

国土交通省 北海道開発局
港湾空港部 港湾建設課監修

北海道の港湾・漁港の技術開発ビジョン
Technology No. 9



氷海域における着床式の洋上風力発電設備に 作用する氷荷重の算定に関する参考資料

令和4年4月

一般社団法人 寒地港湾空港技術研究センター

1. はじめに

2020年12月に策定された洋上風力産業ビジョン（第1次）（洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会）では、洋上風力発電は国民負担の低減効果や経済波及効果が大きいこと等から、2030年度までに1,000万kW、2040年度までに浮体式を含む3,000万kW～4,500万kWの案件を形成する目標が設定され、北海道では全国の1/3に相当する955～1,465万kWの地域別導入イメージが示された。

現在、北海道沿岸では日本海側中心に洋上風力発電の検討が進められているが、今後、太平洋側やオホーツク海側でも導入の可能性があると考えられる。しかし、オホーツク海で洋上風力発電施設を建設する際には、冬季の流氷等の作用により発生する氷荷重を設計で考慮する必要がある。

令和2年3月に策定された「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）」（以下、「基準解説」）は、電気事業法、港湾法及び海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用に関する法律に基づき、洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法の考え方を統一的に解説したものである。この基準解説における「第3章 洋上風力発電設備等に作用する自然条件等」の「3.12 その他の荷重」の解説で海水・着氷荷重の記載があり、“荷重の算定方法は、「氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル」（以下、「氷海域設計マニュアル」）、「JIS C 1400-3（風車－第3部：洋上風車の設計要件）」（以下、「JIS設計要件」）を参考にすることができる。”とされ、特に、「JIS設計要件」の「付属書E（参考）氷荷重に対する洋上風車支持構造物の設計に関する推奨」（以下、「JIS付属書E」）において、具体的な氷荷重の考え方が示されている。しかしながら、氷荷重の算定で必要不可欠な海氷の厚さや圧縮強度等、各種海氷の諸元についての記述はない。

本資料は、国立研究開発法人寒地土木研究所と一般社団法人寒地港湾空港技術研究センターに蓄積された氷海域の沿岸構造物の設計技術を基に、令和3年度に開催した「港湾における海氷の設計手法に関する懇談会」において、「JIS付属書E」で示された氷荷重の算定に必要な北海道オホーツク海沿岸の海氷の諸元等の整理とともに、洋上風車支持構造物に作用する氷荷重の試算を行ったものであり、オホーツク海沿岸の着床式洋上風力発電設備の建設の検討において氷荷重の算定のための参考資料としての利用を想定している。

なお、実海域の海氷の形状や強度は複雑であり、また、気候変動によるオホーツク海沿岸の海氷の減少も予測されており、実際の設計にあたっては、本資料を参考にしつつ、更なる調査・検討が必要である。

令和3年度「港湾における海氷の設計手法に関する懇談会」メンバー

木岡信治	寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 主任研究員
寺島貴志	株式会社クマシロシステム設計 専務取締役
早川哲也	国土交通省 北海道開発局 港湾建設課 課長
平野誠司	寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 上席研究員
鳴海日出人	一般社団法人 寒地港湾空港技術研究センター 調査研究部次長

2. 設計で考慮する海氷荷重

(1) 海氷設計荷重ケース

「基準解説」では、表 2.1 のとおり発電中の状態として D.1～D.5 の 5 つの海氷荷重、待機状態として D.6～D.8 の 3 つの海氷荷重を考慮することとされている。なお、D.3、D.4、D.7、D.8 については、海氷の水平荷重の解析の種類や荷重係数を変えたものであり、海氷の水平荷重としては同じ値を用いることとなる。

表 2.1 海氷荷重に関する荷重組み合わせ

状態	DLC	海氷	風	潮位	解析の種類	荷重係数
発電中	D.1	温度変動による水平荷重	NTM (最大スラストとなる風速) $V_{hub} = V_r \pm 2\text{m/s}, V_{out}$	H.W.L.	U	N
	D.2	温度変動又はアーチ効果による水平荷重	NTM (最大スラストとなる風速) $V_{hub} = V_r \pm 2\text{m/s}, V_{out}$	H.W.L.	U	N
	D.3	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	H.W.L.	U	N
	D.4	移動氷盤による水平荷重	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	H.W.L.	F	F
	D.5	水位変動による氷結板からの垂直荷重	考慮しない	H.W.L.	U	N
待機状態	D.6	氷丘及び氷壁からの圧力	EWM (乱気流モデル) $V_{hub} = V_1$	H.W.L.	U	N
	D.7	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	H.W.L.	F	F
	D.8	移動氷盤による水平荷重	EWM (乱気流モデル) $V_{hub} = V_1$	H.W.L.	U	N

以降、「JIS 付属書 E」で示された具体的な氷荷重の考え方を枠内で示し、氷荷重の算定に必要な海氷の諸元等について、【北海道オホーツク海沿岸での適応】として記述する。

(2) 北海道オホーツク海沿岸での適応

E.3 氷厚の選定

氷厚 h は、現地の海氷地図又は類似資料に記載されている統計データを解析して設定することが望ましい。この付属書の末尾に、データベースに関する参考資料を記載した。多くの事例では、氷厚及び氷破壊強度を組み合わせた解析を実施することになる。外洋の風車については、再現期間 50 年に相当する区分で氷厚を選定してもよい。群島部及び陸地に囲まれた水域の風車については、移動氷の厚さとして“通常の冬”に相当する値を選定し、定着氷板の厚さとしては再現期間 50 年の値を選定してもよい。

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

洋上風車の支持構造津物と海氷の接触面積の増加とともに海氷荷重が大きくなることから、適切な氷厚の設定は重要な課題である。北海道の沿岸の海氷の厚さに関する研究は多くはなく、下記の調査結果¹⁾を参考にしつつ十分な調査・検討が必要である。

図 2.1 は、2008 年 2 月にサロマ湖第 2 湖口の汀線近傍で実施された氷厚の調査結果¹⁾について、海氷の平面形状を正方形換算した辺長をパラメータとして示したものであり、氷厚は概ね 2.0m 以下であった。ただし、調査を実施した 2008 年は、過去の常呂のアメダスデータ 44 年分（1977～2019 年）から積算寒度を計算すると上から 36 番目であり、オホーツク海沿岸では比較的暖冬の年であった。

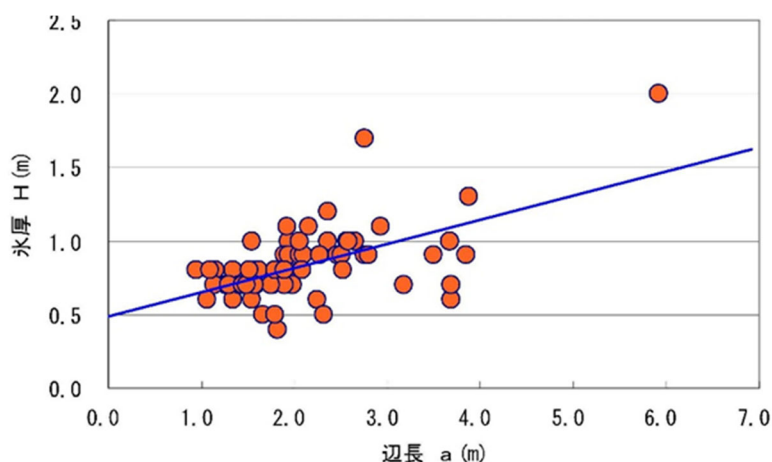


図 2.1 流水の辺長と氷厚の関係

一方、「JIS 付属書 E」において、バルト海等でのデータに基づいた氷厚の算定式が示され、熱収支を考慮した推定モデル²⁾等も提案されているが、北海道沿岸においては再現期間 50 年の氷厚 h は、氷厚の観測結果がない場合、アメダスデータを用いて式(1)による氷厚を参考にすることができる³⁾。

$$h = a(\sum T)^{0.5} \quad (1)$$

ここに、 h : 氷厚 (cm)
 $\sum T$: 積算寒度 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)
 a : 定数 (オホーツク海で 2.1～2.7)

E. 4.1 温度変化に由来する定着氷板による荷重 (DLC. E1)

熱的な氷圧力は、湖域及び汽水域においてだけ検討することが望ましい。北海のような塩水性の外洋では、熱的な氷圧力を無視できる。

ウィンドファーム内では、ウィンドファーム外縁部に位置する洋上風車の支持構造物において、熱による一方向性の氷圧力が最大となり、陸地から外洋に向けて又はウィンドファームの中心から半径方向外向きに作用すると仮定することが望ましい。砕氷船が熱的圧力下にある定着氷板を通して水路を開く場合は、開水路に向かって氷が膨張することとなり、式(E.2)に対応する力が発生する。

この熱的力は、式(E.2)で求められる。

$$F_t = f_i D \cdots \cdots (E.2)$$

ここに、

D : 水線における支持構造物の直径 $D < 4 \text{ m}$ の場合は、 $D = 4 \text{ m}$ とする。

f_i : 支持構造物の単位幅当りの力

ウィンドファーム内に単独で配置した支持構造物、又は外縁に配置した支持構造物に対しては、 f_i を 300 kN/m に設定する。外縁の列の内側、又はウィンドファーム内側の支持構造物に対しては、 f_i 値を 100 kN/m とする。

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

北海道の沿岸部では海氷が波浪・風等の外力により曲げ破壊や圧縮破壊される。図 2.2 は、海氷の平面的な大きさに関するオホーツク海沿岸部の現地調査結果⁴⁾で、海氷を正方形換算した場合の1辺の長さの分布を示しており、海氷の7～9割が5m以下のサイズとなっている。このため、大規模な氷盤が支持構造物に定着し、温度変化により水平荷重を作用する可能性は低いと想定され、オホーツク海は塩水性の外洋であることから、本氷力を無視できると考えられる。ただし、港内や閉鎖性水域では定着する可能性があるため、その場合は適切に算定することが必要である。

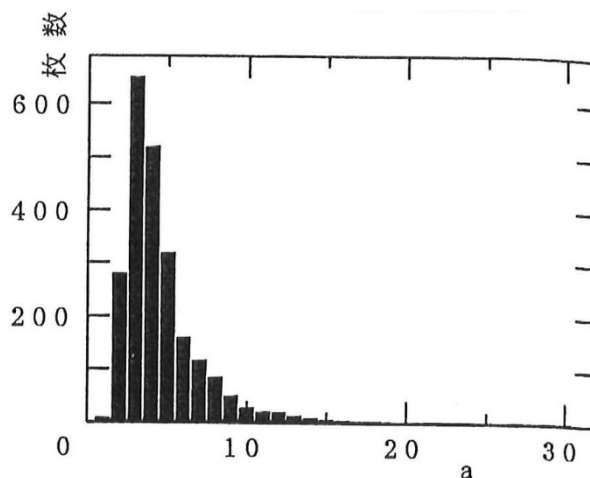


図 2.2 流氷の大きさと枚数

E. 4.2 水位変動又はアーチ効果に由来する定着氷板による水平荷重 (DLC. E2)

風車の支持構造物間，又は支持構造物と岸との間で，アーチ効果によって生じる一方向の水平圧力は，式(E.3)によって推定可能である。

$$F_v = f_v D \cdots \cdots (E.3)$$

ここに， D ：水線における支持構造物の直径

$D < 4 \text{ m}$ の場合は， D を 4 とする。

f_v ：200 kN/m

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

海氷のアーチ形成についての既往の研究⁵⁾では、水理模型実験により、氷盤を円形状とした場合の直径 a が支持構造物間の距離 b' （断面中心間ではなく断面外縁間の距離）の 0.2 倍以上で発生することを明らかにしている。表 2.2 は、オホーツク海沿岸部の現地調査結果⁶⁾に基づく、海氷の大きさの分布の各種統計値である。洋上風力発電設備の支持構造物間の距離は海氷の大きさより十分離れている場合が多いことから、これらを参考に、十分な調査・検討により、本荷重を無視することも可能と考えられる。

表 2.2 海氷サイズの基本統計量と 1992 年調査との比較

	2019 (>0.2m)	2019 (>1m)	1992
平均	2.14	3.21	4.67
中央値 (メジアン)	1.19	1.98	3.83
標準偏差	3.45	4.21	3.10
歪度	7.97	6.81	3.77
最大	65.1	65.1	45.3
標本数	3780	2203	2300

注) 「2019(>1m)」の欄は、1992 年調査との整合性をとるため、その最小サイズ (約 1m) 以上を対象にしたもの

E. 4.3 移動氷盤による水平荷重 (DLC. E3、DLC. E4 及び DLC. E7)

E. 4.3.1 鉛直柱状断面

氷が破碎されることによる最大静的力は、式(E.4)から推定してもよい。

$$F_d = k_1 k_2 k_3 h D \sigma_c \dots\dots (E.4)$$

ここに、 k_1 : 氷衝突面における支持構造物の形状に関する形状係数

k_2 : 支持構造物に対して氷が接触する場合の接触係数

k_3 : 氷厚と支持構造物直径との間の比率に関する、アスペクト比係数

D : 水線における支持構造物の直径

σ_c : 氷の破壊強度

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

①海氷の圧縮強度

図 2.3⁷⁾は、オホーツク海沿岸とサロマ湖内の海氷の一軸圧縮強度について海氷密度をパラメータとして示したものである。強度測定した歪み速度は一般的に海氷圧縮強度が最大となる $\dot{\epsilon} = 10^{-3}/\text{sec}$ で条件であり、圧縮強度の設定の参考にすることがきる。

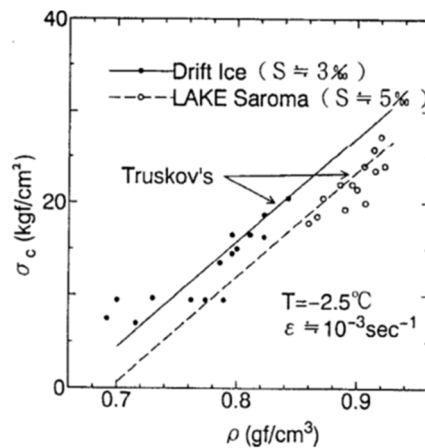


図 2.3 流氷とサロマ湖海氷の強度比較

②海氷の算定式

「JIS 付属書 E」に掲載の海氷力算定式に加えて、「海岸施設設計便覧」(土木学会、2000 年)において、支持構造物の幅 W と海氷厚 h の比 (アスペクト比) $W/h < 10$ の条件で次式が掲載されており、「JIS 付属書 E」と比較して経済的な設計が可能である。北海道の沿岸構造物で採用した実績もあり、条件に応じて使用することができる。

$$F = CW^{0.5}h\sigma_c \cdots \cdots (2)$$

F : 水平氷荷重 (kgf)

C : 構造物の形状係数で、矩形 6.8, 円形 5.0, 楔 (角度 90°) 型 4.5 とする。この係数は (cm)^{0.5} の次元を有すると考えてよい。

W : 構造物の幅 (cm)

h : 海氷の氷厚 (cm)

σ_c : 海氷の一軸圧縮強度 (kgf/cm²)。高さ 20cm, 直径 10cm の円筒供試体を用いて、歪み速度が 10^{-3} (1/s) のオーダーで計測された値である。

E. 4.3 移動氷から受ける水平荷重 (DLC. E3、DLC. E4 及び DLC. E7)

E. 4.3.2 傾斜断面

Ralston が 1977 年に発表した式が、アイスコーンを備えた洋上風車などの傾斜した構造物について有効である。また、この式は API によって推奨案として選定されている。引用された式は、 $0 < \alpha < 70$ の範囲にある傾斜に対して有効であり、ここで α は、水平面から測定した傾斜である。また、模型試験では、コーンに作用する氷荷重に関して、氷盤速度 1 m/s までは Ralston 式が安全側の値を与えることを示している。

コーンによって上方に曲げられている氷から受ける水平荷重は、式(E.5)による。

$$F_h = A_4 [A_1 \sigma_b h^2 + A_2 \rho_w g h D^2 + A_3 \rho_w g h (D^2 - D_T^2)] \cdots \cdots (E.5)$$

鉛直下向きの荷重は、式(E.6)による。

$$F_V = B_1 H + B_2 \rho_w g h (D^2 - D_T^2) \cdots \cdots (E.6)$$

ここに、 A_1, A_2, A_3, A_4 : 無次元の係数で、氷とアイスコーンとの間の摩擦率

B_1 及び B_2 : μ 及びすい (錐) 角 α の関数である。係数の値は、図 E.1 を参照する。

σ_b : 氷の曲げ強度。0.26 σ_c 以上とする。

h : 氷床の厚さ

ρ_w : 水の密度

g : 重力加速度

D : 水線におけるコーン直径

D_T : コーン上部の直径 (=タワーの直径)

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

図 2.4⁸⁾は、オホーツク海沿岸の海氷の一軸圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_f の関係を示したものであり、曲げ圧縮強度の設定の参考にすることがきる。

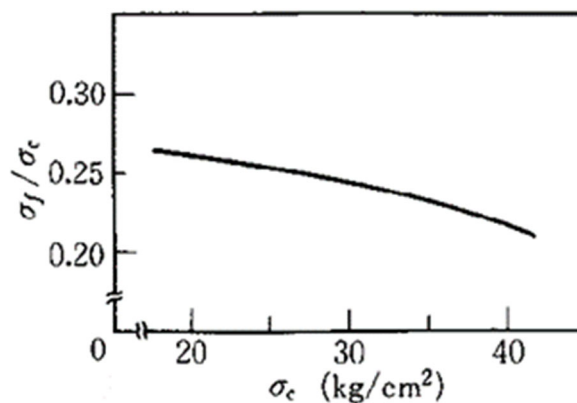


図 2.4 一軸圧縮強度と曲げ強度の関係

E. 4.4 定着氷板による鉛直荷重 (DLC. E5)

水位が変動する場合に、支持構造物に凍りついた定着氷板によって発生する鉛直荷重は、式(E.9)の支持構造物表面の付着部におけるせん断強度 $V\tau$ に制限されるか、又は氷が支持構造物の周りで環状に割れている場合は、式(E.10)の曲げ強度 V_b によって制限される。この二つの荷重のうち低い方によって制限が決まり、その値を用いることが望ましい。

$$V\tau = A\tau \cdots \cdots (E.9)$$

ここに、

τ : 付着せん断強度

$A = \pi Dh$: 円柱状の鉛直支持構造物における接触面積

$$V_b = 0.6A\sqrt{\sigma_b\rho g\Delta z} \cdots \cdots (E.10)$$

ここに、

A : 接触面積

σ_b : 氷の曲げ強度。0.26 σ_b 以上とする。

ρ : 水の密度

g : 重力加速度

Δz : 水位差

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

E. 4.1 でも記載したとおり、大規模な氷盤が支持構造物に定着し、温度変化により水平荷重を作用する可能性は低い状況であり、本氷荷重を無視することも可能と考えられる。ただし、港内や閉鎖性水域では定着する可能性があるため、適切に算定する必要がある。図 2.5⁹⁾は、オホーツク海沿岸の海氷による海氷と鋼材の付着せん断強度 τ について、支持構造物の直径 $2a$ を海氷厚 h で除した $2a/h$ をパラメータとして海氷温度別に示したものであり、付着せん断強度の設定の参考にすることがきる。

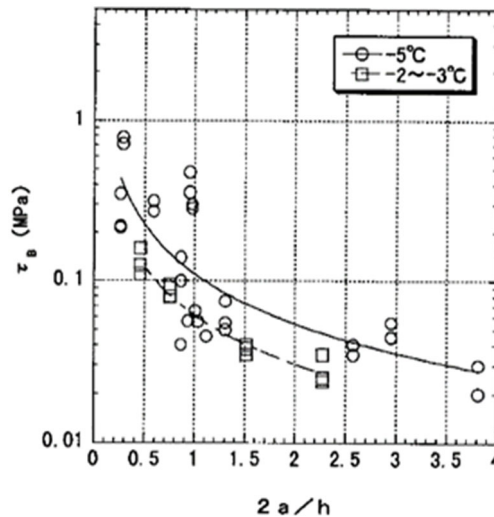


図 2.5 温度別凍着強度

E. 4.5 氷脈による圧力 (DLC. E6)

DLCE6 は、極値氷荷重が再現期間 1 年の極値風条件と組み合わされた状況を対象としている。支持構造物に最大せん断荷重を与える風荷重を適用することが望ましい。

移動中の氷床に囲まれた氷脈が支持構造物を押している場合は、非常に大きな荷重が発生する可能性がある。そのような氷脈は、氷片で構成されており、氷片が一緒に凍りついて 2~3 m の厚さで固められたものが含まれる。押し固められた氷の上下にある、押し固められていない氷塊は、氷荷重に対してほとんど寄与しない。

氷荷重は、氷が破砕される場合又は氷脈が水平面内で曲げられて破壊する場合のいずれの仮定についても概算される。氷脈によるリスクを伴う海域については、通常は風車を設置しないほうがよい。

【北海道オホーツク海沿岸での適応】

①オホーツク海沿岸における氷脈圧力の取扱い

北海道オホーツク海沿岸の紋別沖（沖合 2.4 km、水深 16m）と湧別沖（沖合 1.5 km、水深 16m）で IPS（カナダ ASL 社製 IPS-4）により、海氷の喫水の現地調査を行った研究¹⁰⁾があり、喫水の凹凸が確認され、圧力やせん断によって破壊された氷片が山脈状に積み重なって形成されるアイスリッジであると推察されている。図 2.6 は、その喫水深の超過確率であり、発生頻度は非常に小さいものの湧別沖において喫水深 10m を超えるものも観測¹¹⁾されている。

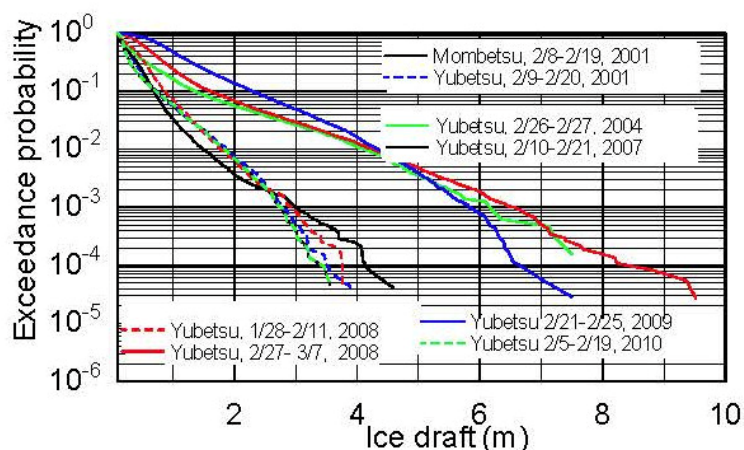


図 2.6 流水喫水深の超過確率分布

「JIS 付属書 E」には、「リッジによる氷荷重が作用するような海域には風車を設置すべきではない」とし、氷荷重の算定方法が示されていない。これは欧州の特にバルト海北部では平坦氷が発達しやすく、極めて強度の強いリッジが発生することを踏まえてのことと推察される。一方、API Recommended Practice 2N 2nd edition(Dec1,1995)において、リッジによる氷荷重は、「固結層による氷荷重」と「キールによる氷荷重」の和として算定され、「キールによる氷荷重」の算定方法が以下のとおり示されている。なお、「固結層による氷荷重」は、「JIS 付属書 E」による「移動氷から受ける水平荷重」の算定式により求めることができる。

$$F_2 = \sigma_p \left\{ 1 + a \frac{t}{D} \left(1 + b \frac{t}{D} \right) \right\} D \cdot t$$

$$a = 0.89 \{ 1 + 1.82 \tan(\varphi - 17^\circ) \}$$

$$b = 0.31 \{ 1 + 2.01 \tan(\varphi - 8^\circ) \}$$

$$\sigma_p = 2C \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

ここで、 t : キールの深さ (m)

D : 支持構造物の直径 (m)

φ : 海氷の内部摩擦角

C : 海氷の粘着力

オホーツク海の北海道沿岸においては、平坦氷は発達しにくく、比較的強度も低いと考えられる。しかし、北海道沿岸のリッジの調査はほとんどないため、既往の研究の発生頻度や氷力も踏まえて十分な調査・検討が必要である。

②海氷の圧縮強度

E.4.3.1 を参照すること。

③海氷の内部摩擦角と粘着力

既往の様々な研究成果を整理すると、内部摩擦角は $10 \sim 70^\circ$ 、粘着力は $0 \sim 20 \text{ kPa}$ の極めて広い範囲となっており、せん断変位速度等の試験条件の相違も指摘¹²⁾されていることから、十分な調査・検討の上、設定する必要がある。

3. 洋上風力発電設備の支持構造物に作用する海水荷重の試算

(1) 洋上風力発電設備の諸元の設定

海水荷重の試算を行うのはモノパイル基礎とし、国土交通省港湾局による「2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方に関する検討会」第1回の資料4「基地港湾の規模及び配置に関する検討について」(一般社団法人日本埋立浚渫協会)に基づき、表3.1に示すとおり発電規模10MW級、15MW級、20MW級を想定して、モノパイル支持構造の諸元を設定する。なお、海水荷重の関係では各諸元の内、海水との接触面積の算定に使用するモノパイルの直径が重要となる。

表 3.1 モノパイル基礎の諸元

	10MW	15MW	20MW
モノパイル直径	7.5m	9.5m	11.0m
モノパイル長さ	70m	70m	70m
モノパイル重量	1,100t	1,500t	1,800t

(2) 各海水荷重の試算

①温度変化による水平荷重(E.1)

直径 D に応じて表 3.2 の通り試算される。

表 3.2 温度変化による水平荷重(E.1) 試算結果

	10MW	15MW	20MW
直径	7.5m	9.5m	11.0m
水平荷重 (外縁)	2,250kN	2,850kN	3,300kN
水平荷重 (内側)	750kN	950kN	1,100kN

【計算例】(10MW の場合)

$$\begin{aligned}
 F_t &= f_t D \\
 &= 300 \text{ kN/m} \times 7.5 \text{ m} \\
 &= 2,250 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

ここで、支持構造物に作用する単位幅当りの力 $f_t=300 \text{ kN/m}$

(ウィンドファームの外縁の風車を想定)

水際における支持構造物の直径 $D=7.5 \text{ m}$

②水位変動又はアーチ効果に由来する定着氷板による水平荷重 (E. 2)

直径 D に応じて表 3.3 の通り試算される。

表 3.3 水位変動又はアーチ効果に由来する定着氷板による水平荷重 (E. 2)

	10MW	15MW	20MW
直径	7.5m	9.5m	11.0m
水平荷重	1,500kN	1,900kN	2,200kN

【計算例】 (10MW の場合)

$$\begin{aligned}
 F_v &= f_v D \\
 &= 200 \text{ kN/m} \times 7.5 \text{ m} \\
 &= 1,500 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

ここで、支持構造物に作用する単位幅当りの力 $f_v=200 \text{ kN/m}$

水際における支持構造物の直径 $D=7.5 \text{ m}$

③移動氷から受ける水平荷重 (E. 3, E. 7 : 短期荷重, E. 4, E. 8 : 疲労荷重)

直径 D に応じて表 3.4 のとおり試算される。

表 3.4 移動氷から受ける水平荷重 (E. 3, E. 7, E. 4, E. 8)

	10MW	15MW	20MW
直径	7.5m	9.5m	11.0m
アスペクト比係数 K_3	1.225	1.181	1.158
水平荷重	6,202kN	7,573kN	8,598kN

【計算例】 (10MW の場合)

$$\begin{aligned}
 F_d &= k_1 k_2 k_3 h D \sigma_c \\
 &= 0.9 \times 0.5 \times 1.225 \times 0.75 \text{ m} \times 7.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ MPa} \times 1,000 \\
 &= 6,202 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

ここで、形状係数 $k_1 = 0.9$ (円形断面 : 0.9、長方形断面 : 1.0)

接触係数 $k_2 = 0.5$ (氷盤が連続的に移動している時)

$$\begin{aligned}
 \text{アスペクト比係数 } k_3 &= 1.225 (k_3 = \sqrt{1 + 5h/D} = \sqrt{1 + 5 \times 0.75 \text{ m} \div 7.5 \text{ m}} \\
 &= 1.2247 \approx 1.225)
 \end{aligned}$$

氷厚 $h=0.75 \text{ m}$ (オホーツク海での再現期間 50 年に相当)

水際における支持構造物の直径 $D=7.5 \text{ m}$

氷の破壊強度 (圧縮強度) $\sigma_c = 2.0 \text{ MPa}$ (サロマ湖を含むオホーツク海の実績値)

④水位変動による氷結板からの垂直荷重 (E. 5)

直径 D に応じて表 3.5 のとおり試算される。

表 3.5 水位変動による氷結板からの垂直荷重 (E. 5)

	10MW	15MW	20MW
直径	7.5m	9.5m	11.0m
氷荷重	239kN	303kN	351kN

【計算例】 (10MW の場合)

$$\begin{aligned}
 V_{\tau} &= A\tau \\
 &= \pi Dh\tau \\
 &= \pi \times 7.5m \times 0.75m \times 0.02MP_{\alpha} \times 1,000 \\
 &= 353kN
 \end{aligned}$$

ここで、氷厚 $h=0.75m$

水際における支持構造物の直径 $D=7.5m$

付着せん断強度 $\tau = 0.02MP_{\alpha}$ (オホーツク海の実績値)

$$\begin{aligned}
 V_b &= 0.6A\sqrt{\sigma_b\rho g\Delta Z} \\
 &= 0.6 \times \pi \times 7.5m \times 0.75m \times \sqrt{0.26 \times 2.0MP_{\alpha} \times 10^6 \times \frac{1000kg}{m^3} \times 9.81m/s \times 0.1m} \\
 &= 239,353N \approx 239kN < 353kN
 \end{aligned}$$

ここで、氷の曲げ強度 $\sigma_b = 0.26\sigma_c$ (氷の破壊強度)

氷の密度 $\rho = 1000kg/m^3$

重量加速度 $g = 9.81m/s$

水位差 $\Delta Z = 0.1m$ (仮定)

V_{τ} と V_b を比較すると V_b が小さいため、 $V_b = 239kN$ が作用する。

⑤氷床及び氷脈からの圧力 (E. 6)

直径 D に応じて表 3.6 のとおり試算される。

表 3.6 氷床及び氷脈からの圧力 (E. 6)

	10MW	15MW	20MW
直径	7.5m	9.5m	11.0m
固結層氷荷重	6,202kN	7,573kN	8,598kN
キール氷荷重	778kN	847kN	904kN
合計氷荷重	6,980kN	8,420kN	9,502kN

【計算例】 (10MW の場合)

- ・固結層氷荷重は、表 3.4 と同様。
- ・キール氷荷重

$$\begin{aligned} a &= 0.89\{1 + 1.82\tan(\varphi - 17^\circ)\} \\ &= 0.89\{1 + 1.82\tan(14^\circ - 17^\circ)\} \\ &= 0.805 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= 0.31\{1 + 2.01\tan(\varphi - 8^\circ)\} \\ &= 0.31\{1 + 2.01\tan(14^\circ - 8^\circ)\} \\ &= 0.375 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 2C\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= 2 \times 2.3\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{14^\circ}{2}\right) \\ &= 5.888kP_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= \sigma_p \left\{1 + a \frac{t}{D} (1 + b \frac{t}{D})\right\} D \cdot t \\ &= 5.888kP_a \times \left\{1 + 0.805 \times \frac{8m}{7.5m} (1 + 0.375 \times \frac{8m}{7.5m})\right\} \times 7.5m \times 8m \\ &= 778kN \end{aligned}$$

ここに、海氷の内部摩擦角 $\varphi = 14^\circ$ (既往研究による実測値)

海氷の粘着力 $C = 2.3kP_a$ (既往研究による実測値)

キールの深さ $t=8m$

水際における支持構造物の直径 $D=7.5m$

<参考文献>

- 1) 「オホーツク海沿岸における海氷のサイズに関する現地調査結果」(河合孝治・木岡信治・成田恭一・寺島貴志・竹内貴弘, 第 24 回寒地技術シンポジウム, 2008 年)
- 2) 「雪・氷面上の熱収支を考慮した海氷厚推定の理論モデルとその計算法について」(木岡信治、寒地土木研究所月報, No. 794, 2019 年 7 月)
- 3) 「氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル」(社団法人 寒地港湾技術研究センター, 平成 8 年 3 月)
- 4) 「氷盤の大きさに関する研究」(國松靖・秋原真哉・榎国夫・高木雄一郎・原文宏・佐伯浩, 第 8 回寒地技術シンポジウム, 1992 年)
- 5) 「海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究」(木岡信治・菅原健司・大井啓司、寒地土木研究所, H18-H22)
- 6) 「北海道オホーツク海沿岸部における海氷のサイズ分布に関する一考察」(木岡信治・石田麻衣子・長谷川朋毅・竹内貴弘・佐伯浩, 土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol. 76, No. 2, 2020 年)
- 7) 「オホーツク海における北海道とサハリン沿岸域海氷の一軸圧縮強度について」(正木孝治・本田秀樹・河合孝治・大塚夏彦・黒木幹男・佐伯浩, 海洋開発論文集、1996 年)
- 8) 「海氷の結氷機構と強度特性」(佐伯浩, 土木学会論文集 第 357 号 II-3 号, 1985 年 5 月)
- 9) 「海氷と諸材料間の凍着強度に関する実験的研究」(宇佐美宣拓・寺島貴志・阿部慎也・佐藤光一・佐伯浩, 海洋開発論文集、第 15 卷、1999 年 5 月)
- 10) 「海氷の出現特性と構造物等への作用に関する研究」(木岡信治・菅原健司・大井啓司、寒地土木研究所, H18-H22)
- 11) Fukamachi, Y, Mizuta G, Ohshima, I., Aota, M and Watatsuchi, M (2001). “Mooring Measurement of Ice Thickness off Yubetsu, Hokkaido,” Proc the International Symposium on Atmosphere-Ocean-Cryosphere, Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment, edited by M. Wakatsuchi and T. Hara, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, pp32-33.
- 12) 「Unconsolidated layer model のせん断強度特性に関する基礎的研究」(松尾優子・近藤浩文・横山茂・木岡信治・佐伯浩, 海洋開発論文集, 第 19 卷, 2003 年)

国土交通省北海道開発局港湾空港部港湾建設課 監修

氷海域における着床式の洋上風力発電設備に作用する
氷荷重の算定に関する参考資料

令和4年4月発行

編集：「港湾における海水の設計手法に関する懇談会」メンバー
