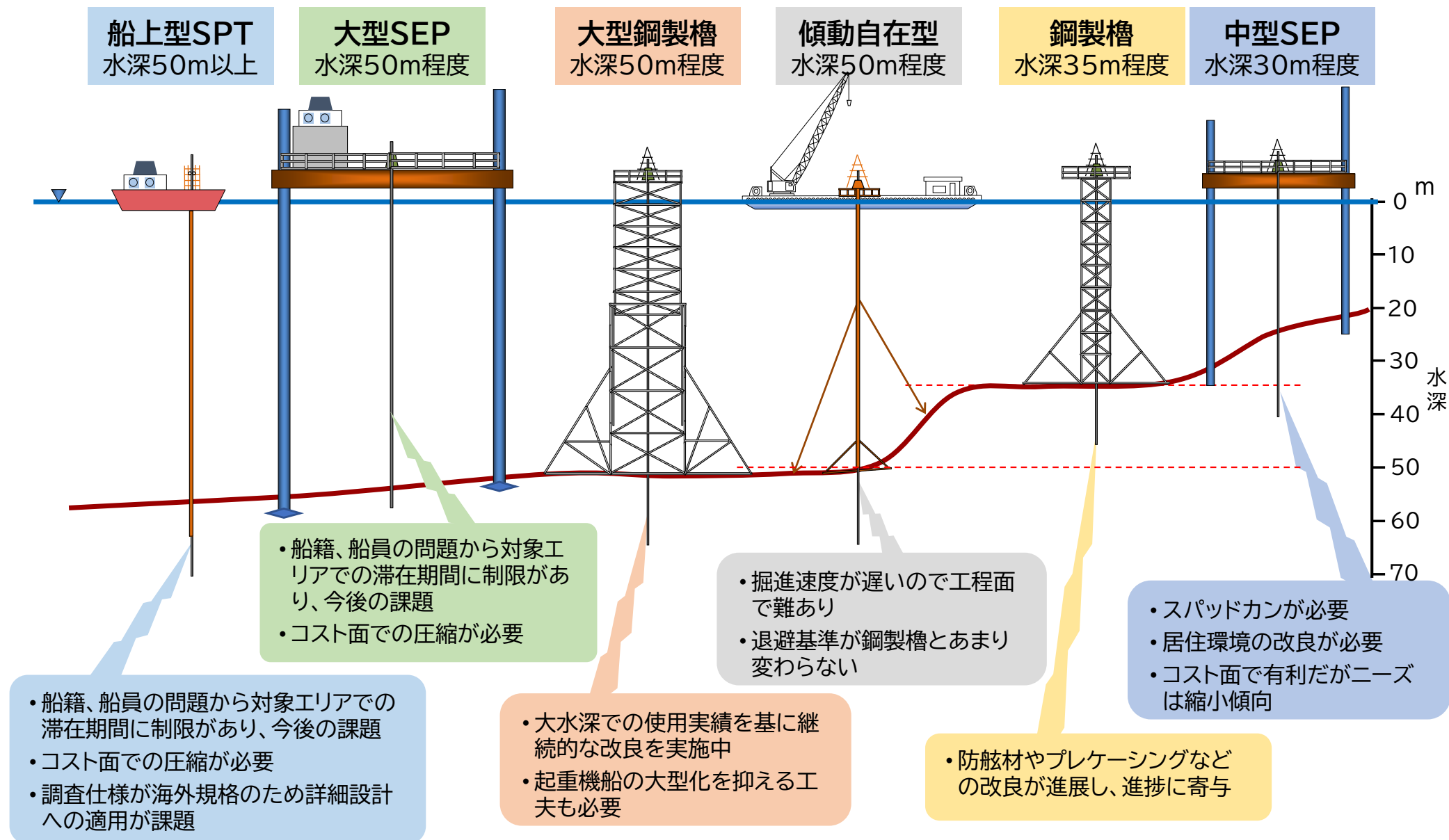


ボーリング現場のイメージ

■海上ボーリング：作業足場の選定



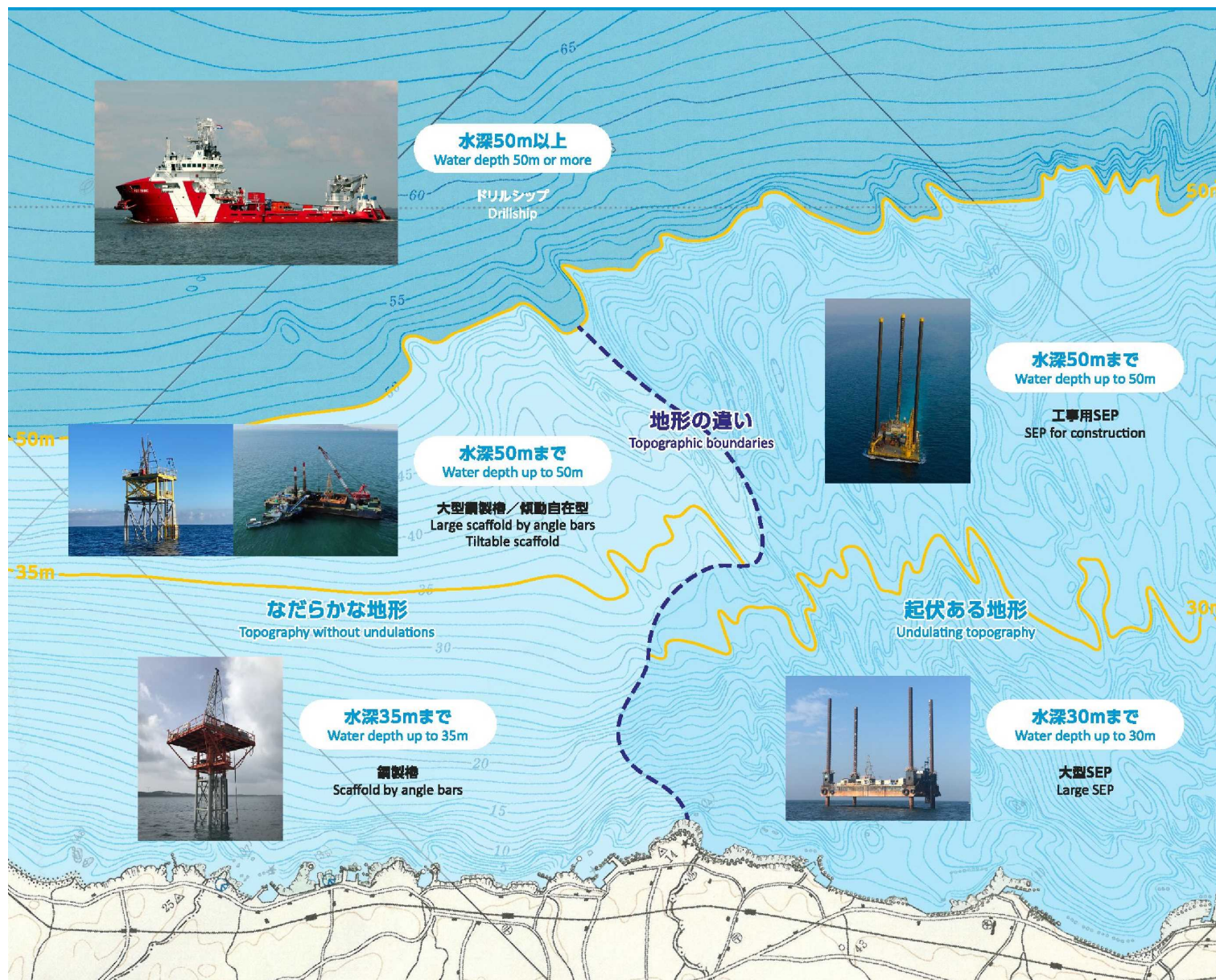
➤ 水深と海上ボーリングの作業足場



■ 海上ボーリング：作業足場の選定



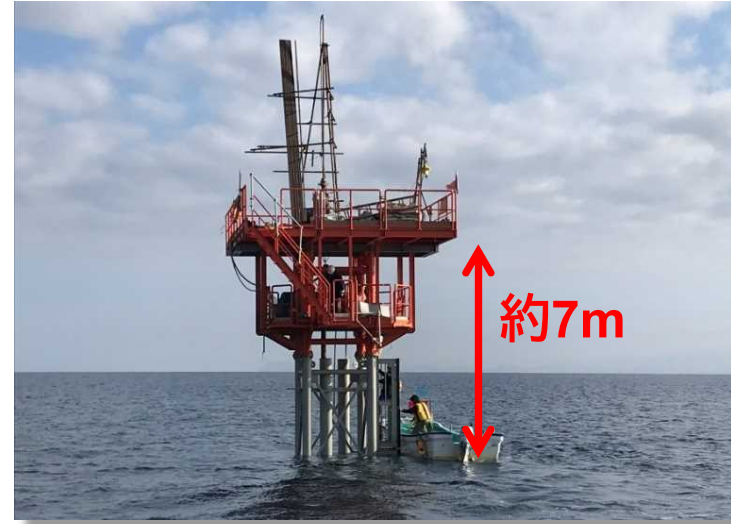
➤ 海底地形と海上ボーリング作業足場の選定



■ 海上ボーリング：作業足場の選定



➤ 鋼製櫓(水深35m程度まで → さらに進化も！)



➤ 中型SEP足場(水深30m程度まで)



■ 海上ボーリング：作業足場



➤ 大型SEP、大型鋼製櫓

伊藤忠商事 & 三国屋建設と水深50m対応へ



大型SEP(大水深対応)
“Kingfish”



“大型鋼製櫓”(高さ調整可能)
※ 改良中(特許取得:2件)

■ 海上ボーリング : ドリルシップ



➤ ドリルシップ



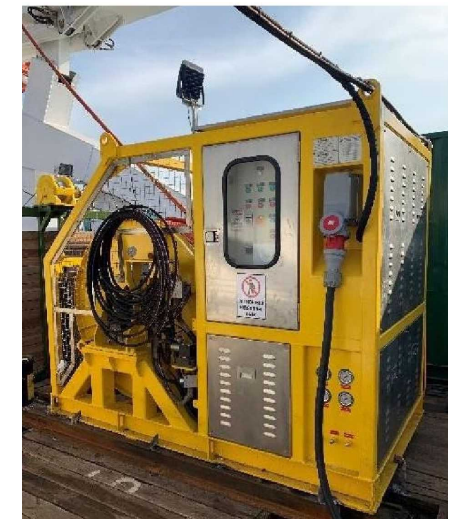
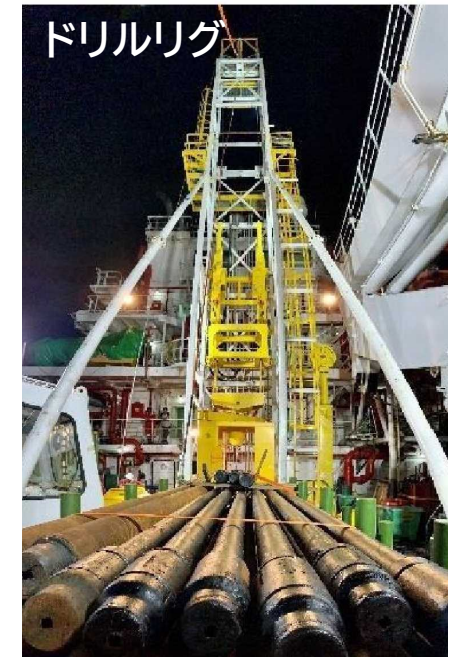
WINDPAL CO. LTD.

Le Gratteciel Build. 1-7F, 6-20-1 Shinbashi,
Minato-ku, Tokyo 105-0004 Japan

Office: +81-3-6452-8631

Fax: +81-3-6452-8630

Email: info@windpal.co.jp

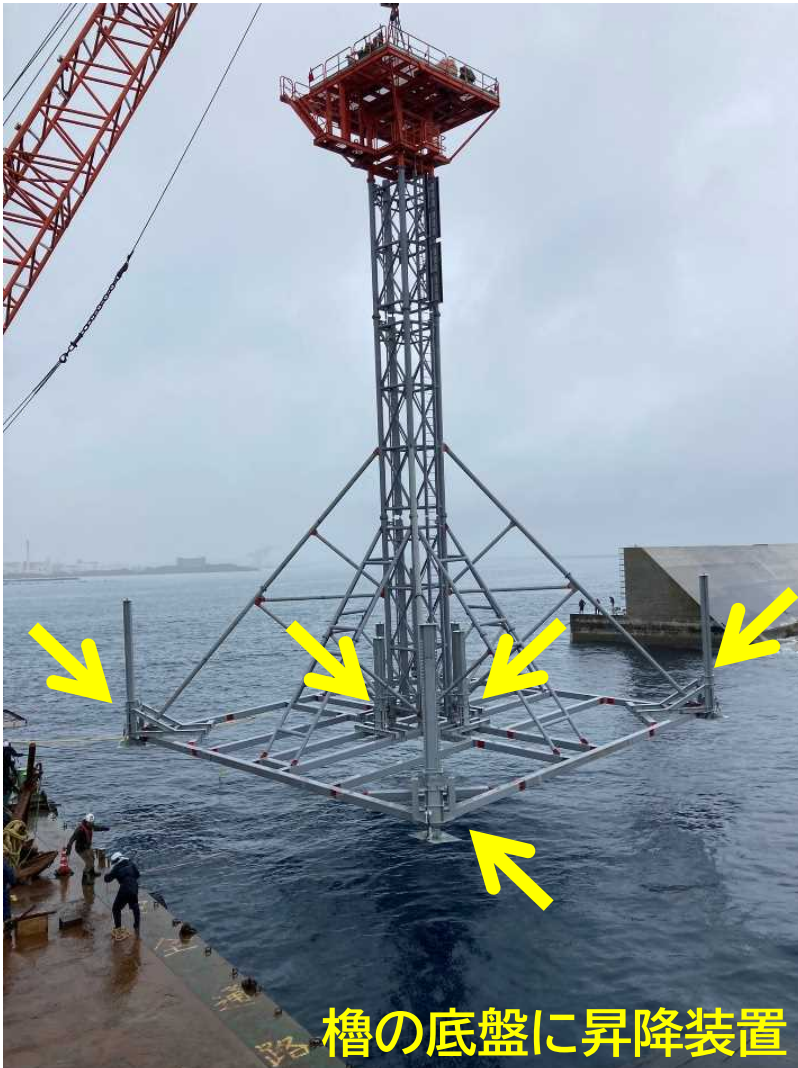


■ 海上ボーリング：作業足場の改良

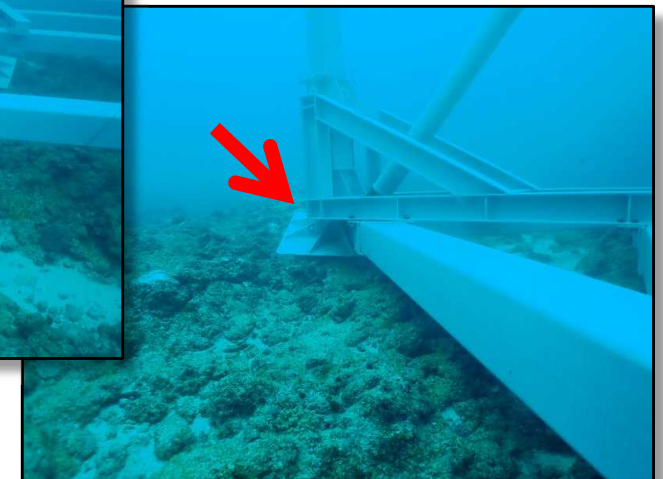
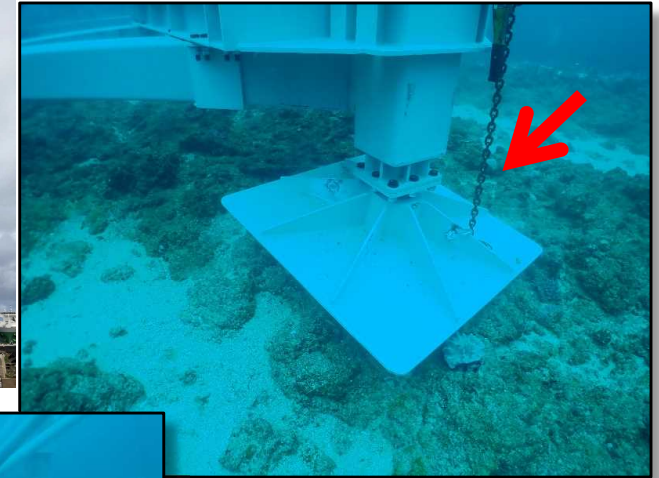


➤ 鋼製櫓の進化(オクトパス:特許取得)

起伏のある海底に対応



櫓の底盤に昇降装置

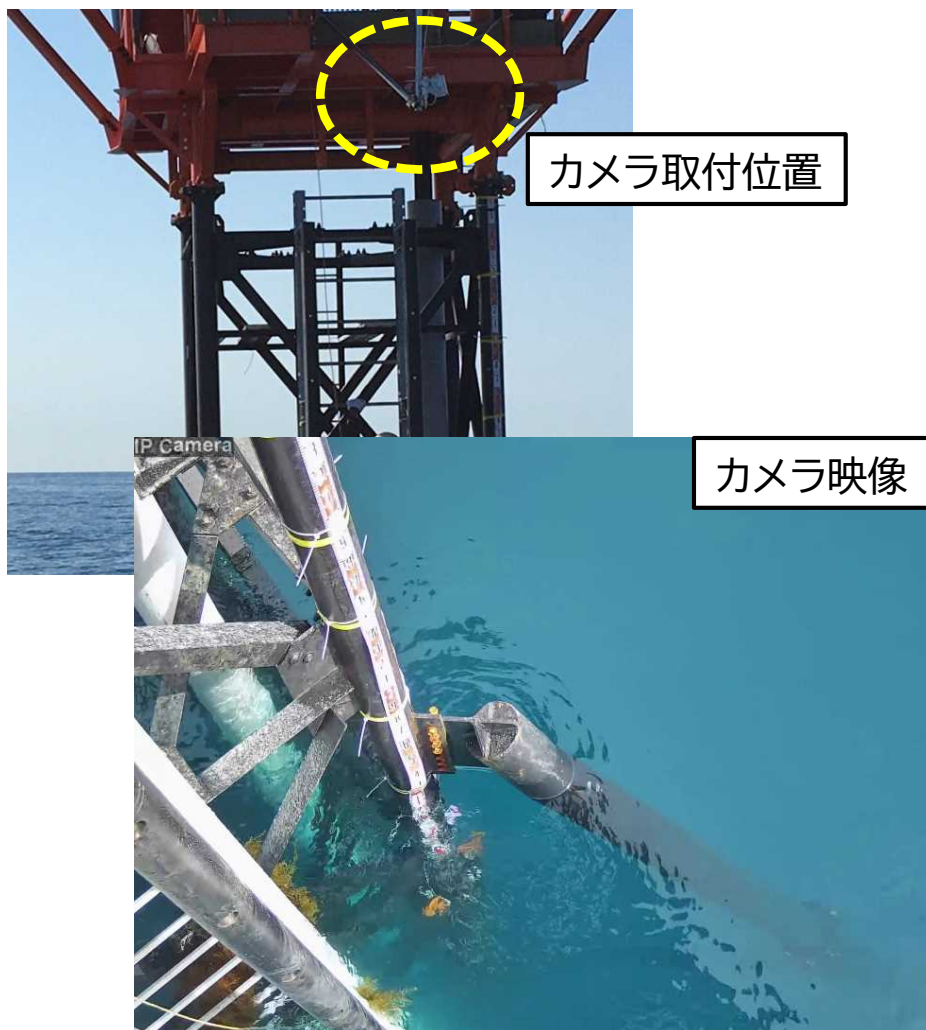


■海上ボーリング：作業足場の改良

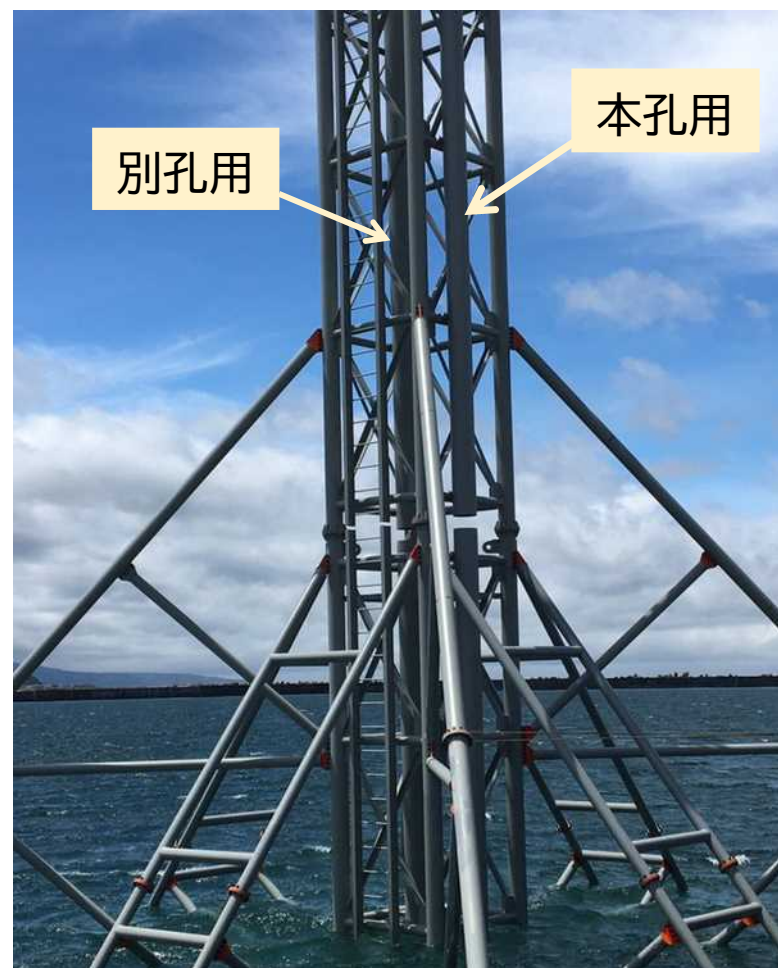


➤ 現場設備の改良：荒天遅延リスクへの対応

Webカメラによる波高の監視



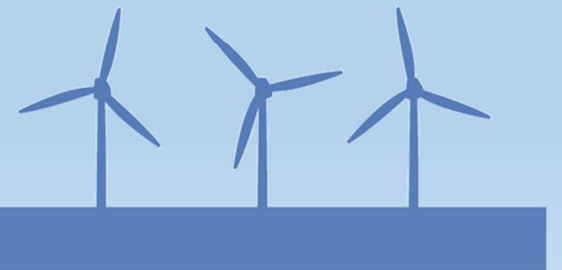
櫓にプレケーシング※設置して別孔移動の手間を排除



※ケーシングより外側のガイド管

海域の地盤調査

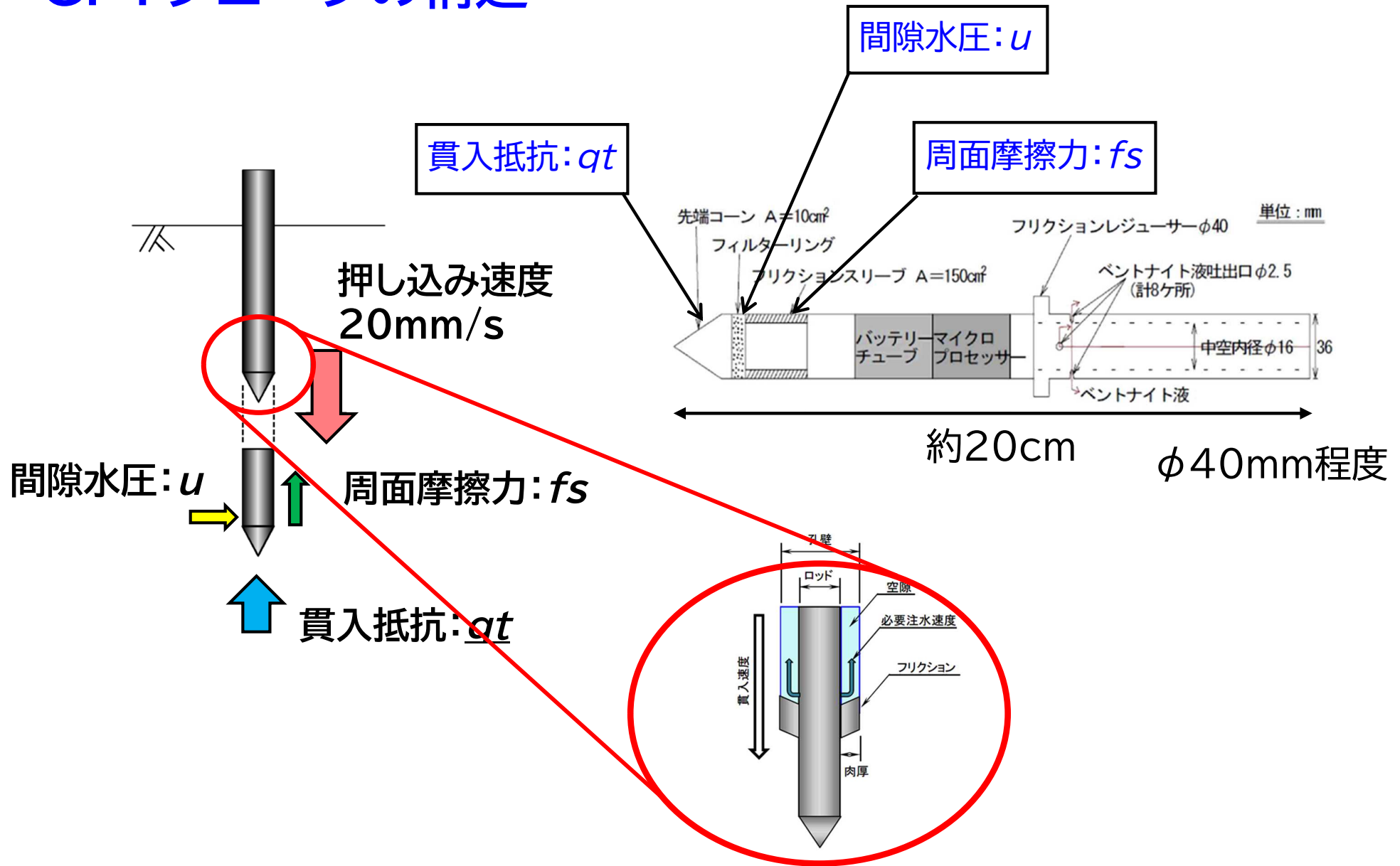
- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ その他の原位置試験
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取



■ CPT



➤ CPTプローブの構造



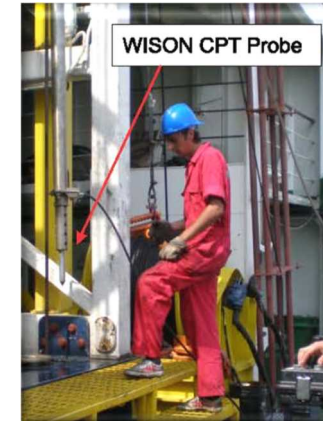
■ CPT : 船上型及びTOP PUSH型



➤ 大水深作業が可能かつ作業期間が短く幅広い適用性

✓ コーン貫入(CPT)はCPT実施各社との連携

ドリルシップ型(ウインドパル社提供)



台船設置型



《CPTの特徴》

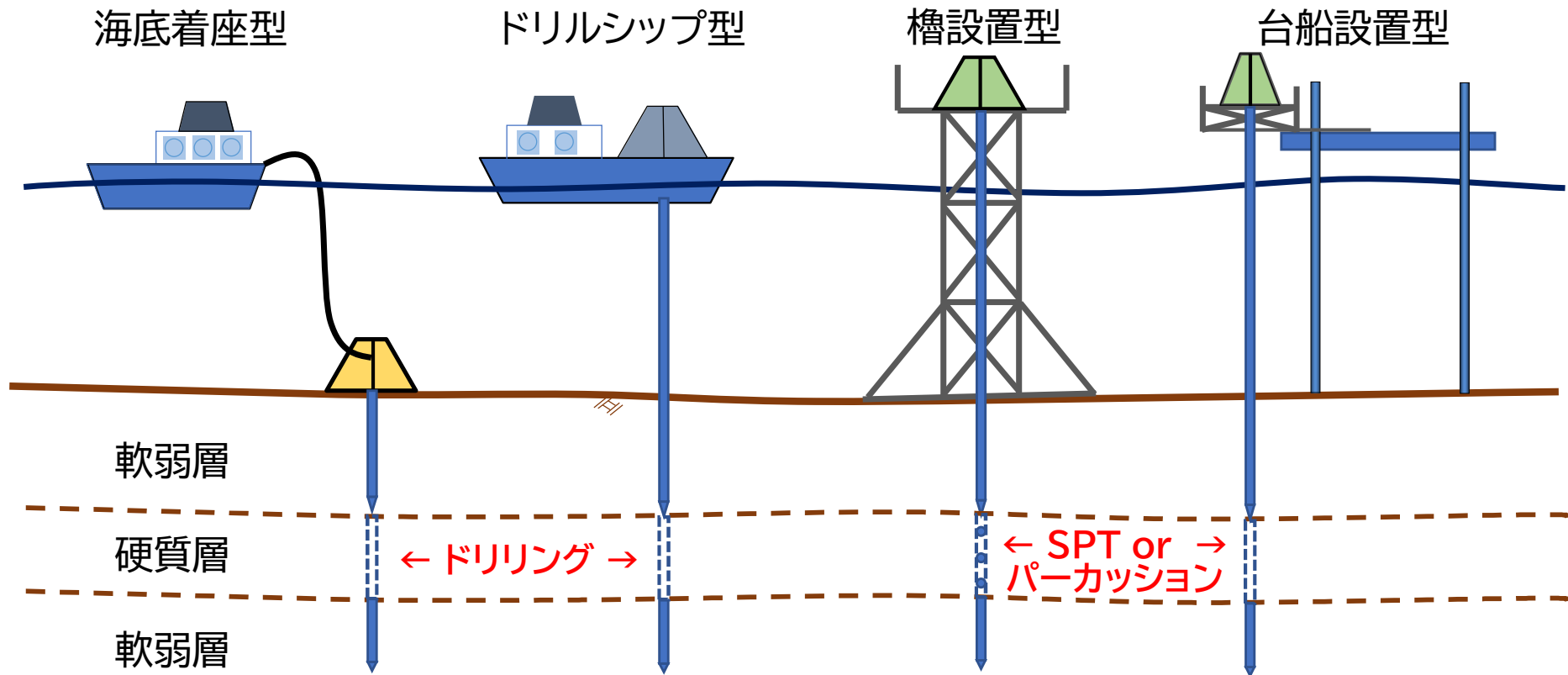
- 貫入不能区間はコアリング
- 経済性の面で不利になる可能性も
- SPTの併用が可能

■ CPT : 船上型及びTOP PUSH型



➤ CPT: 欧米ではスタンダードの調査手法

✓ 静的なコーン貫入試験結果から地盤定数を推定



- ① CPTプローブを地盤中に貫入し、貫入不能となった時点でドリリングを実施する。
- ② CPTプローブの貫入が可能な深度から、再度CPT用に装置を切り替えて調査を継続する。

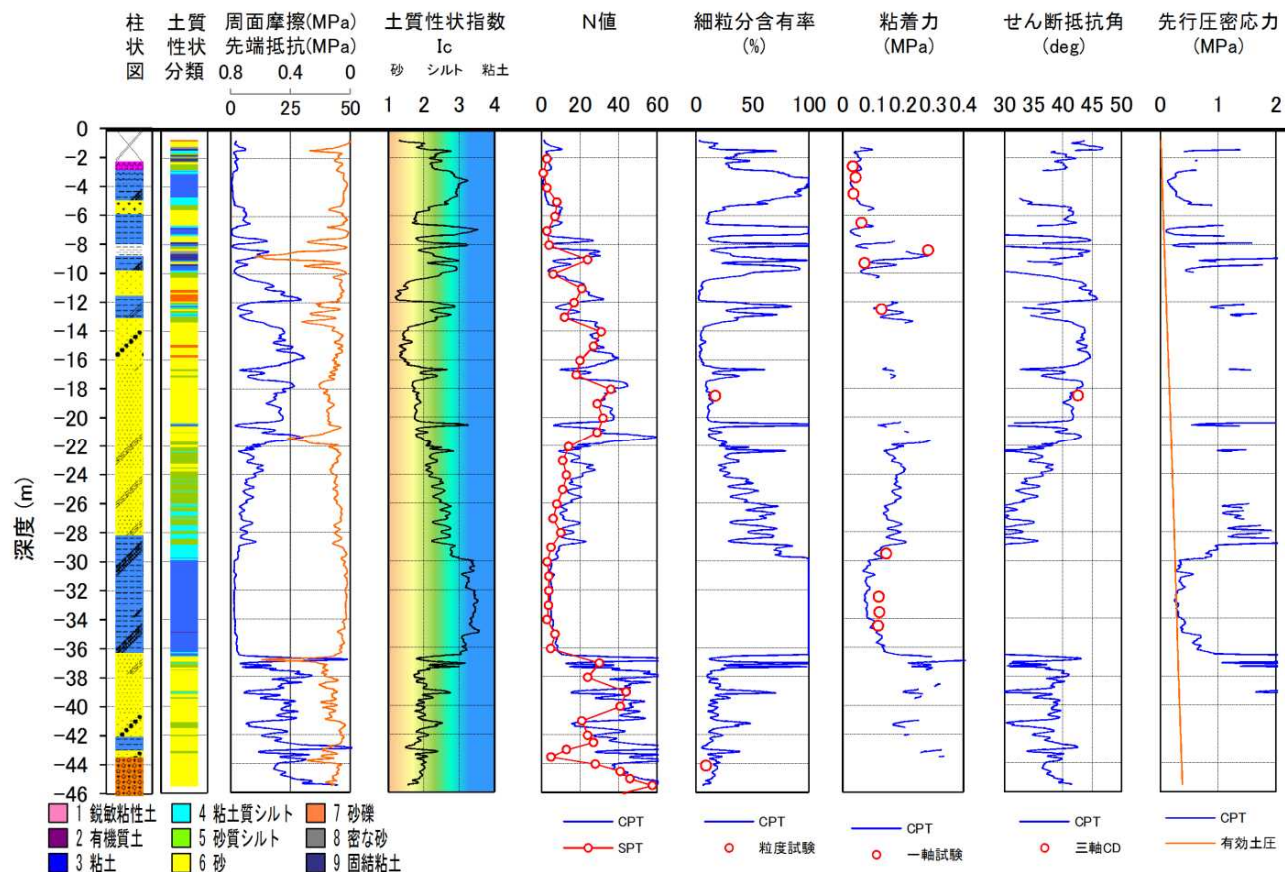
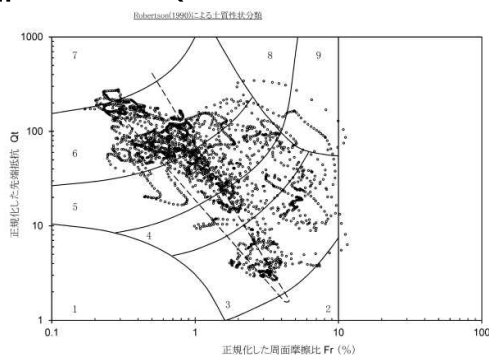
- ① CPTプローブを地盤中に貫入し、貫入不能となった時点でSPTやパーカッション併用ボーリング掘削に切り替える。
- ② CPTプローブの貫入が可能な深度から、再度CPT用に装置を切り替えて調査を継続する。
- ③ フリクションレス貫入試験器により反力を大幅低減

➤ CPT結果の解析事例

✓ 測定値から物性値に換算

一次換算値

- ・土質判別: Q_t , F_r , I_c (Robertson他)
- ・換算N値: N_c (Robertson他)



二次換算値(換算N値: N_c から)

- ・変形係数: E (JGS他)
- ・S波速度: V_s (道路橋示方書)
- ・粘着力: c (JGS他)
- ・内部摩擦角など: ϕ (建築指針他)
- ・初期剛性率: G_0 (V_s より換算)

他多数

■ CPTの限界（その目安）



✓ 機材と貫入抵抗: qt

ドリルチップ型なら、最大80Mpa程度

トッププッシュ型なら、最大40～60Mpa程度

✓ 貫入抵抗: qt の目安

qt (Mpa) \div 100 Cu (Mpa) ※pa=kN/m²

qt (Mpa) \div N / (1.5～2.0)

✓ 実際にはどの程度？

$qt = 80$ Mpaの地盤とは？

N値なら $80 \times 1.5 \div 120$ 回程度

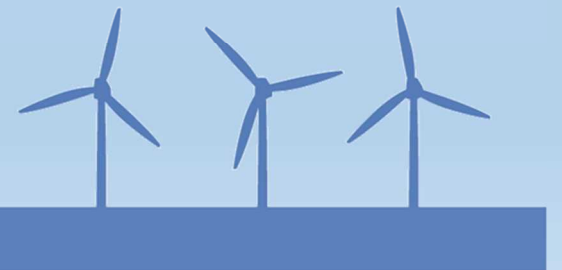
Cu なら $80/100 \div 0.8$ Mpa

$= 800$ kN/m² $= 80$ t/m² $= 8$ kgf/cm²

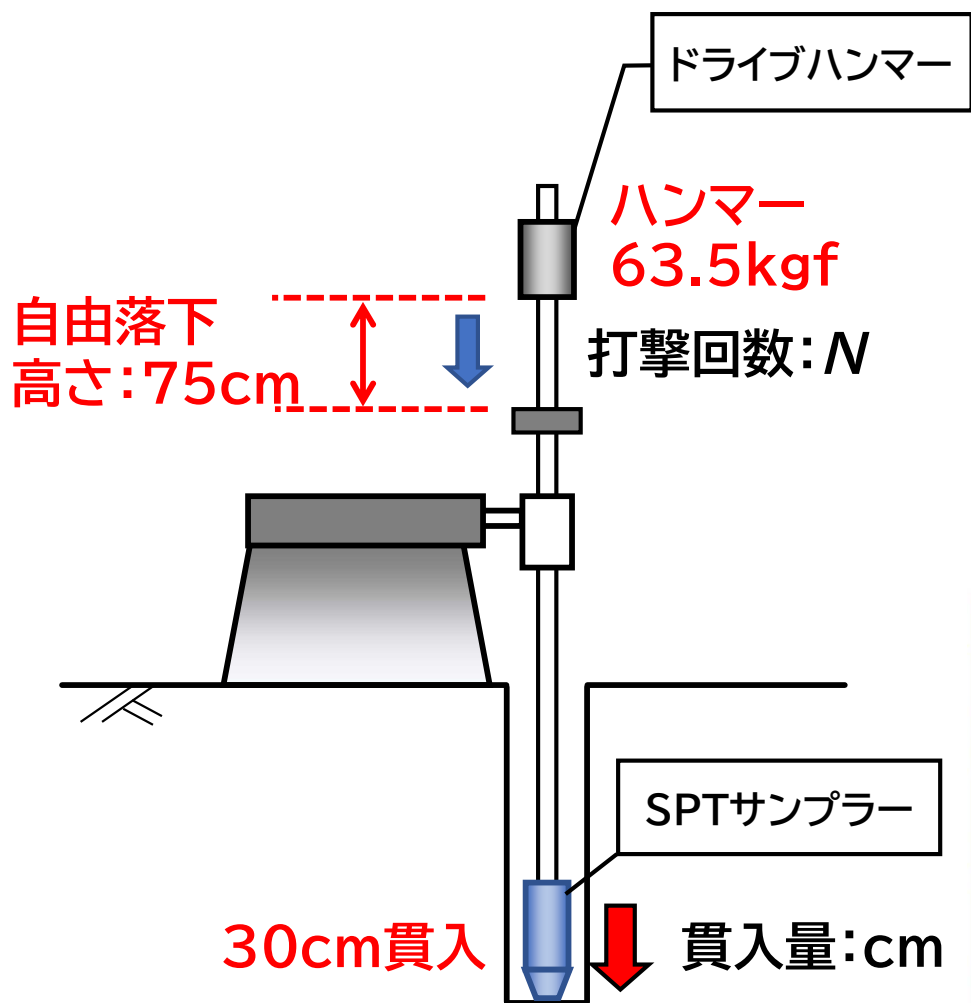
あくまで目安です！

海域の地盤調査

- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ その他の原位置試験
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取



■ SPT (標準貫入試験)



この土を室内土質試験に用いる
(乱した試料)

■ SPT : 留意点



➤ 標準貫入試験(SPT):エネルギー伝達効率を検討

✓ 海上特有の長尺ボーリングによるエネルギーロスを評価

打撃エネルギー

ロッドのたわみなど
= エネルギー損失

計測センサー

エネルギー過小
→ N値を過大評価

ロッドにセンサーを取付

Pile Dynamics, Inc.
30725 Aurora Road
Cleveland, OH 44139 USA

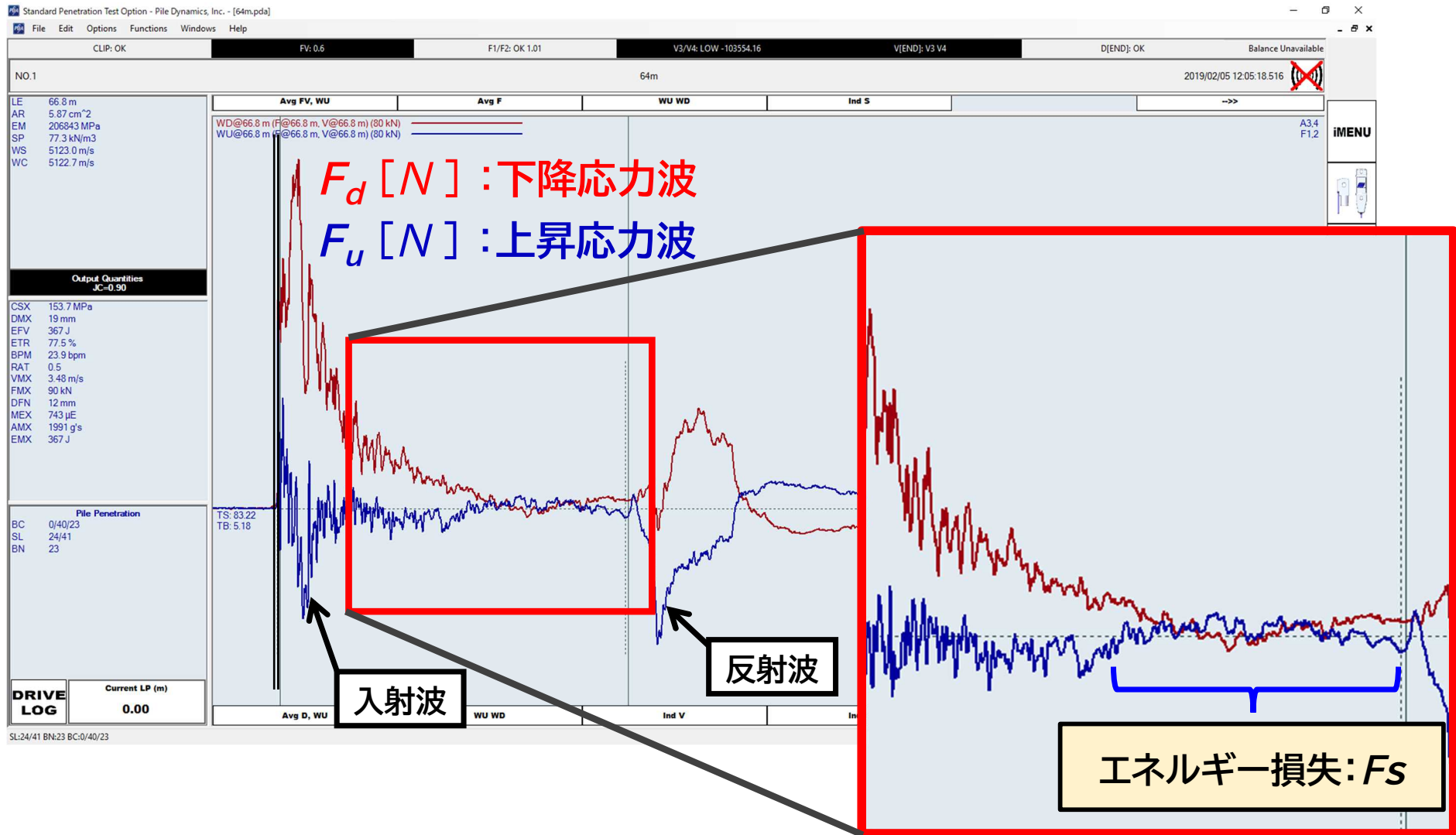
モノパイル基礎は鋼管杭を打ち込み工法により打設するが、打ち込みによる貫入抵抗を測定する標準貫入試験のN値は、この工法と測定の機構が酷似しており、支持層評価の際に有効となる。

ただし、海上ボーリングでは水深分のロッド長が加算されることで、必然的に長尺ボーリングとなるため、ハンマーによる打撃エネルギーの伝達効率を一定に保つ必要がある。

■ SPT : 打撃エネルギーの伝達効率



▶ 測定で得られた反射波形の例 エネルギー損失あり



■ SPT : N値の補正 (実例をもとに)



➤ ISSMFE(1988)補正方法(現在のISSMGE)への適用

計測結果を用いた補正例($N=27$ の場合)

<測定結果の例(水深20m、GL-64m)>

$$e_{12} \doteq 84\%, \quad e_3 \doteq 93\%$$

$$\Rightarrow e = e_{123} = 0.84 \times 0.93 \doteq 78(\%)$$

<補正>

$$\left(\frac{\text{実測}e}{\text{基準}e} \right) \times \text{実測}N\text{値} = \text{補正}N\text{値} (N_{60})$$

※ 基準 $e = 0.6$ (60%)

$$\left(\frac{78}{60} \right) \times 27 = \text{補正}N\text{値} (N_{60}) \doteq 35$$

洋上の調査では実測 e から N_{60} にて地盤を評価する必要も？

■ SPT : N値からの換算 (その目安)



➤ N値との相関例

変形係数 $E \doteq 0.7 * N$ (MN/m²)

一軸圧縮強度 $qu \doteq 12.5 * N$ (kN/m²)

粘着力 $c \doteq qu / 2 = 6.25 * N$ (kN/m²)

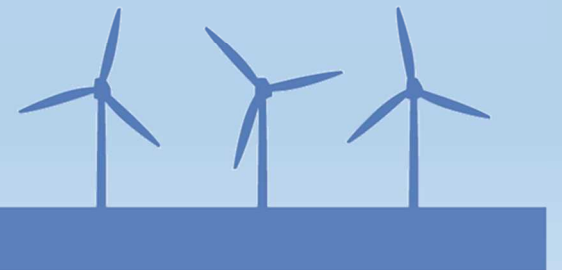
内部摩擦角 $\phi \doteq (20 * N)^{0.5} + 15$ (°)

S波速度 $Vs \doteq 80 * N^{0.333}$ (m/sec)

あくまで目安です！

海域の地盤調査

- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ **その他の原位置試験**
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取

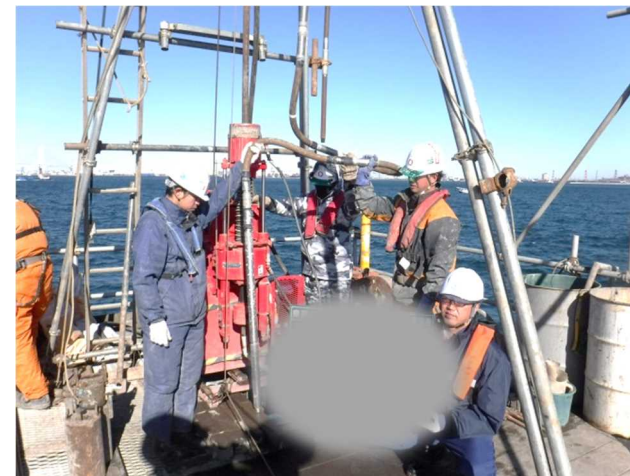
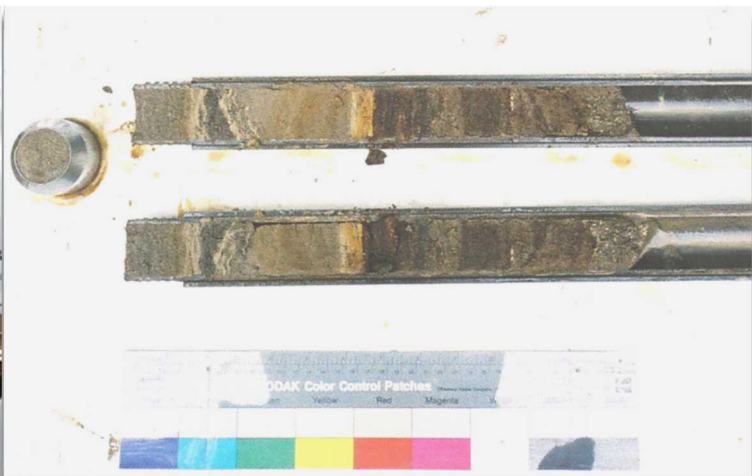


■ 原位置試験：その種類



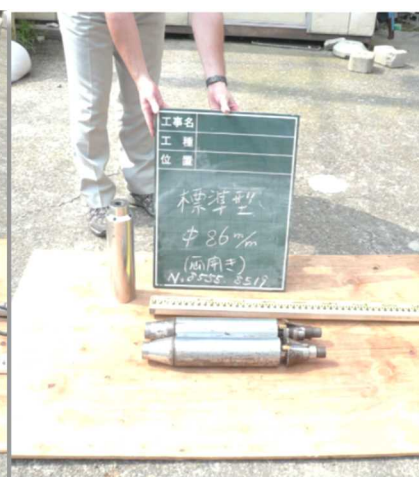
➤ 原位置試験：工学的評価のための指標(JIS, JGS他)

✓ 基礎構造設計のための地盤定数を直接計測



標準貫入試験 N値： N

PS検層 S波速度： V_s



孔内載荷試験 変形係数： E

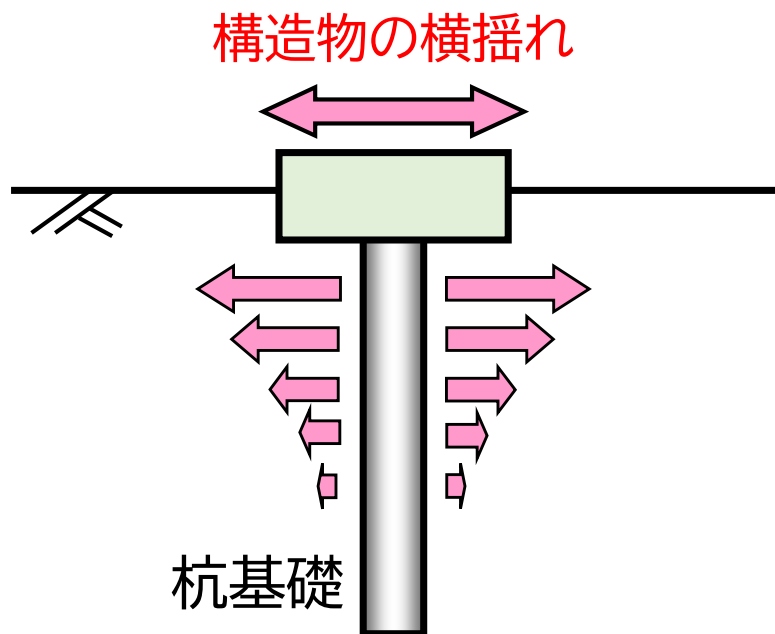
■ 原位置試験：孔内載荷試験



➤ 孔内載荷試験：地盤のばね定数を求める

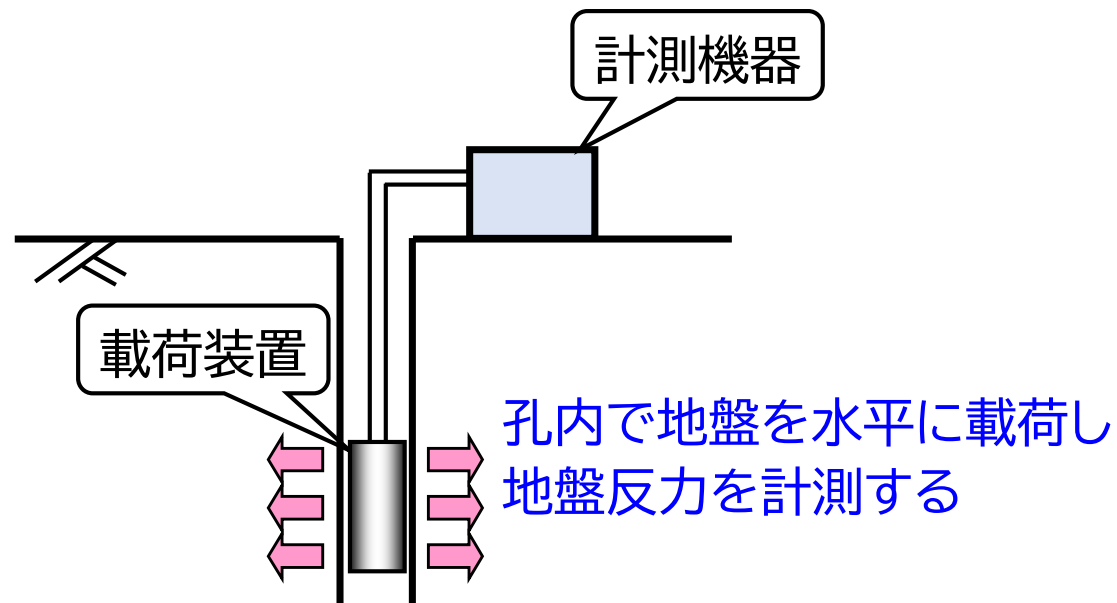
✓ 基礎構造設計のための変形係数を直接計測

地震動などによる横揺れ



横揺れにより杭が地盤を押す
→ 横方向の地盤反力の検討が必要

孔内載荷試験

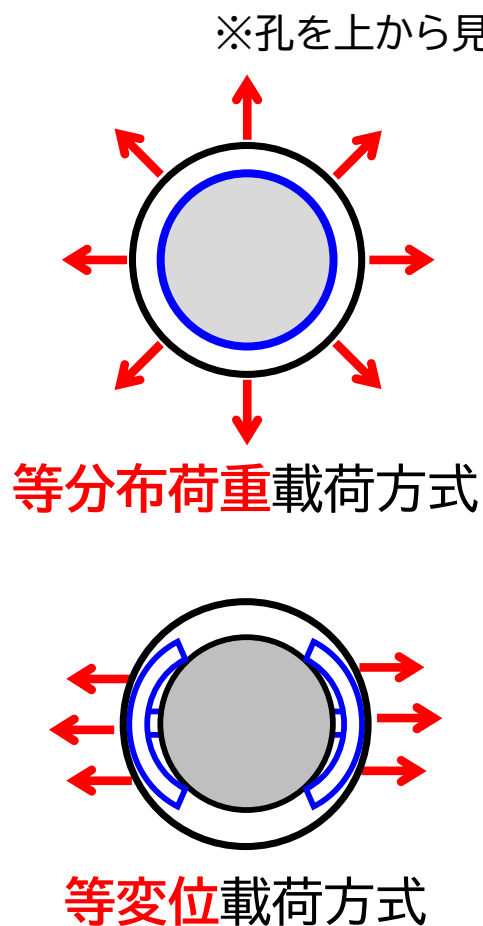


試験方法は、地震時の水平方向繰返しせん断力により構造物が揺れて、円筒形の杭が前面の地盤を押す状態をイメージした機構

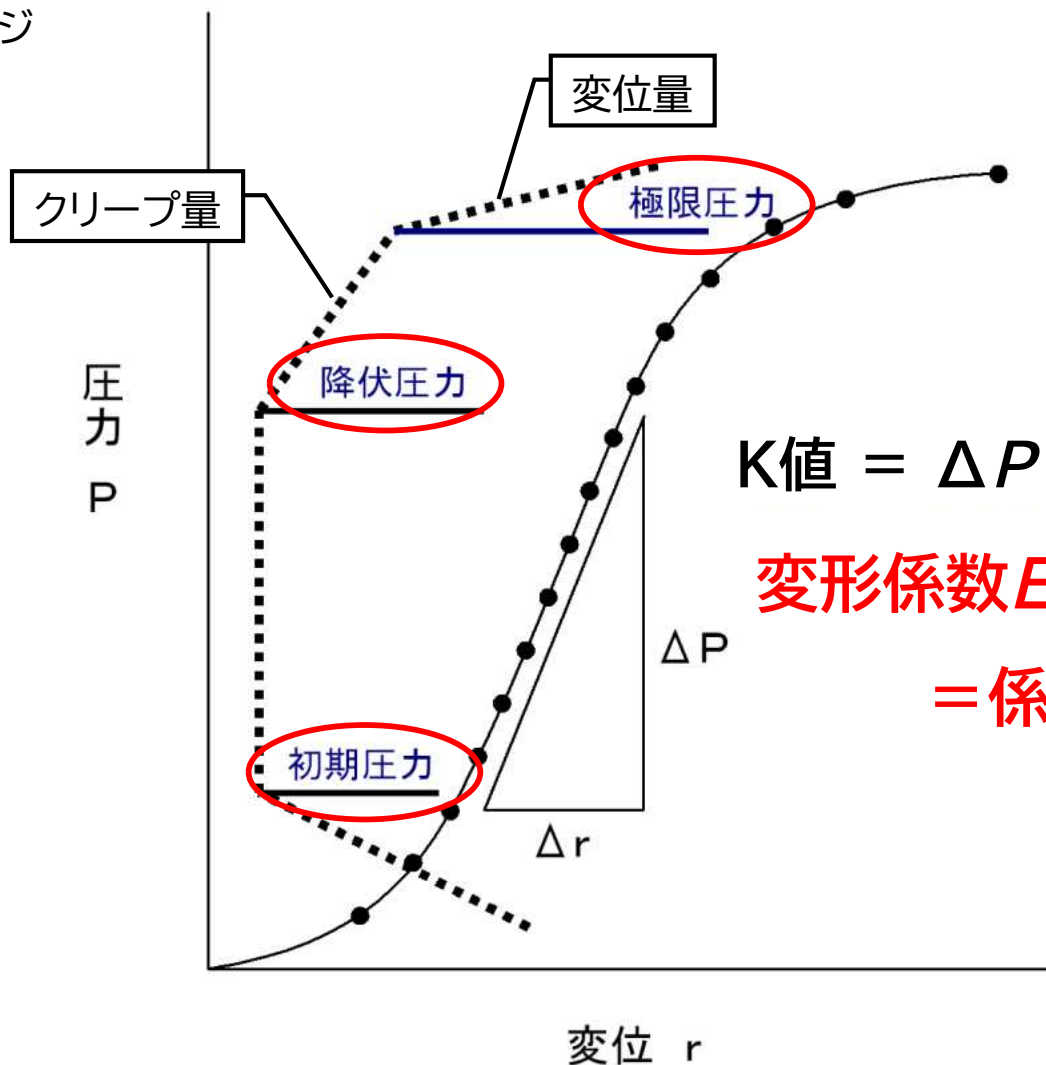
■ 原位置試験：孔内载荷試験



载荷方式の違い



計測結果からK値が得られ
変形係数を求める



■ 原位置試験：弾性波速度検層（PS検層）

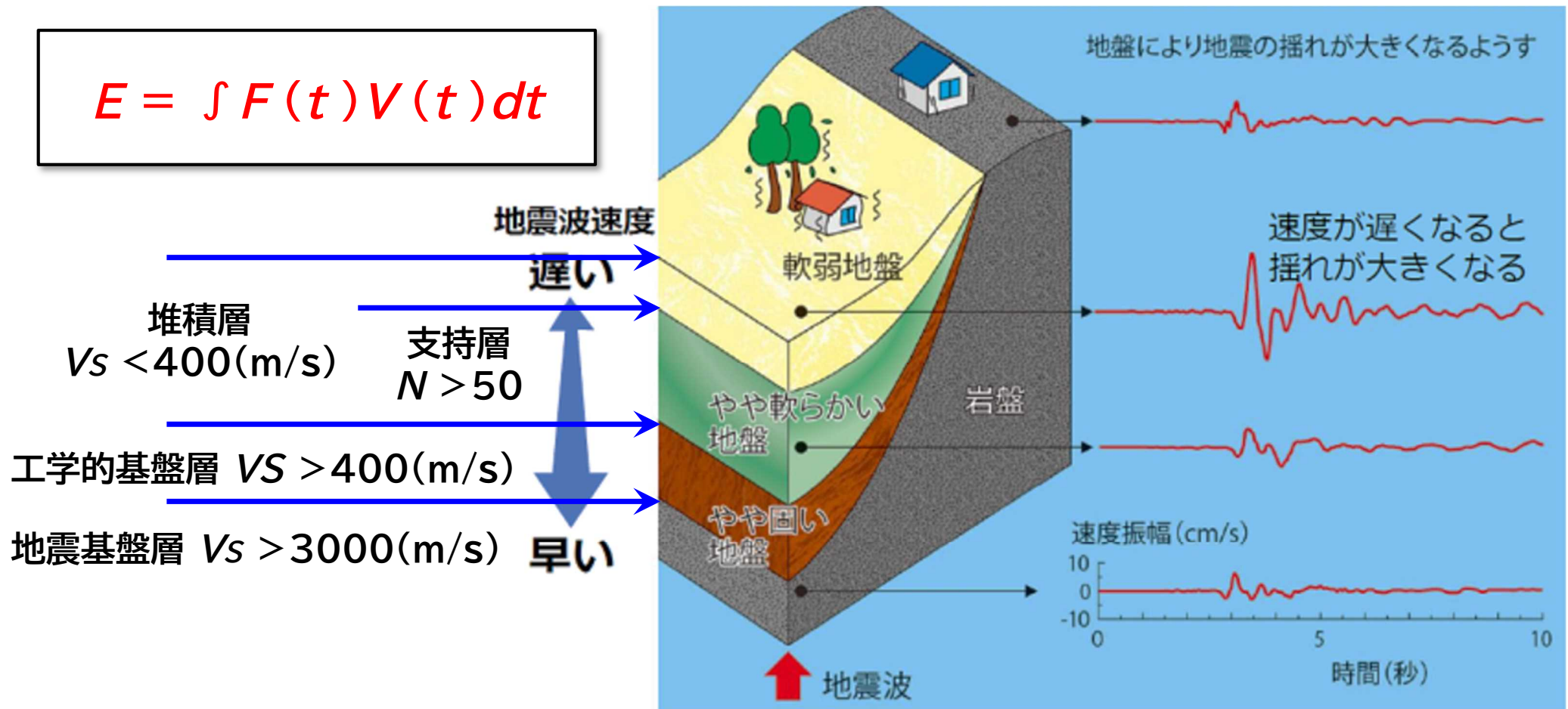


➤ 弾性波速度検層：地盤の弾性波 (V_s , V_p) を求める

✓ 基礎構造設計のための工学的基盤を直接確認

まず、“地震基盤層”、“工学的基盤層”、“支持層”について

$$E = \int F(t) V(t) dt$$

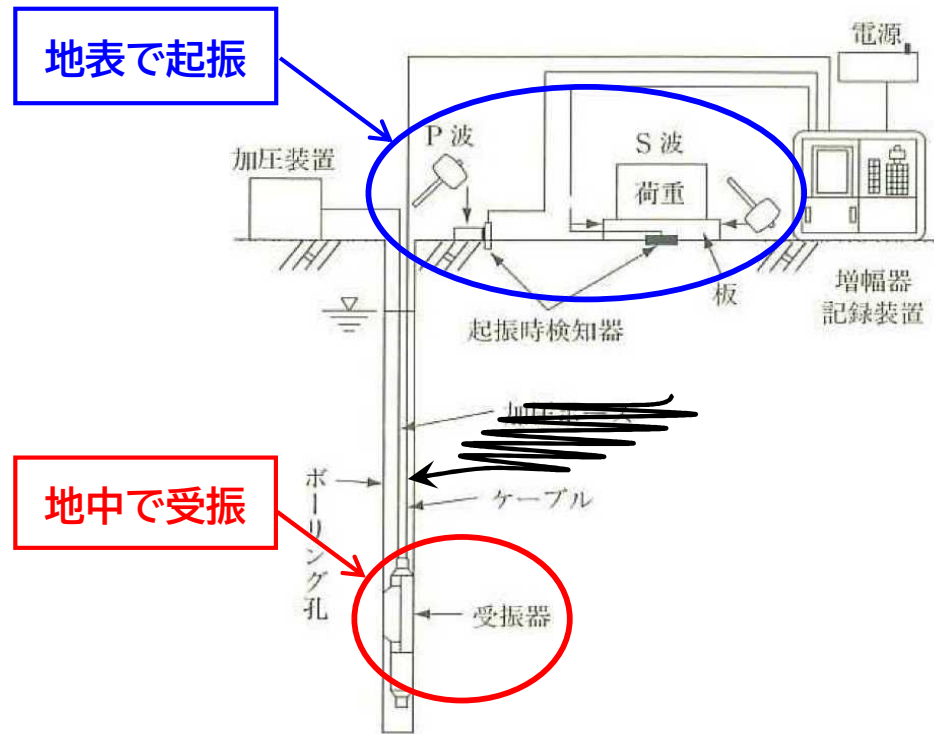


出典：地震本部

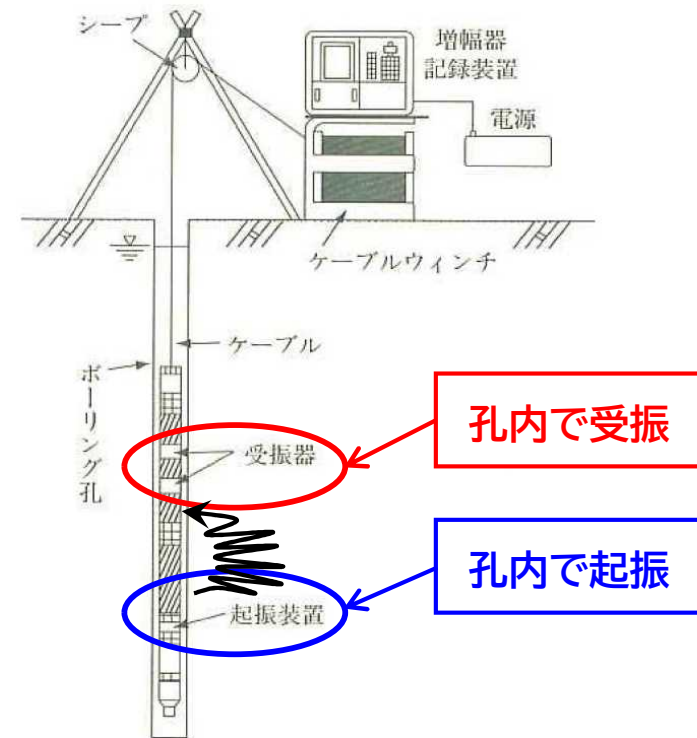
■ 原位置試験：弾性波速度検層（PS検層）



- 測定方法は起振点の違いで区分される
- 海域の調査では海底で起振できないため「**孔内起振受振方式**」のみ



ダウンホール方式



孔内起振受振方式
(サスペンション方式)

■ 原位置試験：弾性波速度検層（PS検層）



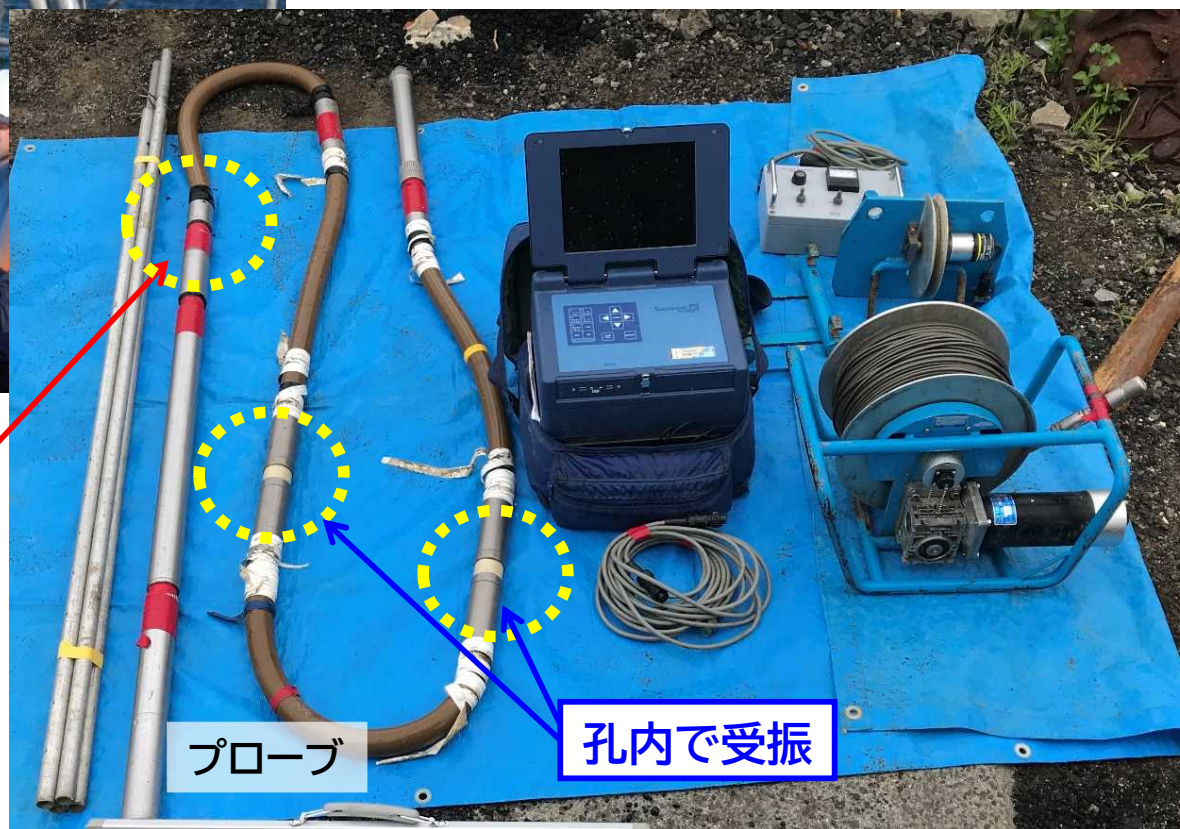
プローブの挿入状況

JGS 1122

地盤の弾性波速度検層方法

孔内で起振

孔内起振受振方式の測定機



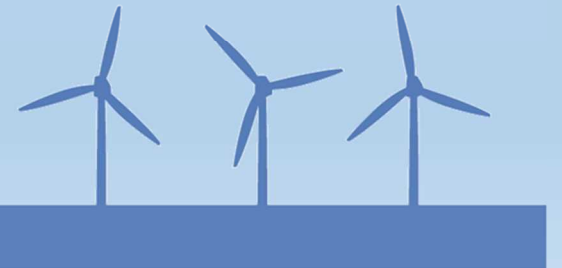
プローブ

孔内で受振

※プローブの長さ:約4.5m -->ボーリング孔は余掘りが5m必要

海域の地盤調査

- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ その他の原位置試験
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取



■ 洋上風力における地盤調査等とは？



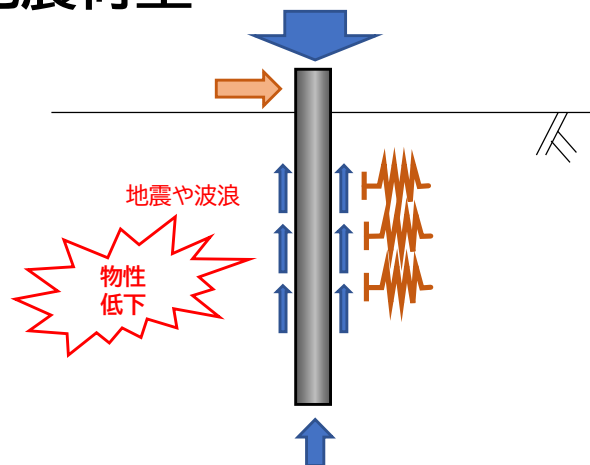
➤ 調べていること(標準)

①杭基礎の支持力

- ・N値(支持層と先端支持力) ← 標準貫入試験(SPT)
- ・内部摩擦角 ϕ (周面摩擦) ← 三軸圧縮試験(CD)
- ・粘着力 c (周面摩擦) ← 三軸圧縮試験(UU)
- ・変形係数 E (ばね定数) ← 孔内載荷試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験

②地震応答解析

- ・S波速度構造(工学的基盤) ← PS検層、海底微動アレイ探査
- ・強度低下特性 ← 動的変形試験、液状化試験、単純せん断試験
- ・地震荷重 ← 地震応答解析



青文字:現場作業

--> ボーリング掘削、原位置試験、乱れの少ない試料採取

赤文字:室内作業

--> 室内土質試験

■ CPTを使うとどうなるか



➤ CPT結果からの主な物性値の推定

✓ 現場測定値から土質定数へ換算

[測定項目]

- ・貫入抵抗: qt
- ・間隙水圧: u
- ・周面摩擦力: fs



[一次換算値など]

- ・土質判別: Qt , Fr , Ic (Robertson他)
- ・**換算N値: Nc (Robertson他) = N**
- ・非排水せん断強さ: Su (港湾式他)
- ・内部摩擦角: ϕ (風力指針)
- ・圧密降伏応力: Pc (深沢2004)
- ・S波速度: Vs (Robertson他) など

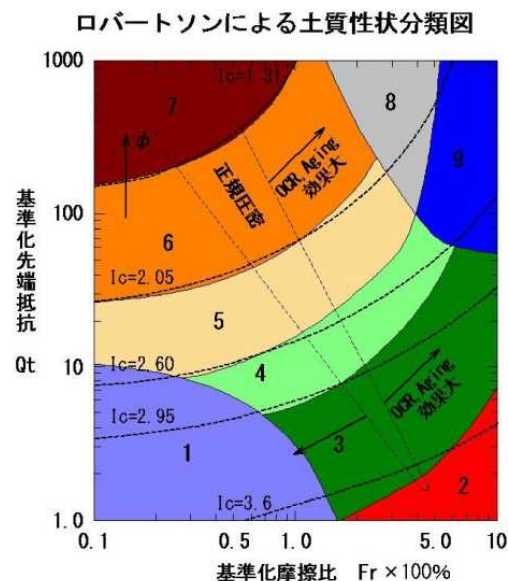


[二次換算値など: **換算N値: Nc (= N) から**]

- ・変形係数: E (JGS他)
- ・S波速度: Vs (道路橋示方書)
- ・粘着力: c (JGS他)
- ・内部摩擦角など: ϕ (建築指針他)
- ・初期剛性率: Go (Vs より換算) 他多数

| 土質性状タイプ | Ic 値 |
|-------------|-----------|
| 1 鋭敏性の高い粘性土 | 適用せず |
| 2 有機質土 | >3.6 |
| 3 粘土 | 2.95~3.60 |
| 4 粘土質シルト | 2.60~2.95 |
| 5 砂質シルト | 2.05~2.60 |
| 6 砂 | 1.31~2.05 |
| 7 砂礫 | <1.31 |
| 8 密な砂* | 適用せず |
| 9 固結粘土 | 適用せず |

* 高度な過圧密または固結状態



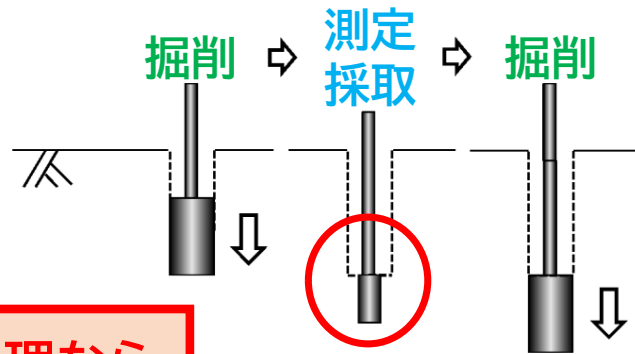
■ボーリング掘削と原位置試験



➤ 調査方法の概念比較

✓ ボーリング掘削＋原位置試験

◎掘削と試験の繰り返し



①が無理なら
SPT!

- ・N値(SPT)
- ・変形係数
- ・試料採取

ほぼ重複不可
(本孔・別孔の使い分け)

現地測定

- ・N値(SPT): N
- ・変形係数: E
- ・S波速度など: V_s

採取試料(室内土質試験)

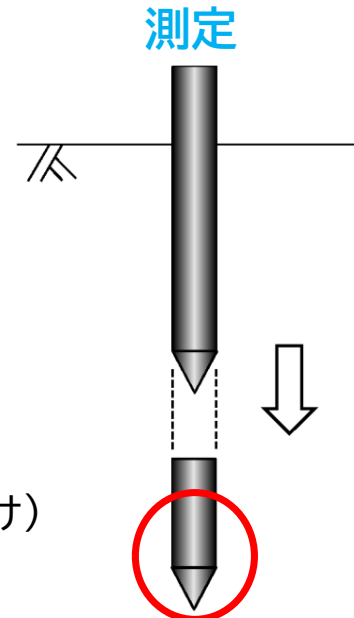
- ・粘着力: c
- ・内部摩擦角: ϕ その他

現地測定や土質
試験で**設計定数**
を**直接計測**する。

① 本来これが必要

✓ コーン貫入(CPT)

◎静的にコーンを連続貫入させる



- ・貫入抵抗
- ・間隙水圧
- ・周面摩擦力

場合により
CPTも

測定項目

- ・貫入抵抗: qt
- ・間隙水圧: u
- ・周面摩擦力: fs

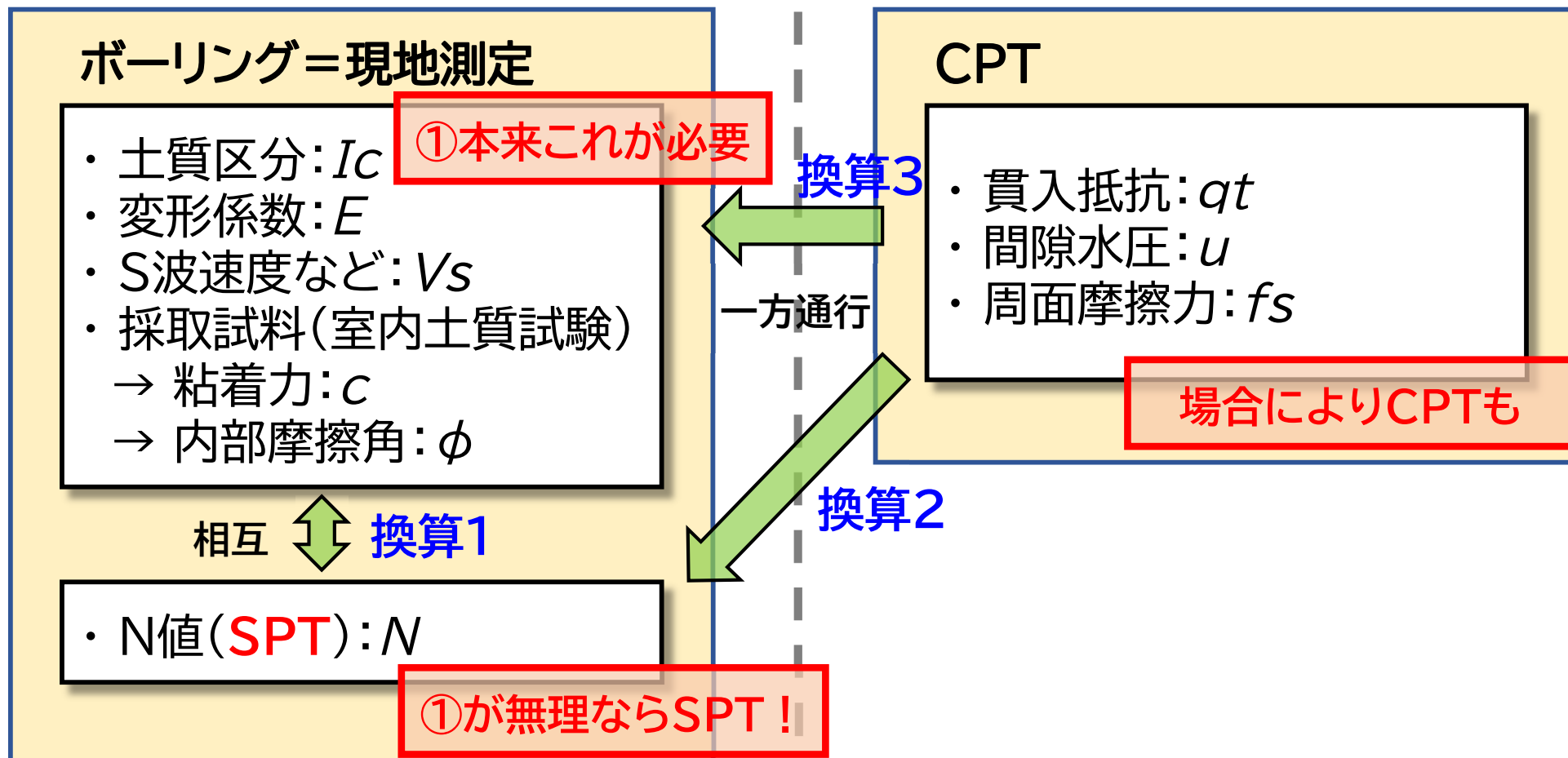
測定結果から**換算式を用**
いて設計定数を推定する。

- ・N値: N
- ・土質区分: I_c
- ・粘着力: c
- ・内部摩擦角: ϕ
- ・変形係数: E
- ・S波速度: V_s

洋上風力における地盤調査と換算関係



キャリブレーションとして、ボーリングとCPTを同地点で実施し、得られた結果を比較する



SPTやCPTは点の試験、物理探査がこれを面的に広げる

洋上風力における地盤調査と換算関係



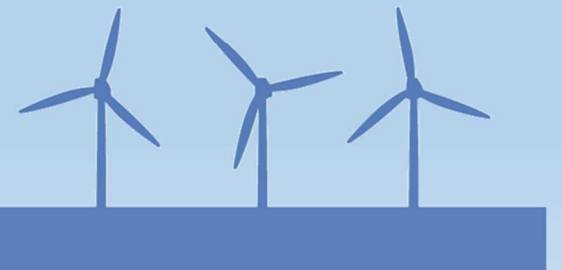
調査内容とキャリブレーション

| | | 換算1 | 換算1+2 | 換算3 |
|-------|------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| | 現地測定/土質試験 | SPT+現/試 | CPT+SPT+現現/試 | CPT+SPT+現現/試 |
| N値 | SPT: N | N | $qt, Fr, u \rightarrow Nc$ | $qt, Fr, u \rightarrow Nc$ |
| 内部摩擦角 | 三軸圧縮(CD): ϕ | $N \rightarrow \phi n$ | $Nc = N \rightarrow \phi c1$ | $qt, Fr, u \rightarrow \phi c2$ |
| 粘着力 | 三軸圧縮(UU): c | $N \rightarrow cn$ | $Nc = N \rightarrow cc1$ | $qt, Fr, u \rightarrow cc2$ |
| 変形係数 | 孔内載荷試験: E | $N \rightarrow En$ | $Nc = N \rightarrow Ec1$ | - |
| S波速度 | PS検層: Vs | $N \rightarrow Vsn$ | $Nc = N \rightarrow Vs1$ | - |

| | CAL | CAL | CAL | CAL |
|-------|-----|-------------------------------|---------------------------------|---|
| N値 | - | - | $N \Leftrightarrow Nc$ | $N \Leftrightarrow Nc$ |
| 内部摩擦角 | - | $\phi \Leftrightarrow \phi n$ | - | $\phi \Leftrightarrow \phi n \Leftrightarrow \phi c2$ |
| 粘着力 | - | $c \Leftrightarrow cn$ | - | $c \Leftrightarrow cn \Leftrightarrow cc2$ |
| 変形係数 | - | - | $E \Leftrightarrow Ec1(=En)$ | $E \Leftrightarrow En$ |
| S波速度 | - | - | $Vs \Leftrightarrow Vsc1(=Vsn)$ | $Vs \Leftrightarrow Vsn$ |

海域の地盤調査

- ・ 仮設構造物
- ・ CPT
- ・ SPT
- ・ その他の原位置試験
- ・ 物性値と換算
- ・ 試料採取



■ 試料採取



➤ 室内土質試験のための試料採取

✓ 試験の種類によって必要な土の状態が異なる
まず、“試験の種類”と“土の状態”について

■ 主な土質試験関係 規格・基準一覧表

| 分類 | 規格・基準番号 | 規格・基準の名称 |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 物理試験 | JIS A 1202 :2009 | 土粒子の密度試験方法 |
| | JIS A 1203 :2009 | 土の含水比試験方法 |
| | JIS A 1204 :2009 | 土の粒度試験方法 (案) |
| | JIS A 1223 :2009 | 土の細粒分含有率試験方法 (案) |
| | JIS A 1205 :2009 | 土の液性限界・塑性限界試験方法 |
| | JIS A 1224 :2009 | 砂の最小密度・最大密度試験方法 (案) |
| 透水試験 圧密試験 | JIS A 1225 :2009 | 土の湿潤密度試験方法 |
| | JIS A 1218 :2009 | 土の透水試験方法 |
| | JIS A 1217 :2009 | 土の段階载荷による圧密試験方法 |
| せん断試験 | JIS A 1227 :2009 | 土の定ひずみ速度载荷による圧密試験方 |
| | JIS A 1216 :2009 | 土の一軸圧縮試験 |
| | JGS 521 -2009 | 土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法 |
| | JGS 522 -2009 | 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験方法 |
| | JGS 523 -2009 | 土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験方法 |
| | JGS 524 -2009 | 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法 |
| | JGS 541 -2009 | 土の繰返し非排水三軸圧縮試験方法 |
| | JGS 542 -2009 | 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸圧縮試験方法 |
| JGS 543 -2009 | 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法 | |
| JGS 551 -2009 | 土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法 | |

乱した試料(SPTで採取)



乱れの少ない試料

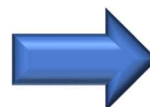


透水試験、圧密試験、せん断試験には「乱れの少ない試料」が必要！！

■ 試料採取

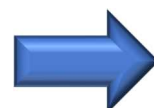


乱した試料(SPTで採取)



物理試験

乱れの少ない試料



成形した供試体



主に力学試験



試験機

● 乱した試料 (物理試験へ)

SPTサンプラー

オーガーボーリング

注) 含水を変化させない

= 特殊なサンプリング =
凍結サンプリング
GPサンプリング
気泡ボーリングによるサンプリング 他

● 乱れの少ない試料 (主に力学試験へ)

固定ピストン式シンウォールサンプラー

ロータリー式二重管サンプラー

ロータリー式三重管サンプラー

ブロックサンプリング

注) 運搬時に試料を乱さない

= 土質・硬軟に応じて選択 =

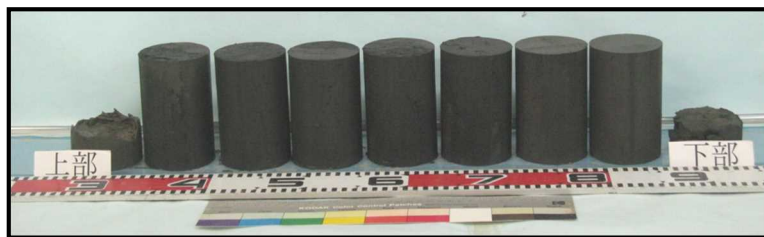
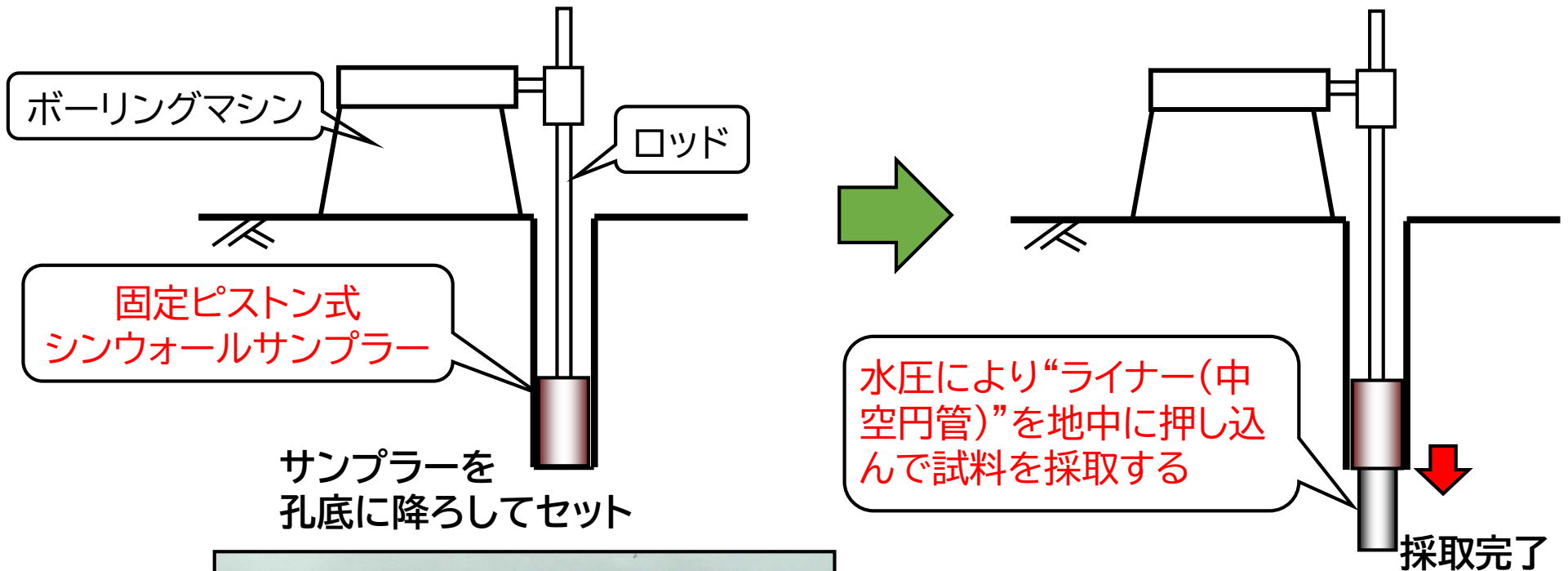
➡ 粘性土(柔らかい N=0~4)

➡ 粘性土(やや固い N=4以上)

➡ 砂質土・礫質土

注) ボーリングの孔径が異なる

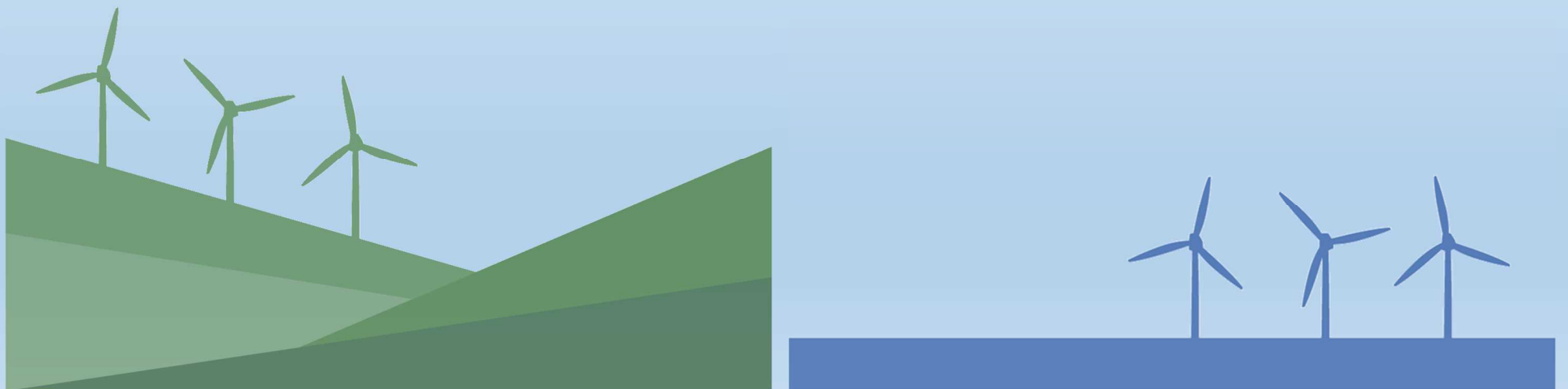
■ 乱れの少ない試料採取：採取イメージ



採取した試料は、ライナーから押し出し、成型して試験用の供試体とする。

| 種別 | 固定ピストン式 シンウォールサンプラー(水圧式) | ロータリー式 二重管サンプラー | ロータリー式 三重管サンプラー |
|------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| 適用地盤 | 粘性土($N=0\sim4$) | 粘性土($N=4$ 以上) | 砂質土・礫質土 |
| 掘削孔径 | $\phi 86\text{mm}$ | $\phi 116\text{mm}$ | $\phi 116\text{mm}$ |
| 備考 | 静的押込み:シンウォール | 回転切削押込み:デニソン | 回転切削押込み:トリプル |

室内土質試験



➤ 地盤調査における土質試験の目的

規格・基準によって定められた方法により、『土』の性質や特性を数値化し、客観的な評価を行えるようにする

- ✓ 地盤材料(土)は、粘土、砂、礫など様々な土粒子の集合体であり、堆積環境(場所、年代、履歴)や人為的な作用によって広範囲な材料特性を示す。
- ✓ 地盤材料について、一般的な材料(鋼材、コンクリート)のような「材料便覧」を作ることは現実的ではない。

■ 室内土質試験：種類



➤ 室内土質試験の種類

一般的な室内土質試験は『物理試験』、『力学試験』、『材料試験』に分けられる

| 物理試験 | 力学試験 | 材料試験 |
|--|--|--------------------------------|
| 含水比試験 土粒子の密度試験 粒度試験 液性限界・塑性限界試験 湿潤密度試験 | 圧密試験、透水試験 一軸圧縮試験 三軸圧縮試験 三軸伸長試験 繰返し非排水三軸試験 変形特性試験(三軸、中空ねじり) 一面せん断試験 | 締固め試験 CBR試験 配合試験 |
| • 土の基本的性質(物理特性)を求める試験 | • 土の力学的性質を求める試験 • 地盤の工学的課題(圧密沈下、支持力、液状化)に対応する試験データが得られる | • 盛土、堤防、地盤改良など土工材料としての性能を調べる試験 |

■ 室内土質試験：規格



➤ 土質試験の規格・基準

主要な土質試験の方法は、JISやJGS(地盤工学会)によって定められている(約80種類)

| 試験名称 | JIS/JGS | ISO/ASTM |
|--|------------|--------------------------------|
| 土の粒度試験 (Test method for particle size distribution of soils) | JIS A 1204 | ISO 17892-4 |
| 土の液性限界・塑性限界試験 (Test method for liquid limit and plastic limit of soils) | JIS A 1205 | ISO 17892-12 |
| 土の湿潤密度試験 Test method for bulk density of soils | JIS A 1225 | ISO 17892-2 |
| 土の段階載荷による圧密試験 (Test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading) | JIS A 1217 | ISO 17892-5 |
| 土の一軸圧縮試験 (Method for unconfined compression test of soils) | JIS A 1216 | ISO 17892-7 |
| 土の圧密非排水三軸圧縮試験(CU-条件) (Method for consolidated-undrained triaxial compression test on soils with pore water pressure measurements) | JGS 0523 | ISO 17892-2 |
| 単純せん断試験(単調載荷、繰返し載荷) (Direct simple shear tests(Monotonic, Cyclic)) | N/A | ASTM D6528-17 ASTM D8296-19 |
| 土の繰返し非排水三軸試験(液状化) (Method for cyclic undrained triaxial test on soils) | JGS 0541 | N/A |

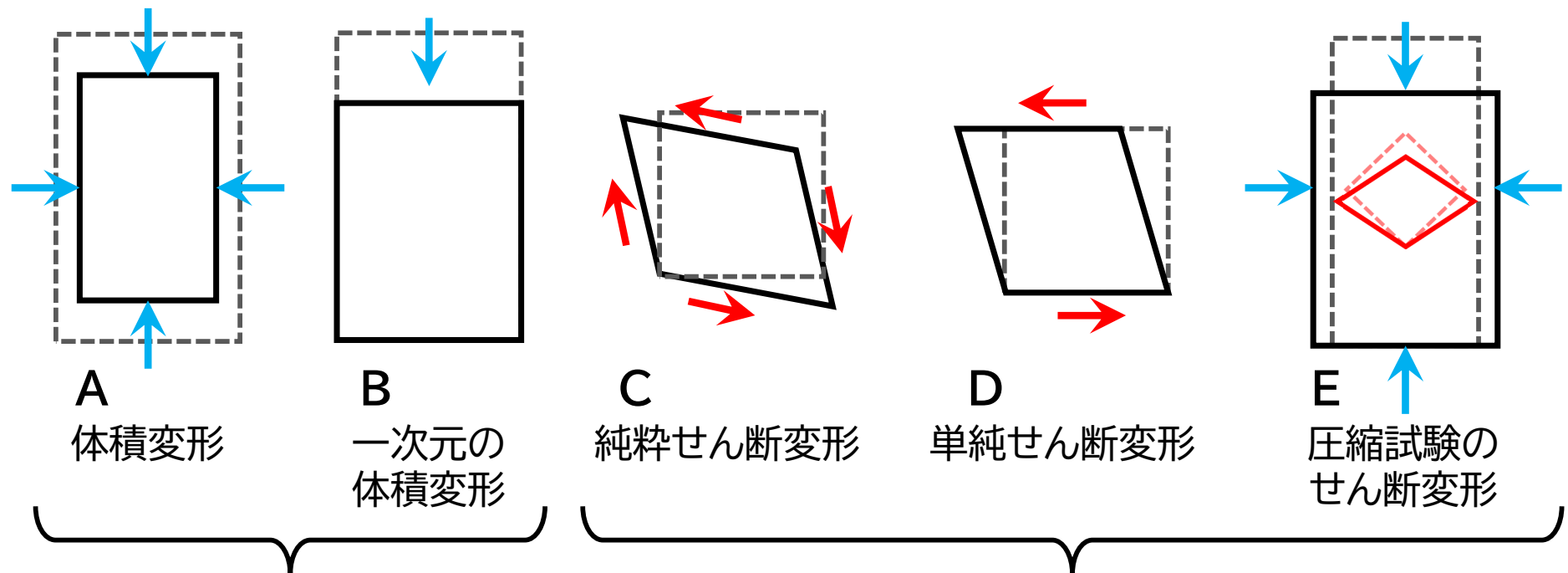
■室内土質試験：力学試験のせん断変形



➤ 力学試験のせん断変形について

- ✓ せん断変形とは、大きさはそのまま、形状が変わる変形をいう
- ✓ 体積変形とは、形状はそのまま大きさが変わる変形をいう

★ただし、地盤材料はせん断変形とともに体積変形が生じる。これをダイランシーという。



体積変形・体積変化をともなう

せん断変形・体積変化をともなわない

■ 室内土質試験：力学試験の種類



➤ 力学試験の種類について

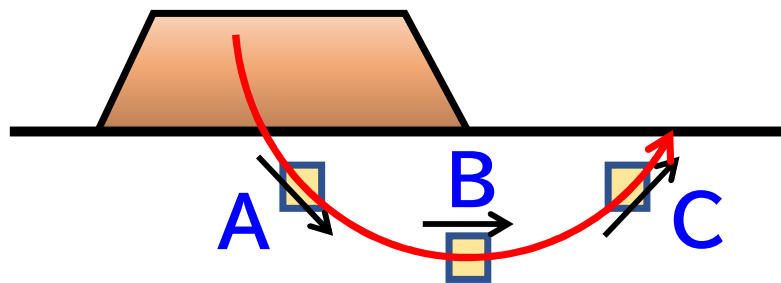
基本的に地盤材料は異方性であるため、強度特性は主にせん断応力や主応力の方向に依存する

すべり線上の地盤要素と力学試験の対応

A: 一軸圧縮試験、三軸圧縮試験

B: 一面せん断試験、単純せん断試験(DSS)

C: 三軸伸張試験



地盤のせん断抵抗は、A、B、Cに対応する試験をすべて実施し、評価するのが理想的。日本では、安全率法を主体とした設計手法が合理化され、Aのみで計算可能となっている。

■ 室内土質試験：試験機の紹介



➤ 単純せん断試験機(DSS)の紹介

洋上風力の調査用に単純せん断試験機を導入しました



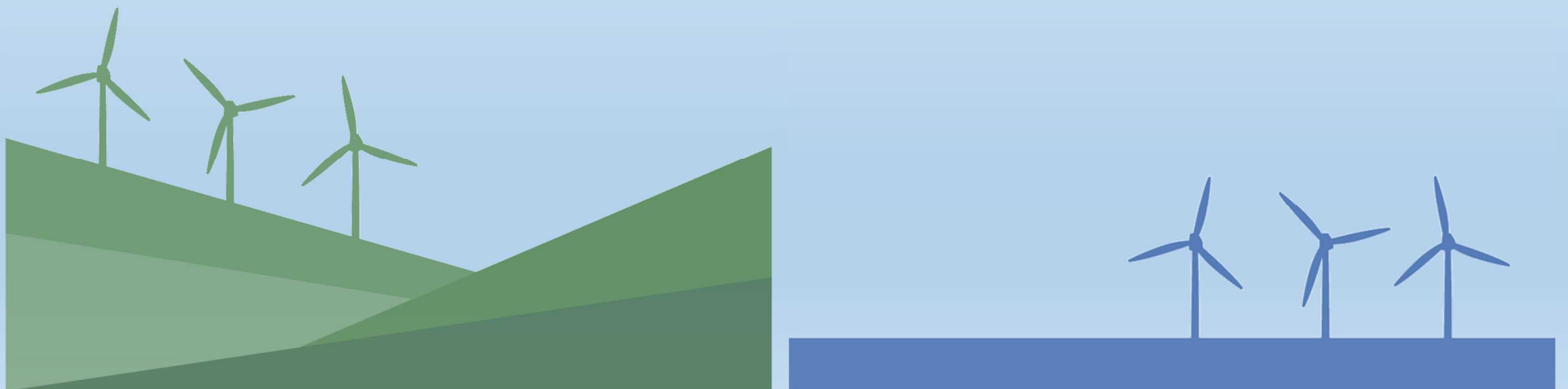
－ 試験機の特徴 －

供試体の側面には、薄いテフロン素材のリングを積層状に装着し、単純せん断モードを再現します。

また、応力制御、ひずみ制御両方に対応するため、2種類の载荷装置を設置しています。

供試体への载荷は、単調载荷、繰返し载荷、地震波をトレースする不規則波载荷が可能です。また、圧力セル内に供試体を設置することにより、供試体内の間隙水圧変化を測定可能です。

ここまでのまとめ



■ 役割分担を明確に



➤ 海上ボーリング / CPT / 物理探査

① 海上ボーリング(SPT)

- ・調査結果の根幹をなす『地層構成』や『各種物性値』は、直接詳細調査により確認して品質を確保

② 物理探査:音波探査

- ・調査結果は音波の反射断面(画像)
- ・ボーリング孔の間の『地層や支持層の連続性』を確認し、サイト全体の地層分布や地質構造を考察

③ 物理探査:海底微動アレイ探査

- ・初期モデルを与えて逆解析して求めたS波速度構造(次元)
- ・工学的基盤を直接確認したボーリング孔の間の『工学的基盤層の連続性』を考察

④ 各種コーン貫入試験(CPT)

- ・物理探査で地層構成が推定できる風車地点は、間接調査で工程短縮(荒天リスクも排除)

■ 役割分担を明確に

◆ モノパイルとしての支持力

- ✓ 周面摩擦、先端支持力、ばね定数
- ✓ ひずみ依存性
- ✓ 強度低下
- ✓ 支持層、工学的基盤

◆ 施工性の検討

- ✓ 一軸圧縮強度
- ✓ RQD, UCS, TCR, SCR, ...

RQD: Rock quality designation
UCS: Uniaxial Compression Test
TCR: Total core recovery
SCR: Solid core recovery

◆ 換算ほか

- ✓ 静的な定数は、おおむねCPTから換算可能(キャリブレーション地点必須)
- ✓ V_s 以外の動的定数は換算できない
- ✓ 船からのCPT実施であれば、水深50mでも大きな問題はない

■ 役割分担を明確に

◆ ドリルシップでできること

- ✓ CPT
- ✓ サンプルング(シェルビー ← JGS基準外)
- ✓ PS検層
- ✓ SPT

※ただし、固定足場以外でのサンプルング・PS検層・SPTは規格外の扱いであり、検証が必要となる。

◆ SPT or サンプルング / 原位置試験

- ✓ SPTは個数が圧倒的に多く、CPTとのキャリブレーションで有利
- ✓ サンプルングと原位置試験は、正確だが数が少ない

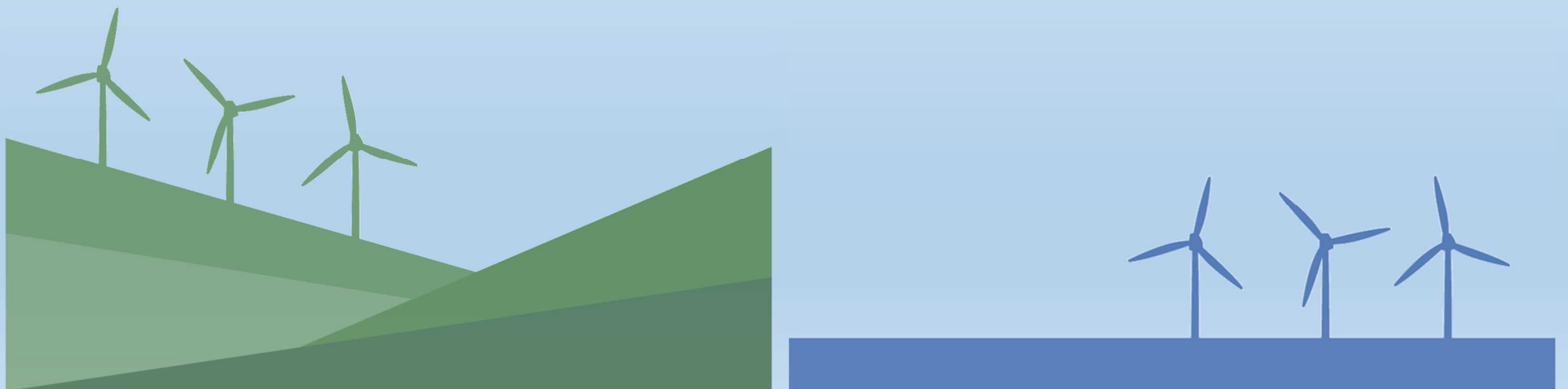
※CPT ⇒ N値 ⇒ 各物性値

■ 役割分担を明確に

- ◆ 水深45～50m:ドリルシップ
 - ✓ CPT
 - ✓ サンプルング(シェルビー ← JGS基準外)
 - ✓ PS検層
 - ✓ SPT

- ◆ 水深30m以浅:ドリルシップ+鋼製櫓
 - ✓ CPT:ドリルシップ or 鋼製櫓
 - ✓ サンプルング:鋼製櫓
 - ✓ PS検層:鋼製櫓
 - ✓ SPT:鋼製櫓

海外規格との比較



■ 海外規格との比較



➤ モノパイル式風車基礎と周辺地盤の関係

✓ 地盤への繰返し荷重

| | | | |
|-----|-------|---------|---------------|
| 地震動 | 数十秒程度 | 広範囲、半無限 | 非排水繰り返しを適用できる |
| 暴風 | 数時間 | 局所的、杭周辺 | 杭近傍→非排水→徐々に排水 |

✓モノパイル評価の課題

• 簡易な評価手法の確立

本来の流れ： 施工事例 ⇨ 数値解析 ⇨ 簡易な設計手法



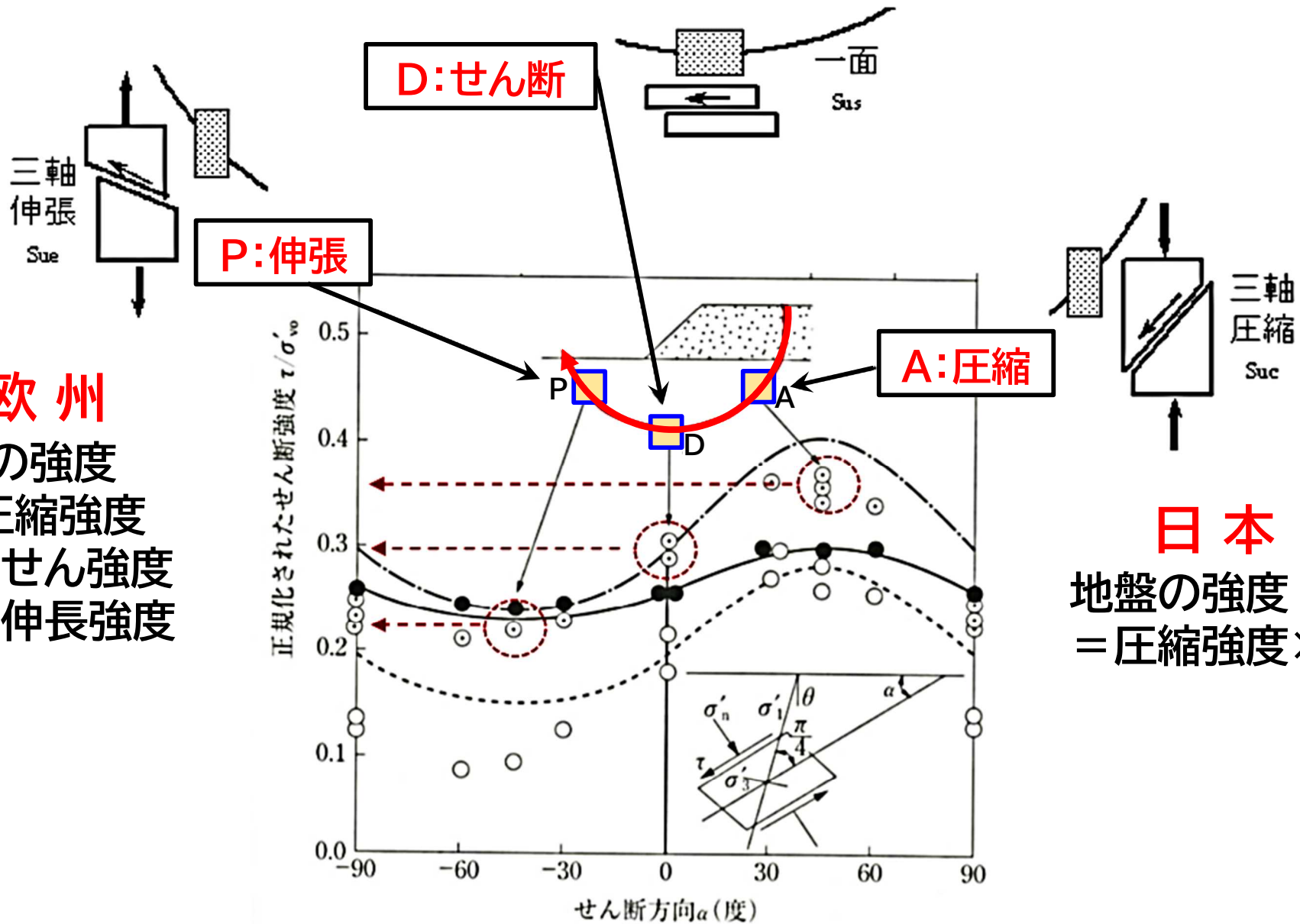
ただし、国内では施工事例がほとんどないため、海外手法から学ぶ必要がある。

• 土質試験の活用

力学試験データを用いる場合、うち最適試験法を検討が必要。

• 日本特有の外力条件を検討する必要がある ⇒ 台風、地震

■ 日本と欧州の設計思想の違い



欧州
 地盤の強度
 = 圧縮強度
 + せん断強度
 + 伸長強度

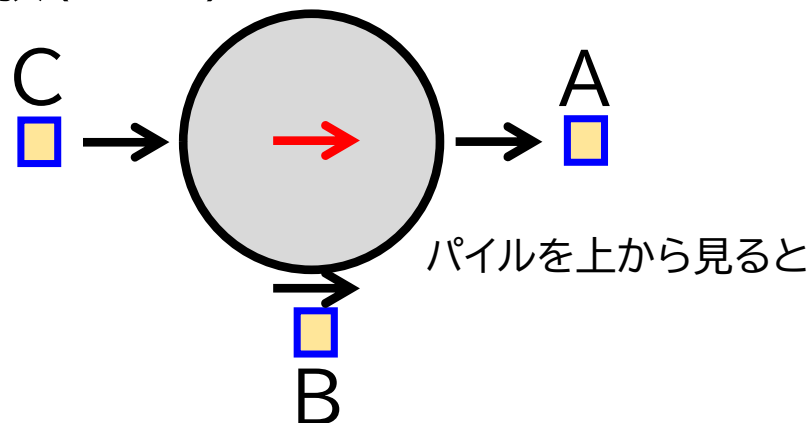
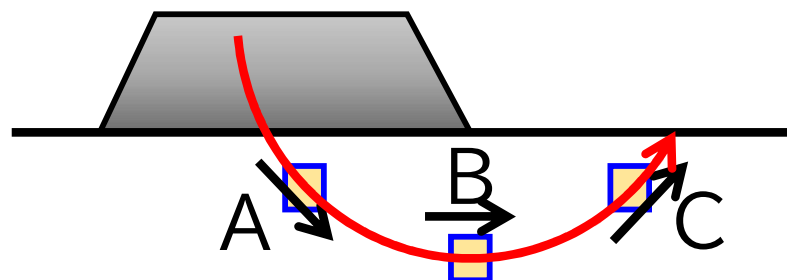
日本
 地盤の強度
 = 圧縮強度 × 安全率

➤ すべり線上の地盤要素と力学試験の対応

A: 三軸圧縮試験

B: 一面せん断試験、単純せん断試験(DSS)

C: 三軸伸張試験



欧州では洋上風力等の地盤評価で多用
(日本には基準無し)

➤ 地盤に作用する繰返し荷重を評価する土質試験

- ✓ 繰返し非排水三軸試験
 - ✓ 繰返し中空ねじり試験
- 液状化強度曲線、いわゆる「S-N曲線」が得られる

✓ 変形特性を求めるための繰返し三軸試験

✓ 変形特性を求めるための繰返し中空ねじり試験

変形特性が得られる
(等価剛性とせん断ひずみ(G_{eq} - γ 曲線)、履歴減衰率とせん断ひずみ(h - γ 曲線))

■日本と海外の考え方の違い



➤日本における掘削手法・作業条件と試験の適否

| | 掘削方式 | | | 作業場所 | | |
|------------|--------|---------|---------|------|-----|-------|
| | ロータリー式 | | | 仮設足場 | | 船 |
| | コアチューブ | ワイヤーライン | パーカッション | 鋼製檣 | SEP | |
| 標準貫入試験 | ○ | ※1 | × | ○ | ○ | ※1&※2 |
| PS検層 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ※2 |
| 孔内載荷試験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ※2 |
| 乱れの少ない試料採取 | ○ | ○ | × | ○ | ○ | ※2 |

※1: JISでは道具類の形状に規定がある。孔内型の形状はJISでは道具類規格外

※2: 船の上下動の影響を懸念する意見があるため、これを排除する必要がある。

■ 日本と海外の考え方の違い



➤ 日本と海外の掘削手法・作業条件と試験の適否

| | 試料の分類 | | | |
|--------------------|-------|--------|-------|--------|
| | JGS基準 | | 海外の基準 | |
| | 乱した | 乱れの少ない | 乱した | 乱れの少ない |
| SPTサンプラー | ○ | | ○ | |
| 固定ピストン式シンウォールサンプラー | | ○ | | ○? |
| ロータリ式二重管サンプラー | | ○ | | ○? |
| ロータリ式三重管サンプラー | | ○ | | ○? |
| シェルビーサンプラー | ○ | | | ○ |

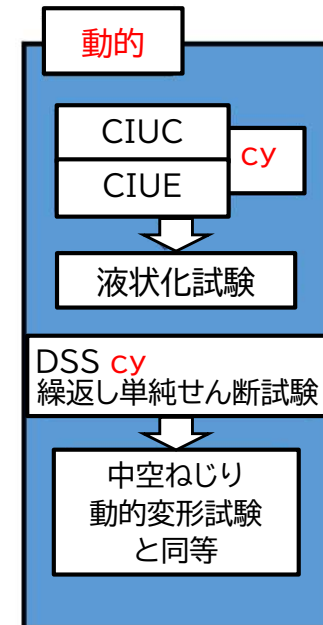
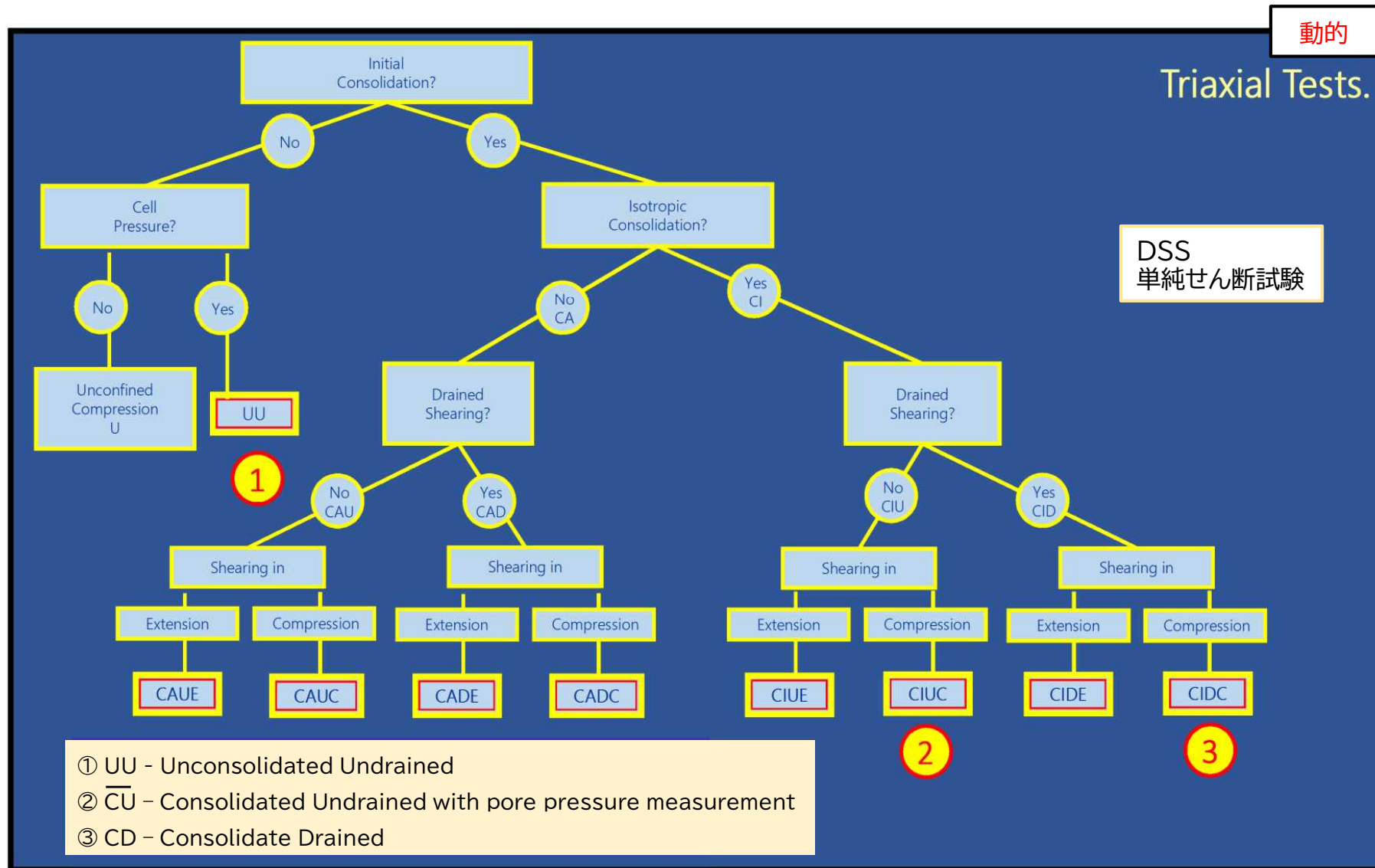
➤ 日本と海外の採取試料区分と試験の適否

| | 試料の分類 | | | |
|---------|-------|--------|-------|--------|
| | JGS基準 | | 海外の基準 | |
| | 乱した | 乱れの少ない | 乱した | 乱れの少ない |
| 物理試験 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 化学試験 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 粘土の力学試験 | | ○ | | ○ |
| 砂の力学試験 | | ○ | ○ | ○ |

■ 海外の室内土質試験



▶ 海外における主な試験名称との整合



➤ 室内土質試験: さまざまな試験条件を再現

- ✓ 載荷方向
三軸 or ねじり?
- ✓ 応力条件
等方 or 異方?
- ✓ 排水条件
排水 or 非排水?
- ✓ 圧密条件
圧密 or 非圧密?
- ✓ 載荷条件
急速 or 緩速?
静的 or 動的(繰り返し)?
圧縮 or 引張り?

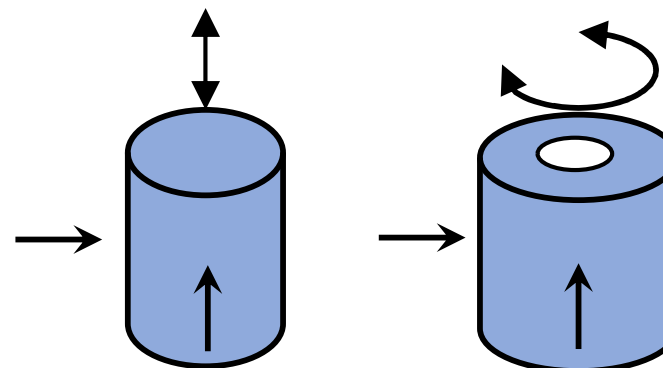
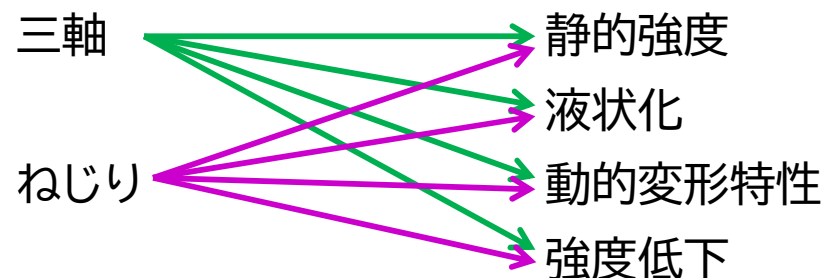
例①

非圧密・非排水(UU: Unconsolidated - Undrained)

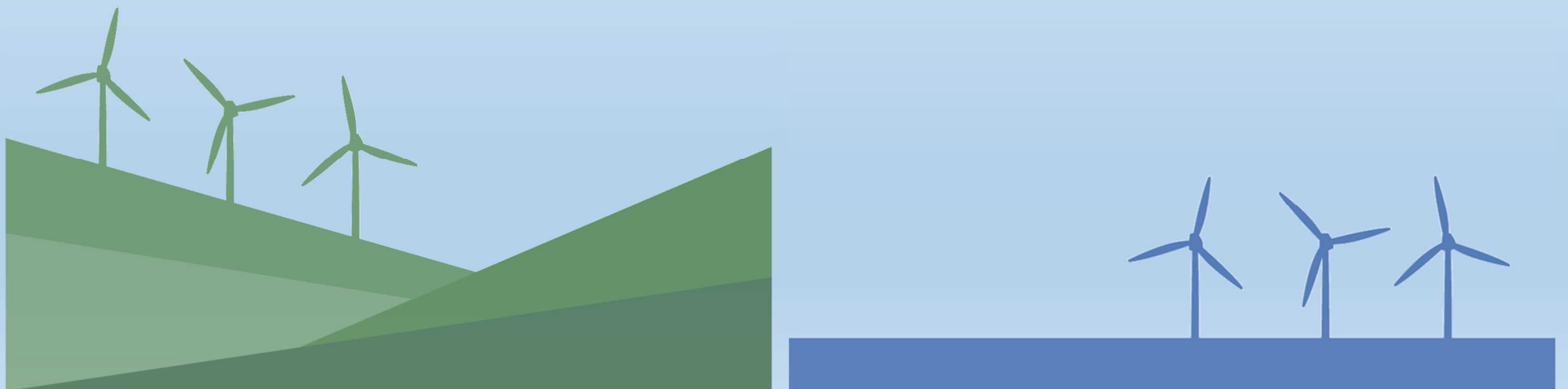
圧密・非排水(CU-: Consolidated - Undrained)

圧密・排水(CD: Consolidated - Drained)

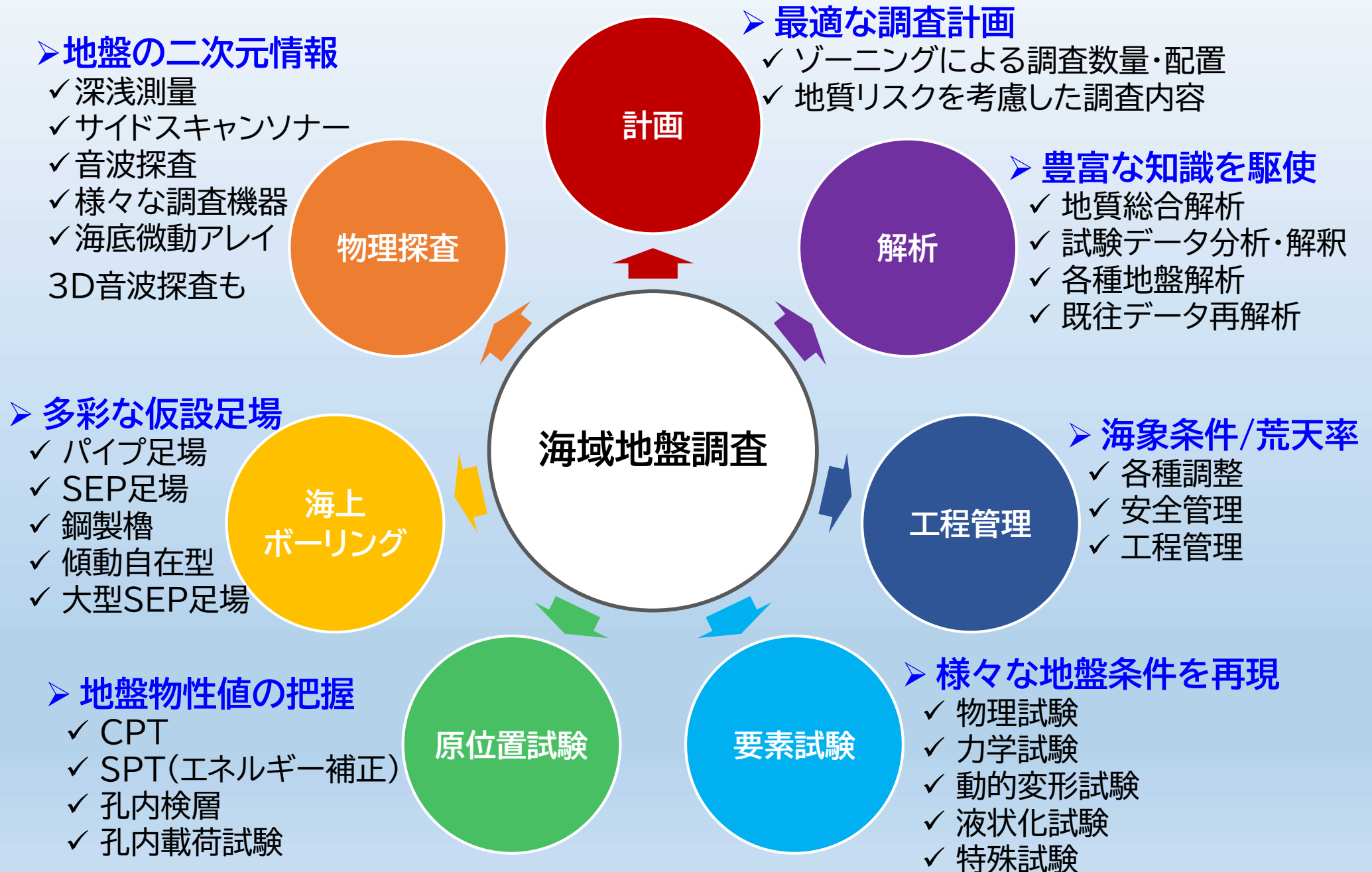
例②



川崎地質の業務範囲



川崎地質の海域地盤調査技術



ウィンドパル



川崎地質



最適解

- ◆ 海外のアライアンスメンバーからの各種調査技術、設計手法を提供
- ◆ VOS SHINEによるCPT調査の実施
- ◆ 設計支援

- ◆ 調査計画の策定
- ◆ SPT、各種試験、物理探査、ラボテストの実施
- ◆ 総合解析、審査対応
- ◆ 新技術の提供

I. 既往の国内調査技術に関する継続的な研究開発

II. 海外の調査技術から、日本の設計思想に適合した最適な調査手法を提案

- ◆ 公募や審査での他社との差別化

I. 日本と海外の最新動向が反映された最適な調査計画

II. 新技術の積極的活用により公募で勝てる概略調査

- ◆ 新技術の導入によるコスト削減
- ◆ 実績に裏打ちされた安全で確実な調査

