

ばら積穀類の挙動に関する実験的検討

(荷繰り免除に関する追加基準の作成)

木戸川 充 彦*

1. 緒 言

穀類をばら積運送する場合、その船舶に対しては「海上人命安全条約」(以下 SOLAS と略す) 第 VI 章が適用される。また、日本国内においては、この規定を全面的に取り入れた「穀類その他の特殊貨物船舶運送規則」が適用される。

これらの規定において穀類をばら積運送する船舶の貨物倉は、穀類の移動によって船舶の復原性に及ぼす影響を最小にするため満載または半載にかかわらず穀類の自由表面を平らにしなければならない。この作業は通常「荷繰り (Trimming)」と呼ばれている。荷繰りを行った満載貨物倉の断面形状を図 1 に示す。

一方、貨物倉に満載状態になるまで穀類を自由流入した場合、穀類は倉口縁部から水平面に対し約 30 度の角度で流入するため、穀類表面と甲板との間に空間が生じる。このような穀類の自由流入の結果生じる甲板下の空間が小さい場合、すなわち、穀類の移動によって船舶の復原性に及ぼす影響が少ない場合は、1974 年 SOLAS 第 VI 章第 3 規則 (c) に於いて各主管庁の裁量により荷繰り作業を免除することが認められている。ところが、この荷繰り免除規定の運用については各主管庁が Case by Case で対応しており、特に積荷港において多くの問題が生じたことから、IMO において国際的な統一解を定めようという動きが従来からなされてきた。このよ

うな中で、荷繰り免除に対する 1 つの国際的統一解釈として 1982 年 4 月に IMO MSC/Circ. 323 が採択された。

MSC/Circ. 323 において、荷繰り免除が適用される船舶とは「穀類積載に特に適した構造を有する船舶」と唱っており、具体的には図 2 に示すように穀類のいかなる横移動の影響をも制限するために 30 度以上傾斜した縦通隔壁を両舷甲板下に持つ一層甲板船を指す。従って、これらの船舶は実際上穀類の横方向への移動がないことから、貨物倉前後部の荷繰り免除が認められている。(図 3*参照) 一例として、荷繰りを行わずに積載した船舶の断面形状を図 3 に示す。この MSC/Circ. 323 は日本国内においては運輸省通達 船査 112 号により実施されている他、多くの SOLAS 批准国で採用されている。

このような荷繰り免除規定に対する国際的な解釈が確立されたことにより、この時期を前後として荷繰りを必要としないバルク型の穀類専用船が世界的に多く建造されるようになった。一方、最近では海上輸送の多種多様化に伴い、穀類のばら積運送にバルク型穀類専用船とは構造の異なる多目的貨物船を投入する機会が増えてきている。これらの船舶は、図 4 に示すようにフィーダホールまたはフィーディングダクトを設けることによって、穀類の自由流入により生じる甲板下の空間が最小となるように設計されたものであるが、MSC/Circ. 323 でい

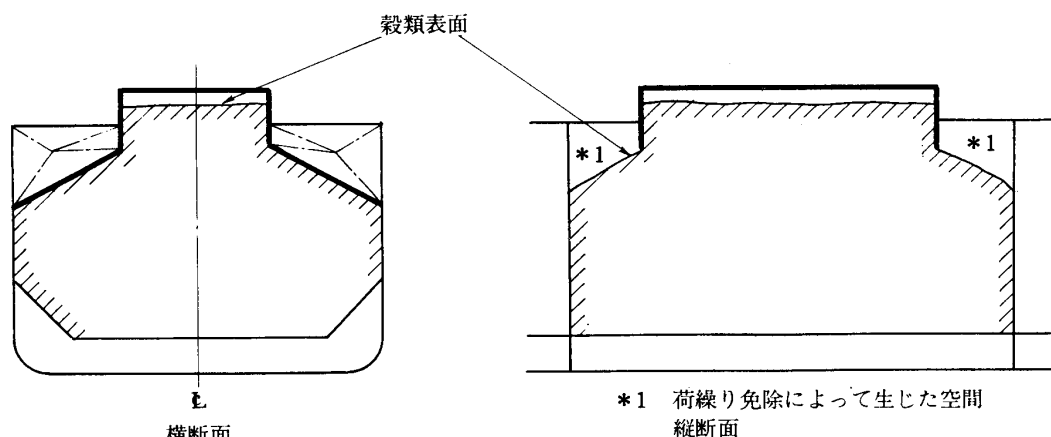


図 1 荷繰りを行った貨物倉の断面形状

* 船体部

う構造要件には合致していないため依然として主管庁の判断により Case by Case で処理されており、実際には荷繰り免除が認められていない船舶が多い。このため多目的貨物船を使用した場合、バルク型専用船と比べると荷繰りに要する時間および費用の面で運航コストに大きな差を生じている。

このような事情から、運航経済性を向上させる目的で多目的貨物船においても穀類を荷繰りせずに運航したいとの要望が海運関係業界から出されるようになった。

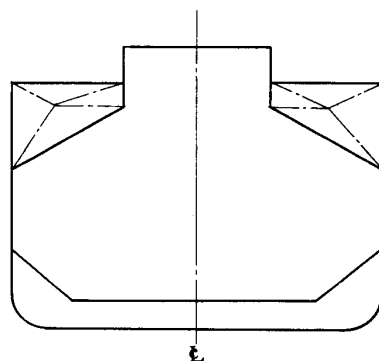
我が国はこのような現状を踏まえ、「穀類の移動が船舶の復原性に及ぼす影響を考慮すれば貨物倉の形状にかかわらず荷繰り免除が認められる」との思想に基づき、第 25 回 IMO コンテナ貨物小委員会（1984 年）（以下 BC 小委員会と称す）に対し、荷繰り免除の承認対象である船舶の構造または配置の要件を取り外し、SOLAS 第 VI 章第 4 規則の非損傷時復原性基準を満足すれば貨物倉の形状に関係なく穀類を満載し、かつ、荷繰りせずに積載できるように解釈を改正すべき旨の提案を行った。この日本提案は第 25 回 BC 小委員会では時間の制約により審議されず、翌年第 26 回 BC 小委員会におい

て審議されたが、

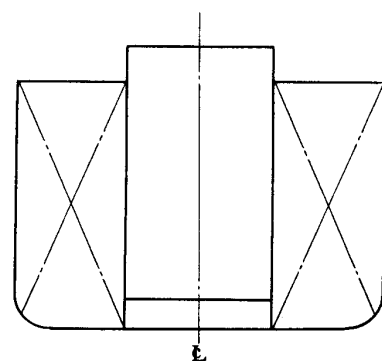
- 1) 日本提案は論理的ではあるが、穀類が荷繰りされていることを前提として作成された現行 SOLAS の非損傷時復原性基準だけで判断するのは無理がある。
- 2) 荷繰りしない穀類表面は容易に崩れるので、SOLAS 非損傷時復原性基準を満足する船舶であっても荷繰りされない穀類の挙動により横傾斜効果が増し、船体が常態的に傾斜する可能性がある。

との意見が出され、今後 BC 小委員会において日本提案に新しい復原性基準を付加する形で引き続き検討を進めることが決定された。

以上のような経過から、我が国では昭和 60 年 4 月に本会を事務局とした穀類運送基準検討会（以下、検討会と称す）が発足した。検討会では BC 小委員会における審議を踏まえた上で、荷繰りされない穀類の挙動と船舶の復原性との関係を解明することを目的とした模型実験を行い、日本提案に追加する新しい復原性基準を作成した。ここにその概要を報告する。

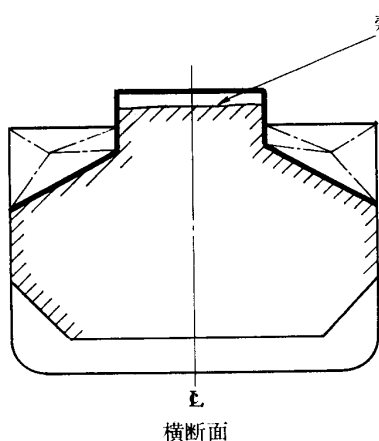


(a) トップサイドタンクを有する場合

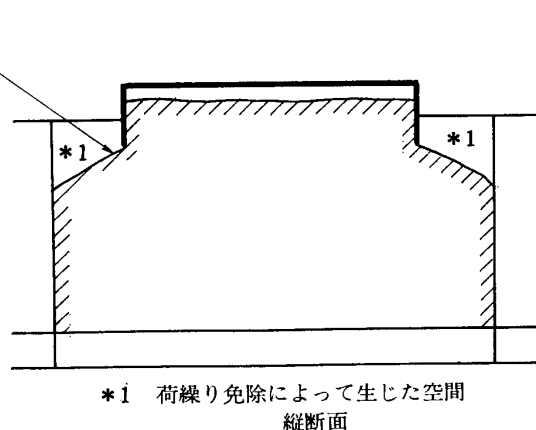


(b) 垂直縦通隔壁を有する場合

図 2 特に適した構造を有する船舶の代表例



横断面



*1 荷繰り免除によって生じた空間
縦断面

図 3 荷繰りが免除された貨物倉の断面形状

2. 穀類の荷崩れ

穀類の移動，特に穀類の荷崩れはその穀類固有の性質によって定まる静止角が大きく影響する．静止角は落下静止角と傾斜静止角に大別される．前者は停止角または安息角とも呼ばれ，穀類を上方より水平面上に自由落下させてできる円錐状の山の斜面と水平面のなす角度である（図5参照）．また，後者は平らにならされた穀類表面が傾斜により崩れ始める角度である（図6参照）．

従って，荷繰りされない穀類表面の傾斜角は落下静止角を意味し，水平に荷繰りされた穀類表面が船体の静かな傾斜により動き出す角度は傾斜静止角と同じである．また，落下静止角と傾斜静止角の間には相当量の差異が認められる．これは穀類の有する摩擦係数と大きく関係し，一般的に含水量が多い程また粒子が大きい程傾斜静止角が大きくなる．

船舶が穀類を積載し直立状態で出港した場合でも，航

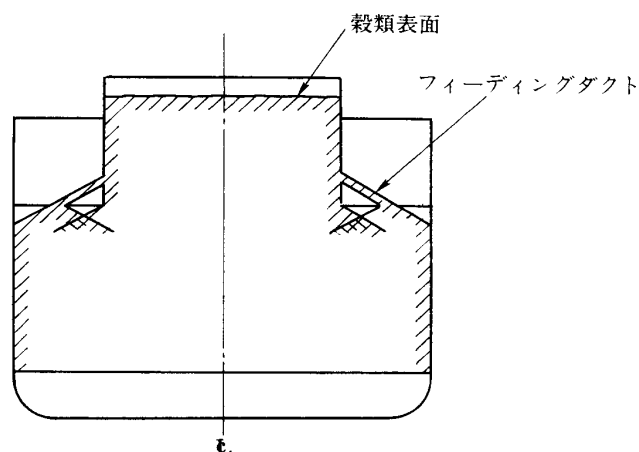


図4 多目的貨物船の一例

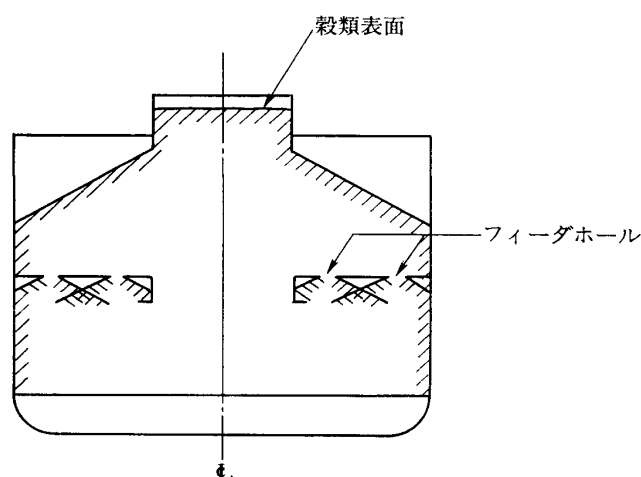


図5 落下静止角 ϕ

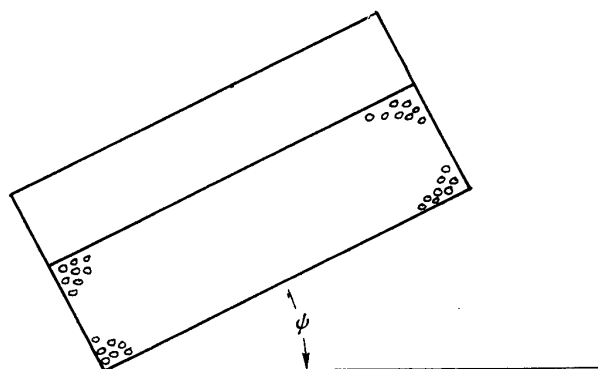


図6 傾斜静止角 ϕ

海中に穀類の荷崩れが生じると船体が片舷に傾き危険な状態に陥ることがある．1960年 SOLAS 当時，航海中の船体の動揺，特に横揺れによって積載した穀類が大きく荷崩れし，これが原因となって転覆，沈没した船舶が数多く報告され1974年 SOLAS への規制強化の導火線となった．

それ故，検討会では船体の横揺れにより生じる穀類の挙動に着目し，船体の横傾斜（静的）または横揺れ運動（動的）に対する穀類の挙動を観察するために以下の模型実験を行った．

3. 模型実験概要

船舶の横傾斜を想定した静的実験および船舶の横揺れ運動を想定した動的実験の二種類の模型実験を行った．

3.1 供試模型

長さ 150 M 程度の一般貨物船を供試船として選び，MSC/Circ. 323 の統一解釈による荷繰り免除が適用されない構造の貨物倉を，荷崩れによる穀類の流れに試験槽の寸法が影響を及ぼさないよう考慮し，50分の1の縮尺でモデル化した試験槽を作製した．試験槽横断面は穀類の挙動を観察するためにガラス張りとし，その他の部分はアクリル樹脂材料を使用した．試験槽全体図を図7に，寸法図を図8に示す．また，試験槽に任意の角度で横傾斜を与える傾斜装置および穀類を試験槽内に自由流入させるホッパーの概略図を図9に示す．

3.2 静的実験

船舶が横傾斜した場合の穀類の挙動を解明するために

以下の実験を行った。

供試穀物として、大豆、トウモロコシ、小麦および粟の4種類の粒の大きさの異なる穀物を使用した。試験槽内において荷繰りした穀類表面または荷繰りされない穀類表面をつくり種々の傾斜角（10度、20度、30度、35度、40度または45度）まで試験槽を静かに傾け、各傾斜角の試験槽横断面における穀類表面形状を撮影した。

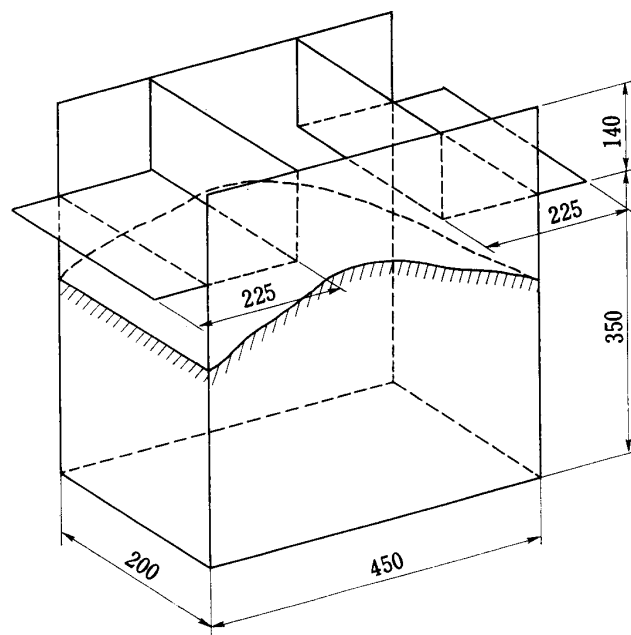
写真1および写真2は大豆を使用した場合の試験槽の直立状態および傾斜角30度における穀類表面形状を示したものである。次に、撮影した穀類表面形状をデジタイザーを使用してパーソナルコンピュータ（HP-216）に記録した。プロッターを使用して描いた穀類表面形状の変化を図10に示す。

3.3 動の実験

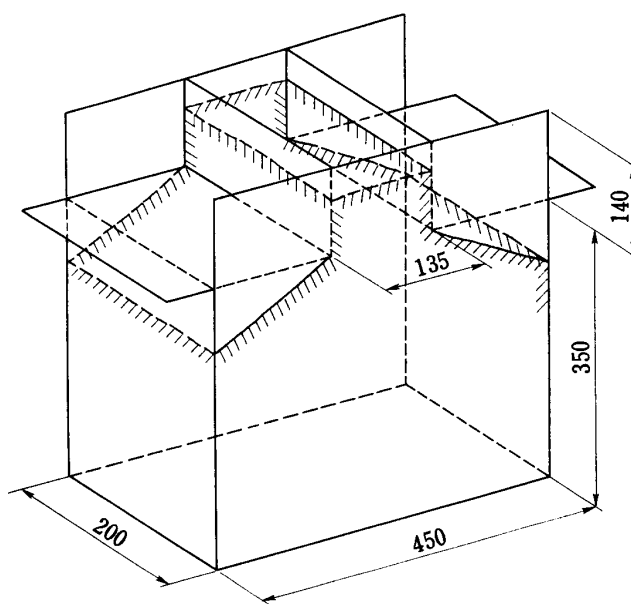
船舶が横揺れ運動を行った場合の穀類の挙動を解明するため、スプリングを使用し横揺れ運動をシュミレートした以下の実験を行った。

供試穀物として小麦を使用した。試験槽内に荷繰りされない満載状態の穀類表面をつくり、種々の初期傾斜角 θ_1 （10度、20度、30度、35度、40度）まで試験槽を静かに傾け、その後試験槽に横揺れ運動を与えた。また、試験槽の横揺れが終了したときの試験槽の静止角 θ_2 を測定した。試験槽の横揺れ運動は傾斜装置の四隅に取り

付けたスプリングにより発生させ、スプリングのバネ定数を変えることにより4種類の異なった周期を有する横揺れ運動を与えた。 $\theta_1=30$ 度における穀類表面形状および横揺れ運動後の静止状態における穀類表面形状を写真3(a), (b)に示す。図11の(a)~(e)は初期傾斜状態および静止状態の穀類表面を撮影し、静的実験と同様にパーソナルコンピュータを介してプロッターで描いた穀類表面形状を表わしたものである。破線は初期傾斜状態、実



(a) 静的実験（//：穀類表面）



(b) 動の実験（//：穀類表面）

図8 試験槽寸法図 単位：MM

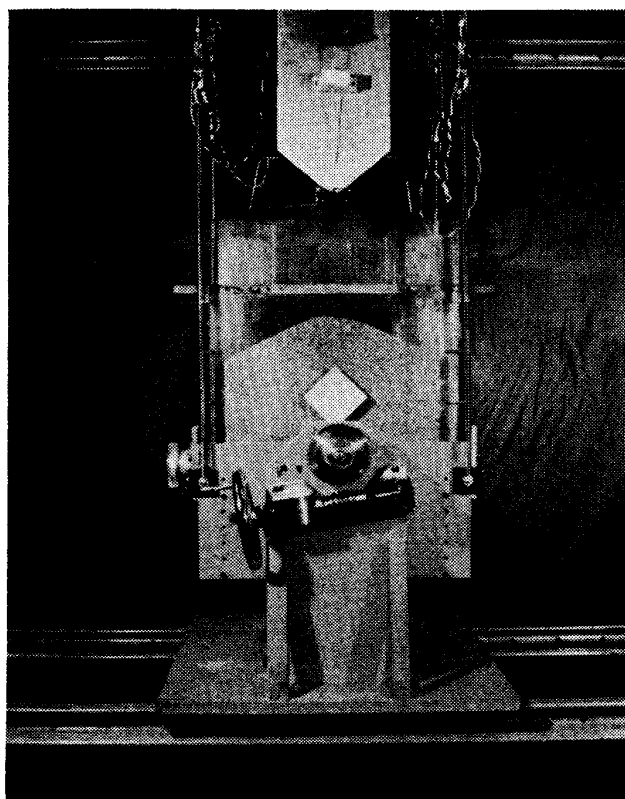


図7 試験槽全体図

線は静止状態の穀類表面形状を示している。

3.4 実験結果

模型実験により以下のことが観察された。

3.4.1 静的実験

試験槽の横傾斜に対する荷練りされた穀類表面の傾斜角および荷練りされない穀類表面の傾斜角の計測結果を表1(a), (b)に示す。ここで“穀類表面の傾斜角”とは、穀類の移動によって表面形状が試験槽の全面にわたりほぼ一定の傾きを成した場合の角度と定義している。

- 1) 荷練りされない穀類表面は荷練りされた穀類表面よりも小さな横傾斜角で移動を開始する。

- 2) 荷練りされない穀類表面は最初は点状に動き始めるがやがてある角度で厚い層をなして大きく崩れ出す。この時の試験槽の角度とは傾斜静止角と落下静止角の差に他ならず、大豆・トウモロコシでは12度～13度、小麦・粟では7度～8度であった。

3.4.2 動的实验

横揺れ運動後の試験槽の静止角 θ_2 を表2に示す。

動的試験により以下のことが観察された。

- 1) 横揺れ周期が2.4秒, 2.8秒, および3.2秒の場合, 横揺れ運動後の試験槽はほぼ直立状態に戻り, 荷練りされない穀類表面は荷練りされた穀類表面とほぼ同じ

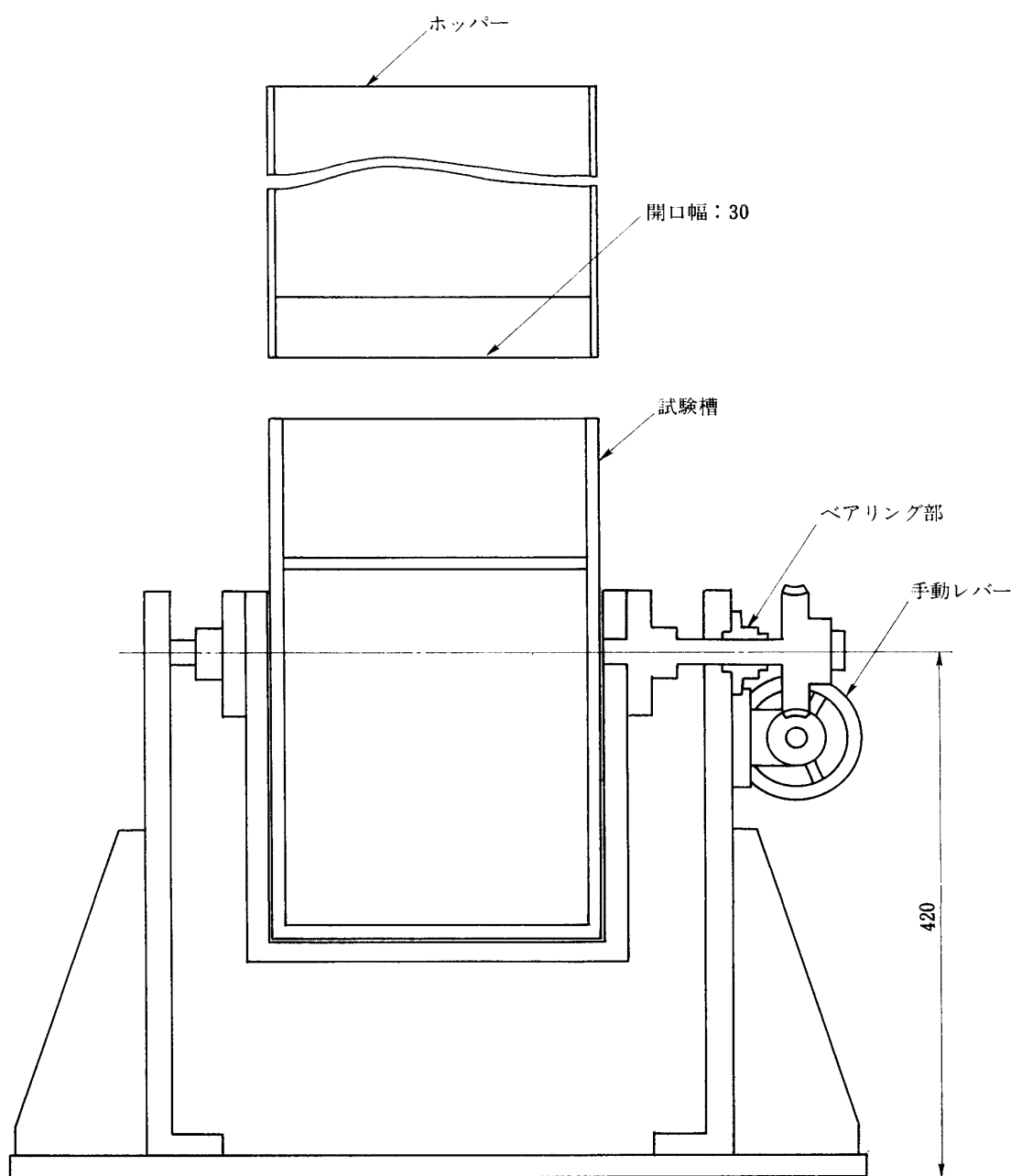


図9 傾斜装置およびホッパーの概略図 単位: MM

形状となる（以下この様な穀類表面形状の変化を Natural Trimming 現象と称す：（付録）参照の事）。

- 2) 横揺れ周期が 4.6 秒の場合、横揺れ運動の間は穀類表面形状に変化はなく、すなわち、Natural Trimming 現象は起こらず、 $\theta_1 \geq 20$ 度においてはいずれも 10 度程度の静止角を残している。
- 3) 横揺れ運動によって穀類表面が Natural Trimming 現象を起こす場合、貨物倉倉口部の穀類が倉口側線外の甲板下に生じた空間に供給される。

4. 荷繰り免除に対する追加基準の作成

緒言で述べたように、第 25 回 BC 小委員会に提出した荷繰り免除に関する日本提案は新しい復原性基準を付加する形で引き続き検討が進められるという第 26 回 BC

小委員会の審議結果に従い、各国においても検討が進められたが、米国の National Cargo Bureau（以下 NCB と称す）は以下の追加基準を提案した。

4.1 Immediate Shift による船体傾斜角の基準

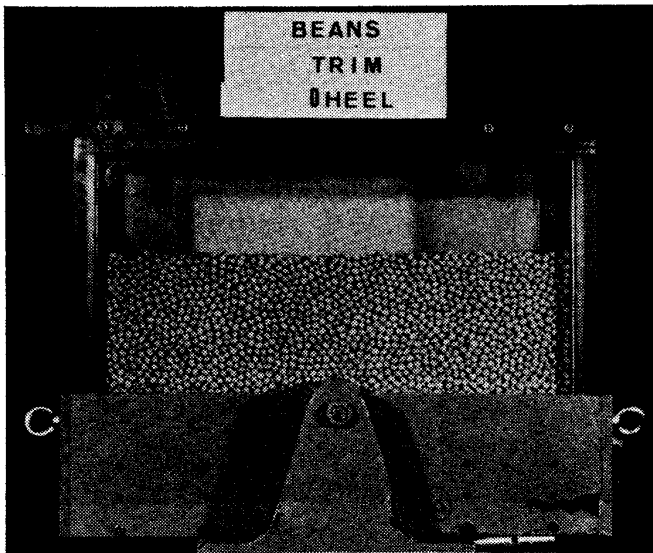
満載状態の荷繰りされない穀類が図 12 のような荷崩れ（Immediate Shift）を生じたとすると、以下の関係式が得られる。ここで n は倉口幅、 m は倉口側線外の甲板幅とする。また、 t は穀類表面の差を表す。

$$0.866 t^2 + (m+n)t = 0.2887 m^2 \quad (1)$$

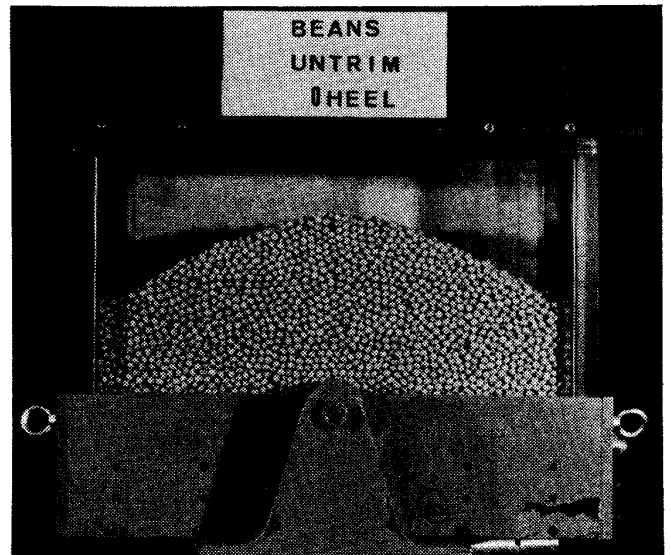
(1)式から穀類の移動による面積傾斜モーメント（AHM）は、(2)式で表わされる。

$$AHM =$$

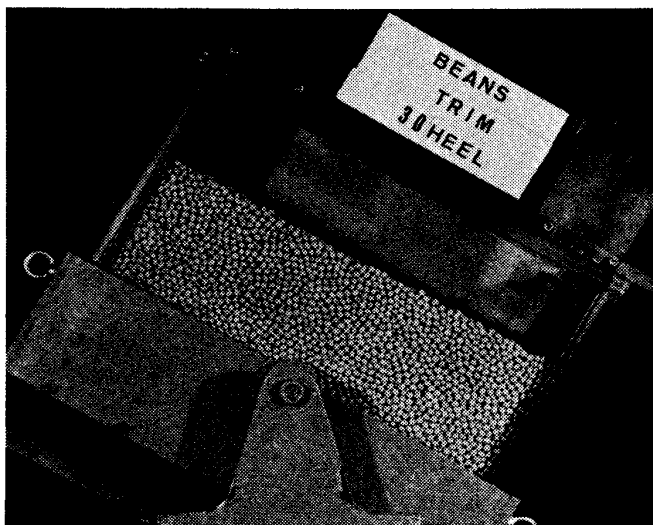
$$\frac{(0.5774m - t)^2 \times (0.667m + 0.5n + 0.5774t)}{1.1547} \quad (2)$$



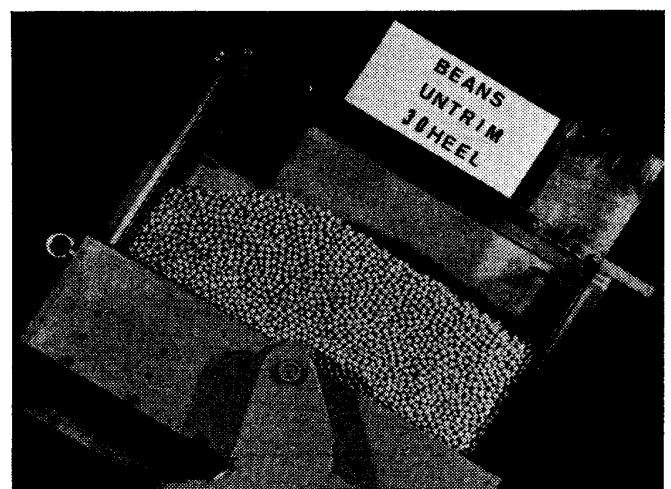
(a) 直立状態



(a) 直立状態



(b) 傾斜角 30 度



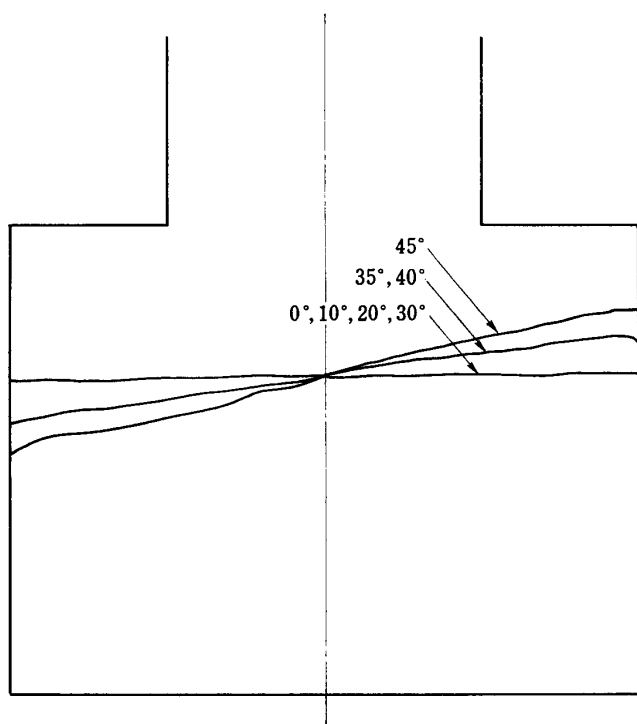
(b) 傾斜角 30 度

写真 1 静的実験における荷繰りされた穀類表面形状

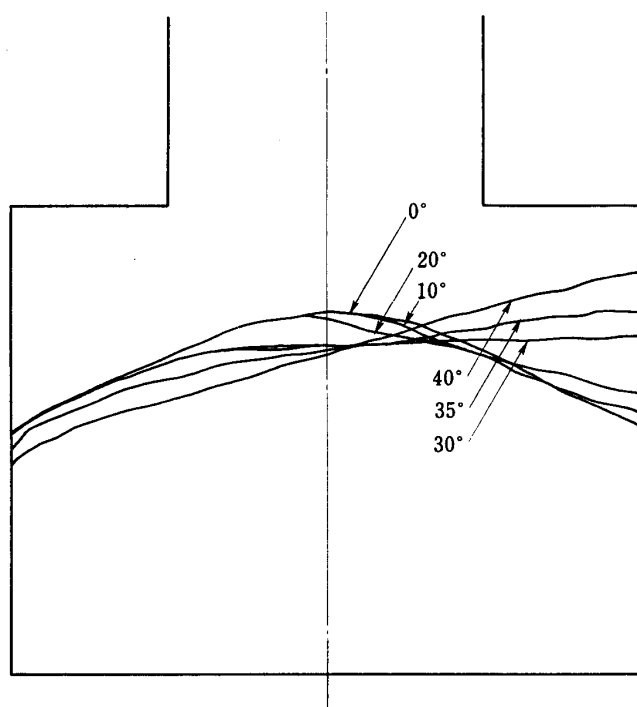
写真 2 静的実験における荷繰りされない穀類表面形状

従って、穀類の Immediate Shift による船体傾斜角 θ (度) は、(3)式で表わされる。

$$\theta = \frac{\text{傾斜モーメント}(MT-M) \times 57.3}{\text{排水量}(MT) \times GM(M)} \quad (3)$$



(a) 荷繰りされた穀類表面



(b) 荷繰りされない穀類表面

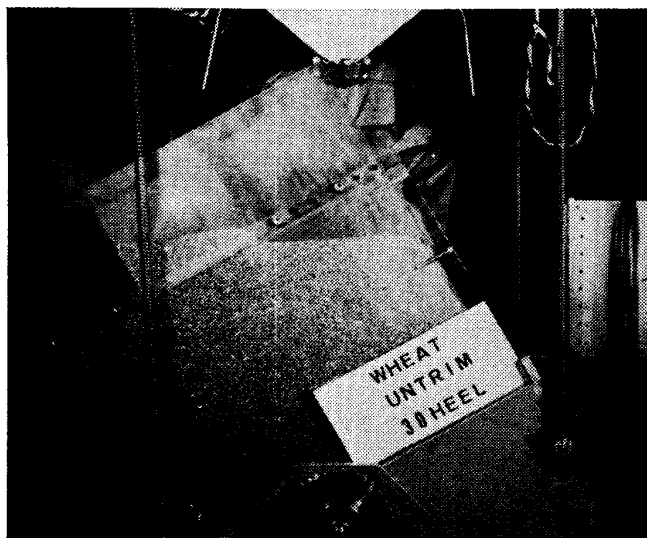
図 10 静的実験における穀類表面形状の変化

NCB は (3)式による船体傾斜角の最大値を 2 度としている。

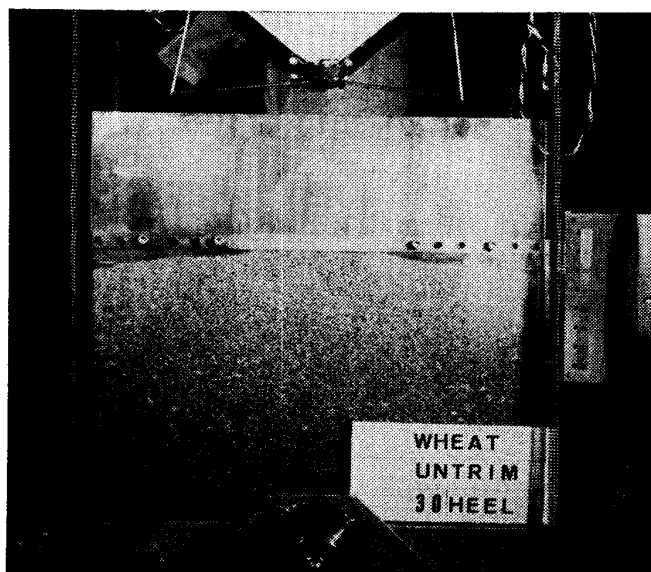
4.2 追加基準作成のための検討

検討会では、荷繰りされない穀類表面は 10 度前後の船体の横傾斜により大きな荷崩れを生じるという静的実験結果、および動の実験における Natural Trimming 現象に着目し、Immediate Shift による船体傾斜角の概念をさらに発展させる方針を打ち出し、以下の検討を行った。

試験槽において図 12 で仮定した 荷崩れ前の穀類表面形状と同じ穀類表面形状をつくりこれを 30 度傾斜させると図 12 に示す 荷崩れ後の穀類表面と同じ形状が得られる (写真 4 参照)。



(a) 横揺れ運動前



(b) 横揺れ運動後

写真 3 動の実験における穀類表面形状

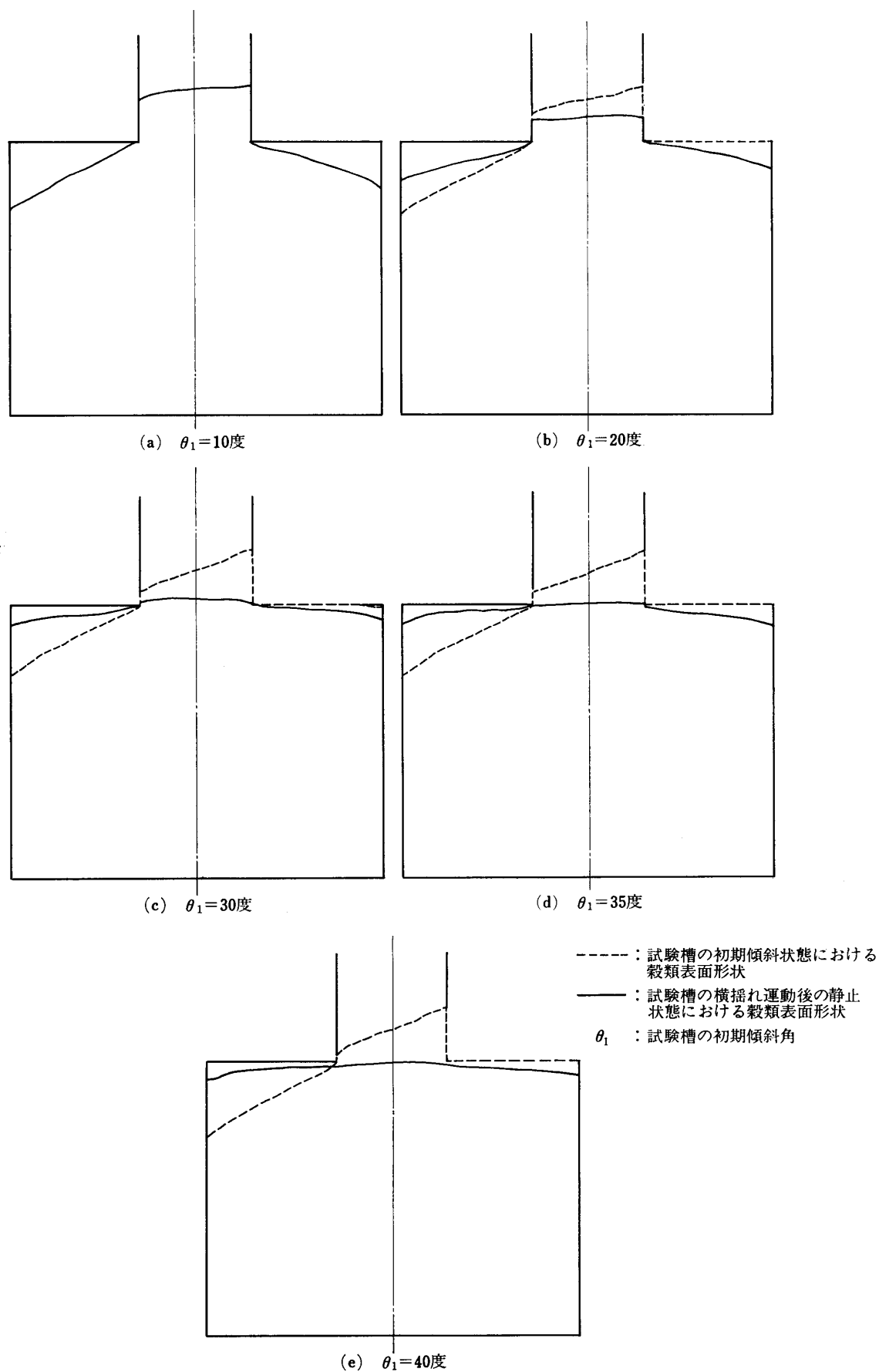


図11 動的実験における穀類表面形状の変化

(2)式を用い面積傾斜モーメントを求めると、試験槽の寸法 $m=0.112\text{ M}$, $n=0.225\text{ M}$ より、

$$AHM=0.492 \times 10^{-3} (M^3) \quad (4)$$

試験槽の長さ $L=0.2\text{ M}$, 実験に使用した小麦の載貨係数 S.F. (Stowage factor)=40.9 CF/LT より穀類の移動による傾斜モーメント $\lambda_0 (M)$ は次式で表わされる。

$$\lambda_0 = \frac{AHM \times L}{\text{穀類を含む試験槽の重量}} \times \frac{35.882}{\text{S.F.}}$$

表1 静的実験における穀類表面の傾斜角
(a) 荷繰りされた穀類表面

試験槽の 横傾斜角 (度)	穀類表面の傾斜角 (度)			
	大 豆	トウモロ コシ	小 麦	粟
10	0	0	0	0
20	0	0	0	0
30	0	0	1	0
35	7	0	12	7
40	8	12	12	13
45	13	12	19	18

(b) 荷繰りされない穀類表面

試験槽の 横傾斜角 (度)	穀類表面の傾斜角 (度)			
	大 豆	トウモロ コシ	小 麦	粟
10	—	—	—	—
20	—	—	—	—
30	0	0	0	—
35	3	2	9	7
40	9	13	13	13
45	17	16	19	18

表2 動的実験における試験槽の静止角

試験槽の 初期傾斜角 θ_1 (度)	試験槽の静止角 θ_2 (度)			
	T=2.4	T=2.8	T=3.2	T=4.6
10	0	3	2	3
20	1	2	2	8
30	0	0	3	10
35	0	1	1	9
40	2	0	0	7

(T: 試験槽の横揺れ周期 (秒))

$$=0.889 \times 10^{-3} (M) \quad (5)$$

スプリングの張力から求めた試験槽の復原挺 (GZ) 曲線を図13に示す。図13により得られた GZ 曲線と λ_0 の交点角を θ_A とすると、 θ_A は Immediate Shift による試験槽の傾斜角に他ならない。各横揺れ周期における交

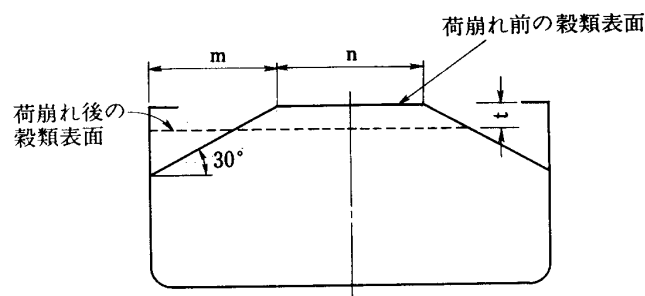
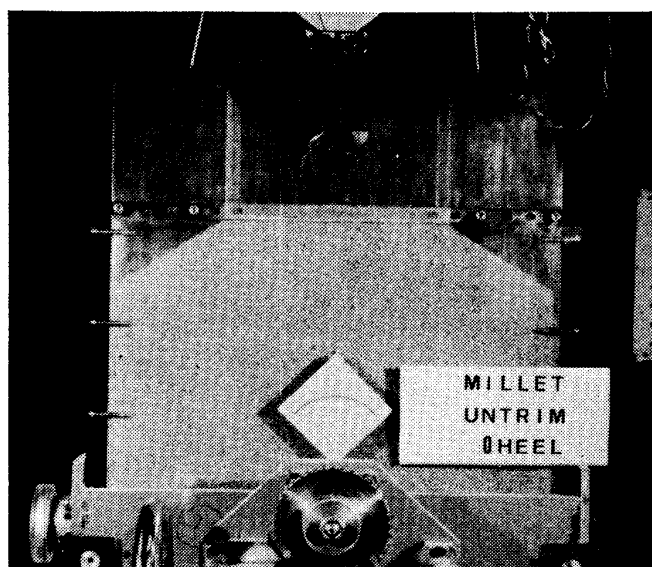


図12 Immediate Shift の概念



(a) 直立状態



(b) 傾斜角 30 度

写真4 Immediate Shift による穀類表面形状

点角 θ_A を表 3 に示す。

表 3 および動的実験結果から、Natural Trimming 現象を起す横揺れ周期 2.4 秒、2.8 秒、および 3.2 秒の動的実験において、交点角 θ_A はすべて NCB が提案する基準値（2 度）以内に収まる。一方 Natural Trimming 現象を起さない横揺れ周期 4.6 秒の動的実験では交点角は 2.3 度である。

従って、動的実験においては、

- 1) Immediate Shift による試験槽の傾斜角が 1.8 度以内に収まる場合、荷繰りされない穀類表面は Natural Trimming 現象を起し、試験槽は横揺れ運動終了後直立状態に復原する。
- 2) また、Immediate Shift による試験槽の傾斜角が 2.3 度を超える場合、荷繰りされない穀類表面は Natural Trimming 現象を起さないため、荷崩れにより一旦試験槽の片舷に移動した穀物は反対舷側に戻らない。この結果、試験槽は常態的に傾斜したまま横揺れ運動を終了する。

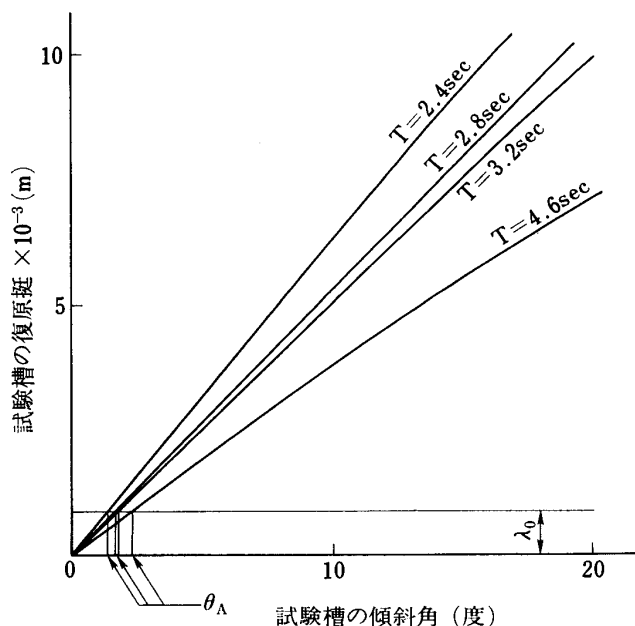


図 13 スプリングにより支持された試験槽の GZ 曲線

表 3 交点角

周期 (秒)	θ_A (度)
T=2.4	1.4
T=2.8	1.7
T=3.2	1.8
T=4.6	2.3

- 3) Natural Trimming 現象を生じさせる試験槽の最大傾斜角は 1.8 度から 2.3 度の間に存在する。
という結果が得られた。

次に、この実験結果を基に、Immediate Shift による船体傾斜角の基準値を設定するために実船試算を行った。試算にはばら積貨物船として運航実績のある多目的船を使用した。その主要目および全体配置図を図 14 に示す。

この船舶は、MSC/Circ. 323 により荷繰り免除が適用される、いわゆる「穀類積載に特に適した構造を有する船舶」ではないが、フィーダホールを設けることによって、穀類の自由流入により生じる甲板下の空間が最小となるように設計されていることから、米国政府により荷繰り免除が認められている船舶である。試算結果を表 4 に示す。

表 4 により示された実船試算結果より、載貨係数 S. F. (Stowage Factor) = 43.5 CF/LT から S. F. = 65.0 CF/LT の積付状態はすべて SOLAS 第 VI 章第 4 規則 (b) による非損傷時復原性基準を満足している。例えば、S. F. = 55.0 CF/LT の積付状態において非損傷時復原性基準値から導き出された穀類の許容傾斜モーメント 6,563 MT-M に対し、実際の傾斜モーメントは 5,000 MT-M である。これに対して、Immediate Shift による船体傾斜角は、S. F. = 43.5 CF/LT から S. F. = 55.0 CF/LT の積付状態では 2 度以内に収まるが、S. F. = 65.0 CF/LT の積付状態においては、2.33 度という結果が得られた。

4.3 検討会における審議

検討会では、実船試算結果（表 4）と模型実験における Immediate Shift による試験槽の傾斜角（表 3）との比較、検討を行い以下の結論を得た。

- 1) Immediate Shift による船体傾斜角がほぼ 2 度以内に収まる場合、荷繰りされない穀類表面は船舶の横揺れ運動により Natural Trimming 現象を起し、穀類表面は荷繰りされた状態とほぼ同等となる。ことが本実験及び多目的船における従来からの運航

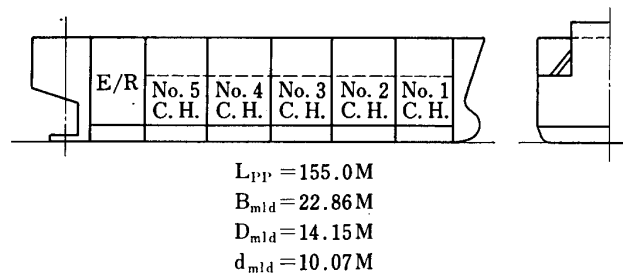


図 14 主要目および全体配置図

実績から確認されている。

- 2) 次に Immediate Shift による船体傾斜角が2度を超える場合、模型実験では2.3度において Natural Trimming 現象を起こさず試験槽は常態的に傾斜するが、実船試算では2.33度においても穀類の荷崩れに対しては十分に安全な積付状態であることが運航実績により判明している。
- 3) ここで、Immediate Shift により Natural Trimming 現象を生じさせ得る船体傾斜角の限界点は模型実験からは2.0度から2.3度の間にあると考えられるが、実験に使用した試験槽は貨物倉倉口部のみをモデル化したものであり、倉口前後部に流入する穀類の影響については考慮されていない点、並びに実船試算における結果を更に審議し、また、運航者側から得られた情報も考慮した結果、貨物倉倉口前後に流入する穀類が貨物倉倉口部における穀類の横移動のみを考慮した場合と比べ、10%程度船体の横傾斜効果を減ずるであろうとの判断により、日本提案に付加する Immediate Shift による船体傾斜角の追加基準を2.5度とすることに決定した。

5. IMO コンテナ貨物小委員会への提案

穀類運送基準検討会における模型実験および検討結果を基に、日本は第27回 BC 小委員会に対し、荷繰り免除に関する以下の提案を行った。

- 1) 荷繰り免除の適用を受けようとする船舶の構造または配置等の要件は一切問わない。
- 2) 荷繰り免除は満載に積載された貨物倉のみに適用される。
- 3) 穀類の荷崩れによる常態的傾斜を制限し、かつ、荷繰りされない穀類表面が航海中の横揺れにより Natural Trimming を起して荷繰りされた穀類表面と同等になるという復原性能を確保する為に、現行規則に加え Immediate Shift による船体傾斜角の基準、2.5度を設ける。

第27回 BC 小委員会は1986年5月、ロンドンのIMO 本部において開催され、小委員会の下、作業部会において日本提案が全面的に盛り込まれた MSC サーキュラー案が作成された。しかしながら、第27回 BC 小委員会ではこの MSC サーキュラー案を終了化せず、実

表4 実船試算結果

載貨係数の違いによる積付状態		S. F. =43.5 (CF/LT)	S. F. =45.0 (CF/LT)	S. F. =55.0 (CF/LT)	S. F. =65.0 (CF/LT)
要 目					
倉 物 貨	No.1 Cargo Hold (%)	100	100	100	100
	No.2 Cargo Hold (%)	100	100	100	100
	No.3 Cargo Hold (%)	42	64	100	100
	No.4 Cargo Hold (%)	100	100	100	100
	No.5 Cargo Hold (%)	100	100	100	100
復 原 性 要 目	排水量 (MT)	29,093	29,093	26,003	23,059
	型 喫 水 (M)	10.10	10.10	9.13	8.18
	ト リ ム (M)	0.00	0.00	0.00	0.00
	T KM (M)	9.54	9.54	9.42	9.40
	KG (M)	7.92	7.93	8.20	8.33
	GGo (M)	0.17	0.17	0.19	0.25
	GoM (M)	1.45	1.44	1.03	0.82
復 原 性 基 準	実際の傾斜モーメント (MT-M)	8,223	7,616	5,000	4,230
	許容傾斜モーメント (MT-M)	9,820	9,820	6,563	4,771
	Immediate Shift による船体傾斜角 (度)	1.56	1.52	1.95	2.33
SOLAS 第4規則(b)による船体傾斜角 (度)		10.0	9.3	9.1	10.6

船実験を行い安全性を確認した上で次回小委員会で更に検討されることとなった。

第28回BC小委員会は、1987年3月に開催されたが、いまだ実船実験を実施した国がないことから、MSCサーキュラー案の検討は実船実験等により実証されるまで延期されることになった。

6. おわりに

模型実験に際して種々の助言を載き、また、御検討を賜りました運輸省海上技術安全局安全基準管理官付浅野富夫国際第二係長（当時）、並びに穀類運送基準検討会委員各位に厚く御礼申し上げます。

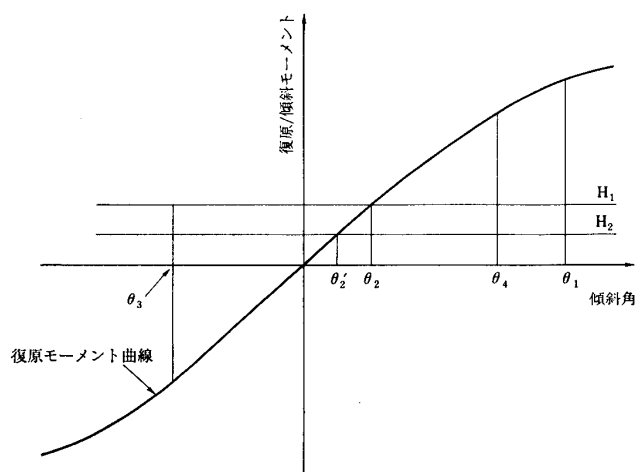
—参考文献—

- 1) 1974年海上人命安全条約
- 2) 阿部武夫：日本航海学会論文集 No 48（昭和47年12月）
- 3) 西山安武：SOLAS第VI章条文解釈ならびにB.C. Code 検討への一資料
- 4) National Cargo Bureau, Inc. Intersessional papers
—October 16, 1984—
—November 16, 1984—
—April 18, 1985—

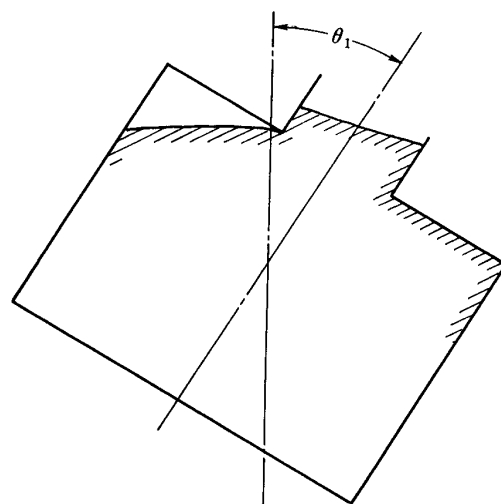
（付録）Natural Trimming 現象

動的実験において観察された Natural Trimming 現象を以下に簡単に説明する。

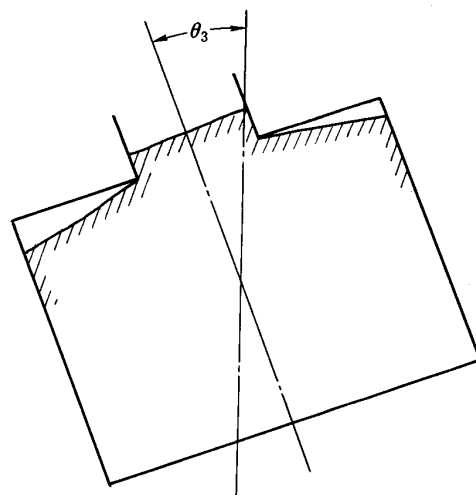
- 1) 試験槽を初期傾斜角 θ_1 まで右舷側へ傾けると、倉口内の穀類は倉口側線外の甲板下空間に流入し H_1 の傾斜モーメントが生じる。（付録図1(a)および



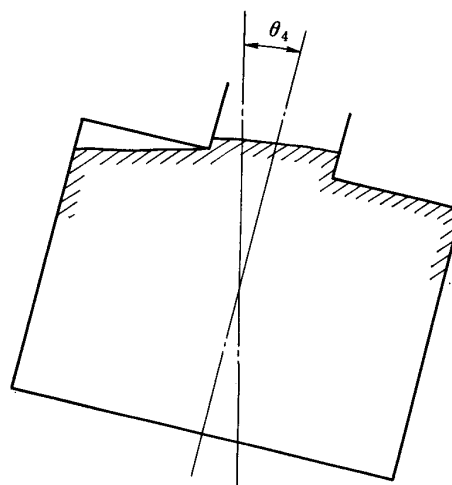
付録 図2 試験槽の復原モーメント曲線と穀類の傾斜モーメント



(a) 初期傾斜時



(b) 第1回横揺れ



(c) 第2回横揺れ

付録 図1 試験槽の横揺れ運動における穀類の動き

び付録図 2 参照)

- 2) 試験槽の拘束を解くと、試験槽はスプリング張力によって復原し、試験槽の復原モーメント曲線および穀類の傾斜モーメント (H_1) の交点角 θ_2 を中心に試験槽の残存復原力面積と等しい面積における角度 θ_3 まで左舷側へ傾斜する。(付録図 1 (b) および付録図 2 参照)
- 3) 角度 θ_3 まで傾斜した試験槽において、倉口内の

穀類は左舷側の甲板下空間に一部流入しその結果穀類の傾斜モーメントは H_1 から H_2 と小さくなる。試験槽は交点角 θ_2' を中心に角度 θ_4 まで右舷側に傾斜する。(付録図 1 (c) および付録図 2 参照)

- 4) このように横揺れ運動を続けることにより、倉口内の穀類は甲板下に流入し穀類の傾斜モーメントは減少する。横揺れ運動が終了した段階では、穀類表面はほぼ平らな状態となる。