

重防蝕鋼管に対する海水の凍着強度 に関する実験的研究

新日本製鉄㈱	大槻富有彦
北海道大学大学院 学生員	佐々木広輝
NTT	杉野文秀
北海道大学工学部	小野敏行
北海道大学工学部 正会員	佐伯 浩

1. 研究目的

近年、鋼材の腐蝕防止のため、ポリエチレン系やポリウレタン系の合成化学材料で鋼材を被覆した重防蝕鋼材が開発されている。寒冷地のような厳しい自然環境条件下においては、メンテナンスフリーの材料が望まれていることから、重防蝕鋼材は寒冷地の海洋、海岸及び河川、湖沼の種々の構造物の材料として適当と思われる。海水が凍結する海域において、氷盤が構造物に凍着すると、水位の変動に伴い、構造物に鉛直方向の水力が作用し、水位上昇時には上向きの引き抜き力が、水位低下時には下向きの押し込み力が働く。このような水力によって栈橋構造の杭が引き抜かれたり、ダム取水塔が倒壊した例が数多く報告されていて、それらの被害を防止するため、エアバルブを送って凍着を防いでいる例や杭の表面を厚いゴム板で被覆した例等が報告されている。この氷盤凍着時の水位変化に伴う杭構造物に作用する鉛直方向水力を計算するためには、杭径、氷盤の厚さ・弾性定数・ポアソン比・曲げ強度、水位の変化量、それに構造物表面材料と氷盤の凍着強度が与えられねばならない。氷盤が構造物に凍着している時、水位が変動すると、氷盤と構造物間の凍着強度が強い場合には、氷盤と構造物表面の界面でせん断破壊が起こらず、氷盤が曲げ破壊を起こすし、また、氷盤と構造物表面間の凍着強度が小さい場合には、それらの界面でせん断破壊を起こすことになる。水力を低下させるために人工的に制御できるものは、凍着強度の小さい表面材料を選択することのみである。著者の一人、佐伯の研究によれば、凍着強度は材料表面の粗さに強く依存することが明らかになっているが、ポリエチレン系及びウレタン系の材料は表面が滑らかなので、凍着強度が小さくなることが予測され、結氷海域の使用にも適当であると思われる。そこで、本研究は重防蝕鋼管の凍着強度に関する実験を行い、その結果を報告するものである。

2. 実験装置及び実験

重防蝕被覆材として実際に用いられている材料は、ポリエチレン系やウレタン系がほとんどである。そこで、今回我々が行った実験でも、ポリエチレン系やウレタン系の材料を主とし、更にレジンモルタルやポリエステル、そして比較を容易にするために重防蝕被覆材を巻いていない鋼管杭、コンクリート杭についても実験を行った。表1. に実験材料を示してある。硬度はショアD硬度計を用いて瞬間硬度を測定した。海水と諸材料間の凍着強度については、Oksanen、Sackinger、Saeki等の研究があるが、試験方法から凍着強度特性まで系統的に研究されているのはSaekiのみである。それによると、海水と諸材料間の凍着強度試験においては、試験方法としては未だ確立されていないが、Pull Out Test、Push Out Test、Twist Testの3種類がある事、また、供試体の径や氷厚も凍着強度に影響を与える事、さらに、押し抜き、引き抜きの速度、応力速度も凍着強度に影響を与える事もわかっている。また、同一の試験方法であっても、海水の温度及びブライン量、材料表面の粗さが凍着強度に影響を与える事がわかっている。

実験条件は過去の研究成果をもとにして以下のように決定した。

- 1) 水温： 氷盤内の温度分布は気温に依存する。一般に、雪に表面を覆われていると、その断熱効果のため、海水氷盤の表面温度は気温の低下と共に低下するが、気温よりはるかに高い温度を示す。また、気温の変化を受ける範囲は氷厚の上層部のみで、中・下層は -1.8°C ～ -4°C 程度が多い。よって氷盤全体の平均水温は -20°C を越えることは希であるので、下限を -20°C とし、更に -10°C 、 -5°C についても実験を行い、凍着強度に及ぼす水温の効果を調べた。

2) 杭径： 図1. に示すように、杭径が大きくなると凍着強度は減少して、ある一定値に近づくという傾向がある。しかし小径の杭での凍着強度と大口径の構造物の凍着強度の関係は図1. より材料に関係なく一定の比となっているので、今回は実験のし易さから杭径が12cm程度の杭を使用した。図中の ϕ は杭径、 Dgr は海水の平均グレインの径、 τB は凍着強度である。

3) 氷厚： 図2. に示すように、氷厚の増加に伴い凍着強度は大きくなるが、氷厚が8cmを越えると凍着強度はほぼ一定値をとる。今回の実験では氷厚が9～16cmとばらついたが、凍着強度に氷厚が影響しない範囲で実験を行った。

4) 応力速度・歪速度： 海水は粘弾性体であり、応力速度・歪速度によって一軸圧縮強度や曲げ強度が変化する事は良く知られている。しかし、一方、せん断強度等はそれ程大きな影響は受けない事が知られている。図3、図4. に示すように、凍着強度は応力速度 $\dot{\tau B}$ 、歪速度 $\dot{\delta B}$ にはほとんど影響を受けないが、 $\dot{\tau B} = 0.1 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、 $\dot{\delta B} = 0.1 \sim 1.0 \text{ mm/sec}$ で緩やかなピークを示す。そこで、今回の実験では応力速度、歪速度とも最大の凍着強度を示す上記の範囲内に入るように実験を行った。

5) 試験方法

凍着強度の試験方法としては図5. に示すようにPush out Test (押し抜き試験)、Pull out Test (引き抜き試験)、Twist Test (ねじり試験)の3種類が考えられるが、図6. に示すように3者の試験結果にはほとんど差がないこと、テストサンプルを製作するのが容易で試験も簡単であることなどを考慮して、今回の試験ではPush out Testを採用した。その試験装置の概略を図7. に示す。

3. 結果と考察

凍着強度の算定には次の式を用いた。

$$\tau B = P / \pi \phi h \quad (1)$$

τB : 凍着強度 (kgf/cm²)、 P : 破壊加重 (kgf)、 ϕ : 杭の外径 (cm)、 h : 氷厚 (cm)

図8. は今回試験をした材料の氷温(T)と凍着強度(τB)の関係を示したものである。佐伯らのコンクリート杭の凍着強度に関する研究において、凍着強度と氷温には直線で近似できるという結果が得られているが、今回の結果でも同様の結果が得られた。また、氷温の低下に伴い凍着強度が大きくなっている。また、表面の滑らかなLDPEやウレタンエラストマーの場合、氷温の低下による凍着強度の増加はゆるやかであるが、表面を粗くした、段差をつけたLDPEやポリエステルは氷温の低下に伴って凍着強度は急激に増加する事が明らかとなった。また、コンクリートやレジンモルタルの凍着強度はそれらの材料よりはるかに大きな凍着強度を示す。

次に、今回用いた重防蝕鋼管の凍着強度を -5°C で比較して小さい順に並べたものが図9. である。LDPEやウレタンエラストマーの凍着強度はコンクリートの凍着強度と比較してかなり小さくなっており、重防蝕被覆材を巻いていない鋼管と比較しても依然として小さな値となっている。これは、LDPEやウレタンエラストマーの表面が鋼やコンクリートの表面よりもかなり滑らかであるためである。また、HDPEや段差を付けたLDPEは -5°C ではコンクリートや鋼と比較して凍着強度は小さいが、 -10°C や -20°C ではその差はあまりなくなっている。これに対する理由としては、温度の低下と共に氷の強度が増すために凍着強度が大きくなるということの他に、材料の性質が温度によって影響を受けるためではないかと思われる。更に、同一のLDPEであっても段差があると、凍着強度試験を行う場合、氷盤と杭の界面の破壊モードがせん断破壊に近くなり、凍着強度が大きくなると考えられる。以上より、表面が滑らかで段差のない材料は凍着強度が小さいと言えるが、温度の低下に伴う材料の性質の変化を考慮しなければならないものと思われる。

次に、過去にコンクリートや鋼に対して行われた佐伯等の研究によると、凍着強度は材料表面の粗さに強く依存する事が知られていることから、凍着強度と表面粗さの関係を調べた。その結果を図10. に示す。材料表面の粗さの平均波高 h が小さくなると凍着強度は小さくなっているが、 $h < 10^{-2} \text{ mm}$ の範囲では凍着強度は h にはあまり影響を受けず、材料によって多少差があるが、ほぼ一定値をとっている。 h が小さくなってくると、材料表面の平均粗さよりも他の因子が凍着強度に影響するものと考えられる。Muraseらの高分子化合物の付着エネルギーと凍着強度に関する研究の中で、材料の付着エネルギーが大きくなると凍着強度が大きくなる報告されていて、その結果が図11. である。Muraseは高分子材料と淡水氷間の凍着強度と材料表面の付着エネルギーの間には線形関係である事を述べている。今回我々が用いた重防蝕鋼管の接触角、表面自由エネルギー、付着エネルギーのデータを表2. に示す。これ

と Murase らの結果を対応させると、凍着強度は、HDPE が最も小さく、LDPE、ウレタンエラストマー、軟質ウレタンエラストマーが同じ値となるはずである。しかし、我々の結果では、LDPE、ウレタンエラストマーが最も小さい凍着強度を与え、次いで HDPE、軟質ウレタンエラストマーとなっている。図 12. に表面粗さの似かよった材料の硬度と凍着強度の関係を示している。実験データの数が少ないので明確な結論は得られなかったが、凍着強度は硬度にもある程度影響されるものと思われる。これらより、材料の粗さの平均波高が小さくなってくると凍着強度に影響を及ぼす因子は材料の付着エネルギーも考えられるが、その他に硬度なども考えなければならないものと思われる。以上、海水と諸材料間の凍着強度は、同一試験条件であれば、水温、材料表面の粗さ、材料表面の付着エネルギー等に依存している。この海水と諸材料間の凍着強度を考える時、その界面での破壊機構は大きく二つに分類できると考えられる。一つは、材料表面が粗い場合の、凹部にある海水がセン断破壊される場合と、もう一つは表面が滑らかな場合には、海水のセン断破壊より、むしろ材料表面の付着エネルギーを超える力が作用した時の剥離破壊される場合である。

Muraseの実験においては、材料表面の粗さが測定されていないため、明確には結論づけられないが、表面の滑らかな高分子材料のみの試験であるため、凍着強度と付着エネルギーの相関が非常に大きく、また、佐伯等が行ったコンクリートや無処理の鋼といった表面の粗い材料では、凍着強度と表面粗さの相関が強い。図 13. に佐伯等が行った海水のセン断強度を示す。この図 13. から判断すると、コンクリート等の表面の粗い材料の凍着強度より海水のセン断強度の方が大きく、この事は、表面材料が比較的粗い場合でも、その界面の破壊は剥離破壊とセン断破壊が混在している事を示すと考えられるし、Murase の結果においても、必ずしも一本の直線で表わせないデータが存在するのは、凍着強度が材料表面の付着エネルギーのみでなく、材料表面の粗さにも起因している事を示していると考えられる。

4. 結論

- 1) 重防蝕鋼管の凍着強度が明らかになり、これらはコンクリートや重防蝕被覆材を巻いていない鋼管よりも凍着強度を小さくすることができることが明らかになった。
- 2) 重防蝕鋼管の凍着強度は水温が下がると凍着強度が大きくなり、直線で近似できる。
- 3) 重防蝕鋼管のように表面が非常に滑らかで、表面の粗さの平均波高が 10^{-2} mm 以下であれば、凍着強度は表面の粗さの平均波高にはあまり影響されず、材料の性質（付着エネルギーや硬度など）に影響されるものと思われる。
- 4) ポリエチレン系やあるいはウレタン系の高分子材料で被覆した重防蝕鋼管はコンクリートや塗装した鋼に比べて凍着強度を低下させるため、氷海域や結氷した河川や湖沼で使用するのに非常に良いものと思われる。

参考文献

- 1) Saeki, H., Ono, T., Ozaki, A., "MECHANICAL PROPERTIES OF ADHENSION STRENGTH TO PILE STRUCTURES," Proc. Int. Symposium on Ice Problems, Quebec, Canada, 1981
- 2) Oksanen, P., "Friction and adhesion of ice" Proc. of IAHR Ice Symposium, Quebec, Canada, 1981
- 3) 佐伯浩, 田中祐人, 酒井雅史, 小野敏行, 尾崎晃: 氷盤凍着に伴う直立構造物に作用する軸方向氷力について, 第 29 回海岸工学講演会論文集 P.P. 482~ 485, 1982
- 4) 佐伯浩, 竹内貴弘, 小野敏行, 五十嵐昇, 蟹江俊仁: 氷盤凍着に伴う大断面構造物に作用する氷力について, 第 32 回海岸工学講演会論文集 P.P. 638~ 642, 1985
- 5) Murase, H., Nanishi, K., "ON THE RELATIONSHIP OF THERMODYNAMIC AND PHYSICAL PROPERTIES OF POLYMERS WITH ICE ADHESION," Int. Glaciological Society, 1985
- 6) 角田光雄: 濡れと接着力, 日本化学会編
- 7) 桜井俊男, 玉井康勝: 応用界面化学, 朝倉書店

材 料	硬度 (シヨアド)
低密度ポリエチレン (LDPE)	5 4
低密度ポリエチレン (LDPE) 段差0.2 mm	5 4
高密度ポリエチレン (HDPE)	6 6
ウレタンエラストマー	6 2
軟質ウレタンエラストマー	3 4
レジンモルタル	8 1
ポリエステル	8 4
鋼 管	—
コンクリート	強度 5 0 0 kgf/cm ²

表 1 . 試験材料

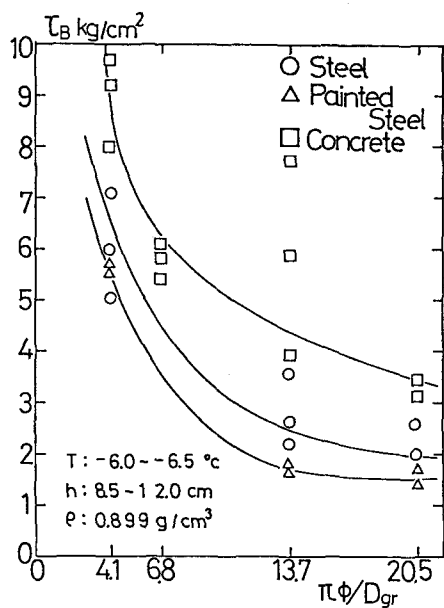


図 1 . 杭径と凍着強度の関係

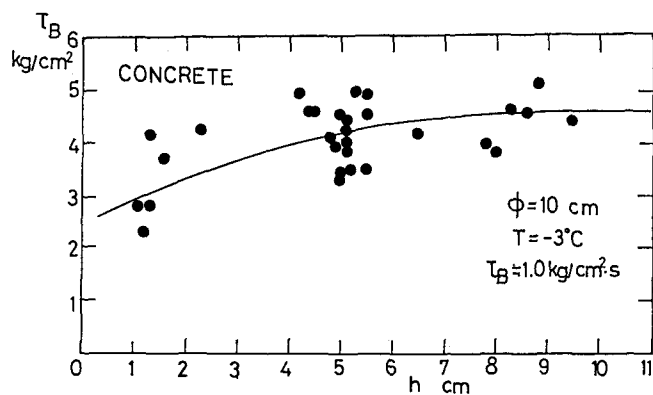


図 2 . 氷厚と凍着強度の関係

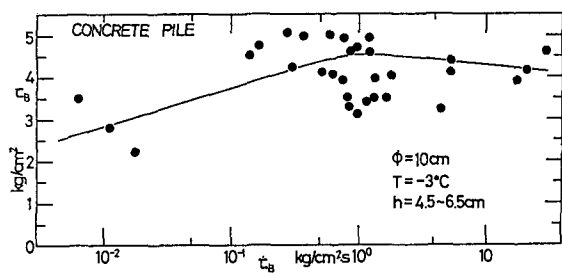


図 3 . 応力速度と凍着強度の関係

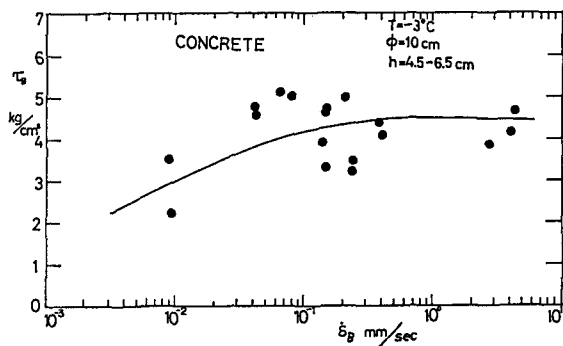
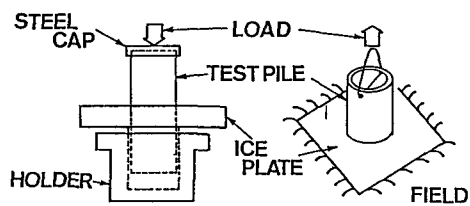
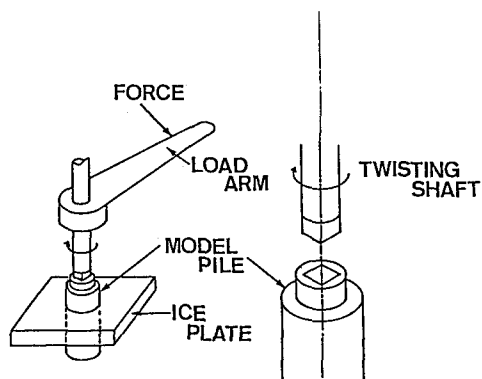


図 4 . 歪速度と凍着強度の関係



PUSH OUT TEST PULL OUT TEST



TWIST TEST

図 5 . 試験方法

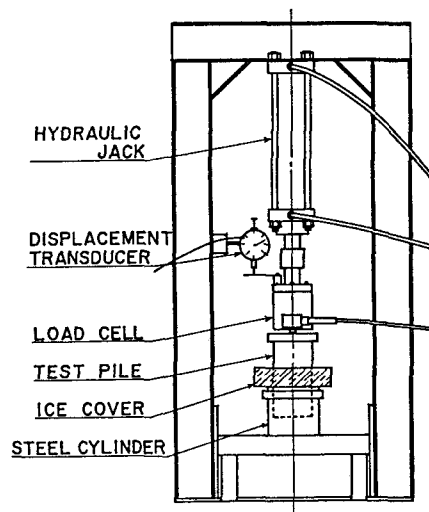
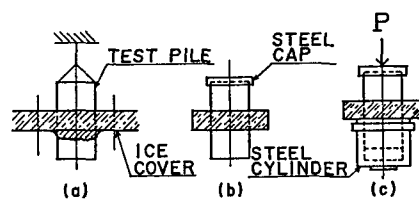


図 7 . 実験装置

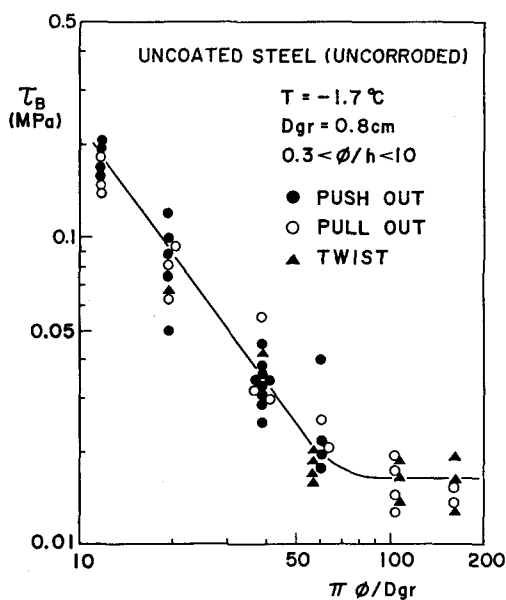


図 6 . 試験方法と凍着強度

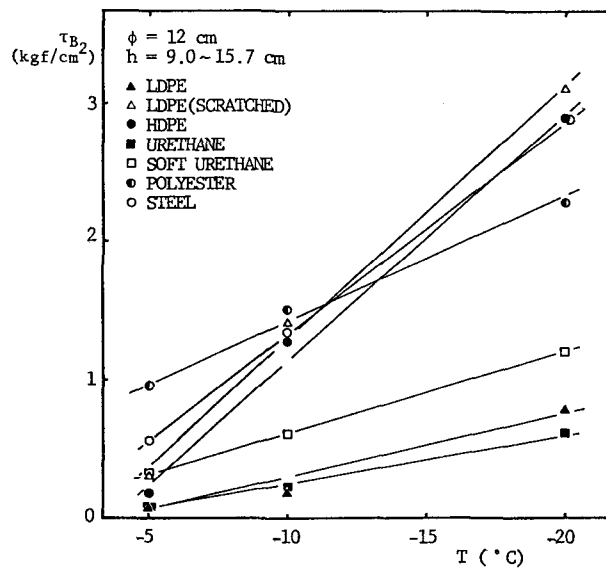


図 8 . 水温と凍着強度の関係

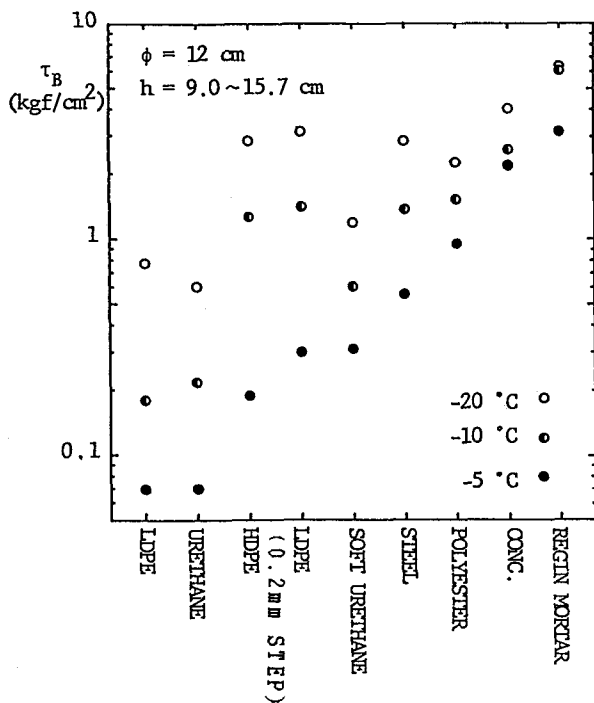


図 9 . 重防蝕鋼管の凍着強度

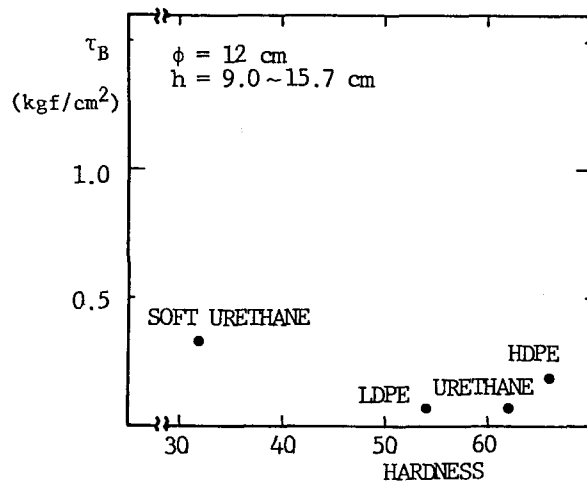


図 1 2 . 硬度と凍着強度の関係

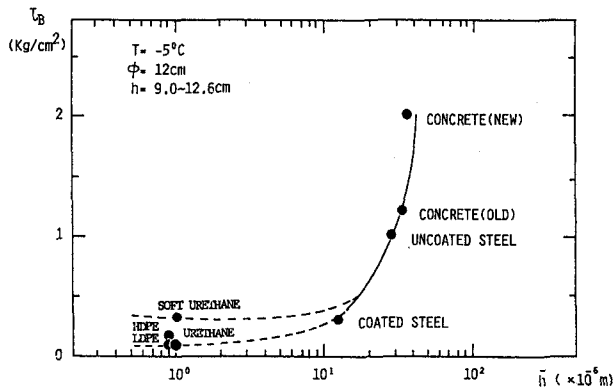


図 1 0 . 表面粗さの平均波高と凍着強度の関係

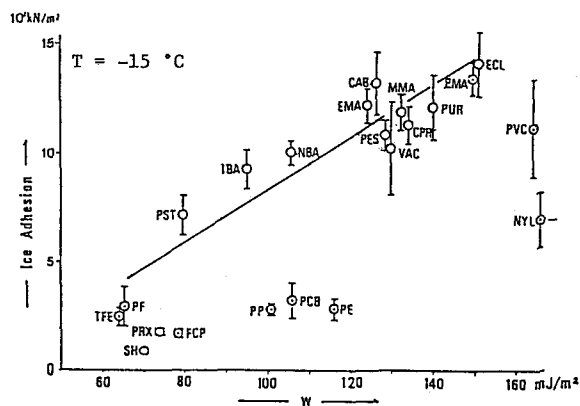


図 1 1 . 付着エネルギーと凍着強度の関係
(Murase)

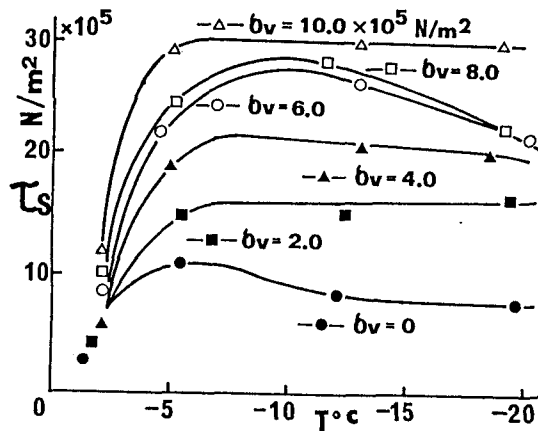


図 1 3 . 海水の温度とせん断強度

	接触角 (°)	自由表面エネルギー (erg/cm²)	付着エネルギー (erg/cm²)
低密度ポリエチレン	65	33.2	155.1
ウレタンエラストマー	65	39.0	155.1
軟質ウレタンエラストマー	65	39.0	155.1
高密度ポリエチレン	88	35.0	112.8

表 2 . 材料の性質