

(昭和 49 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

極低温における諸材料の摩擦係数について

正員 岡 本 富 保* 正員 片 埜 泰 治*
正員 栗 原 至 道** 正員 赤 根 晴 雄**

On the Coefficient of Friction of Some Materials under
Cryogenic Temperature

by Tomiyasu Okamoto, *Member* Yasuharu Katata, *Member*
Tomomichi Kurihara, *Member* Haruo Akane, *Member*

Summary

In designing the supporting system of the self-supporting tank of LNG carrier, it is very important to evaluate the frictional force acting at the sliding parts. But there is only few available data for such an object.

The authors carried out serial tests for measuring the coefficient of friction of some materials which are supposed to be used for the supporting system, under cryogenic temperature and obtained some available data and useful informations for the actual design.

1 緒 言

極低温液体運搬船においては、独立タンク方式では、船体とタンクとの間のスペーサーは船体傾斜などによるタンク移動を防止するストッパー構造と、タンク重量を支持する支持台とから構成される場合がある。このような構造では、冷却による拘束力を小さくするためには支持台のすべり抵抗を小さくして、タンクが自由に収縮可能とする方が望ましいが、一方ストッパー構造に対しては支持台のすべり抵抗を考慮に入れることによってその負担を軽減することが可能となる。

このようなタンク支持部分の設計に当っては支持台のすべり面に使用される材料の摩擦係数を明確に知ることが必要であるが、特に低温での摩擦係数を計測した例は非常に少ない。そこで支持台に使用されると想定される種々の材料のうちから数種のものを選び、次の項目について実験を行なった。

- 1) 材料の組合せによる摩擦係数の変化
- 2) 表面加工条件の影響
- 3) 表面温度の摩擦に及ぼす影響

実験は小形の模型試験装置を用いて系統的に実施し、さらに形状の影響を確認するため数種の組合せについて大形寸法の実験を行なった。これらの結果を取纏めて報告する。

2 実験方法

2.1 小形模型実験

1) 実験装置の概要：実験装置の概要を図1に示す。すなわちウォーム歯車を介したねじ軸により定速で移動できる移動台車に固定した下部試験片上に上部試験片を設置し、両試験片間の面圧は鉛直の油圧シリンダーにより所定の値に設定することができる。試験は移動台車をレール上を移動させて行ない、摩擦力は移動台車とねじ軸との間に挿入した荷重計によって検出する。

低温の実験には移動台車上に液体窒素の冷却槽を設け、試験片の表面温度が所定の温度であることを確認して

* 日立造船(株)船舶事業本部

** 日立造船(株)技術研究所

すべり速度 : 0.5 mm/min
 油圧シリンダ径 : 36 mm
 最大荷重 : 1600 kg
 上部試験片 : 20 mm x 20 mm x 10 mm
 下部試験片 : 50 mm x 140 mm x 12 mm

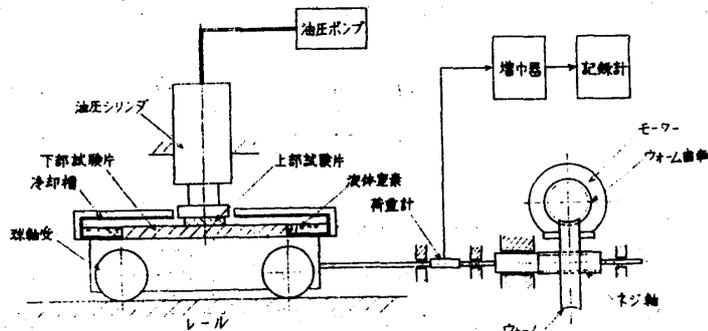


図1 小型模型試験装置

表1 供試材の詳細

材料	上部試験片		下部試験片		実験No.	常温	低温	本形試験
	面状況	すべり方向	材料	面状況				
フェノリック材	成形ま	→	9% Ni鋼	ショットブラスト	→	1	○	○
	▽	→		▽	→	2	○	○
	▽	→		▽	→	3	○	○
	▽	→		▽	→	4	○	○
	▽	→		▽	→	5	○	○
フェノリック材	成形ま	→	フェノリック材	成形ま	→	6	○	○
	▽	→		▽	→	7	○	○
	▽	→		▽	→	8	○	○
	▽	→		▽	→	9	○	○
	▽	→		▽	→	10	○	○
	▽	→		▽	→	11	○	○
フェノリック材	成形ま	→	ステンレス	ロールま	→	13	○	○
	▽	→		▽	→	14	○	○
	▽	→		▽	→	15	○	○
合材ブロック	横	→	9% Ni鋼	ショットブラスト	→	18	○	○
		→		ショットブラスト	→	19	○	○
	面	→	アルミ合金	ロールま	→	20	○	○
		→		ロールま	→	21	○	○
		→		強化合板	→	22	○	○
		→		強化合板	→	23	○	○
強化合板	標準面	→	アルミ合金	ロールま	→	25	○	○
		→		ロールま	→	26	○	○

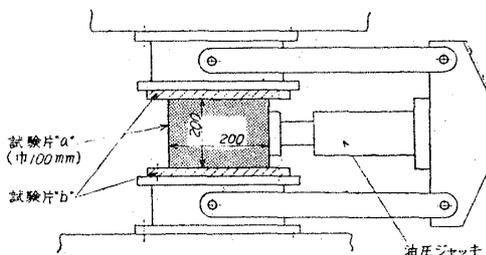


図2 大型模型試験装置

実験を行なった。又低温時には大気中の水分が摩擦に影響すると考えられるので、空気を窒素ガスで置換してその影響も調べた。

実験条件は次のとおりである。

摩擦速度 : 0.5 mm/min

面圧 : { 50, 150, 300, 400 kg/cm²
 { 5, 20, 40, 60 " }

試験片寸法 : 上部試験片 20×20×10 mm

下部試験片 140×50×12 mm

雰囲気温度 : 室温 約 -196°C

雰囲気状態 : 大気中 N₂ ガス中

2) 供試材 : 使用した供試材の詳細は表1に示すとおりである。9% Ni 鋼面はショットブラスト施工および切削加工, アルミ合金およびステンレス鋼の面はロールのままとした。フェノリック材については表面あらかさの影響を確認するため、成形のままのものと表面を切削加工したもの2種類の合計3種、合板ブロックは木口をペーパー仕上げしたもの

表2 大形模型試験条件

試験片番号	荷重		実験No. 1			荷重		実験No. 2		
	Ton	kg/cm ²	1	4	5	Ton	(kg/cm ²)	18	19	22
1	0	0	*	*	*	0	0	*	*	*
2	10	50	*	*	*	4	20	○	○	○
3	20	100	*	*	*	8	40	○	○	○
4	30	150	○	○	○	12	60	*	*	●
5	40	200	○	○	○	14	70	○	○	○
6	50	250	*	*	*					
7	60	300	○	○	○					

* ; 5回繰返し摩擦
 ● ; 2回
 ○ ; 1回
 ** ; 表1の実験Noと同じ

の、強化合板は成形のままのものを使用した。

これらの各材料について表面あらかさ、加工条痕の方向の影響を調べるためその組合せを種々変えて実験を行なった。

2.2 大形模型実験

実験装置と実験条件 : 実験装置は図2に示すとおり試験片 "a" を二枚の試験片 "b" ではさんで、400 ton アムスラー試験機で加圧し、試験片 "a" を油圧ジャッキで横移動させて横押力から移動時の摩擦力を求めた。

供試材の組合せは表1, 実験条件は表2に示すとおりである。

3 実験結果とその検討

3.1 フェノリック材と9% Ni 鋼の摩擦

1) 摩擦回数と摩擦係数について: 小形模型実験において一定の面圧のもとに繰返し摩擦試験を行なって, 摩擦係数と摩擦回数の関係を求めてみると, 図3に示すごとくになる。すなわち摩擦回数が増加すると摩擦係数は増加して一定値に収れんする傾向にあるが, 面圧がきわめて高くなるとこの傾向は緩和する。

この実験から摩擦係数としては数回繰返して落ちついた値を採り, 面圧に対して整理すると図4に示すごとくになる。図から明らかなとおり摩擦係数は面圧 50 kg/cm^2 及至 150 kg/cm^2 で極大値をとり, これ以上の面圧では漸減する傾向を示す。大形模型実験の場合は繰返し数が少ないため初回の摩擦係数をプロットしたがこの傾向は見られない。これは小形模型実験の場合の初回の値においても同様である。

摩擦回数の増加によって摩擦係数が増加するのは, 摩擦によってフェノリック材の摩耗粉が発生し, これが摩擦面に介在するために生じたものと推定し次の実験を行なった。

摩擦の過程で発生した摩耗粉を取除き, 同様の条件で摩擦を繰返すと図5に示すとおり, 摩擦係数は一時低下し摩擦繰返し数を増すとふたたび漸次増加する傾向がみられた。この増加する原因については写真1に示すように発生した摩耗粉が9% Ni 鋼の表面に象嵌されるためと推定される。この傾向は前述のごとくに面圧が増大しても同様であるが摩擦係数が増加する割合は少なくなる。

2) 表面あらしの影響について

a) フェノリック材の表面あらし: 9% Ni 鋼の表面はショットブラストとして, フェノリック材の表面あらしを変えて実験を行なった結果は図3でわかるように, フェノリック材の表面あらしの影響は殆んどないものと考えられる。これは前述のとおりショットブラストを行なった9% Ni 鋼の表面はフェノリック材の表面あらしよりも数倍あらく, 又両者の硬さにも大きな差があるため, 摩擦を繰返すことによってフェノリック材の表面は9% Ni 鋼によって削除され平坦化すること, 一方摩擦によって生じた摩耗粉によって9% Ni 鋼の表面も平坦化されるなどの理由によるものと考えられる。

b) 9% Ni 鋼の表面あらし: 9% Ni 鋼の表面をショットブラストしたもの外に, 切削, 研摩加工して表面

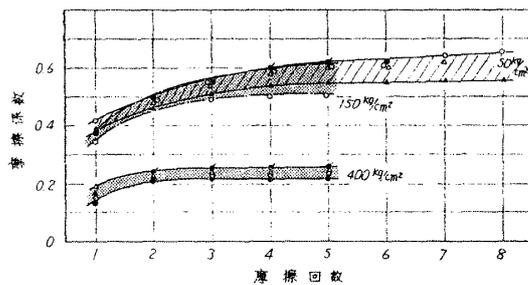


図3 フェノリック材と9% Ni 鋼の摩擦係数

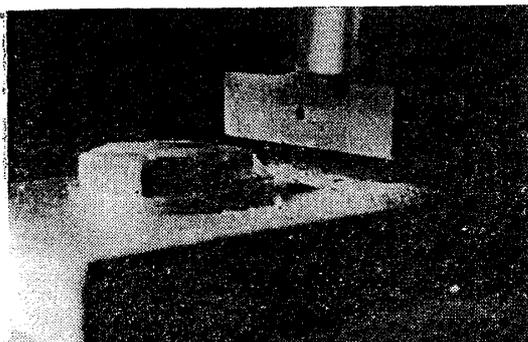


写真1 フェノリック材の摩耗粉

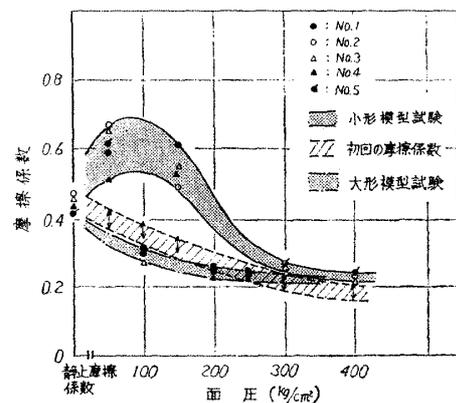


図4 フェノリック材と9% Ni 鋼の面圧と摩擦係数

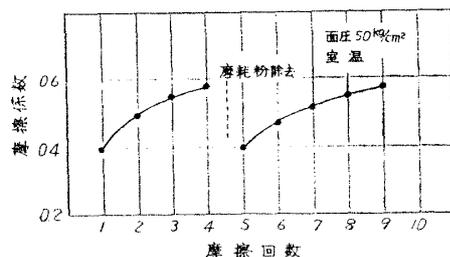


図5 フェノリック材と9% Ni 鋼の摩擦に及ぼす摩耗粉の影響

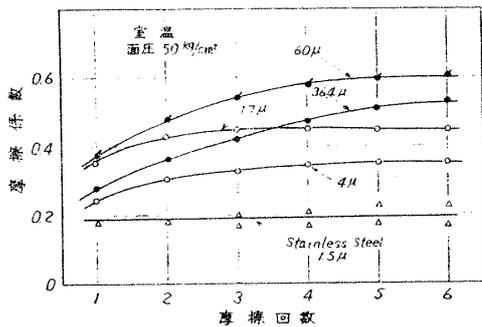


図6 9% Ni 鋼の表面あらしと摩擦係数

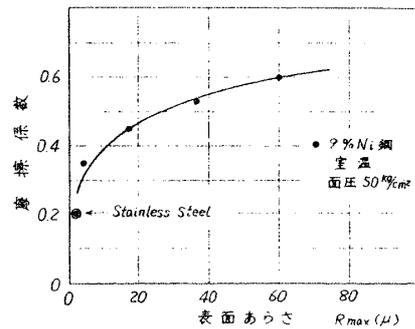


図7 9% Ni 鋼の表面あらしと摩擦係数

表3 試験条件

冷媒	上試験片 (フェノリック材) 温度	下試験片 (9% Ni 鋼) 温度	O ₂ 濃度
液体窒素	-130°C ~ -150°C	-180°C ~ -195°C	0.6 ~ 8.1%
ドライアイス	-4°C ~ -7°C	-30°C ~ -34°C	

O₂ 濃度は窒素ガス封入の場合

あらさを変えた試験片で面圧 50 kg/cm² で試験を実施した。その結果は図6に示すとおりである。図中表面あらし 1.5 μ についてはステンレス鋼の場合を記入した。表面あらしが小さくなる程、摩擦回数によって摩擦係数の増加する割合は少なくなる傾向にあり、また発生する摩耗粉の量も少なくなる。これらの結果をもとに摩擦係数と表面あらしの関係を示すと図7のごとくになり、表面あらしの小さいもの程摩擦係数は低くなる。

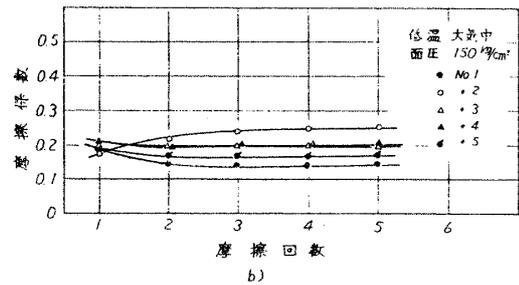
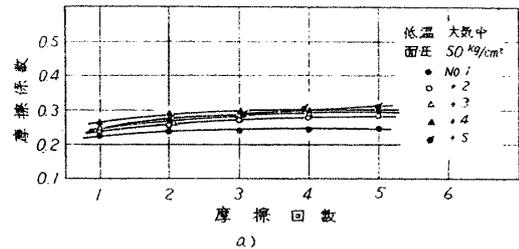


図8 フェノリック材と 9% Ni 鋼の低温摩擦係数

3) 低温での摩擦係数について：図1に示す試験片の周囲に液体窒素の槽を造り、大気中で摩擦係数を測定した。この時の試験片の温度は滑動表面下 1 mm の位置で計測した。その結果は表3のとおりであり、上部試験片の温度が若干高く計測された。摩擦回数と摩擦係数の関係は図8に示すとおりであり、室温での試験の場合のように繰返し回数による摩擦係数の顕著な変化は認められない。またこれを面圧について整理すると図9のとおりとなり、面圧が増加すると摩擦係数が低下する傾向は室温の場合とほぼ同様である。

大気中の試験では摩擦面に大気中の水分が凝結したと考えられる霜状の堆積物がみられた。この影響を調査するために、窒素ガスを試験片の周囲に封入し空気の浸入を抑えて試験を行なった。その結果は図9の点線で示す

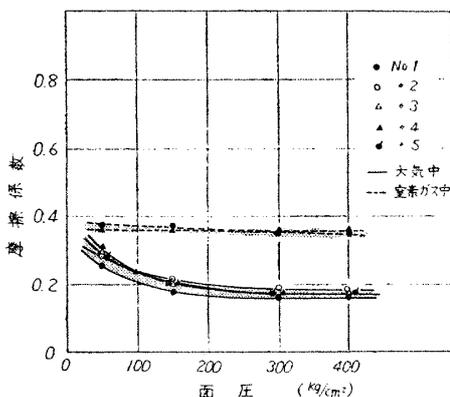


図9 フェノリック材と 9% Ni 鋼の低温における面圧と摩擦係数

ごとくなり荷重の影響を殆んど受けず 50~400 kg/cm² の面圧で摩擦係数はほぼ一定となった。摩擦係数としては大気中の計測値に比して約 2 倍となる。

参考のためドライアイスを使用し、試験片温度を -30 ~ -34°C とし面圧 400 kg/cm² の場合について同様の試験を行ない、摩擦係数と表面温度の関係を求めると図10に示すとおりとなった。温度を下げると摩擦係数は上昇の傾向を示し、Bowden¹⁾ らの実験結果と傾向的によく一致している。

3.2 フェノリック材同志の摩擦

1) 室温での摩擦について：表1に示す組合せについてフェノリック材同志の摩擦係数と摩擦回数の関係を求めた

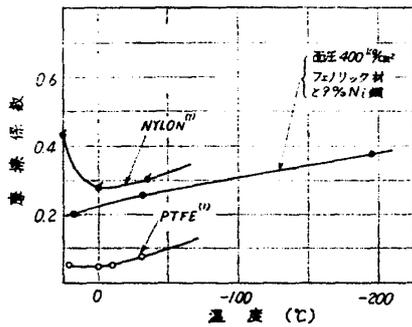


図 10 温度と摩擦係数

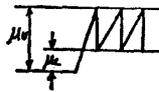


図 11 (a) フェノリック材の Stick-Slip 現象

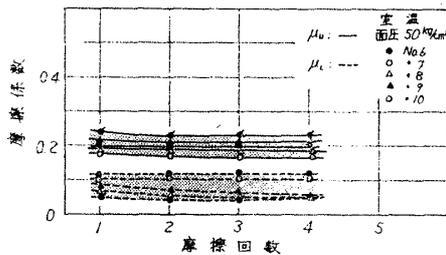


図 11 (b) フェノリック材の摩擦係数

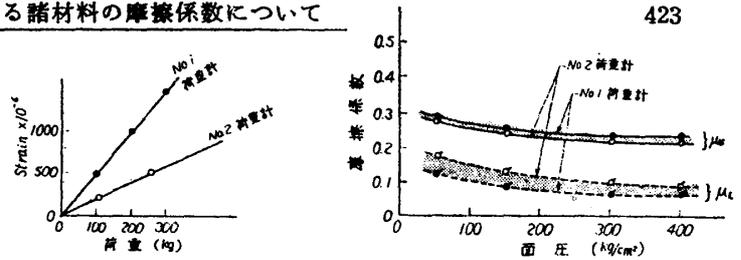


図 12 (a) 荷重計の検定線図 (b) フェノリック材の摩擦係数

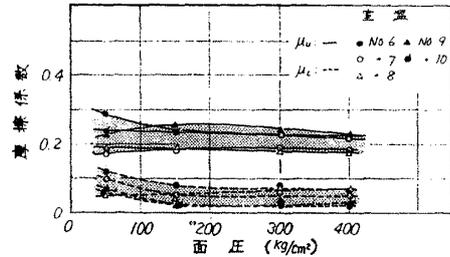


図 13 フェノリック材の面圧と摩擦係数

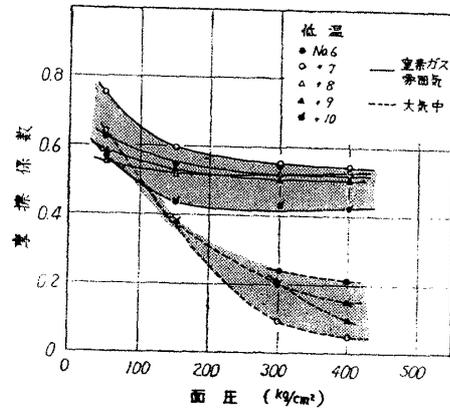


図 14 フェノリック材の低温における摩擦係数

例は図 11 (b) に示すとおりである。フェノリック材同志の組合せでは図 11 (a) に示す stick-slip の現象は摩擦を繰返しても、又面圧を高くしても消失しなかった。

stick-slip の現象は下試験片を移動させる試験装置の駆動系ことに荷重計のパネ定数に関係すると推定されるので、図 12 (a) に示すとき 2 種類の荷重計を使用して試験を行なった。その結果は図 12 (b) に示すとおりであり、摩擦の変動量は荷重計のパネ定数を大きくする程小さくなるが stick-slip の現象を消すことはできなかった。他の材料の組合せではこのような結果は見られなかったため、これはフェノリック材同志の摩擦に固有な現象と考えられる。

この stick-slip による摩擦係数の変動量を図 11 (a) のごとくに μ_s , μ_d であらわし、面圧に対して整理すると図 13 に示すごとくになる。図から明らかなおお表面あらしの影響については明確な差は見られないが、いずれの表面あらしの場合でも面圧が高くなると摩擦係数は低くなる傾向にある。

2) 低温での摩擦について：大気中、窒素ガス雰囲気中で摩擦係数計測結果は図 14 に示すとおりである。低温の場合フェノリック材と 9% Ni 鋼の組合せの場合と同様、大気中で計測した摩擦係数よりも窒素ガス雰囲気中の摩擦係数の方が高くなる。しかしいずれの場合も stick-slip の現象は見られなかった。

又フェノリック材の表面あらしによる差は明確には認められないが、表面あらしの細かいものの方が若干摩擦係数は高くなる傾向を示す。面圧に対しては面圧が高くなる程摩擦係数が低くなるのは室温の場合と同様である。

3.3 フェノリック材とステンレス鋼の摩擦

フェノリック材とステンレス鋼の摩擦は非常に安定しており、フェノリック材同志の組合せに見られた stick-slip の現象は見られず、数回摩擦を繰返しても摩擦係数が増加する傾向は認められなかった。

室温および窒素ガス雰囲気中で低温の摩擦係数計測結果は図 15 に示すとおりである。摩擦係数は室温、低温ともに面圧が増加すると若干低下する。フェノリック材の表面あらしによる差は若干認められ、表面あらしのあらいもの程摩擦係数は低くなる。これはフェノリック材の表面あらしがあらい場合、摩擦力はフェノリック材

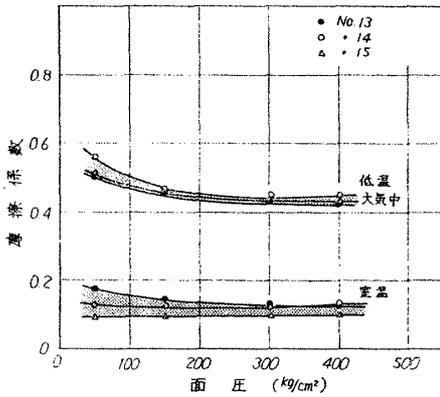


図15 フェノリック材とステンレス鋼の摩擦係数

室温
 合板ブロックと9%Ni鋼 { ● No.18 ● 大形模型No18
 ○ No.19 ○ ○ No.19
 合板ブロックとアルミ合金 { △ No.20 △ △ No.20
 ▲ No.21 ▲ ▲ No.21
 — 小形模型試験

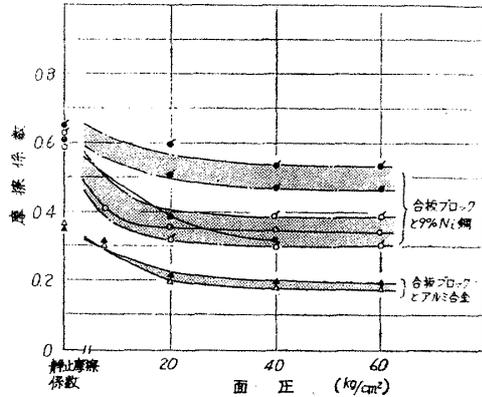


図16 合板ブロックと9%Ni鋼, アルミ合金の摩擦係数

合板ブロックと9%Ni鋼 { ● No.18 ● 大形模型試験
 ○ No.19 ○ ○ No.19
 合板ブロックとアルミ合金 { △ No.20 △ △ No.20
 ▲ No.21 ▲ ▲ No.21
 — 窒素ガス雰囲気
 - - - 大気中

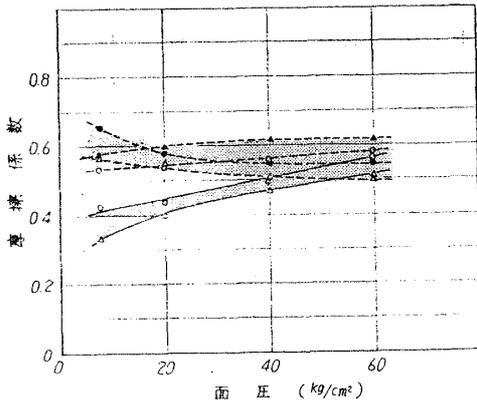


図17 合板ブロックと9%Ni鋼, アルミ合金の摩擦係数 (低温)

強化合板と合板ブロック { ● No.22 ● 大形模型試験
 ○ No.23 ○ ○ No.23
 強化合板とアルミ合金 { △ No.24 △ △ No.24
 ▲ No.25 ▲ ▲ No.25
 — 窒素ガス雰囲気
 - - - 室温

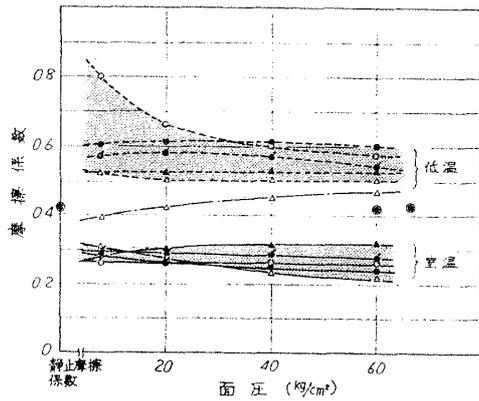


図18 強化合板と合板ブロック, アルミ合金の摩擦係数

の剪断抵抗に起因すると考えられるが、フェノリック材の表面あらかさが細くなるとフェノリック材とステンレス鋼の間に局部的に凝着が生じ、ステンレス鋼にも剪断を生じる部分が発生するため摩擦係数は高くなるものと思われる。このことはフェノリック材に成形のままのものをを用いた試験で、試験後フェノリック材の表面にステンレス鋼の摩耗粉が付着していたことでも裏付けられる。

3.4 合板ブロックとの摩擦

1) 合板ブロックと9% Ni 鋼：室温における摩擦係数と面圧の関係は図16に示すとおりである。図に大形模型試験の結果も記入したが、大形模型試験の結果の方が小形模型試験の結果よりも摩擦係数は高くなる。しかしいずれの場合も面圧が増加すると摩擦係数は低くなる傾向にある。合板ブロックの木口の積層方向と摩擦係数の間には明確な差は認められない。

低温における結果は図17に示すとおりである。室温の場合と比較して摩擦係数は高くなる。No.19の組合せについて大気中、窒素ガス雰囲気中の比較を行なったが、フェノリック材の場合ほど顕著な差はなく大気中の方が若干高くなる。

2) 合板ブロックとアルミ合金：室温の場合を図16、低温の場合を図17に示す。室温の場合の摩擦係数は9% Ni 鋼と組合せたものよりも低くなる、これは9% Ni 鋼とアルミ合金の表面あらかさの差が結果として表われたものと思われる。しかし低温になるとこの表面あらかさの差は明確に表われず、9% Ni 鋼と組合せた場合とほぼ同程度の摩擦係数を示す。

表 4 試験結果

材 料	温 度		試 験 結 果				設 計 採 用 値	
			小 形 試 験		大 形 試 験			
			max	min	max	min	max	min
フェノリック材 9%Ni鋼	室 温	大 気 中	W.D 0.65	0.2	0.45	0.2	0.4	0.2
	低 温	大 気 中	0.32	0.15				
		窒素ガス中	0.38	0.35				
フェノリック材 フェノリック材	室 温	大 気 中	0.3	S.S 0.05			0.6	0.4
	低 温	大 気 中	0.62	0.05				
		窒素ガス中	0.65	0.42				
フェノリック材 ステンレス鋼	室 温	大 気 中	0.18	0.1			0.55	0.4
	低 温	大 気 中	0.55	0.42				
合板ブロック 9% Ni 鋼	室 温	大 気 中	0.6	0.32	0.65	0.3	0.6	0.3
	低 温	大 気 中	0.65	0.5				
		窒素ガス中	0.57	0.4				
合板ブロック アルミ合金	室 温	大 気 中	0.35	0.2			0.6	0.4
	低 温	大 気 中	0.61	0.5				
		窒素ガス中	0.51	0.32				
強化合板 合板ブロック	室 温	大 気 中	0.3	0.22	0.42	0.42	0.6	0.3
	低 温	大 気 中	0.52	0.5				
		窒素ガス中	0.47	0.39				
強化合板 アルミ合金	室 温	大 気 中	0.32	0.28			0.6	0.4
	低 温	大 気 中	0.57	0.53				

W.D : 摩耗粉発生

S.S : Stick-Slip

3.5 強化合板との摩擦

1) 強化合板と合板ブロック：室温および低温の結果は図 18 に示すとおりである。室温においては摩擦係数は面圧に関係なくほぼ一定である。合板ブロックの木口の積層方向の差はほとんど認められない。No. 22 の組合せについて試験片寸法の確認を行なったが、大形試験の方が摩擦係数は高くなる。

この組合せについても低温の方が摩擦係数は高くなるが、大気中と窒素ガス雰囲気中とでは大気中の方がむしろ摩擦係数は高くなる。この傾向は 3.4 1) および 2) の場合にも見られた傾向で合板ブロック材に特有な現象と思われる。

2) 強化合板とアルミ合金：室温および低温の結果は図 18 に示すとおりである。室温、低温ともに摩擦係数は面圧に関係なくほぼ一定であるが、低温の方が摩擦係数が高くなるのは他の組合せの場合と同様である。

3.6 結果の総括

以上数種の組合せについて室温、低温の摩擦係数を計測したが、表面あらさなど条件を統一させることができなかったこと、stick-slip などがありデータにバラツキが生じたことを考えて、それぞれの組合せの摩擦係数はある範囲で表示するのが妥当であると思われる。このような観点から設計値として表 4 に示す値を採用しても実用上差支えないものと考えられる。

4 結 言

LNG タンク支持材として使用が想定される数種の組合せについて室温、低温の摩擦係数を求めた。低温の場

合、特にそれぞれの材料の物性値との関連で更に検討すべき問題点も多いと考えられ、今後機会があれば更に調査したいと考える。本結果が設計資料として役に立てば幸甚である。

参 考 文 献

- 1) Bowden and Taber : The Friction and Lubrication of Solid Part II, Oxford, (1964).
-