

寒冷地海洋構造物の設計法

佐 伯 浩

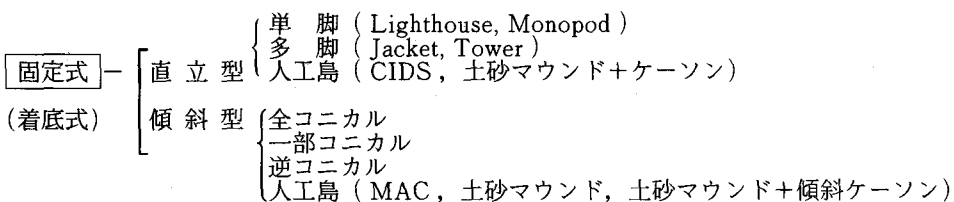
1. まえがき

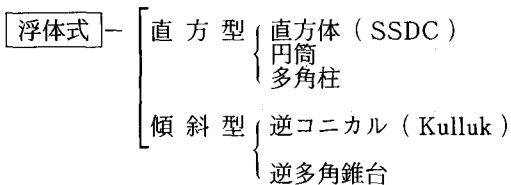
20年ほど前から、北米、北欧それにソ連の各国において海水の力学特性、海水と海洋構造物間の相互作用、氷海域向けの新構造型式の開発それに氷海域におけるリモートセンシング技術の開発が積極的に進められてきている。また、我が国においても15年ほど前から同様の研究が始められているが、特に構造的に作用する全氷力に関する研究が集中的に行われている。このように海水に関連した研究が活発になってきた原因にはいくつか考えられるが、その最大の原因は、極地（Arctic Area）あるいは亜極地（Subarctic Area）に石油・天然ガスといったエネルギー資源の埋蔵が確認されはじめ、1960年代後半に、アラスカのボーフォート海に面したブルドーベイで石油の採掘が始められたことである。現在、海水の影響を受ける海域での石油の探査及び採掘が行われているところは、アラスカ及びカナダの北極海沿岸海域とカナダの大西洋岸、ソ連シベリヤの北極海に面した沿岸、アラスカの西海岸、サハリンの北東沿岸さらにバレンツ海等である。また、中国の渤海においても10年以上も前から掘削が行われている。特に北極海域は地球上最後の大石油埋蔵地域と考えられていて開発の期待は大きい。アラスカ・カナダの北極海沿岸だけでも3,200億バレルの原油と2,500兆立方フィートの天然ガスの埋蔵が推定されている。

さて、このような極寒冷地に海洋構造物を建設する場合、その構造物の設計に当っては解決しなければならない多くの技術的課題が残されている。特に氷海域においては、海水と構造物の相互作用が問題となるが、その他に海水の強度及び力学特性、氷象と海水の移動・運動特性の解明、耐寒・耐氷建設材料の開発、海水に対する新しい構造型式の開発、海水移動による海底地型の変化の予測法、極低温条件下での施工法の開発等解決すべき問題は多い。ここでは主に種々の型式の構造物に作用する海水の力について述べることにする。

2. 海洋構造物の型式

氷海域に建設される海洋構造物の型式を分類すると次のようになる。





半潜式 直立型—多脚

一般の海洋構造物と同様に、氷海域に建設される海洋構造物も固定式（着底式）、浮体式それに半潜式に分けられる。また特別な場合完全潜式も考えられている。これら3つの分類は図1に示されているように、設置水深と氷象条件によって決定される。水深の比較的浅い所に建設される場合は

固定式あるいは着底式が多く、水深が深くて、氷象条件がそれほど厳しくない所では浮体式や半潜式が採用される。また水深が20m程度以上で氷象条件が厳しくない所では浮体式が用いられる例がある。

1) 固定式（着底式）構造物

この型式は大きく分けて直立型と傾斜型に分けることができる。これは氷盤と接する面が直立であるか傾斜しているかによって分けられる。移動する半無限の氷盤に構造物が貫入する時、氷盤と構造物の面が直角の場合は氷盤が接触面で圧壊したり、氷盤が座屈しながら貫入するし、また構造面が傾斜している場合は氷盤が曲げ破壊しながら貫入する。構造物に作用する

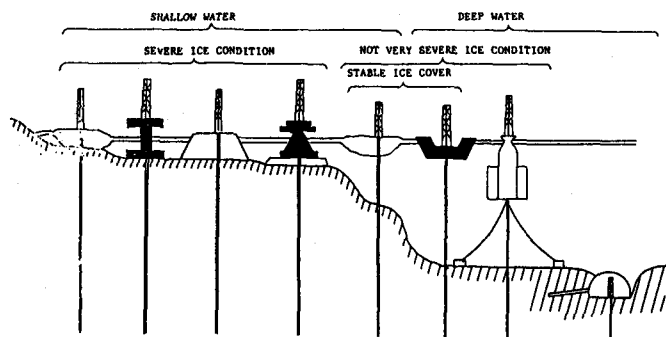


図-1 水深変化に対する構造物の基本型式

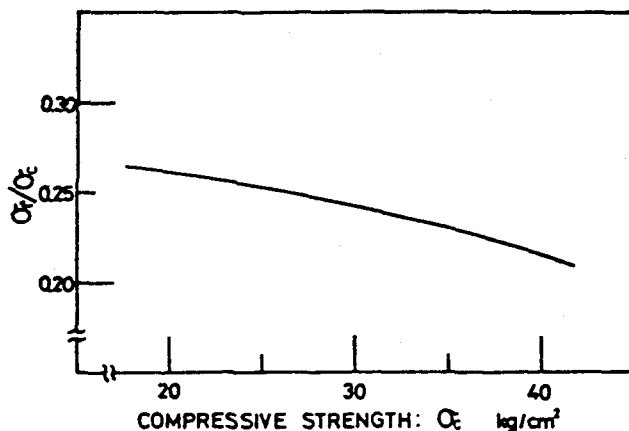


図-2 一軸圧縮強度と曲げ強度の関係

最大の氷力は氷盤が破壊する時であるから、氷盤を破壊し易い構造型式程、全氷力が小さくなる。海水の一軸圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_f の関係は、佐伯等によるオホーツク海南部海域での測定結果によると図2に示すように、曲げ強度は一軸圧縮強度の20～27%である。よって、氷盤を曲げ破壊させる

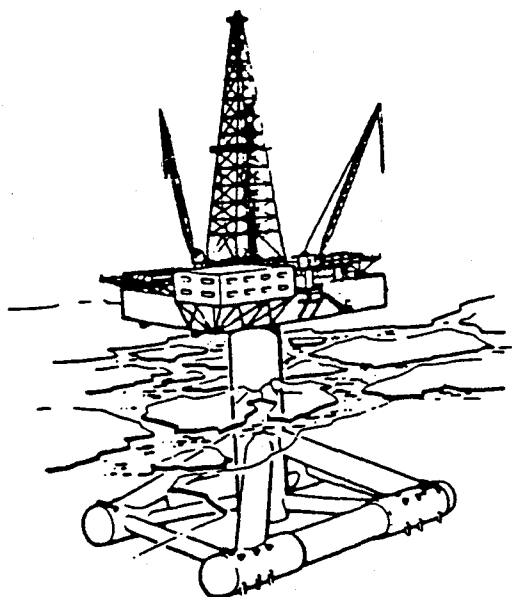


図-3 モノポッド型構造物（クック湾）

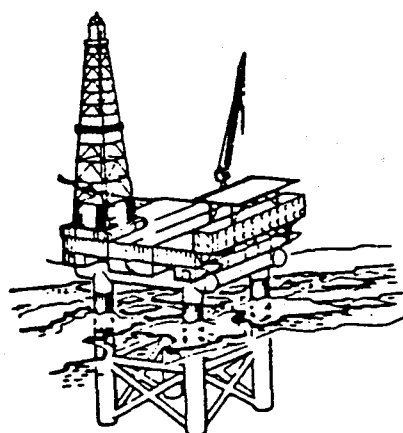


図-4 タワー型（4本脚）構造物

ような構造形式である傾斜型が構造上は有利といえる。この固定式の直立型には単脚型，多脚型それに人工島型に分けられる。単脚型は一本の柱状の構造物で氷海域の海中燈台やアラスカのクック湾で用いられている構造型式で直径は2～5 m程度が多く，氷象条件も厳しくなく，設計氷厚も1 m以下の場合が多い。クック湾の例を図3に示す。多脚型は4本あるいはそれ以上の脚を持つ構造型式で通常タワー型とかジャケット型といわれているものである。この型式は単脚式に較べると，より厳しい氷象条件にも耐えられるが，斜材等が多く使われている通常の海域に建設されているジャケット型構造物の場合は，破壊した氷塊が構造物内に堆積し，それが再凍結して，Ice Jammingを誘発する恐れがあるため構造的には単純なタワー型が用いられる事が多く，現在，中国の渤海，それにクック湾等でこの型式が用いられている。図4にクック湾の例を示す。氷盤の影響を受ける水面近くに斜材は用いられていない。次に人工島型の代表的

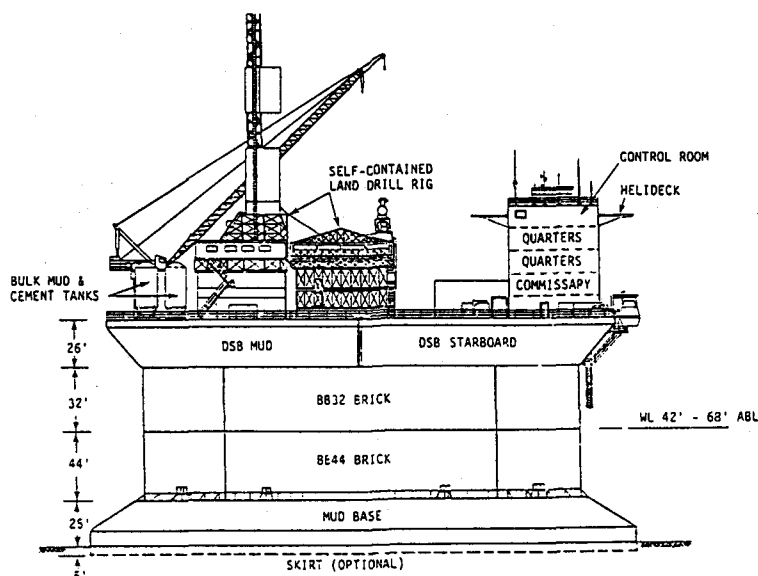


図-5 人工島（Super CIDS）

構造物の場合は，破壊した氷塊が構造物内に堆積し，それが再凍結して，Ice Jammingを誘発する恐れがあるため構造的には単純なタワー型が用いられる事が多く，現在，中国の渤海，それにクック湾等でこの型式が用いられている。図4にクック湾の例を示す。氷盤の影響を受ける水面近くに斜材は用いられていない。次に人工島型の代表的

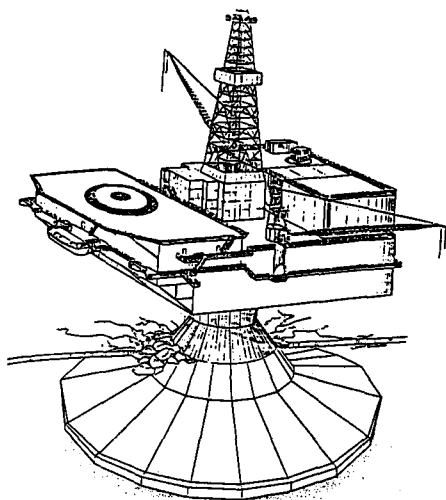


図-6 コーン型構造物

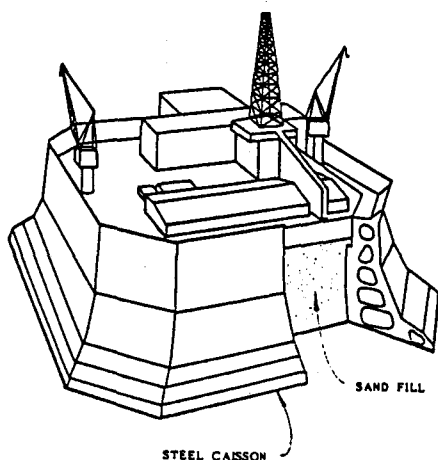


図-7 傾斜型人工島（MAC）

なものとしては図5に示す Super CIDS がある。これは、鋼製の基礎部の Mud Base と作業デッキと居住区の Upper Deck の間を矩形断面のハニカム構造の軽量高強度コンクリートとした三層構造となっていて、現在、アラスカのボーフォート海にて使われている。これとは別に、水深が2～7 m程度の浅海部では、斜面表層をブロック等で保護した砂利マウンドに海水の Ride-up を防ぐためにケーソンで囲まれている型式の人工島も建設されている。

また、固定式あるいは着底式の傾斜型の構造物としては、構造物全体がコニカル型となったもの、あるいは氷盤と接する部分のみがコニカル型となっているもの、あるいは上にいくにつれて断面が大きくなる逆コニカル型のもの、あるいは人工島型のものなどがある。図6は全体がコニカル型となっている構造物のコンセプトである。断面形状は円断面のものや多角形のものが提案されている。この型式は全氷力は直立型のものに比べて小さくすることが可能であるが、水深が深くなると構造物が大きくなりすぎる欠点がある。この欠点を克服するため、氷盤と接する水面近くはコニカル型で、それ以外のところは直立式となっている構造型式も提案されている。また逆コニカル型は、進行してくる氷盤を下向きに押え込む方式で、一般的には水面近くのみその形で他は直立型となっているコンセプトが多い。次に傾斜型的人工島型式のものとしては、すでに建設されている MAC（図7）がある。これは八角形の断面で、デッキと側壁は鋼製で、中央部には土砂を入れる構造となっている。また、砂利マウンドで表層を波による侵食防止のためブロックを張った人工島も数多く建設されている。その諸元を表1に示す。この砂利マウンド式的人工島は、北極海の石油開発では最も古くから用いられている方式で、水深は0.6 m～13 mの浅い海域に建設されている。夏期に施工される場合は浚渫船やクラムシェル等が用いられるが、冬期は海氷盤上をトラック輸送で土砂を運んで建設されている。この砂利マウンドだけでできている人工島は海水の Ride-up 現象により、人工島上に氷塊が Pile up し、それが冬期の石油掘削作業を困難ならしめている。そのため、近年建設されているこの種的人工島は、

表-1 マウンド型人工島

ARTIFICIAL GRAVEL ISLANDS -CANADIAN BEAUFORT SEA-							
Name of Island	Date Construction	Water Depth (ft)	Fill Island			Construction Technique	Construction Days
			Freeboard (ft)	Dimention (ft)	Volume (Cuyd)		
Inomerk B-48	Summer 1973	10	15	300 Dia	210,000	Dredge & Pipeline	110
ADGO F-28	"	7	3	150×600	48,000	Clam Shell	30
Pullen F-17	Spring 1974	5.5	10	225×375	84,500	Haul Over Ice	45
Unark L-24	"	4	8	200×400	57,000	Haul Over Ice	50
Pelly B-35	Summer 1974	7.5	7.5	270×515	45,000	Barge Core & Clam Shell	50
Netserk B-44	"	15	15	320 Dia	400,000	Dump Barge & Clam Shell	80
ADGO P-25	"	5	2	225×470	36,000	Clam Shell	30
ADGO C-15	Winter 1975	5.5	10	165×515	92,000	Truck Haul Over Ice	42
Netserk F-40	Summer 1975	2	15	320 Dia	380,000	Dump Barge & Clam Shell	100
Srpik B-35	Spring 1976	13.5	21/29	320 Dia	155,000	Truck Haul Over Ice	44
Ikkatok J-47	Summer 1976	5	7/5	150×425	50,000	Flat Barge & Clam Shell	30
Arnak L-30	"	28	17	320 Dia	1,400,000	Dredge & Pipeline	35
Kannerk G-42	"	27	17	320 Dia	1,400,000	Dredge & Pipeline	30
Rugmallit D-49	"	17	15	320 Dia	310,000	Clam Shell	37
ADGO J-27	Summer 1977	6	10	165×350	90,000	Clam Shell	30
Isserk	"	43	15	320 Dia	1,600,000	Dredge & Pipeline	80
Sag Delta	Winter 1977	3	4	325×400	52,000	Haul Over Ice	14

砂利マウンドの上に鋼製ケーソンを多角形状に連結して、海水の Ride-up を制御している例が多くなりつつある。砂利マウンド型の構造物の場合は氷力そのものは重要ではなく、波による侵食防止と海水の Ride-up 制御が設計上重要な視点となる。

2) 浮体式構造物

浮体式構造物も直立型と傾斜型に分けられる。直立型は矩形断面と円断面それに多角形断面が提案されているが現在までに建設されたものとしては、タンカーの両端部を先断して造られた SSDC がある。また傾斜型としては逆コニカル型と逆多角錐台型が提案されているが、建設されたものとしては逆コニカル型 (図 8) の Kulluk がある。浮体式構造物の場合は、係留索を通してアンカすることになるため、氷力が大きくなると構造物の変位量が大きくなる。一般に石油及びガスの掘削においては水深の 5 % 程度の水平変位が限

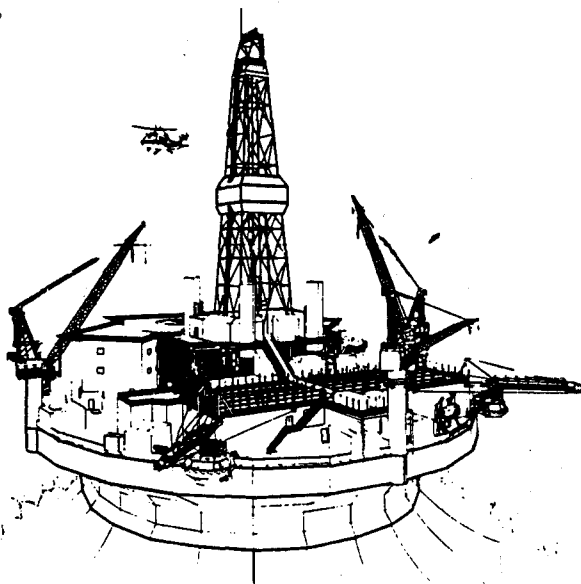


図-8 浮体式逆コーン型構造物 (Kulluk)

度とされているため、浮体式構造物は大水深で氷象条件がそれ程厳しくない海域でのみ使われることになる。また、逆コンカル型にするのは、氷盤が構造物上に Ride-up して構造物が傾斜したり、沈み込みするのを防止するためである。

3) 半潜式構造物

現在のところ、氷海域に半潜式構造物が建設された例はない。氷象条件が厳しくなければ通常の海域で用いられている半潜型構造物と同型式でも可能であるが、この構造型式は着氷の影響を受けると傾斜する可能性もある。大水深で、着氷の影響も少なく、かつ氷象条件も厳しくない海域のみ建設が可能といえる。

以上、氷海域向けに開発された種々の構造型式の特徴について述べたが、現在50以上のコンセプトが提案されていて、その優劣は決めがたい状況といえる。ただ、米国、カナダにおいては、我が国に較べて、独創性豊かなコンセプトが提案されている。この理由は氷海域における海水の動き、個々の海岸地形とその近傍の氷象状況との関係の詳細な観察に基づくものと考えられる。この他、変った構造様式としては、図9に示すような人工氷床がある。この方式はカナダ北極諸島で多く用いられている方法で、自然結氷の海水盤に穴をあけ、そこからポンプで海水を吸い、散水して氷厚を増加させて Ice Platform を造り、そこから掘削しようとするものである。この方法を可能にするためには、氷盤が移動しないという条件が必要で、北極諸島のように小さい数多くの島や岬が複雑に入りこんでいるような海域でのみ使われる方法といえる。

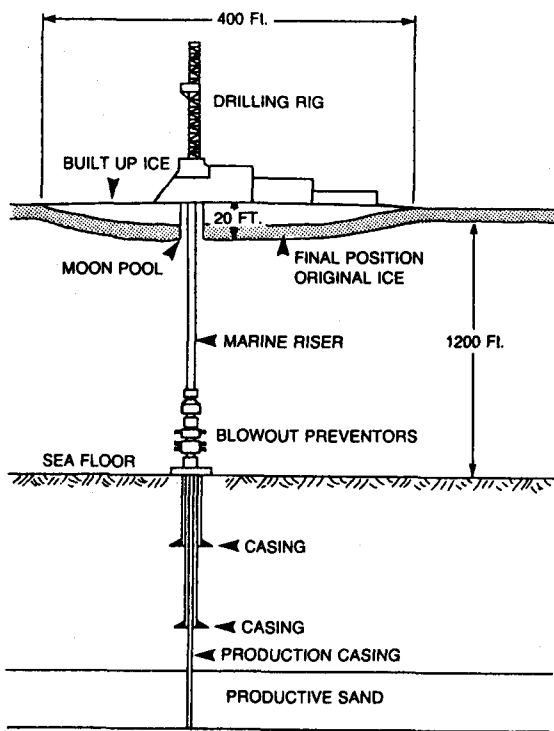


図-9 人工氷床 (Ice Platform)

3. 氷海域に建設される構造物に作用する氷力の種類

氷海域に建設される構造物には様々な形式の氷力が作用する。基本的には風や潮流等による氷盤の水平方向移動に伴って構造物に及ぼす氷力と潮汐等による水位の鉛直方向変位に伴って構造物に及ぼす鉛直上下方向の氷力、その他に気温変化に伴う氷温変化による氷盤の収縮・膨張により発生する力や、ケーソン内中詰材凍結により、いわゆる相変化に伴う体積変化により内圧増加を引き起こすような場合もある。このような各種氷力のうちで、氷温変化による氷盤の膨張・収縮により構造物に

及ぼす氷力は、氷盤上の冠雪による断熱効果や、海水の場合は構造物周辺の Circumferential Crack の存在により構造上は問題にはならないといわれている。最終的には、構造物に作用する氷力は氷盤の水平移動による氷力と潮汐による氷盤上下移動に伴う氷力それにケーソン内の氷厚増加による内圧増加といったことが設計上問題となる。これとは別に Ride-up した氷塊が Pile up した状態での静的な力もあるが、これは土圧と同様の考え方で対処している。次に各構造型式に対する考慮すべき各種氷力を列挙する。

1) 固定式（着底式）海洋構造物

- ①直立単脚構造物：半無限氷盤の移動に伴う、圧壊あるいは座屈破壊時の水平方向氷力。 Break out 時の氷力。 局部氷圧力。 氷盤の水平移動時の氷盤の断続的破壊による動的氷力。 氷盤凍着による鉛直方向氷力。
- ②直立多脚構造物：半無限氷盤の移動に伴う圧壊あるいは座屈破壊時の水平方向氷力。 Break out 時の水平方向氷力。 Ice Jamming 時の氷力。 局部氷圧力。 氷盤の水平移動時の氷盤の断続的破壊による動的氷力。 氷盤凍着による鉛直方向氷力。
- ③直立型人工島：半無限氷盤の水平移動に伴う、氷盤の圧壊あるいは座屈破壊時の水平方向氷力。 Break out 時の水平方向氷力。 Ride-up 時の氷力。 Rubble field 形成時の氷力。 Pile up 時の静的氷圧力。 氷盤凍着時の鉛直方向氷力。 直立部ケーソンの中詰凍結による内圧増加。
- ④コニカル型（傾斜型）構造物：半無限氷盤の水平移動に伴う氷盤の曲げ破壊時の水平・鉛直方向氷力。 Break out 時の氷力。 局部氷圧力。 Ride-up した氷盤の静的氷力。 氷盤凍着時の鉛直方向氷力。
- ⑤傾斜型人工島：半無限氷盤の移動に伴う氷盤の曲げ破壊時の水平・鉛直方向氷力。 Break out 時の氷力。 局部氷圧力。 Ride-up 時の氷力。 Pile up 時の静的氷力。 Rubble field 形成時の氷力。 氷盤凍着時の鉛直方向氷力。 ケーソンの中詰凍結による内圧増加。

2) 浮体式海洋構造物

- ⑥逆コニカル型構造物：半無限氷盤の移動に伴う鉛直・水平方向氷力。 Iceberg の衝突時の氷力。 Break out 時の氷力。 氷盤の断続的破壊による係留索に作用する動的力。 着氷による静的荷重の増加。 局所氷圧力。 Moon pool への氷塊の侵入。
- ⑦コニカル型構造物：⑥の他に、氷盤の Ride-up による静的荷重の増加。
- ⑧直立型構造物：半無限氷盤の移動に伴う水平方向氷力。 Iceberg の衝突時の氷力。 Break out 時の氷力。 氷盤の断続的破壊による係留索に作用する動的氷力。 局所氷圧力。

3) 半潜水式海洋構造物

- ⑨直立多脚型構造物：半無限氷盤の移動に伴う圧壊あるいは座屈破壊時の水平方向氷力。 Break out 時の氷力。 Ice Jamming 時の水平方向氷力。 局所氷圧力。 氷盤の水平方向移動時の断続的破壊による動的氷力。 着氷による偏心荷重の増加。 Iceberg 衝突時の氷力。

氷海域に建設される海洋構造物の設計に際しては、上述した各構造型式に対応した氷力を設計外力として考慮すべきであるが、この他に海水の水平移動あるいは潮汐等による鉛直方向の移動による構造物表面の摩耗も充分考慮されるべきである。また、上述した各種氷力、氷圧力の中で、特に理解しにくい現象について説明すると、まず、Break out 時の氷力とは、半無限の氷盤が構造物と無接触の状態から、移動に伴ない接触、貫入する場合と異なり、氷盤が構造物に完全に凍着した状態から、氷盤が突然移動を始め、それにより氷盤が破壊する時の氷力で、直立構造物にとっては最大の氷力を示すとされている。しかし、比較的気温が暖く、かつ潮差が大きい海域においては、氷盤は構造物に凍着していないので、この現象は起らない。また多脚構造物に対する Ice Jamming 時の氷力は、氷盤移動に伴って破壊した氷塊が多脚構造物の脚の間に閉じ込められ、それが再固結したため、見かけ上透過性のある多脚構造物が一体となった大投影面積の構造物となり、大きな氷力を受けるような状態の力をさす。また氷盤凍着による鉛直方向氷力は、大きな氷盤が構造物に凍着した状態で水位が上昇する時には構造物を鉛直上方に引き抜いたり、持ち上げようとする力で、水位が低下する時には構造物を座屈させようとする力が作用するような氷力をさす。また Rubble field 形成時の氷力は、大断面（アスペクト比の大きい構造物）の構造物、特に人工島のような場合、構造物の氷盤が貫入してくる側には破壊された氷塊で覆われる状態となり、それが再固結した状態のところ無限の大きさの氷盤が押しよせてくるような状態での構造物に作用する力をさす。

また、構造物に作用する氷力は、氷象条件にも依存する。図10に Kovacs がボーフォート海における典型的な氷象状況を調査した例を示す。ごく沿岸部においては、その場所で結氷した平坦氷（Level Ice）が存在し、その沖側には、沖側から移動してきて、その大きな喫水のため海底に乗り上げた氷塊が位置し、さらに沖側には氷脈（Ice Ridge）が位置している。このように氷海域の海水は一樣厚のみの氷ではない。よって無限の大きさの平坦氷の場合、氷脈の場合等によって作用する氷力も変わってくることになる。また氷脈については、その固結の度合いが大きく変化しているので取り扱いも困難

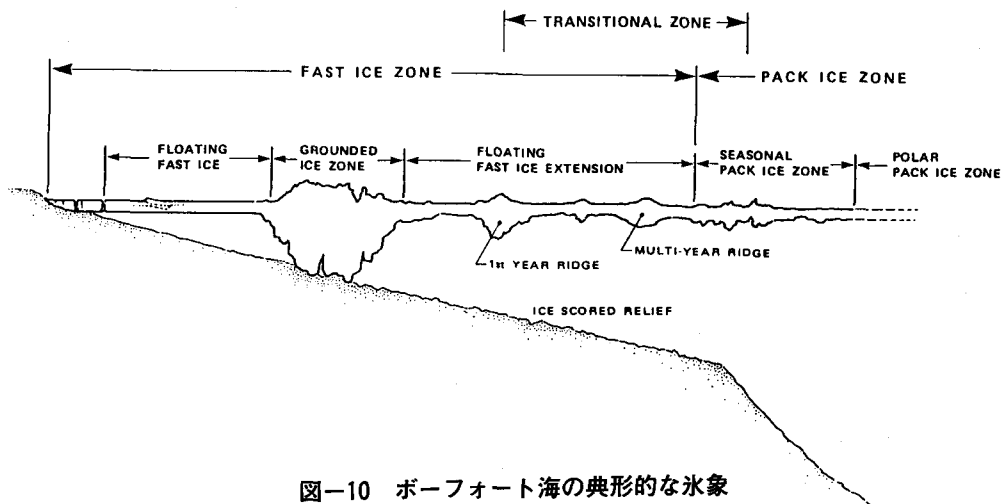


図-10 ボーフォート海の典型的な氷象

である。本テキストでは主に平坦氷を対象とすることにしている。また、ボーフォート海及びベーリング海の氷厚は表2のようになっている。オホーツク海の氷厚は緯度によって異なっているが、北海道沿岸の Ice Sheet は45～50cmが多く、北部海域に近づくにつれて氷厚は増加し、最大で2 m近くまでとなる。

表-2 ボーフォート海及びベーリング海の平均的氷厚

	アラスカ	ボーフォート海	ベーリング海
Ice sheet		2 m	1 m
Rafted Ice		5 ~ 6 m	3 ~ 4 m
First-year Ridge		8 ~ 9 m	5 ~ 8 m
Extreme		30m 以上	30m 以上
Multi-year Floe		6 ~ 8 m	not applicable
Multi-year Ridge		13~20m	not applicable

4. 直立構造物に作用する氷力

上述してきたように、氷力は構造物の型式、氷象条件、構造物に対する氷盤の作用形態それに氷の強度に大きく影響される。さらに海水の強度自体も、供試体寸法、歪速度、荷重速度、氷温に大きく依存する。海洋構造物に作用する水平全氷力の算定式は現在まで数多く提案されているが、前述の様に、その影響因子が多いため、提案式における諸係数の評価の違いにより算出される氷力にも大きな違いが表われる。また提案式の適用においても不明確な点が多いのが実状といえる。直立構造物に作用する水平方向全氷力が支配外力となることが多いが、この氷力を算定するためには氷盤が座屈破壊をするか、圧壊するかによって氷力の算定式が異なることになる。この二つの破壊様式の違いはアスペクト比（構造物の投影幅と氷厚の比）によって起こる事が知られている。加藤はこのアスペクト比と破壊様式の模式化したものを示している。それを図11に示す。図より明らかなように、圧壊領域と座屈破壊領域に大きく分けられ、加藤によるとアスペクト比が40～50を越えると座屈破壊が卓越してくると報告している。しかし実際の設計に当っては、圧壊とした時の氷力式で計算される氷力と座屈理論から計算される氷力の小さい方の氷力を設計に用いればよい。

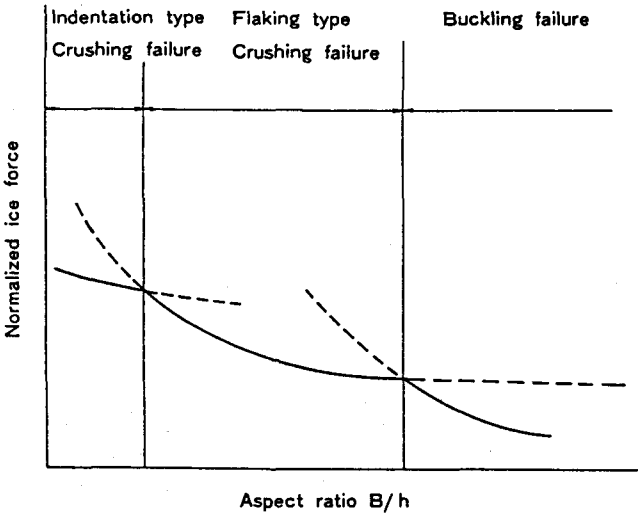


図-11 アスペクト比と破壊様式の関係の模式図 (加藤 1988)

1) 圧壊時の直立構造物に作用する氷力式の検討

直立構造物に作用する全氷力は一般的に次のような関係となっている。

$$F = f(\alpha, W, h, \sigma_c) \tag{1}$$

F ：水平方向全氷力， W ：構造物の幅， h ：氷厚

α ：構造物の断面形状，氷盤貫入に伴う歪速度，アスペクト比により決定される係数， σ_c ：氷の圧縮強度で供試体の形状，寸法，試験時の歪速度及び荷重速度に依存する。

さて，水平全氷力 F は W と h が同一条件の場合，係数 α と σ_c の評価に大きく依存することになる。よって提案されている氷力式を適用するに当っては，それらの式の適用範囲等を充分考慮しておく必要がある。構造物に作用する最大氷力は，構造物が氷盤と接し，貫入して氷盤が破壊する時である。その時の構造物近傍の氷盤の破壊様式は貫入に伴う歪速度に依存する。歪速度は次式で示される。

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{V}{4W} \quad (2)$$

V ：貫入速度， W ：構造物の投影幅

図12に佐伯と Michel による貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}_p$ と氷力係数 K' の関係を示す。 K' は最大氷力を示す $\dot{\epsilon}_p = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の時の氷力とその他の $\dot{\epsilon}_p$ に対する氷力の比である。歪速度 $\dot{\epsilon}_p$ が増加するにつれて破壊様式は ductile から transition ,

brittle へと移行する。氷力を表わす係数 K' は transition 領域 ($\dot{\epsilon}_p \approx 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ のオーダー) で最大を示し, brittle 領域では減少し，一定値に近づく。よって氷力式においては，この貫入に伴う歪速度の効果を考慮したものでなくてはならない。次に海水の圧縮強度 σ_c についてであるが，海水強度への影響因子は多い。供試体の形状（立方体，直方体，円柱等），試験時の歪速度と荷重速度によって同一の海水でも強度は異なることになる。図13には円柱供試体の高さ

と径の比 l/ϕ と $l/\phi = 2$ の時の一軸圧縮強度で無次元化した強度の関係を示したものであるが l/ϕ によって得られる強度が大きく変化する。次に $l/\phi = 2.0$ の時の海水の圧縮強度 σ_c と $\dot{\epsilon}$ ，それに σ_c と応力速度 $\dot{\sigma}_c$ の関係を示したものがそれぞれ，図14，図15である。両図からも明らかなように，一軸圧縮強度は歪

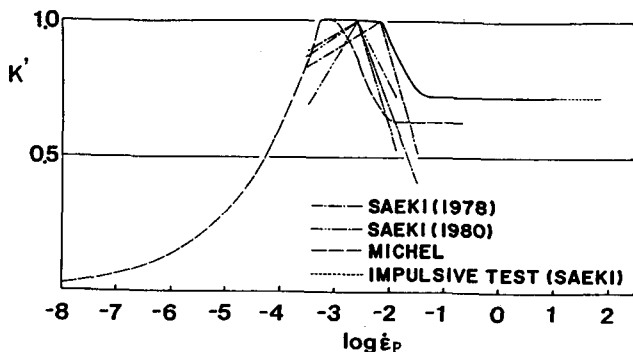


図-12 氷盤貫入時の歪速度と氷力係数の関係

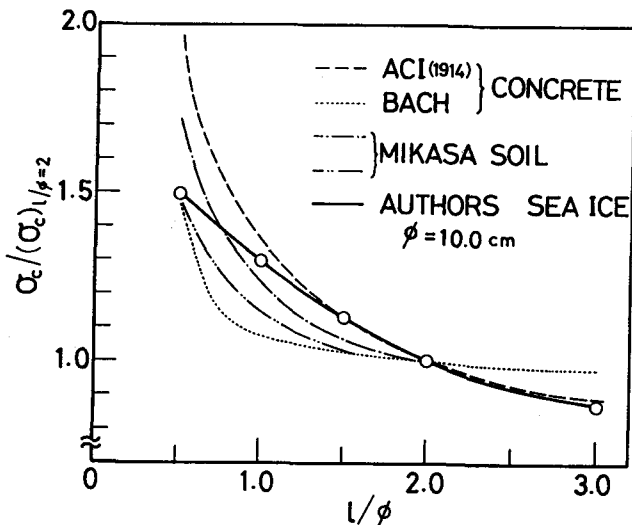


図-13 強度に及ぼす供試体の寸法効果

速度と応力速度に依存していることが判る。また、最大の氷力を示す歪速度 $\dot{\epsilon}_p$ と最大の一軸圧縮強度を示す歪速度 $\dot{\epsilon}$ は 10^{-3} sec^{-1} のオーダーで良い一致を示している。この他、供試体の断面積及び載荷板の種類によっても異なった強度を示すことが知られている。このように、海水の強度はその試験方法によって異なった値を示すことから、特に氷力に関する実験式の場合は、使われている強度がどのような方法で、どのような条件で求められたかが明らかにされていないなければならないことになる。

さて、今までに発表されている直立構造物に作用する氷力式を示したものが表3である。これらの式は大きく経験式、実験式さらに理論式に分類できる。経験式は一般的に次の(3)式で表わされる。

$$F = \alpha \cdot W \cdot h \cdot \sigma_c \quad (3)$$

(3)式において α は、表3の備考の欄に記されているように、定数あるいは複数の係数の積で表わされる。これらの式は基本的には氷と構造物の接触面積 ($W \times h$) に氷の強度を乗じたものである。実測結果に合うように定数 α を乗じて補正する形となっている。A・P・I式の場合、 $\sigma_c = 14.0 \sim 35.2 \text{ kg/cm}^2$ の範囲を示し、 $C = 0.3 \sim 0.7$ としているが、それらの値の決定法については示されておらず、又、 σ_c を求めるための試験法も決められていない。また、橋脚等へ作用する氷力を求めるAASHTO、その他の式についても σ_c の決め方については決められていないし、いかなる貫入条件も規定されていない。一般的にいて、経験式は試験法によって大きく値の違う σ_c について決定法が示されていないところに実用への疑問が残る。次に表3により実験式は次の(4)式で表わすことができる。

$$F = \beta \cdot (W)^{n_1} \cdot (h)^{n_2} \cdot \sigma_c \quad (4)$$

これらの式は実験結果に基づいているが、Saeki式では C は構造物の断面形状による係数で(円断面5.0, 正方形断面7.2, 頂角 90° の楔形4.5), K' は $\dot{\epsilon}_p$ に依存する係数で図12に示されている。また $n_1 = 0.5$, $n_2 = 1.0$ としていて、 σ_c の試験法についても決められている。また Hirayama & Schwarz

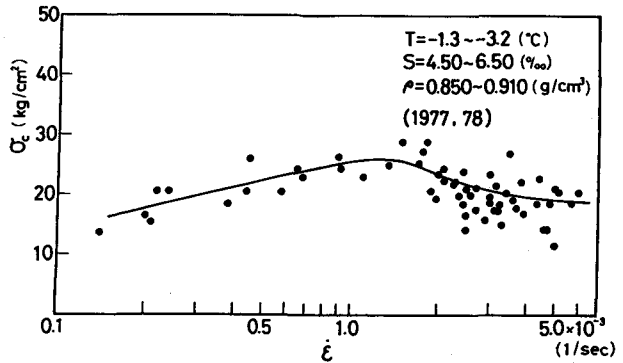


図-14 歪速度と強度の関係 (Saeki)

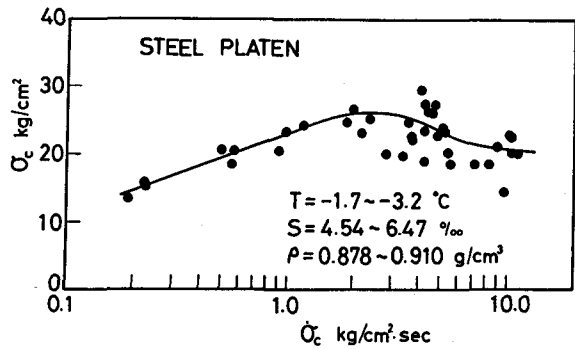


図-15 応力速度と強度の関係

表－3 水平氷力算定の提案式

提 案 者	提 案 式	備 考
1) A. P. I. (米国石油研究所) 2) U. S. S. R 3) AASHO 4) Määttänen 5) Neill	$C W h \sigma_c$ $m A W h \sigma_c$ $W h \sigma_c$ $K_1 K_2 K_3 W h \sigma_c$ $C_n C_1 W h \sigma_c$	経 験 式 C : 0.3～0.1 $\sigma_c = 14 \sim 35 \text{ kg/cm}$ A : 気象係数、m : 形状係数 K1 : 形状係数 K2 : 接触係数 K3 : ア スペクト比による係数 Cn : 傾斜角に よる係数 C1 : 貫入速度
6) Saeki 7) Hirayama & Shwarz 8) N. K. K (日本鋼管) 9) M. H. I (三菱重工) 10) I. H. I (石川島播磨重工) 11) Bercha & Danys 12) Afanasey 13) Korzhavin	$K' C \sqrt{W h \sigma_c}$ $3.57 \sqrt{W h \sigma_c}$ $C \sqrt{W h \sigma_c}$ $C V^{-0.25} \sqrt{W h^{1.1} \sigma_c}$ $2.0 W^{0.4} h^{1.6} \sigma_c$ $m W h \sigma$ $m (1 + 5h/w)^{0.5} W h \sigma$ $I m K W h \sigma_c$	実 験 式 K : E_p による関数 C : 形状係数 C : 形状係数 C : 形状係数、V : 貫入速度 m : 形状、接触係数 m : 形状係数 I : 貫入係数、m : 形状係数
14) Gold & Frederking 15) Michel 16) Reinicke 17) Morgenstern & Nutfall 18) Tryde 19) Croasdale	$N (V/W)^\alpha W h$ $V h \sqrt{2 \rho \sigma_i \sigma \Omega \tan \alpha}$ $[1.4 + 0.97h/w] W h \sigma_c$ $[1 + 0.304h/w] W h \sigma_c$ $[0.8 + 1.2h/w] W h \sigma_c$ $[A + Bh/w] W h \sigma_c$	理 論 式 Ω : 氷盤の面積、Q : 氷の密度

σ_c : 氷の圧縮強度、h : 氷厚、W : 構造物の幅

式は定数が3.57で $n1 = 0.5$, $n2 = 1.1$ としている。また σ_c の求め方も決められている。また M. H. I. 式は C は断面形状に依存し、 $n1 = 0.5$, $n2 = 1.1$ である。また式中に貫入速度 V が含まれているし、 σ_c を求めるに際しては貫入に伴う歪速度 $\dot{\epsilon}_p$ と等しい歪速度で σ_c を求めるとしている。また I. H. I. 式は現地実験から得られたもので、C は断面形状による係数、 σ_c は $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ で求めた値となっていて、Transition 領域の氷力式と考えることができる。

また、表3より理論式は(5)式で表わされる。

$$F = (\gamma + \delta \cdot \frac{h}{W}) \cdot W \cdot h \cdot \sigma_c \tag{5}$$

γ, δ : 定数

無次元氷力を $F / (W \cdot h \cdot \sigma_c)$ とすると、無次元氷力はアスペクト比のみの関係となる。理論式では、あらかじめ氷盤の破壊型式を仮定することにより求めている。例えば Reinicke の式は Hill 型の破壊を仮定することにより、また Morgenstern & Nuttall 及び Tryde は楔型の破壊を仮定することにより式を得ている。また、Gold & Frederking の式及び Michel の式では σ_c が考慮されておらず、

また相対速度が増加すれば F は際限なく増加する形となっているが、図12に示すように、 $\dot{\epsilon}_p$ が増大しても brittle 破壊の範囲では減少し一定値に近づくことになるので、式に適用範囲が示されるべきである。ここで、円形断面の直立構造物で $\sigma_c = 28.2 \text{ kg/cm}^2$ の時、径 $D = 2.0 \text{ m}$ と 10.0 m に対する各氷力式の計算結果を示したものが表4である。 $D = 2 \text{ m}$ の場合、最大氷力は最小氷力の約14倍、 $D = 10 \text{ m}$ の場合は約30倍となっている。この事実は各氷力式を用いるに当っては、その式の由来を詳しく調べる必要があることを示している。

以上のことより、水平方向全氷力の算定式を選定する場合、以下に示すことが考慮されたものであることが望ましい。①構造物の断面形状、②構造物と氷盤の相対貫入速度と構造物の代表幅より求められる貫入に伴う歪速度、③氷盤の破壊様式、④構造物の寸法、氷厚及びアスペクト比、⑤氷の圧縮強度の決定法。

2) 座屈破壊時の直立構造物の氷力
氷盤が直立構造物に接した後、貫入するより以前に、氷盤が座屈破壊する事がある。この現象はアスペクト比が40~50以上と大きい場合に起こり易す

い。この研究は Sodhi & Hamza によって始められ、その後加藤により継続されている。氷盤貫入時の半無限氷盤の座屈荷重の理論解はすでに Sodhi 等によって求められているのであるが、問題点は構造物表面と氷盤の接触面が摩擦なしであるかヒンジとみるかによって得られる座屈荷重に大きな差が出ることである。この氷盤と構造物表面の接触条件については氷盤と構造物表面間の摩擦係数と貫

表-4 直立構造物に作用する氷力の計算例

直立構造物への氷力計算例			
条件： 円形構造物、径 $D = 2.10 \text{ m}$ 、氷厚 $h = 1 \text{ m}$ 、 $\sigma_c = 28.2 \text{ kg/cm}^2$			
(提案式名)	(氷力 $F_{b,i}$) $D = 2 \text{ m}$		$D = 10 \text{ m}$
1. A. P. I.	395		1920
2. U. S. S. R.	310		1550
3. AASHO, CSA	564		2820
4. TIMES AREA	564		2820
5. Määtänen	950		3108
6. Neil	1055		3454
7. Saeki	199		446
8. Hirayama	226		505
9. N. K. K.	557		1249
10. M. H. I.	182	min	273 min
11. I. H. I. model (max)	2458	max	8047 max
insitu	744		1417
12. Bercha, Danys	373		1861
13. Afanasev	950		3108
14. Korzhavin	938		1607
15. Reinicke	1063		4221
16. Croasdale	520		2468
17. Morgenstern & Nuttall	650		2906
18. Tryde	790		2594
	Max / Min ~ 14		Max / Min ~ 30

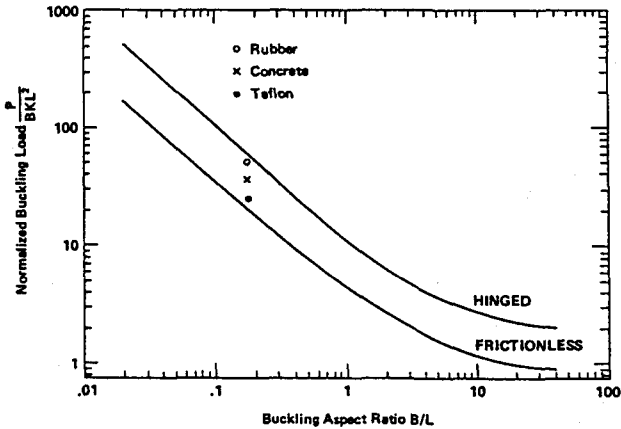


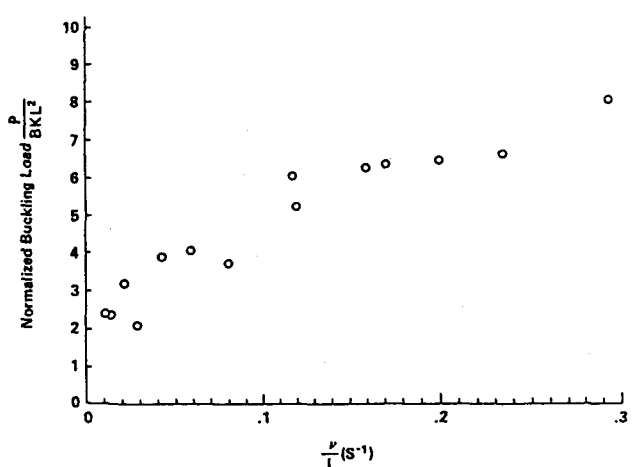
図-16 座屈破壊荷重に及ぼす表面材料の影響

入速度に依存すると言われている。加藤は氷盤との摩擦係数 (μ) の異なる三種類の材料で実験を行った。ゴム ($\mu = 0.14$)、コンクリート ($\mu = 0.2$) それにテフロン ($\mu = 0.07$) である。実験の結果を図16に示す。 P は座屈荷重、 B は構造物の幅、 K は氷の単位体積重量、 L 氷盤の特性長(6)式、である。

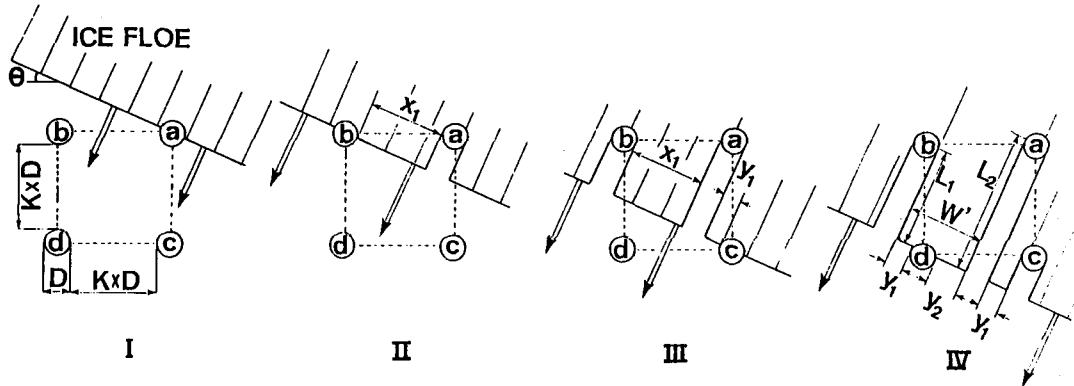
$$L = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K}}$$

E ：氷盤の弾性係数、 ν ：氷盤のポアソン比

図16より、摩擦係数の順にならないが、最も摩擦係数の小さいテフロンが Frictionless の理論解に近く、弾性があるゴムの場合はヒンジとなっている。また接触速度の効果を調べたものが図17である。図中の V は接触速度である。同図より接触速度が大きくなるにつれて接触条件はヒンジに近づくことがわかる。以上、氷盤の座屈時の氷力については、その破壊モードが圧壊モードの場合に較べて単純であるためその取り扱いと比較的簡単ではあるが、ただ氷盤と構造物の接触条件によって得られる氷力に大きく差があるため、今後は接触条件の解明が必要である。また、設計に当ってはヒンジで計算すると安全側の氷力を得ることができる。



図一17 座屈氷力に及ぼす接触速度の効果



図一18 多脚（4本脚）構造物に氷盤が貫入する模式図

3) 多脚海洋構造物に作用する全氷力

クック湾の例にあるように氷象条件の厳しくないところでは氷海域においてもタワー形の多脚海岸構造物が建設されるであろう。半無限氷盤が4本脚の海洋構造物に貫入していく状況を図18に示す。図18においてI図は氷盤が杭aに達した時で、杭aには半無限氷盤による氷力が作用することになる。

Figure 1 illustrates four types of structural connections:

- TYPE I-a:** A vertical member of diameter D is fixed into a horizontal base.
- TYPE I-b:** Two vertical members of diameter D are connected by a horizontal member of diameter $K \times D$. The angle $\theta = 0^\circ$.
- TYPE II:** A vertical member of diameter D is fixed into a horizontal base. A horizontal member of diameter X is attached to the top of the vertical member.
- TYPE III:** A vertical member of diameter D is fixed into a horizontal base. A horizontal member of diameter W' is attached to the top of the vertical member. A vertical member of diameter L is attached to the side of the horizontal member.

$D/h \doteq 5.0$

$T = -3.6 \sim -2.1 ^\circ C$
 $S = 8.3 \sim 13.7\%$

X/D	$\frac{F/h}{F_{h\infty}}$
0	0.55
1	0.60
2	0.62
4	0.88
5	1.00

θ (degrees)	X_F for $K=9$	X_F for $K=6$	X_F for $K=3$
0	2.0	2.0	2.0
10	3.2	3.1	2.9
20	3.5	3.3	2.9
30	3.6	3.4	2.9
40	3.5	3.3	2.9
45	3.0	2.7	2.4

B-4-15

杭 d に発生する。佐伯等はこの Type III に示されているような条件の基礎的な実験を行ない、氷桁の座屈計算を行なえば良い事を示した。そして、各 4 本の杭が最大氷力を長時間持続するとの仮定のもとに多脚構造物に作用する全氷力を計算したものが図 21 である。図 21 は 4 本脚の構造物の場合であるが全氷力は $\theta = 30^\circ$ 方向から半無限氷盤が進行してくる時に最大全氷力を示すことが明らかとなった。図 21 中の K は杭間隔を杭径 D で除した値であるが、 K が大きくなるにつれて F_θ / F は 4 に近づいている。これは杭間隔が大きくなると図 19 の Type I - a に示すような各 4 本の脚がそれぞれ半無限氷盤に作用する単独杭と同じ氷力が作用することを示している。図 21 はアスペクト比が 5.0 の場合の 4 本脚であるが、図 22 は等間隔に配置された 9 本脚の場合である。 $\theta = 26.6^\circ$ で全氷力が極小値を持つが、これは氷盤の進行方向に対して複数の杭が重なるためである。

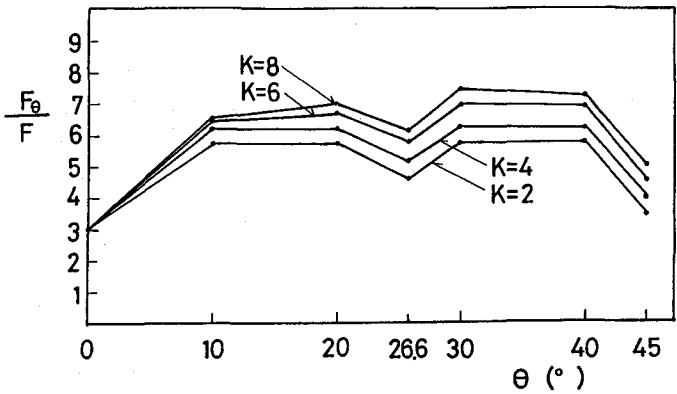


図-22 9 本脚構造物の場合の半無限氷盤の進入角と全氷力の関係

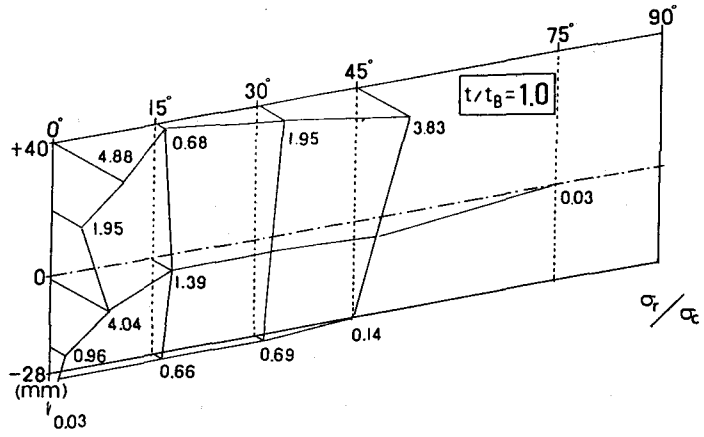


図-23 直立円断面構造物に作用する、最大氷力発生時の氷圧力分布（法線方向圧力）

直立構造物に作用する氷圧力分布については実験の困難さもあり、あまり研究が進んでいないのが現状である。この氷圧力については、過去の直立構造物に作用する全氷力の式より、接触面積により氷力を与えていく方法と実験的に氷圧力分布を求めた結果に基づく方法がある。図 23 にアスペクト比が約 5 の場合の円断面構造物に作用する氷圧力分布を示すが、一般に氷の三軸圧縮強度が一軸圧縮強度の 4 ～ 5 倍であることを考慮すると良い結果となっている。吉田等の数値シミュレーションによると直立単独脚に作用する最大の応力は、脚基部に作用する応力より氷盤との接触部に発生するとの結果となっているが、それは氷圧力が局部的に非常に大きくなるためである。

氷盤の移動にともない氷盤が継続的に破壊することにより、氷荷重が構造物に周期的に作用することがある。これが構造物の固有振動と共振するも構造物は大きく振動することになる。このような単独脚の構造物型式の振動問題についても研究成果が発表されているので設計に当っては充分な配慮が

必要である。

5. その他の氷力

以上、直立構造物に作用する氷力について述べてきたが、傾斜構造物については直立構造物の場合と違って、氷盤を曲げ破壊させる氷力の他に、側面に Ride-up した氷盤の静的荷重、破壊した氷盤を排除するための氷力等も考慮せねばならない。この傾斜構造物に作用する氷力に関連した文献を見る場合も、どのような氷力までを含めてあるかをよく確認してとくことが重要である。また、傾斜構造物においても佐伯等の結果や加藤の実験から判断して、傾斜角が 80° 以上は直立構造物とみなすべきである。これは構造物表面と氷盤との摩擦係数にもよるが、通常のコンクリートや鋼それに塗装した鋼では、氷盤の破壊モードも摩擦のため 80° 以上では圧壊あるいは座屈破壊を起こすからである。次に氷盤凍着時の潮汐等による水位変動に伴う鉛直方向氷力についてであるが、基本的には参考文献をみれば明らかであるが、氷盤の厚さと曲げ強度、ヤング率、ポアソン比、氷盤と構造物表面間の凍着強度、それに水位変動量と構造物の径が与えられれば鉛直上下方向氷力は計算できる。しかし、この氷力は氷盤と構造物が凍着するという条件が必要であり、冬期の湖沼や、潮差の小さい所（オホーツク海北部海域等）、厳寒の海域では海水氷盤の凍着がみられるが、北海道のオホーツク海沿岸程度の潮差の海域では完全な凍着は起っていない。よって、この鉛直方向氷力が作用する前提条件の凍着するか否かの判定が必要となる。またケーソン型構造物の場合、内詰材として海水あるいは海水と土砂を入れることが多いが、ケーソン内部の凍結による内圧の予測方法及び内圧低下の方法については参考文献を参照して戴きたい。この内圧予測の最も重要な因子は、内詰材が海水の場合は海水の透水係数が、また海水と土砂の場合は土砂を含んだ海水の透水係数が適切に決められなければならない。

参 考 文 献

1. 概論及び氷海域の構造物

- 1) Design for Ice Forces, Ed. by Caldwell, S. R. and R. D. Crissman, ASCE, 1983
- 2) Ice Mechanics, B. Michel, Laval University Press, 1978
- 3) 海水の強度特性と海岸、海洋構造物の耐氷設計法に関する研究、佐伯浩、1982
- 4) 藤井清光；海底石油、NHK ブックス、昭和45年6月
- 5) 藤井清光；海洋開発、東京大学出版会、1974年3月
- 6) APOA REVIW, Arctic Petroleum Operator's Association, Vol. 5, No. 1, 1982
- 7) 佐伯浩；海水と海岸・海洋構造物、第15回水工学に関する夏期研修会議案集 B コース、1979年7月
- 8) 中尾正義；カナダの氷工学、その野外現場（その1）－石油探査のための人工海水床－、雪氷、第43巻、第2号、昭和56年6月、p. 107－114

- 9) 小野延雄; 北極における海水研究, 北極における雪氷研究シンポジウム概要集, p. 7 - 8, 1981年5月
- 10) Danys, J. V. ; Effects of Cone-shaped structures on Impact Forces of Ice Floes, Proc. of the 1st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol 1, p. 609 - 620, 1971
- 11) Maattanen, M. ; Experiences of Ice Forces against a Steel Lighthouse Mounted on The Seabed, and Proposed Constructional Refinements, Proc. The 3rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. 2, p. 857 - 869, 1975
- 12) Doud, J. O. ; Ice Sheet Loads on Marina Piles, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, p. 599 - 564, 1978
- 13) 佐伯浩; 海水制御構造物とその問題点, 海と港, No. 2, p. 87-95, 昭和54年3月
- 14) 清水利平; 流結氷地帯における沿岸漁業, 海と港, No. 2, p. 81-86, 昭和54年3月
- 15) American Petroleum Institute ; Planing, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, 7th Edition, 1976
- 16) Den norske Veritas ; Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures, 1977
- 17) American Bureau of Shipping ; Rules for the Building and Classing off Offshore Mobile Drilling Units, 1973
2. 直立構造物に作用する水平氷力
 - 1) 川崎哲郎, 石川暁, 田口義明, 戸沢秀, 縄田卓生; 氷荷重推定に関する一考察, 寒地技術シンポジウム '85論文集 p. 138-143, 札幌市, 1985年11月
 - 2) Saeki, H., Hamanaka, K., A. Ozaki ; Experimental Study of Ice Force on a Pile
 - 3) 加藤一行; 氷板の座屈荷重, 第7回海洋工学シンポジウム論文集, p. 255-264, 東京, 昭和59年6月
 - 4) Kato, K., & D. S. Sodhi ; Ice Action on Pairs of Cylindrical and Conical Structure, CRREL Report, 83 - 85, 1983
 - 5) 柳沢一郎, 加藤一行, 小嶋初徳, 山下三郎, 松島義男; 構造物に作用する氷荷重, 第7回海洋工学シンポジウム論文集, p. 265-274, 東京, 昭和59年6月
 - 6) 加藤一行; 氷盤と垂直構造物との相互作用について, 寒地技術シンポジウム '85論文集, p. 144-149, 札幌市, 1985年11月
 - 7) 竹内貫弘, 小野敏行, エイジ L スエナガ, 佐伯浩; Tower型海洋構造物に作用する全氷力について, 寒地シンポジウム '85論文集, p. 156-161, 札幌市, 1985年11月
 - 8) Croasdale, K. R. ; Ice Forces on Marine Structures. 3rd International Symposium on Ice

Problems, I. A. H. R. 1975

- 9) Croasdale, K. R., Morgenstern, N. R., and Nuttal, J. B. ; Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers. *Journal of Glaciology*, Vol 19, No. 81, p. 301 – 312. 1977
- 10) Afanasev, V. P., Dologoplov, Y. V. and Shraishtein, Z. I., ; Ice Pressure on Individual Marine Structures, In *Ice Physics and Ice Engineering*, Israel Program for Scientific Translation 1973. p. 50 – 68, 1971
- 11) Michael, B. ; Ice Pressure on Engineering Structures. CRRL Monograph 111 B1b, Corps of Engineers, U. S. Army, Hanover, New Hampshire, 1970
- 12) Schwarz, T., Hirayama, K. and Wu, H. C. ; Effect of Ice Thickness on Ice Forces Offshore Technology Conference, Houston, 1974.
- 13) Frederking, R. and Gold, L. W. ; Experimental Study of Edge Loading of Ice Plates, *Canadian Geotechnical Journal*, vol, No. 4, November 1975, p. 456 – 457
- 14) Hirayama, K., Schwarz, J. and Wu, H. ; An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures, Iowa Institute Hydraulic Research Report, NO. 158, 1974
- 15) Korzhavin, K. N. ; Action of Ice Engineering Structures, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N. H. Translation 260, 1971
- 16) Michel, B., and Toussaint, N. ; Mechanisms and Theory of Indention of Ice Plates. Symposium on Applied Glaciology, Cambridge, England, 1976. Published in *Journal of Glaciology*, vol. 19. No. 81, 1977
- 17) Tryde, P. ; A Method of Predicting Ice Pillings, Prog. Report 25, Institute of Hydordynamics and Hygrauclic Engineering, Technical University of Denmark, p.17 – 23, 1972
- 18) Saeki, H., Nomura, T., A, Ozaki. : Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice. Proc. IAHR Symposiom on Ice Problems, Lulea, Sweden, p. 1 – 35 – 150, 1978
- 19) Ralston, T. D. : An Analysis of Ice Sheet Indentation. Proc. IAHR Symposium on Ice Problems Lulea, Sweden, p. 13 – 32, 1978
- 20) Reinicke, K. M., Remer, R. : A Procedure for the Determination of Ice forces Illstrated for Polycrystalline Ice. Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, p. 217 – 238, 1978
- 21) Saeki, H., Ono, T., Ozaki, A., S. Abe. : Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures. Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, p. 465 – 478, 1978
- 22) Saeki, H., Ono, T., Yamada, M. and A. Ozaki. : Study on Ice Forces on Vertical Pile Sturctures, Proc. of the 28th Japanese Conference on Coastal Engineering p. 396 – 400, 1981
- 23) Saeki, H. and Ozaki, A. : Ice Force on Piles, Physics and Mechanics of Ice, Ed. Per Tryde,

Springer-Verlag, Berlin, p. 342 — 350, 1980

- 24) Sodhi, D. S. and Nevel, D. E. : Review of Buckling Analysis of Ice Sheet, CRREL Special Rept., 80 — 26, p. 131 — 146, 1980
 - 25) Katoh, K. and Sodhi, D. S. : Ice Action on Two Cylindrical Structures, IHI Engin
 - 26) 加藤一行：垂直壁を有する氷海構造物に作用する氷荷重について，第10回海洋開発シンポジウム，1985
3. 傾斜構造物に作用する氷力
- 1) Bercha, F. G. and Danys, J. V. : Investigation of Ice Forces on a Conical Offshore Structure, Ocean Engineering, Vol. 3, No. 5, p. 299 — 310, 1976
 - 2) Bercha, F. G. and Danys, J. F. : Prediction of Ice Forces on Conical Offshore Structures, Marine Science Communications, p. 365 — 380, 1975
 - 3) Afanasev, V. P., Dolgoplov, Y. V. and Shraishtein, Z. I. : Ice Pressure on Individual Marine Structures in Ice Physics and Ice Engineering, Israel Program for Scientific Translation, p. 50 — 68, 1973
 - 4) Croasdale, K. R. : Ice Engineering for Offshore Petroleum Exploration in Canada, Fourth International POAC, Memorial University, St. John's Newfoundland, p. 1 — 32, 1977
 - 5) Lewis, J. W. and Croasdale, K. R. : Modelling the Interaction between Pressure Ridges and Conical Structures, IAHR Ice Symposium, Lulea, 1978 (preprint)
 - 6) Michel, B. : Ice Pressure on Engineering Structures, CRREL Monograph 111 B1b, Corps of Engineers, U. S. Army, Hanover, New Hampshire, 1970.
 - 7) Sackinger, W. M. and Sackinger P. A. : Shear Strength of the Adfreeze Bond of Sea Ice to Structures, Fourth International POAC, Memorial University, St. John's Newfoundland, p. 607 — 614, 1977.
 - 8) Schwarz, T., Hirayama, K. and Wu, H. C. : Effect of Ice Thickness on Ice Forces, Offshore Technology Conference, Houston, 1974
 - 9) Frederking, R. and Gold, L. W. : Experimental Study of Edge Loading of Ice Plates, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, NO. 4, p. 456 — 457, November 1975
 - 10) Ralston, T. D. : Ice Force Design Considerations for Conical Offshore Structures, Fourth POAC Conference, St. John's Newfoundland, 1977
 - 11) Croasdale, K. R. : Ice Forces on Fixed Rigid Structures, A Report Prepared for the Working Group on Ice Interaction on Hydraulic Structures. Committee on Ice Problems, IAHR, 1978
 - 12) Ralston, T. D. : Plastic Limit Analysis of Sheet Ice Loads Conical Structures IUTAM Symp. Aug. 1979, Copenhagen

- 13) API Bulletin on Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Structures in Ice Environment, American Petroleum Institute, Jan. 1982
 - 14) Tryde, P. : Intermittant Ice Forces Acting on Inclined Vedges, LAHR Hanover, 1976
 - 15) E. H. Gershunov : Shear Strength of Adfreeze Bond and its Effect on Global Ice Load Applied to Mobile Offshore Drilling Units Under Arctic Conditions, OTC 4687, 1984 Huston
 - 16) F. J. Bruen, R. C. Byrd, V. Vivatrat, B. J. Watt : Selection of Local Design Ice Pressures for Arctic Arctic Systems, OTC 4334, 1982 Huston
 - 17) V. P. Afanasev : Ice Pressure on Vertical Structures, Transporynoe Stroitel' Stvo 1972
 - 18) 井上一正 : 傾斜構造物に働く氷力, 寒地技術シンポジウム論文集, p. 162-167, 1985
4. 鉛直方向氷力
- 1) Lofquist, B. : Lifting Force and Bearing Capacity of an Ice Sheet, Natl. Res. Council Can., Ottawa, Canada, Tech. Rep. R - 700, 1970
 - 2) Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N. and Yamada, M. : Ice Forces due to Changes in Water Level and Adhesion Strength between Fresh-Water Ice and Various Pile Materials, 20th IAHR Congress, Vol. II, Moscow, U. S. S. R., Sept. 5 - 9, 1983
 - 3) Saeki, H., Ozaki, A. and Kubo, Y. : Experimental Study on Flexural Strength and Elastic Modulus of Sea Ice, Vol. I, POAC 81, Quebec, Canada, July. 27 - 31, 1981
 - 4) Traetteberg, A., Gold, L. W. and Frederking, R. : The Strain Rate and Temperature Dependence of Young's Modulus of Ice, Proceeing, IAHR, Third International Symposium on Ice Problems, Hanover, 1975
 - 5) Saeki, H., Ono, T. and Ozaki, A. : Mechanical Properties of Adhesion Strength to Pile Structures, Proc. Int. Symposium on Ice Problems, Hanover, 1975
 - 6) Saeki, H., Ono, T., Niu en Zong, and Nakazawa, N. : Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, International Symposium on Snow and Ice Processes at the Earth's Surface, IGS Sapporo, Sepq. 2 - 7, 1984
 - 7) Saeki, H., Takeuchi, T., Nakazawa, N., Ono, T. and Kanie, S. : Ice Force due to a Change of Water Level and Adfreeze Bond Strength between Sea Ice and Various Materials, Proc. of 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), 1986
 - 8) Doud, J. O. : Ice Sheet Loads on Marina Piles, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, p. 599 - 604, 1978
5. ケーソン内圧の予測
- 1) Ogura, S. H. Saeki, K. Izumi and M. Sakai : Estimation of Internal Pressure due to a Growth of Ice Thickness in Caisson, Proc. of IAHR Ice Symposium, Hamburg, pp. 97 ~ 109, 1984

- 2) Kubota, F., H. Saeki, T. Takeuchi and N. Igarashi : Experimental Study on Permeability Coefficient of Sea Ice, Proc. of 10th Ocean Development Symposium, Tokyo, pp. 74 ~ 77, 1985
- 3) Saito, T. and N. Ono : Percolation of Sea Ice I—Measurements of Kerosene Permeability of NaCl Ice—Low Temperature Science, Ser, A, 37, pp. 55 ~ 62, 1978
- 4) Saeki, H., T. Ono. A. Ozaki and S. Abe : Estimation of Sea Ice Forces on Pile Structures, Proc. of IAHR Symposium on Ice Problems, Part 1, pp. 465 ~ 478, 1978
- 5) Hasemi, T., On the Growth of Thin Winter Ice, Low Temperature Science, Ser. A, 32. pp. 207 ~ 218, 1974