

固体ばら積み貨物の 安全運送の研究

**Study on Safe Carriage of
Solid Bulk Cargoes**

太田 進

目次

1	緒言	1
1.1	固体ばら積み貨物の運送実態	1
1.2	ばら積み船の事故例	2
1.3	貨物に起因する運送上の危険性	6
1.4	本研究の目的	7
1.5	用語	9
2	貨物運送に係る安全基準と安全対策の概要	11
2.1	貨物の安全運送における安全基準の位置付け	11
2.2	固体ばら積み安全運送のための留意事項	11
2.3	安全基準と貨物の性状	13
2.3.1	SOLAS 条約と貨物の性状	13
2.3.2	BC Code と貨物の性状	15
2.4	貨物の性状とその評価	17
2.4.1	貨物の名称及び危険物の国連番号等	17
2.4.2	運送する貨物の総量及び載貨係数	17
2.4.3	荷繰り方法及び荷の移動の可能性	17
2.4.4	液状化物質の船積み水分値及び運送許容水分値	18
2.4.5	その他の化学的性質	21
2.5	貨物運送に係る安全基準の問題点	22
3	液状化物質の運送	23
3.1	第3章の構成	23
3.2	荷の移動と液状化	23
3.2.1	荷の移動とばら積み船の危険性	23
3.2.2	液状化現象	24
3.2.3	代表的液状化物質の運送状況	26
3.2.4	液状化物質運送に係る問題点	26
3.3	液状化物質の判別方法の考え方	29
3.3.1	各種判別方法に関する検討	29
3.3.2	液状化物質判別試験の原理	31
3.3.3	液状化物質判別試験の手順と考え方	32
3.4	液状化物質判別試験法の開発	34
3.4.1	試験法の概要	34
3.4.2	固体比重の計測から試料挿入前まで	35
3.4.3	試料の挿入及び締固め	36
3.4.4	飽和試料の作成	37
3.4.5	供試体の形成及び重量計測（排水前）	38
3.4.6	供試体からの排水及び重量計測（排水後）	38
3.4.7	供試体の水分値計測	38
3.4.8	飽和度等の解析及び判定	39
3.4.9	真空引きの時間	40
3.4.10	排水時間	41

3.5	液状化物質判定のためのクライテリア	43
3.5.1	クライテリアの考え方	43
3.5.2	クライテリアの検討のための実験	44
3.5.2.1	実験に用いた試料	44
3.5.2.2	プロクター／ファガベリ法試験	45
3.5.2.3	貫入法試験	49
3.5.2.4	透水性試験	55
3.5.2.5	液状化物質判別試験	58
3.5.2.6	その他の液状化物質の液状化物質判別試験結果	59
3.5.3	クライテリアに関する検討及び提案	60
3.5.4	液状化物質判別試験結果の適用範囲	64
3.6	粒径分布に基づく液状化物質の判定	67
3.6.1	粒径分布に基づく判定の位置付け及び考え方	67
3.6.2	物質の種類と液状化物質の判定	67
3.6.3	石炭以外の物質に対する有効径のクライテリア	68
3.6.3.1	有効径のクライテリア設定用実験の概要	68
3.6.3.2	試料及び粒径調製	68
3.6.3.3	試験結果及びクライテリアの提案	68
3.6.4	石炭に対する有効径のクライテリア	69
3.6.4.1	有効径のクライテリア設定用実験の概要	69
3.6.4.2	試料及び粒径分布	70
3.6.4.3	試験結果及びクライテリアの提案	71
3.7	液状化物質の判別方法のまとめ	73
3.7.1	石炭以外の物質に関する液状化物質の判別方法	73
3.7.2	石炭に関する液状化物質の判別方法	74
3.7.3	液状化物質判別試験が適用できる物質	74
3.8	液状化物質の安全運送	76
4	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発	77
4.1	第4章の構成	77
4.2	荷崩れ防止と荷崩れの危険がある貨物	77
4.2.1	荷崩れを起こし易い貨物の運送方法	77
4.2.2	荷繰り方法	78
4.2.3	荷崩れの危険性のある貨物	78
4.3	荷崩れ危険性の基礎的評価法	81
4.3.1	荷崩れ危険性の基礎的評価法と斜面の安定性評価法	81
4.3.2	剪断強度計測法	82
4.3.2.1	代表的剪断強度計測法	82
4.3.2.2	三軸圧縮試験	82
4.3.2.3	一面剪断試験	82
4.3.3	ニッケル鉱に関する三軸圧縮試験と一面剪断試験の比較	83
4.3.3.1	試験結果の比較に用いた試料	83
4.3.3.2	三軸圧縮試験結果	83
4.3.3.3	一面剪断試験結果	84
4.3.3.4	三軸圧縮試験結果と一面剪断試験結果の比較	87
4.3.4	その他のニッケル鉱の水分値と剪断強度の関係	88

4.3.5	荷崩れ危険性の数値解析	95
4.3.5.1	解析方法	95
4.3.5.2	ニッケル鉱の荷崩れ危険性の数値解析	96
4.3.6	荷崩れ危険性の基礎的評価法の問題点	100
4.4	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発	103
4.4.1	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の必要性及び位置付け	103
4.4.2	ニッケル鉱の運送・積荷役状況	104
4.4.3	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法に関する研究の概要	107
4.4.4	試験法開発に用いた試料	109
4.4.5	篩分けの必要性に関する調査・検討	110
4.4.5.1	調査・検討の概要	110
4.4.5.2	篩分けを行わない円錐貫入試験結果	112
4.4.5.3	最大粒径を 19 mm に調製した円錐貫入試験結果	115
4.4.5.4	篩分けの有無と代表円錐貫入力	116
4.4.5.5	篩分けの必要性の検討	117
4.4.6	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の仕様	118
4.4.6.1	試験法の概要	118
4.4.6.2	試験装置等の仕様	119
4.4.6.3	試験回数と代表円錐貫入力	121
4.4.7	水分値の一次クライテリア	123
4.4.8	水分値の換算	133
4.4.8.1	水分値換算の考え方	133
4.4.8.2	水分値換算の式	135
4.4.8.3	水分値換算方法の有効性	137
4.4.8.4	水分値の一次クライテリアの換算	139
4.4.9	代表円錐貫入力のクライテリア	140
4.4.10	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法のまとめ	144
4.5	ニッケル鉱の運送における注意事項	145
4.5.1	ニッケル鉱運送上の注意の種類	145
4.5.2	ニッケル鉱の荷崩れ危険性の認識	145
4.5.3	貨物の性状の判定及び船舶の選定	145
4.5.4	荷役の際に考慮すべき事項	146
4.5.5	航海中の安全対策及び非常時対策	146
5	結言	147
5.1	固体ばら積み貨物の運送状況及び分類方法	147
5.2	液状化物質判別法の開発	149
5.3	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発	151
5.4	まとめ及び今後の課題	153
5.5	謝辞	155
	参考文献	156
ANNEX A	貨物の運送に係る安全基準	161
A.1	安全基準の概要	161
A.1.1	貨物運送と安全基準	161

A.1.2	安全基準の構成	161
A.2	SOLAS 条約	162
A.2.1	条約の構成及び概要	162
A.2.2	SOLAS 条約第 II-2 章	163
A.2.2.1	構成及び概要	163
A.2.2.2	固定式消火設備	165
A.2.2.3	危険物を積載する貨物区域に関する規定	167
A.2.2.4	自動車の運送等	168
A.2.3	SOLAS 条約第 VI 章	168
A.2.3.1	規則の概要及び構成	168
A.2.3.2	適用範囲	169
A.2.3.3	Timber Deck Code 及び CSS Code	170
A.2.3.4	貨物資料	171
A.2.3.5	酸素濃度測定器、ガス検知器の備え付け、殺虫剤の使用	173
A.2.3.6	有形貨物の積付及び固定	173
A.2.3.7	穀類以外の固体ばら積み貨物の船積みに関する認容	174
A.2.3.8	穀類以外の固体ばら積み貨物の荷役及び積付	175
A.2.3.9	SOLAS 条約第 VI 章に規定される安全対策	176
A.2.4	SOLAS 条約第 VII 章	176
A.2.4.1	構成及び概要	176
A.2.4.2	容器に収納した危険物の運送	178
A.2.4.3	固体ばら積み危険物の運送	180
A.2.4.4	改正 SOLAS 条約第 VII 章 A 部及び A-1 部に規定される安全対策	182
A.3	危険物運送に関する国連勧告と IMDG Code	183
A.4	BC Code	186
A.4.1	BC Code の位置付け及び構成	186
A.4.2	コードの目的及びコードで考慮する危険性	187
A.4.3	一般的注意事項	188
A.4.4	人命及び船舶の安全	189
A.4.5	貨物の安全運送のための判定	191
A.4.6	荷繰り	193
A.4.6.1	BC Code の荷繰り基準	193
A.4.6.2	粘着性物質と非粘着性物質	194
A.4.6.3	静止角	195
A.4.7	液状化物質	196
A.4.7.1	改正 BC Code 案にみる液状化現象のメカニズム	196
A.4.7.2	液状化物質を運送する際の注意事項	197
A.4.7.3	液状化物質運搬船	198
A.4.7.4	液状化物質の試験法	198
A.4.7.5	運送許容水分値決定法	199
A.4.7.6	液状化物質に関する要件の適用範囲	201
A.4.8	化学的危険性を有する貨物	202
A.4.9	石炭を積載する船倉の通風及びガスの監視	204
A.4.10	その他の注意事項	206
A.4.11	BC Code の問題点	207
A.5	貨物運送に係る規則のまとめ	210

A.5.1	規則の種類	210
A.5.2	規則の適用を規定する貨物の性状	210
A.5.3	固体ばら積み貨物の安全運送対策	210
A.5.4	貨物運送基準に係る技術的問題点	211
	ANNEX A 参考文献	212
ANNEX B	液状化物質判別試験法	216
ANNEX C	Test procedure for evaluating danger of sliding failure of nickel ore	224

1 緒言

1.1 固体ばら積み貨物の運送実態

固体貨物には多くの種類があるが、容器に入れることなく直接船舶に積み付けられ運送されるものを「固体ばら積み貨物」という。固体ばら積み貨物は、タンカーや液化ガス運搬船を除くばら積み船（以下、単に「ばら積み船」と呼ぶ。）で運送される。

海運立国である日本は、食料や原材料の多くを輸入に頼っており、日本貿易振興会のホームページ（c.f. www.jetro.go.jp）に示されている貿易統計によれば、2000年における日本の輸入額は約 3800 億米ドルであった。このうち、原料品（大豆、木材、パルプ、鉄鉱石、非鉄金属鉱）に石炭、小麦、トウモロコシを加えた額は、全体の約 8.5%であり、これらは殆ど固体ばら積み貨物として海上運送されていると考えられる。ちなみに、タンカーや液化ガス運搬船で運送される貨物（鉱物性燃料（石炭、原油及び粗油、石油製品、液化石油ガス、液化天然ガス等）から石炭を除いたもの）の額は、全輸入額の約 19%であった。

船舶に目を向けると、英国のロイド船級協会が発行している **World Fleet Statistics**（2000年版）によれば、総トン数 1,000 トン以上のばら積み船（油兼用船を除く）は、1999年12月31日の時点で 4,886 隻、載貨重量トンは総計 254,984,117 トンであった。これは、載貨重量トンベースで、総トン数 1,000 トン以上の船舶の約 3割に相当する。ばら積み船の内訳を載貨重量別にみると、20,000 トン以上 50,000 トン未満の船が、隻数では約 55%、載貨重量トンでは約 35%を占めている。

これらの統計値から、固体ばら積み貨物の運送は日本の経済活動にとって不可欠であり、ばら積み船は世界の荷動きの基幹を担っているものの一つであると言える。

1.2 ばら積み船の事故例

ばら積み船の事故の歴史を振り返ると、過去には「かりふおるにあ丸」をはじめとする大型鉱石運搬船の折損事故が相次ぎ、昭和 40 年代には船体の横強度等について活発に研究がなされた。また、1980 年 12 月 30 日に野島崎沖で発生した「尾道丸」の折損事故を契機として、運輸省（当時）は「異常海難防止システム」の研究開発を実施した。また、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）では、1980 年 9 月 9 日に発生し 44 名の死者・行方不明者を伴ったダービシャー号の事故原因及びこれに対処するための安全対策が審議されている。

IMO は、ばら積み船の事故の多さに鑑み、海上人命安全条約⁽¹⁾（SOLAS 条約）に新たに第 XI 章（Special measures to enhance maritime safety：ばら積み船の検査強化等）及び第 XII 章（Additional safety measures for bulk carriers：ばら積み船の損傷時復原性及び構造等に関する追加措置）を設け、ばら積み船の安全要件を強化した。さらに、日本及び英国は、ばら積み船の安全性に関する Formal Safety Assessment（FSA：確率論的安全評価に基づく検討）を実施している。日本は IMO において、ばら積み船の安全性に関する FSA の中間報告^{(2)~(6)}を行っており、その中⁽⁴⁾で、ばら積み船の事故例解析を実施している。

事故例解析の基礎となったデータは、英国の Lloyd's Maritime Information Service（LMIS）社が提供する海難事故データであり、この中には、1978 年以降に発生した総トン数 100 トン以上の船舶の事故であって、船舶に一定以上の損傷を生じたものが収録されている。LMIS では、事故の規模を船舶の損傷の程度に基づき 4 段階に分類しており、タンカー以外の船種については、これらのうち被害の大きい"Severe"と"Total loss"（全損事故）のみを Casualty Data として提供している。日本の FSA では、1978 年から 2000 年までに発生した、載貨重量一万トン以上の二重側壁構造を有しないばら積み船の事故例、計 376 件を抽出し、解析している。事故例は、以下の 7 のタイプに分類されている。

- タイプ 1 座礁や衝突等に起因するものを除く構造損傷による貨物倉への浸水を含むと考えられる事故（150 件）
- タイプ 2 座礁や衝突等に起因するものを除く構造損傷による貨物倉以外の区画への浸水を含むと考えられる事故（59 件）
- タイプ 3 浸水を伴わない構造損傷による事故（52 件）
- タイプ 4 ハッチカバーまたはその他の閉鎖装置の不具合による浸水を含む

と考えられる事故 (29 件)

タイプ 5 荷の移動 (Cargo Shifting) による事故 (17 件)

タイプ 6 積み荷役中、揚げ荷役中またはバラスト張排水中における、例えば弁や管の不具合といった、例外的な事故 (53 件)

タイプ 7 衝突等に起因する浸水による全損事故 (16 件)

これらのデータに基づき、以下、荷の移動による事故を中心に、事故の傾向について述べる。

事故の発生年と件数の関係を図 1.1 に示す。

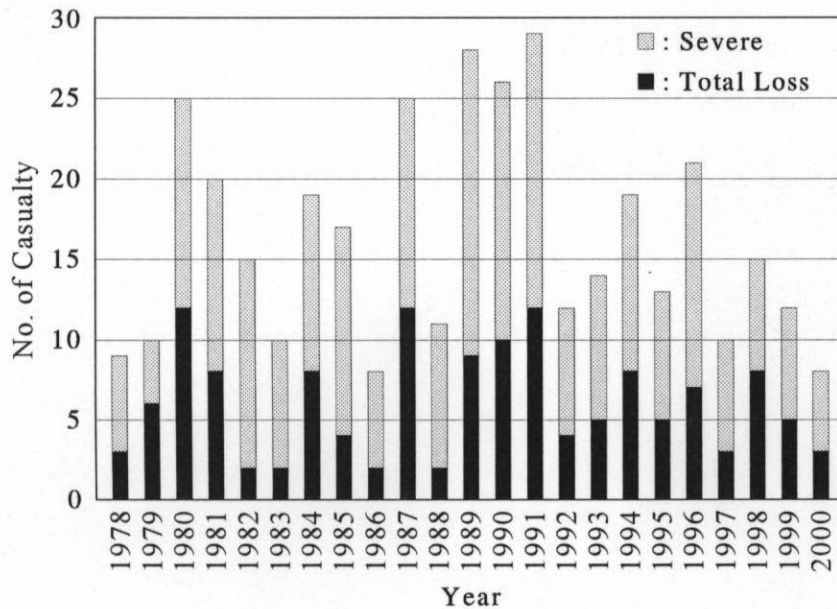


図 1.1 各年の事故件数

事故の件数に年毎のばらつきはあるものの、図からは、事故が明確な減少傾向にあるとは言い難い。但し、前述の SOLAS 第 XI 章 (1996 年 1 月 1 日発効。但し、検査強化は 1997 年 7 月 1 日より実施。) 及び第 XII 章 (1999 年 7 月 1 日発効) の有効性は、この結果からは一概に論じられない。

船舶が全損 (沈没を含む) に至った事故 (計 140 件) について、各タイプ毎の件数、これらの事故による死者・行方不明者の数及事故が発生した際の船齢の平均値を表 1.1 に示す。

表 1.1 1万 DWT 以上のばら積み船の全損事故の件数、死者等の数及び平均船齢

	件数	死者・行方不明者の数	平均船齢
タイプ 1	83	744	19.0
タイプ 2	12	37	20.3
タイプ 3	2	0	16.5
タイプ 4	10	276	17.1
タイプ 5	7	54	13.7
タイプ 6	10	9	30.4
タイプ 7	16	174	15.0
	計：140	計：1,294	全平均：19.1

表より、ばら積み船の全損事故の中では構造損傷による船倉への浸水事故が多く、荷の移動による事故は、件数と死者・行方不明者の数の双方で約 4 %を占めていると考えられる。図 1.2 は、表 1.1 に示した事故のうち、タイプ 5 を除く事故 (133 件) の際の船齢の分布を示したものである。タイプ 5 の事故は、全損以外のものを含めると計 17 件挙げられている。図 1.3 は、これら 17 件の事故の際の船齢の分布を示したものである。

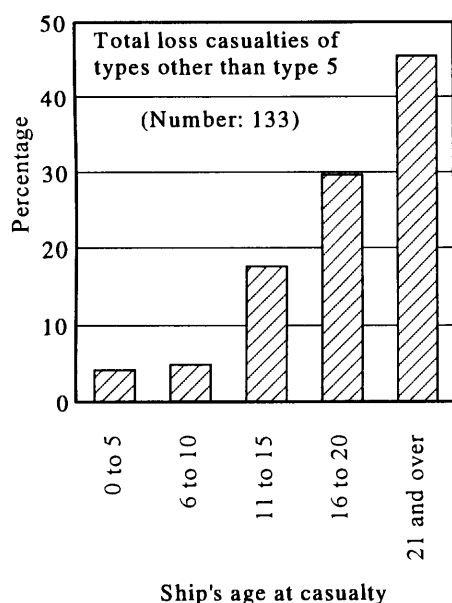


図 1.2 荷の移動によるものを除く全損事故時の船齢分布

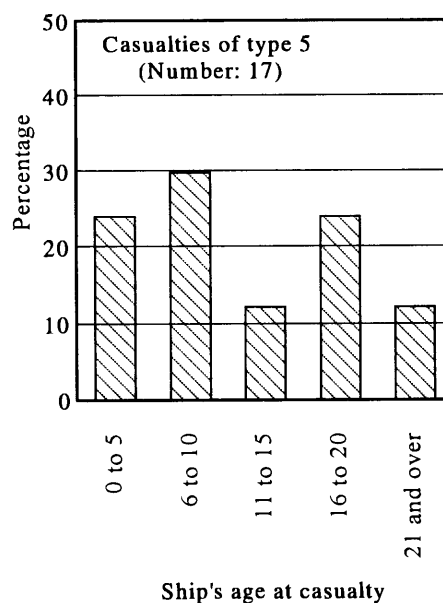


図 1.3 荷の移動による事故時の船齢分布

これらの図より、構造損傷に起因する事故は船齢が大きくなるほど発生頻度が多くなるが、荷の移動による事故の発生頻度は船齢によらないと言える。

前述のばら積み船の安全性に関する FSA の中間報告では、船舶を大きさにより、表 1.2 に示す 4 種類に分類して事故例を解析している。

表 1.2 Classification of bulk carrier in size (MSC 74/INF.10 Table 1.1)

	Lf (m)	GRT	Dwt (ton)	(Ref. Dwt*)
(Mini)	100~130	5,000~14,000	10,000~23,000	10,000~35,000
Small-handy	130~150			
Handy-size	150~200	14,000~30,000	23,000~55,000	35,000~50,000
Panamax	200~230	30,000~45,000	55,000~80,000	50,000~80,000
Cape-size	230~270	45,000+	80,000+	80,000+
(Very large)	270+			

Note: The figures in the column of (Ref. Dwt*) are cited from the report of “Bulk Carrier Report, An analysis of vessel losses and fatalities statistics for 1999 and ten years of losses 1990-1999” by INTERCARGO for the reference purpose.

分類は主として載貨重量に基づいているが、事故例の中には一隻、載貨重量が不明の船舶があり、この船舶は総トン数に基づき、Small-handy に分類されている。前述の 133 件のタイプ 1~4 及びタイプ 6, 7 の全損事故の船舶と、17 件の荷崩れ事故の船舶を分類してみると、表 1.3 の通りとなる。

表 1.3 事故を起こしたばら積み船の大きさ

Ship size	Total loss casualty of types other than type 5		Casualties of type 5	
	Number	Percentage	Number	Percentage
Small-handy	43	32.3	9	52.9
Handy-size	50	37.6	8	47.1
Panamax	21	15.8		
Cape-size	19	14.3		
Total	133		17	

表より、荷崩の移動による事故は、Handy-size 以下の大きさのばら積み船で起こっていることが分かる。

こうした事故例解析の結果からも分かるとおり、固体ばら積み貨物の安全運送は重要な課題であり、IMO 各種の規則や基準を定め、日本もこれらを国内法に取り入れている。また、事故のうちには貨物に起因するものも含まれており、貨物に起因する事故の防止も重要な課題である。

1.3 貨物に起因する運送上の危険性

貨物の運送に係る危険性としては、貨物の荷重による船体構造の損傷と、貨物の特性に応じて考慮すべき航海中における貨物の移動及び化学的危険性が挙げられる。

貨物の荷重による船体構造の損傷は、特に貨物の密度が大きい場合に注意を要する。第 2 章で述べる安全基準からは、貨物を適切に分布させることにより、特に内底板に過大な荷重が作用しないようにすることが重要であることが分かる。

貨物の化学的危険性に起因する事故としては、貨物が水に反応して有毒ガスを発したことによる事故等がある。これらは危険物運送中の事故である。また、石炭は危険物ではないが、航海中に出火した例がある。

航海中における貨物の移動は船舶の復原性に悪影響を及ぼす。そのため、液体貨物を運送する船舶では貨物の移動量を制限するため縦通隔壁を設ける等の措置がとられる。また、有形貨物（ばら積み以外の貨物）は適切に固定される必要がある。固体ばら積み貨物を運送する場合は、必要に応じて貨物の頂部を平坦に均したり、貨物のパイルの斜面の角度を小さくする「荷繰り」が行われ、穀類等の流動性の高い貨物については、船倉に隙間無く積載する等の措置がとられる。固体ばら積み貨物の移動（cargo shifting）は本研究の主題であるため、後に詳述する。

1.4 本研究の目的

固体ばら積み貨物を安全に運送するためには、船舶が十分な堪航性を有するとともに、貨物をその性状に応じて適切に取り扱うことが重要であり、荷送人は貨物の性状を正確に把握、これを関係者に伝えることが求められる。一方、貨物の移動に関する性状の把握方法については、後述する通り、当該貨物が液状化の恐れのある物質か否かについては未だ評価法が確立されていない等の問題がある。

本研究の目的は、固体ばら積み貨物の移動（荷の移動。Cargo Shifting）、即ち、荷崩れ及び液状化に関連する諸要素を総括し、貨物の移動による事故を防止するために必要な技術を開発して、ばら積み船の運航の安全性の向上を図ることである。

固体ばら積み貨物の安全運送に関する留意事項の多くは、各種安全基準で言及されている。そのため、第2章では、固体ばら積み貨物の運送に係る安全基準について、貨物に関する情報提供に係る事項を中心に述べる。

荷の移動は、船舶の動揺や振動といった繰り返し荷重に起因する固体ばら積み貨物の粒子の微視的な移動で貨物内部の間隙圧が上昇することより貨物の剪断強度が失われる「液状化」と、船舶の動揺等による加速度により、貨物の液状化が生じなくても、剪断強度の不足に起因して生じる「荷崩れ」に大別できる。液状化と荷崩れの関係を図1.4に模式的に示す。

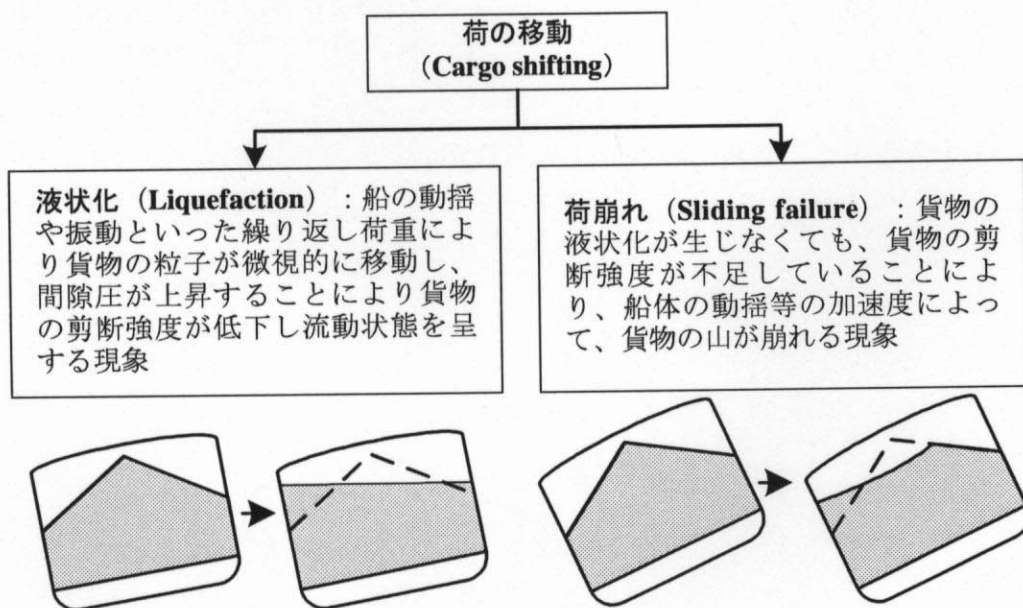


図 1.4 液状化と荷崩れ

貨物の液状化について言えば、貨物が液状化物質であると判断された場合の貨物運送の方法は安全基準に示されているが、当該貨物が液状化物質か否かを判定する方法、即ち、要件の適用範囲の決定方法は安全基準に示されていない。そこで、液状化物質の判別方法を開発したので、第3章に述べる。現在、液状化とは別に、荷崩れが問題となっている代表的な貨物としては、粘土状物質である「ニッケル鉱」が挙げられる。この貨物の安全運送のため、ニッケル鉱の荷崩れ危険性を評価する方法を開発したので、第4章に述べる。

1.5 用語

本研究では、以下の用語を用いる。

固体ばら積み貨物は一般に固体部分と水と空気により構成されており、これを模式的に図 1.5 のように表す。水と空気とで構成される部分を間隙（空隙）と呼ぶ。固体部分、水、空気並びに間隙の体積及び固体部分と水の重量を以下の記号で表す。なお、空気の重量は無視する。

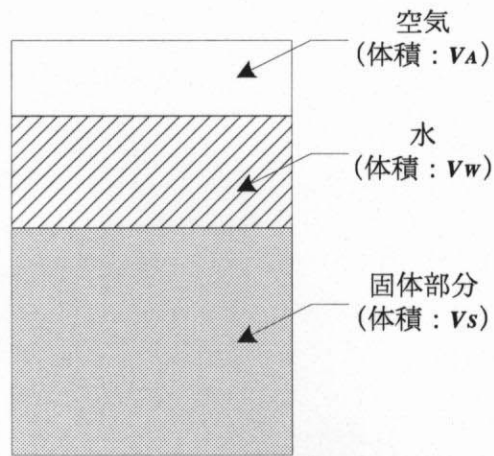


図 1.5 固体ばら積み貨物の構成物質の模式図

- V_S : 固体部分の体積
- V_W : 水の体積
- V_A : 空気の体積
- V_V : 間隙の体積 ($V_V = V_W + V_A$)
- W_S : 固体部分の重量
- W_W : 水の重量

全体の重量と体積を以下の記号で表す。

- V_T : 全体の体積
- W_T : 全体の重量

水分値（moisture content）は、特にことわらない限り、次の全水分値（gross moisture content） M_c^{105} で表す。ここで、肩付きの数値 105 は、乾燥時の温度を意味する。

$$M_c^{105} = \frac{W_W}{W_T} = \frac{\text{乾燥前の試料の重量} - \text{乾燥後の試料の重量}}{\text{乾燥前の試料の重量}}$$

間隙の体積と固体部分の体積の比を空隙比（void ratio）という。空隙比 e は次の式で表せる。

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

間隙の体積に占める水の体積の割合を飽和度（degree of saturation）という。飽和度 S_r は次の式で表せる。

$$Sr = \frac{V_w}{V_v}$$

粒子の大きさの分布、即ち粒径分布 (grain size distribution) は、図 1.5 に示す粒径加積曲線 (grain size accumulation curve) で表す。本研究で用いる粒径加積曲線は全て、試料の乾燥時のものである。

通過重量百分率 10 %に対応する粒径を D_{10} と表す。 D_{10} は「(Hazen の) 有効径 (effective size)」と呼ばれ、液状化と関係の深い透水性を考慮する際の指標として良く用いられる。

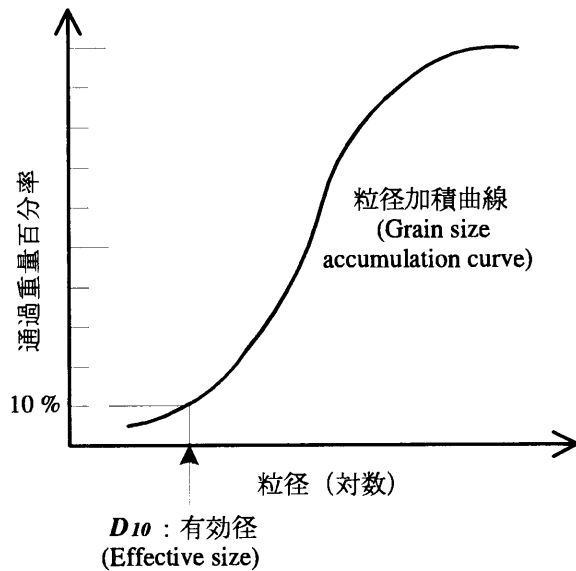


図 1.5 粒径分布

固体ばら積み貨物の液状化に関する用語は以下の通り。

- 船積み水分値 (moisture content at shipment) : 貨物を船積みする際の水分値
- 運送許容水分値 (transportable moisture limit) : 液状化物質運搬船 (特殊な構造を有する専用船) 以外の船舶に積載できる貨物の船積み水分値の上限
- 流動水分値 (flow moisture point) : 貨物が液性/流動状態を示す水分値
- 固体比重 (density of solids) : 空隙を含まない固体部分の比重

2 貨物運送に係る安全基準と安全対策の概要

2.1 貨物の安全運送における安全基準の位置付け

貨物を安全に運送するため、即ち、船舶を安全に運航するためには、様々な安全対策を実施する必要がある。如何なる安全対策を実施するかは、最終的には船主、運航船社及び船長をはじめとする乗組員の判断に委ねられることになるが、基本的な安全対策を確実に実施させる目的で、各種の安全基準が定められている。こうした各種の安全基準は、過去の経験や技術開発から得られた知見の集大成であり、その遵守は安全運航の基礎をなすものである。よって、船舶の安全運航を確保するには、関係する安全基準に対する理解が不可欠である。

この章では、固体ばら積み貨物の運送に係る安全基準を概観し、安全運送に係る技術的問題点を抽出する。その上で、固体ばら積み貨物の荷崩れ及び液状化に係る諸要素を総括する。

2.2 固体ばら積み安全運送のための留意事項

貨物の運送に係る安全基準に関する説明を ANNEX A にまとめる。

船舶に関する国際条約は、国際連合の専門機関である「国際海事機関（IMO: International Maritime Organization）」で策定・改正される。IMO で審議される船舶の安全に係る規則には、衝突防止に関するものや復原性に関するものなど、様々なものがあるが、貨物運送に係る安全要件の基本的事項は「海上における人命の安全に関する条約（SOLAS 条約）」⁽⁷⁾に記載されている。また、固体ばら積み貨物の安全運送については「固体ばら積み貨物に関する安全実施基準（BC Code）」⁽⁸⁾に多くの規定がある。SOLAS 条約や BC Code をはじめとする各種国際基準及び国内関係法令に関する調査の結果をまとめると、固体ばら積み貨物の安全運送のための留意事項は以下の通りである。

- (1) 貨物の性質に応じ、適切な固定式消火設備、通風装置等を備えた船舶を選定すること
- (2) 荷役においては、適切な荷役計画を策定し、これに基づいて船舶とターミナルが協力して実施すること（船体への過大な負荷の防止等）
- (3) 船倉の内底板に過大な荷重を作用させないため、貨物は可能な限り均等に積載すること
- (4) 船体構造に問題が生じない範囲で、貨物は可能な限り深く積み付けること

と（「浅い積付」による荷崩れの防止）

- (5) 適切に荷繰りすること（荷崩れ防止）
- (6) 液状化物質（航海中に液状化する恐れのある貨物）は、液状化物質運搬船で運送する場合を除き、運送許容水分値（transportable moisture limit）を超える水分値の貨物を積付ないこと。また、荷役中や航海中に貨物の水分が増加しないための措置を講じること
- (7) 船倉内に立ち入る際には酸素濃度を計測し、必要に応じてガス検知器を用いるとともに呼吸具や防護服を着用し、粉塵に対する衛生基準を遵守すること（貨物の燻蒸を行う場合には、「船舶における殺虫剤の安全使用に関する勧告」に従うこと）
- (8) 危険物は、適切に積付、また、隔離すること。

これらの安全対策を実施する上での基礎となるのは、貨物に関する正確な情報の把握であり、貨物を安全に運送するためには、まず、貨物に関する正しい情報を把握する必要がある。そのため、貨物に関する正確な情報を船長またはその代理人に提供することは荷送人の義務である旨、規則により定められている。次節では、船舶の安全運航の観点から、固体ばら積み貨物について如何なる情報を把握すべきについて述べる。

2.3 安全基準と貨物の性状

2.3.1 SOLAS 条約と貨物の性状

SOLAS 条約の各規則の表題は以下の通り。

- 第 I 章 一般規定 (General Provisions)
- 第 II-1 章 構造 (区画及び復原性並びに機関及び電気設備) (Construction - Subdivision and Stability, Machinery and Electrical Installations)
- 第 II-2 章 構造 (防火並びに火災探知及び消火) (Construction - Fire Protection, Fire Detection and Fire Extinction)
- 第 III 章 救命設備 (Life-Saving Appliances and Arrangements)
- 第 IV 章 無線通信 (Radiocommunications)
- 第 V 章 航行の安全 (Safety of Navigation)
- 第 VI 章 貨物の運送 (Carriage of Cargoes)
- 第 VII 章 危険物の運送 (Carriage of Dangerous Goods)
- 第 VIII 章 原子力船 (Nuclear Ships)
- 第 IX 章 船舶の安全運航の管理 (Management for the Safe Operation of Ship)
- 第 X 章 高速船の安全措置 (Safety Measures for High Speed Craft)
- 第 XI 章 海上の安全性を高めるための特別措置 (Special Measures to Enhance Maritime Safety)
- 第 XII 章 ばら積み貨物船の追加の安全措置 (Additional Safety Measures for Bulk Carriers)

貨物運送に係る安全基準は、船舶の設計や設備に関するものと、貨物の取り扱いを含む船舶の運用に係るものに大別できる。SOLAS 条約の中でも直接貨物運送に係る主な事項は第 II-2 章、第 VI 章及び第 VII 章に規定されている。このうち、第 II-2 章は設計や設備に係る事項であり、第 VI 章及び第 VII 章は船舶の運用に係るものである。貨物資料、即ち貨物に関する情報については、荷送人が船長またはその代理人に提供すべき旨は、SOLAS 条約第 VI 章第 2 規則に規定されている。また、第 VII 章第 5 規則等にも、荷送人は正しい名称を用いて貨物 (危険物) に関する試験成績書等を船長等に提出すべきことが規定されている。SOLAS 条約第 VI 章第 2 規則で要求される貨物資料については、BC Code でさらに詳しく規定されているので、後述する。

貨物は、その化学的危険性に基づき、危険物、ばら積み時のみ化学的危険性を有

する物質（MHB : Materials Hazardous only in Bulk）及びその他の物質に大別できる。輸送の観点に基づく危険物の分類は SOLAS 条約第 VII 章等に示されている。危険物は国際運送の目的で、表 2.1（ANNEX A、表 A.2）に示すクラスに分類される。

表 2.1 国際貨物輸送における危険物分類

Class 1	火薬類	Class 5.1	酸化性物質
Class 2.1	引火性ガス	Class 5.2	有機過酸化物
Class 2.2	非引火性・非毒性ガス	Class 6.1	毒物
Class 2.3	毒性ガス	Class 6.2	伝染性病原体等
Class 3	引火性液体	Class 7	放射性物質
Class 4.1	可燃性固体	Class 8	腐食性物質
Class 4.2	自然発火性物質	Class 9	有害性物質
Class 4.3	水反応可燃性物質		

また、各危険物には国連番号が定められている。固体ばら積み危険物には「可燃性固体」、「自然発火性物質」、「水反応性物質」、「酸化性物質」、「放射性物質」及び「有害性物質」（他のクラスに属しない危険物）があり、「伝染性病原体」のばら積み運送は想定されていない。安全運送のためには、一般に貨物の正しい名称を用いることが重要であるが、特に危険物については重要であり、SOLAS 条約第 VII 章で強制要件として規定されている。個品危険物（包装された貨物）の輸送に関する要件は「国際海上危険物規定（IMDG Code）」⁽⁹⁾等に規定されており、固体ばら積み危険物の輸送に関する要件は、BC Code に規定されている。MHB とは、固体ばら積み貨物であって、危険物としては指定されていないが、ばら積み時には化学的危険性を有する物質であり、危険物に準じた取り扱いが必要である。

船倉内における貨物の移動に関する危険性の観点からは、固体ばら積み貨物は液状化物質とその他の物質に大別できる。液状化物質とは、航海中に液状化する恐れのある物質であり、液状化物質運搬船（一般に縦通隔壁を有する専用船。現在日本では運航されていない。）等の特殊な設備を有する船舶で運送する場合を除き、船積み時の貨物の水分値が運送許容水分値を超えないことが要求される。

液状化物質ではなくても、一般に、固体ばら積み貨物は、航海中に荷崩れを起こす危険性がある。荷崩れを防止するためには、必要に応じて荷繰りを行うべきこと、穀類のように船倉内で自由に流動する貨物については、船倉内で貨物が流動する隙間を無くす等、穀類に準じて運送すべきことが定められている。貨物の性状に応じた荷崩れの危険性を考慮し、必要な荷繰りの程度等を示すことは、荷送人の義務である。

SOLAS 条約第 XII 章は、ばら積み船の構造損傷に係る事故が多発したことに鑑み策定されたもので、損傷時の復原性の要件の適用は、船舶が運送しようとする貨物の見かけ密度との関係において規定されている。

2.3.2 BC Code と貨物の性状

BC Code は、固体ばら積み貨物の安全運送全般に関する基準である。BC Code の構成は以下の通り。

序文 (Introduction)

第 1 節 定義 (Definitions)

第 2 節 一般的注意事項 (General precautions)

第 3 節 人命及び船舶の安全 (Safety of personnel and ship)

第 4 節 貨物の安全運送のための判定 (The assessment of acceptability of consignments for safe shipment)

第 5 節 荷繰り方法 (Trimming procedures)

第 6 節 静止角の決定方法 (Methods of determining the angle of repose)

第 7 節 液状化物質 (Cargoes which may liquefy)

第 8 節 液状化物質：試験方法 (Cargoes which may liquefy: test procedures)

第 9 節 化学的危険性を有する物質 (Materials possessing chemical hazards)

第 10 節 固体廃棄物のばら積み運送 (Transport of solid wastes in bulk)

第 11 節 載貨係数変換表 (Stowage factor conversion tables)

付録 A 液状化ばら積み物質のリスト (List of bulk materials which may liquefy)

付録 B 化学的危険性を有するばら積み物質のリスト (List of bulk materials possessing chemical hazards)

付録 C 液状化物質 (付録 A) 及び化学的危険性を有する物質 (付録 B) 以外のばら積み貨物のリスト (List of bulk materials which are neither liable to liquefy (Appendix A) nor to possess chemical hazards (Appendix B))

付録 D 試験所用試験方法、関係試験装置及び規格 (Laboratory test procedures, associated apparatus and standards)

付録 E 付録 B の物質に対する非常措置指針 (Emergency schedules (EmS) for materials listed in appendix B)

付録 F 船上における閉囲区画への立ち入りに関する勧告 (Recommendations for entering enclosed spaces aboard ships)

付録 G 石炭貨物のガス監視方法 (Procedures for gas monitoring of coal cargoes)

MSC/Circ.908 : ばら積み貨物の密度計測の機能仕様 (Performance specification for the measurement of the density of bulk cargoes)

BC Code については、2002 年 9 月時点において、総合的な改正作業が進められており、その本文（付録を除く部分）の案⁽¹⁰⁾が作成されたところである。この案では、荷送人が船長またはその代理人に提出する貨物資料に明記すべき事項が、以下の通りまとめられている。

- BC Code に記載されているものについては、コードにある名称。（他の名称の追加は認められる。）
- 危険物の場合、そのクラス及び国連番号。MHB については BC 番号（BC Code で規定する各 MHB に固有の番号）
- 運送を求める貨物の総量
- 載貨係数
- 荷繰り方法
- 荷の移動の可能性。適用できる場合（非粘着性物質の場合）静止角
- 精鉱その他の液状化物質の場合は、貨物の水分値及び運送許容水分値の証明書
- 透水性（水分値の高い層を形成する恐れ）
- 危険物以外については、危険の原因となる化学的性質

これらの項目は、SOLAS 条約第 VI 章第 2 規則で固体ばら積み貨物に要求されている貨物資料の項目を、より具体的にしたものである。次節では、ここに挙げた貨物の性状の評価について述べる。

2.4 貨物の性状とその評価

2.4.1 貨物の名称及び危険物の国連番号等

貨物の名称については、BC Code に記載されている場合はその名称を、記載が無い場合は商品名では無く正しい物質名を用いることが要求される。過去に、貨物の不適切な名称の使用が原因の一つと考えられる事故⁽¹¹⁾も報告されている。この事故は、水に濡れると有毒ガスを発生するフェロシリコン（危険物）を荷送人が「合金鉄」（フェロクロム、フェロマンガン等の非危険物を含む総称）と申請して運送した際に、有毒ガスに対する注意が不十分であることにより発生したものである。一方、この事故は規則の運用の問題であり、貨物の性状の評価上の問題ではない。また、国連番号または BC 番号（MHB の場合）を決定する際の問題点は報告されていない。よって、貨物の名称及び危険物の国連番号等を貨物資料に含めることに関しては、特に技術的問題はないと言える。

2.4.2 運送する貨物の総量及び載貨係数

運送する貨物の総量は明確である。載貨係数、即ち単位重量当たりの貨物の体積は、一般に、船倉内の貨物の目視計測等により求められた体積と船舶の喫水計測等により求められる貨物の重量から計算される値に基づき経験的に求められた値である。これに対して、前述の SOLAS 条約第 XII 章で計測することが要求される「ばら積み貨物の密度」は、所定の試験（MSC/Circ.908）⁽¹²⁾により計測される貨物の密度計測により求められる。計測方法は、容積が既知の容器（日本では約 0.2 m³）に突固めを行わずに貨物を挿入し、その重量を計測するものである。この計測により求められる密度と載貨係数の関係については報告されていないが、載貨係数や見かけ密度の評価における問題点は指摘されていない。

2.4.3 荷繰り方法及び荷の移動の可能性

荷崩れ等の現象により船倉内において貨物が移動することは、船舶の復原性に悪影響を及ぼす。タンカーでは、貨物の移動（流動）を考慮して、その移動量を制約するために縦通隔壁を設け、また、十分な復原性を確保しているのに対して、ばら積み船では、一部の特殊船を除き、貨物の移動を考慮して復原性を確保する等の措置は講じられていないため、船倉内における貨物の移動により船が転覆することもある。貨物の移動の観点からは、貨物は液状化物質とその他の物質に大別できる。

液状化物質については後述する。

液状化を除く荷崩れの防止の観点からは、貨物は粘着性物質と非粘着性物質に大別できる。非粘着性物質については、傾斜箱試験 (c.f. A.4.6.3) により計測される静止角に基づき、荷繰り方法が定められている (c.f. A.4.6.1)。静止角が 30 度未満の非粘着性貨物は「穀類のように自由に流動する貨物 (cargoes which flow freely like grain)」と呼ばれ、穀類と同様に、貨物の移動を拘束するための荷止め板を設置するなどして積み付ける必要がある。静止角が 30 度以上 35 度以下の場合、基本的には、貨物表面の高低差が船幅の 1/10 または 1.5 m の小さい方の値以下となるように荷繰りすることが要求される。静止角が 35 度を超える場合は、注意して急傾斜ができないように積付け、静止角より十分に小さい角度まで荷繰りすることとしている。このことから、貨物の荷繰りの観点からは、船体運動として 30 度の横傾斜が想定されていることが分かる。

粘着性物質の荷繰りについて BC Code では、基本的には「貨物は船倉の端まで平坦に荷繰りすること」とした上で、荷送人から提供される貨物資料に従って荷繰りを行うこととしている。即ち、粘着性物質の荷繰りの要否及び程度については、荷送人が示す貨物資料に基づいて決定することになる。荷繰り基準、特に粘着性物質に関する荷繰り基準が明確でないことは、BC Code の問題点の一つである。

BC Code では、乾燥状態において非粘着性物質に区分される貨物のリストがあるが (c.f. A.4.6.2 節、表 A.5)、BC Code は全ての固体ばら積み貨物を網羅したものではなく、非粘着性物質はリストに挙げられら物質に限らないことに留意する必要がある。また、非粘着性物質と粘着性物質の判定方法も示されていない。しかし、固体ばら積み貨物の運送の実務において、粘着性物質／非粘着性物質の判定方法が無いことによる問題点は指摘されていない。

2.4.4 液状化物質の船積み水分値及び運送許容水分値

船積みしようとする貨物が液状化物質である場合、特殊な設備を有する船舶で運送する場合を除き、予め貨物の運送許容水分値を決定するとともに、貨物の船積みのたびに、その時の貨物の水分値 (船積み水分値) を計測する必要がある。また、運送許容水分値及び船積み水分値は、貨物資料に記載する必要がある。

貨物の水分値の測定方法としては、BC Code では、精鉱及び類似物質については、試料の重量が恒量になるまで 105 度で乾燥し、乾燥前の重量から乾燥後の重量を引

いた値を乾燥前の重量で割ることにより得られる全水分値（wet base moisture content）で表すこととしている。また、石炭については、ISO 589-1974 "Hard coal - Determination of total moisture"の方法を推奨している。貨物の水分値や運送許容水分値を計測する目的で試料を採取する場合、試料の性状が貨物のそれを正しく代表する必要がある。そのため、BC Code には試料の採取方法についても規定がある。（c.f. A.4.5）。

運送許容水分値とは、物質が液状化すると考えられる水分値に対して安全余裕を見込んだ値である。運送許容水分値の決定方法として、BC Code には三つの試験法が示されている（c.f. A.4.7.5）。試験法はそれぞれ IMO フローテーブル法、貫入法、プロクター／ファガベリ法と呼ばれている。

ある貨物が液状化物質に該当するか否かは、運送実務上大きな問題である。安全のためには、液状化物質の範囲を広く考え、多くの貨物を液状化物質として運送すれば良いが、この場合、液状化物質として運送する必要の無い貨物についてまで、運送許容水分値の決定や船積み水分値の計測を行うこととなり、事業者に負担を強いることになる。

現行 BC Code の付録 A は液状化物質のリストであり、リストにある貨物の名称については、現在見直しが行われている（c.f. A.4.7.5 節、表 A.8）。しかし、このリストは全ての液状化物質を網羅したものではない。日本の特殊貨物船舶運送規則⁽¹³⁾では、液状化物質については次の通り定義され、表 2.2 に示す 21 品目が液状化物質になり得る貨物として指定された。

特殊貨物船舶運送規則第十六条（抄）「船舶に液状化物質（浮遊選鉱により得られる精鉱その他の航海中に液状化する恐れのある微細な粒状物質であつて国土交通大臣が定めるものを言う。以下同じ。）をばら積みして運送する場合には、・・・」

表 2.2 液状化物質（特殊貨物船舶運送規則第十六条関係告示）

1	銅鉱	8	選粉炭	15	アルミクリンカー
2	鉛鉱	9	石こう	16	コークブリーズ
3	亜鉛鉱	10	重晶石	17	消石灰
4	鉄鉱	11	ほたる石	18	銅精錬沈殿物
5	硫化鉄鉱	12	イルメナイトサンド	19	レッドドロス
6	マンガン鉱	13	ネフェリンサイアナイト	20	ジンクドロス
7	ニッケル鉱	14	セメントカッパー	21	鉱さい

表 2.2 に示した貨物であっても、「航海中に液状化する恐れのある微細な粒状物質」でなければ、液状化物質とはならない。例えば、表 2.2 には「鉄鉱」とあるが、細かな粒子を含まない鉄鉱石は、液状化物質ではない。表 2.2 のうち特に「鉱さい」（鉱滓。スラグ）は、各種の物質を含み、範囲の明確化が求められていた。

前述の運送許容水分値に関する試験法のうち、IMO フローテーブル法と貫入法は、試料の水分値を変化させて試験を行い、液状化現象を検出することにより、液状化が発生する水分値（流動水分値。flow moisture point）を求め、この値の 90 % を運送許容水分値とする方法である。IMO フローテーブル法は主として微粉精鉱の流動水分値の測定のために用いられてきた試験法で、石炭には適用できない。また、この試験法では、型枠に試料を入れてからこの型枠を外して供試体を形成することから、石炭以外にも、供試体が形成できないことにより、この試験法が適用できない物質が存在する。そして、供試体が形成できない、即ち、この試験法が適用できないことは、その物質が液状化物質ではないことを意味するものではない。また、貫入法は、IMO フローテーブル法が石炭に適用できないことから、石炭のための運送許容水分値決定法として開発され、その後、精鉱に適用する場合の仕様が追加された^{(14)~(22)}。この試験法では、試料を円筒形の容器に挿入して締固めを行い供試体を形成し、供試体に振動を与えた際のビット（液状化検出用のウエイト）の貫入量により液状化の発生可否を判定するが、試料によっては、水分値にかかわらずビットが貫入してしまうことがあり、試験法が適用できない場合もある。そして、この試験法が適用できないことは、その物質が液状化物質ではないことを意味するものではないと言える。

一方、プロクター／ファガベリ法は、試料を所定の手順で締固めることにより、水分値と見かけ密度・間隙比・飽和度の関係を求め、飽和度 70 % に対応する水分値を運送許容水分値とする方法であり、液状化を検出して流動水分値を求めるものではない。よって、この試験法を用いれば、液状化物質でない物質についても、締固めを行う際の容器の水密性によっては、運送許容水分値の条件に当てはまる水分値を決定できる可能性がある。

以上により、BC Code に記載されている運送許容水分値決定法は、液状化物質の

判別の観点からは、十分な機能を有するものではないと言える。一方、前述の通り、運送しようとする貨物が液状化物質か否かは、運送事業者にとっては、重要な問題である。特に日本の場合、運送許容水分値の決定のみならず、貨物（液状化物質）の船積み水分値の計測も第三者機関が行うことが義務づけられているため、液状化物質ではない貨物を液状化物質として船積みすることは、安全上は問題ないが、船積みに要するコストと時間の観点で大きな負担となる。そのため、液状化物質の範囲の明確化が求められていた。

2.4.5 その他の化学的性質

その他の化学的性質を有する貨物としては、腐食性物質（class 8）ではないが、例えば塩のように、船体構造を腐食させる危険性のある貨物や、可燃性固体（class 4.1）ではないが、粉塵爆発の危険性がある貨物が挙げられる。過去に、船倉内に海水が侵入して貨物である砂糖の一部が解けて空隙が生じたことにより、貨物が荷崩れを起こし船舶が転覆した例もあるが、危険物及び MHB 以外の貨物の化学的危険性が不明なことに起因する事故例は報告されていない。

2.5 貨物運送に係る安全基準の問題点

以上のとおり、固体ばら積み貨物を安全に運送するための留意事項は多いが、中でも、貨物に関する正しい情報を得ることは、安全運送の基本であると言える。貨物に関する正しい情報を得るための現状の問題点としては、以下の二つがある。

- (1) 液状化物質の範囲が明確でないこと
- (2) 荷練り基準、特に粘着性物質の荷練り基準が明確でないこと

これらの問題点に対処するため、本研究では、液状化物質判別法を開発し、粘着性物質の中でも問題となっているニッケル鉱の荷崩れ危険性の評価法を開発した。液状化物質判別法の開発については第 3 章、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価法の開発については第 4 章で述べる。

3 液状化物質判別法の開発

3.1 第3章の構成

この章では、船舶の貨物としての液状化物質の判別に関する安全基準の問題点を補うため、本研究により開発した液状化物質判別法について述べる。

前述の通り BC Code には、ある貨物が液状化物質と判定された場合に、その貨物を安全に運送するための運送許容水分値を決定する方法として、IMO フローテーブル法、貫入法及びプロクター／ファガベリ法の三つの試験法が記載されている。しかし、ある貨物が液状化物質か否かを判定するための試験法は従来無かったため、液状化物質に関する規則上の要件の適用範囲が問題となり、本研究において開発したのが液状化物質判別法である。BC Code に記載されている運送許容水分値決定法は、ある貨物が航海中に液状化する恐れのない水分値を決定する方法、即ち、液状化を水分値という貨物の状態との関係で評価する方法である。これに対して、液状化物質判別法は、通常の航海における貨物の液状化を、物質の状態ではなく、物質の基本的性質との関係において評価する試験法であると言える。

3.2 節では、固体ばら積み貨物が液状化することによる危険性や液状化現象について概説し、液状化物質の運送に係る問題を整理して、液状化物質判別法の位置付けを明らかにする。

液状化物質判別法は、その中核となる液状化物質判別試験法と、粒径分布に基づく液状化物質の判別法により構成される。3.3 節では、液状化物質判別法の考え方について述べる。

3.4 節では、装置や手順といった液状化物質判別試験法の仕様と、仕様決定のための研究について述べ、3.5 節では、試験に基づく液状化物質の判別のためのクライテリアの設定について述べる。

3.6 節では、粒径分布に基づく液状化物質の判別について述べ、3.7 節では、試験法を含む液状化物質判別法についてまとめる。開発した液状化物質判別試験法の仕様を ANNEX B に示す。

3.2 荷の移動と液状化

3.2.1 荷の移動とばら積み船の危険性

船倉内で貨物が左右舷方向に移動すれば船舶には横傾斜モーメントが作用する。ばら積み船はタンカーと異なり、一般に縦通隔壁を有しておらず、船倉内で貨物が

移動すれば、船舶の異常傾斜や転覆に結びつく恐れがある。即ち、貨物の液状化は船舶の異常傾斜や転覆の原因となる。

船倉内における貨物の移動の防止が困難である場合には、船倉内に隙間が発生しないように貨物を積載し、船倉内に隙間が残る場合は貨物の移動を考慮して、適切な予備復原力を持たせれば良い。穀類は一般に剪断強度が低く、航海中における貨物の移動を防止することが困難であり、隙間を無くす等の対策を実施するため専用船（穀類運搬船）で運送される。荷の移動があっても安全に運送するためのもう一つの方法は、タンカーのように、縦通隔壁を装備し、荷の移動距離を限定することにより、傾斜モーメントを限定することである。液状化物質運搬船は、この考え方にに基づき設計されるが、液状化物質運搬船は現在日本には無い（c.f. 2.3）。

縦通隔壁等の特殊な構造を有しないばら積み船で固体ばら積み貨物を運送する際には、荷の移動（Cargo shifting）を防止する必要がある。航海中に船倉内で貨物が移動するか否かは、船体運動等により貨物のパイルに作用する加速度、貨物の見かけの密度、貨物のパイルのスロープの角度や規模といった条件と、貨物の摩擦に関する特性、即ち、固体ばら積み貨物としての剪断強度の関係により決まる。即ち、船倉内における貨物の移動は、一言で言えば、貨物の剪断強度の不足とみなせる。

貨物の剪断強度の不足には、船積み時点において既に剪断強度が不足している場合と、航海中の液状化現象により貨物の剪断強度が不足する場合の二種類が考えられる。前者の剪断強度の不足に起因する現象が、液状化が発生しなくても生じる「荷崩れ（sliding failure）」であり、地盤工学（土質工学）で言うところの「斜面の土砂崩れ」と同様の現象である。また、後者の剪断強度の不足に起因する現象が「液状化（liquefaction）」である。これら二つの現象は、BC Code でも分けて扱われている。ここでは、液状化物質の運送方法について述べ、液状化を伴わない貨物の荷崩れ防止法に係る事項については第4章で述べる。

3.2.2 液状化現象⁽²⁴⁾

精鉱等の湿った、即ち部分的に飽和している粒状物質は、一般に、水と空気からなる空隙と固体部分により構成される。こうした物質に繰り返し荷重が作用すると、物質の粒子が微視的に移動し、多くの場合空隙の体積が減少しようとする。このとき、空隙が水で満たされ、且つ、細い粒子間の隙間が狭いことにより粒子間の水（間隙水）の流れの抵抗が大きいと、間隙の水圧（間隙水圧）が上昇する。粒状物

質の剪断強度は粒子間の摩擦力及び粘着力により維持されており、以下の式で表される。

$$\tau_R = \tan\phi \cdot \sigma'_N + c \quad (3.1)$$

$$\sigma'_N = \sigma_N - u \quad (3.2)$$

where:

τ_R : 抵抗剪断応力 (resisting shear stress)

$\tan\phi$: 摩擦係数 (friction coefficient)

σ'_N : 有効直応力 (effective normal stress)

c : 粘着力 (cohesion)

σ_N : 直応力 (normal stress)

u : 間隙水圧 (pore pressure)

(3.1)式右辺第一項の摩擦力は有効直応力と内部摩擦係数の積であるため、間隙水圧が高まると粒子間の有効直応力が小さくなるので低下する。このとき、もし右辺第二項の粘着力が有意でないと、粒状物質の抵抗剪断応力は非常に小さくなり、この物質は流動する。こうした現象が液状化現象と呼ばれる。物質が一定程度の空気を含む場合は、空気の体積弾性係数 (bulk modulus) が水よりも遙かに小さく (常温常圧で約二万分の一)、空隙の体積変化を容易に吸収できるため、間隙水圧はさほど上昇しない。そのため、物質が多くの水分を含まなければ、即ち、物質の水分値が低ければ、液状化は発生しない。大きい粒子により構成される物質では、間隙水が粒子間の大きな隙間を少ない抵抗で移動できるため、間隙水圧は殆ど上昇しない。そのため、大きな粒子で構成された物質 (細かな粒子を含まない物質) は液状化しない。物質が、粘土のように非常に細かな粒子で構成されている場合、湿った状態では、微視的な粒子の移動は粘着力によって拘束され、間隙水圧は殆ど上昇しない。そのため、非常に細かい粒子で構成された粘土のような物質は液状化しない。固体ばら積み貨物は一般に不飽和状態、即ち、空隙に水と空気の両方が存在する状態であり、固体ばら積み貨物の液状化現象は以下の通り概説できる。

- (1) 湿った (部分的に飽和した) 粒状物質に繰り返し荷重が作用する。
- (2) 粒子の微視的移動により、空隙の体積が減少する。
- (3) 空隙の空気が上方に抜け、残った空隙が殆ど水で満たされる。即ち、飽和に近い状態になる。

- (4) 細かな空隙を通る水の流れは抵抗が大きく、間隙水圧が上昇する。
- (5) 粒子間の摩擦が減少し、物質の剪断強度が小さくなり、液状化する。

液状化が発生しないための条件は以下の通り。

- (1) 繰り返し荷重が作用しない。
- (2) 物質が十分な粘着力を有する。(物質が非常に細かな粒子により構成されている。)
- (3) 物質の水分値が低い。(物質の飽和度が低い、即ち、空隙に占める水の体積の割合が低い。)
- (4) 物質が大きな粒子で構成されている。(細かな粒子を含まない。)

一般に、浮遊選鉱により得られた微粉精鉱は液状化しやすい。これは、浮遊選鉱の際に界面活性剤が用いられ、粒子間の摩擦係数が低くなり易いためである。

3.2.3 代表的液状化物質の運送状況

BC Code の付録 A にある液状化物質のリストは、ANNEX A の表 A.8 に示した通りである (c.f. A.4.7.6)。この中で、比較的多く運送される貨物は、銅精鉱、鉛精鉱、亜鉛精鉱である。財務省の貿易統計によれば、例えば、2000 年における銅、鉛、亜鉛の鉱石の輸入量はそれぞれ 447 万トン、18 万トン、106 万トンであり、これらの大半は精鉱として輸入されている。

3.2.4 液状化物質運送に係る問題点

2.2 節で述べた通り、航海中のばら積み貨物の液状化を防止するため、液状化物質については、運送許容水分値 (Transportable Moisture Limit) を決定しておき、船積み水分値を計測したうえで、船積み水分値が運送許容水分値を超える場合は積載しないことが要求されている。

現在 IMO-DSC 小委員会で実施されている BC Code の総見直しにおいては、液状化物質の雨中荷役について議論されている。現行 BC Code では、化学的危険性を有する貨物を除き、貨物毎にページを分けて記載していないが、改正 BC Code は、各貨物についてページを分けて、各種の注意事項を記載する書式となる。この案⁽²⁵⁾の中で、液状化物質である鉱物精鉱については、各貨物の正式名称を列挙し、共通の注意事項を記載する予定である。これらの貨物に対する天候に関する注意 (weather precautions) については、以下の二つに意見が分かれている⁽²⁵⁾。

- (1) 液状化物質運搬船に積付ける場合を除き、水分が増加しないようにすること。
- (2) 船積み水分値が運送許容水分値に近い場合を除いて、雨天でも積付け及び荷揚げできる。

日本は(1)の案を主張している。液状化物質の荷揚げは、他の船舶等に貨物を積みかえる必要がなく、その荷揚げにより海上運送が終了するのであれば、雨中で行っても、液状化による危険は生じないと考えられるが、船舶に積載する貨物の水分値の増大を防止するため、液状化物質の積付けは、特別な対策なしに雨中で行うべきではない。(2)は、液状化物質を運送する際の考え方に反している。貨物の水分値が殆ど上がらない、または、貨物の平均の水分値が運送許容水分値を超えない範囲では雨中荷役を認めるとの考え方も成立し得るかもしれないが、その場合であっても「船積み水分値が運送許容水分値に近い場合を除いて」だけでは条件として全く不十分であり、少なくとも、雨の強さ、荷役に要する時間、さらには貨物に侵入することが予想される水の量等について言及すべきである。なお、特殊貨物船舶運送規則には、液状化物質の積付け（液状化物質運搬船への積付けを除く）について以下の通り規定されている。

- 一 船舶をできる限り直立状態に保持して積み付けること。
- 二 雨中その他水分が増加する恐れがある場合には、これを防止するために必要な措置をとること。
- 三 その表面をできる限り平らに荷繰りすること。

液状化物質の雨中荷役の可否については、今後さらに IMO-DSC 小委員会で引き続き審議される予定である。

過去には、IMO で認められた運送許容水分値決定法は IMO フローテーブル法しかなかったのに対して、細かな粒子を含む石炭は液状化するが IMO フローテーブル法は石炭には適用できないという問題があった。そのため、田中、浦らは貫入法を開発し、国際基準とした。

液状化物質の運送については、2.4 節で述べた通り、液状化物質の判定法が無いという問題がある (c.f. A.4.7.6)。BC Code は全ての固体ばら積み貨物を網羅するものではなく、表 A.8 に示した液状化物質のリストも液状化物質を網羅していないことは、BC Code 付録 A に明記されている。また、日本の規則も、表 2.2 (c.f. 2.4.4) に示したとおり貨物の名称を記載しているが、ここであげられた名称の多くは特定の

貨物を示すものではない。また、規則上の液状化物質の定義は「浮遊選鉱により得られる精鉱その他の航海中に液状化する恐れのある微細な粒状物質」、即ち「液状化の恐れがあるもの」であり、ある貨物が液状化物質か否かの判断に資するものではない。一方、液状化物質に係る規則を適用すれば、積付の 6 箇月以内に作成した運送許容水分値の証明書及び船積み水分値の証明書が必要であり、これらは運送に要するコストに影響する。特に、船積み水分値の証明書は、少なくともそれぞれの航海毎に必要であり、また、我が国では国の指定機関による計測を義務付けている、即ち、荷送人の計測結果のみでは船積みできないこともあり、規則の適用範囲の明確化が、規則（1994 年 1 月 1 日発効）の策定の時点から求められてきた。そのため、液状化物質の判別方法を開発したので、以下に述べる。

3.3 液状化物質判別法の考え方

3.3.1 各種判別方法に関する検討

2.4.4 節で述べた通り、ある貨物が液状化物質か否かを判定する一つの方法は、IMO フローテブル法または貫入法 (c.f. A.4.7.5) により流動水分値を計測することである。流動水分値が問題なく計測できる貨物は、基本的には液状化物質であると判定できる。しかし、流動水分値が計測できないことは、液状化物質でないことを保証するものではない。

また、プロクター／ファガベリ法 (c.f. A.4.7.5) は、試料に繰り返し荷重を作用させて流動状態を呈するか否かを試験するものではなく、試料の飽和度に基づいて運送許容水分値を判定する方法である。よって、この試験法は、基本的には液状化物質か否かによらず適用できる。但し、プロクター／ファガベリ法でも、試料の透水性が高く、容器に挿入した際に試料が過剰な水を含んでいれば、締固めを行っている間に試料の粒子間の水が抜け落ちるため、細かな粒子を含まない試料、例えば小石のようなものであれば、極端に高い水分値での試験は実際には実施できない。そのため、一般には、粒径の大きい物質を試料とした場合は、飽和度が 70 %に達する水分値は求められない。しかしながら、プロクター／ファガベリ法では、モールドの水密性については規定されていないため、もし水密性の高い容器を用いた場合には、液状化の恐れのない物質（以下、非液状化物質と呼ぶ。）であっても容器に挿入する時点で一定程度の水分値を含むことができるものであれば、飽和度 70 %に達する水分値を求められる可能性がある。即ち、非液状化物質であっても、見かけのうえでは、プロクター／ファガベリ法により運送許容水分値を求められる可能性がある。よって、プロクター／ファガベリ法で運送許容水分値が決定できるか否かは、当該物質が液状化物質か否かの判断材料にならない。

ある物質が液状化物質でないことを判定するもう一つの方法としては、その物質が非常に多くの水分を含んだ場合でも液状化が発生しないことを確認することが考えられる。この考え方に基づき、日本海事検定協会は海上貨物運送調査会（当時）の下に液状化物質検討部会を設置し、浦部会長（東京大学生産技術研究所）の指導のもと、船舶機装品研究所に実験を委託し、船舶技術研究所（当時。研究担当者は著者）と共同で、試験を実施している⁽²⁶⁾。試験方法は、貫入法試験に準じて、水密の容器を用い、試料を人為的に飽和状態（間隙が全て水で満たされる状態）にして振動を与え、ビットの貫入量により液状化の発生の有無を判定するものである。そ

の結果、以下の二つのことが分かった。

- (1) 経験的には液状化物質ではないと判断される物質も、人為的に飽和状態にすれば、液状化現象が発生する。
- (2) 試料や締固め方法によっては、ビット貫入量が液状化判定のクライテリアである 50 mm に達しない場合であっても、液状化が発生している可能性がある。

(1)の知見からは、この評価法は、安全側に過ぎる判断を与えると考えられる。(2)の知見については、報告書に以下の記述がある。

「いずれの試験においても、ビット貫入量は、液状化のクライテリアである 50 mm に達していない。しかし、これらの図からは判断できないが、加振時の試料は、いずれの場合も早い時点で流動状態となり、その後容器の底部から再圧密が進行し、ビットが貫入し難くなっている様子が観察される。」

液状化が発生すると、粒子が動き易くなるため、振動により高まった間隙水圧が消散する（抜ける）過程で粒子の再配置が起こり、粒子は密な状態となり⁽²⁴⁾、剪断強度が高くなる現象が起こることはあることが知られている。この現象を「再圧密（re-consolidation）」という。即ち前述の記述は、試料を人為的に飽和状態にして貫入法に準ずる試験を実施した場合、試料や締固め方法によっては、試料が簡単に液状化し、短時間のうちに再圧密が起こり剪断強度が大きくなることによりビットの貫入が阻害されることがあるので、ビット貫入量が液状化の有無を判定する指標にならない場合があることを意味する。これを考慮すれば、試料を飽和状態にして加振し液状化の有無を確認する方法を用いた場合、実際の航海中には液状化する恐れがある物質であっても、液状化物質と判定されない可能性があると言える。よって、飽和状態の試料を用いて液状化の可否を判定する方法は、液状化物質の判別法としては実用的ではないと言える。

以上の経験及び検討に基づき、液状化物質の判定方法として、船積み水分値が運送許容水分値に達するか否かを判定する方法を開発することにした。この試験法を液状化物質判別試験（Liquefaction material identification test）と呼ぶ。

また、液状化物質は、図 3.1 に模式的に示すように、ある範囲の粒径分布の物質に限られることが知られている⁽²⁷⁾。

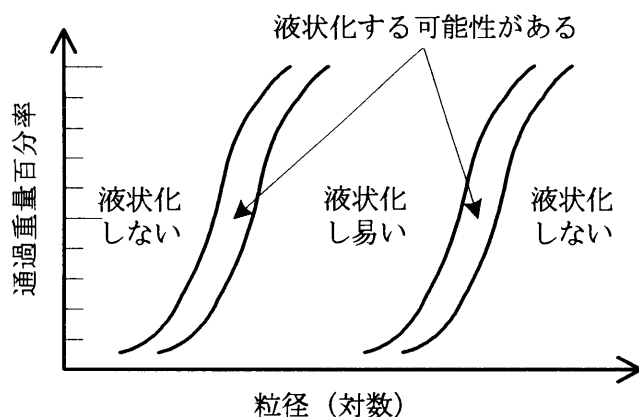


図 3.1 液状化物質の粒径分布範囲の模式図

よって、粒径分布、具体的には粒径分布の代表値を用いて、液状化物質か否かを判定するのも一つの方法であり、研究を実施した。

3.3.2 液状化物質判別試験の原理

本研究で提案する液状化物質判別試験は「通常の排水状態において、液状化が発生するだけの水分を保持することができない物質は、航海中に液状化する恐れが無い」との考え方を基礎としている。

この方法では、物質の粒子が微細で十分な粘着力を有するため液状化しない、即ち、図 3.1 において、粒径分布のグラフが左にくるため液状化しない物質は、判別できない。即ち、粘土状物質は、この試験の適用範囲ではない。一方、2.4.4 節で述べた通り、特殊貨物船舶運送規則の告示であげられている物質のうち、特にその範囲の明確化が求められているのは「鉱滓」である。一般に鉱滓は、炉から出てきた熔融した物質を、水中に投入することにより急冷して粒状物質とするか、または、熔融した物質を徐々に冷却して塊にした後、これを砕くことにより得られるもので、粒子が微細な場合もあるが、それでも粒状物質が基本成分であるために粘着力が少なく、粘土状物質ではない⁽²⁸⁾。よって、液状化物質判別試験が粘土状物質に適用できないことは、実務上特段の問題ではない。

「通常の排水状態」とは、積付前には短時間であれ貯蔵または輸送され、航海中は船倉内のビルジが定期的に排出されることを想定している。炉から出されて水中で急冷された粒状物質が、水の中から出されて直接船舶に積付けられることは想定し難い。また、一般に船倉内のビルジは、定期的に排出される。よって、この前提条件は、特別なものではない。

当該物質が「液状化が発生するだけの水分を保持することができない」ことを確認する方法としては、試料の初期状態と試料からの排水に関する条件を規定し、排水後の水分を評価することが考えられる。液状化が発生する水分値は物質毎に異なるため、水分値は排水後の水分の評価指標として適さない。そこで、試料の飽和度を評価指標として用いるプロクター／ファガベリ法が BC Code で採用されていることを考慮して、排水後の水分の評価指標としては飽和度を用いることにした。飽和度を指標として用いる場合、試料の初期状態は典型的状態である飽和状態とするのが妥当である。そのため、予め試料を飽和させ、その状態から排水させて、排水後の飽和度に基づき、試料が液状化物質か否かを判定する方法を開発した。

3.3.3 液状化物質判別試験の手順と考え方

試料を一度飽和状態にして、所定の条件下で排水を行い、排水後の飽和度により試料を評価することは、試料の透水性を評価することでもある。よって、試験の再現性を確保するためには、透水性に影響を及ぼす事項について検討を要する。ここで、地盤工学の検討対象となる土（粘土から大きな塊まで含む一般的名称）の中で、液状化物質判別試験の対象とする物質に近いものは砂であるため、砂の場合を主として透水性に影響を及ぼす要因について検討する。

土の透水性に影響を及ぼす要因としては、まず粒径があげられており^{(29),(30)}、土の透水性はおよそ有効径 (D_{10}) の二乗に比例するとの説が紹介されている。また、砂の場合は、透水性は平均粒径の二乗に比例するとの説も紹介されている。よって、液状化物質判別試験においては、原則として試料の粒径を調整してはならない。但し、試験で用いる容器の大きさを考慮して、一定以上の大きさの粒子は除去する必要がある。また、特に大きな塊を含む試料の場合、こうした塊を含めることにより、通過重量百分率に変化し、有効径も変わるため、試料の最大粒径を規定する必要がある。

土の透水性に影響を及ぼす要因としては、次に、間隙比があげられている。一般に透水性は、間隙比を e とした時、 $e^3/(1+e)$ に比例するとされている。また、砂の場合に限り透水性が間隙比の二乗に比例するとの説も紹介されている。よって、液状化物質判別試験においても、間隙比の再現性を確保する必要がある。土質調査においては「乱さない状態」の試料、即ち、現地においてあるがままの状態を試料を取り出し、供試体を形成する場合もあるが、船舶の貨物はもともと「練り返した」も

のに相当し、試料としても「練り返した試料」を抽出するしかない。そのため、試料から形成される供試体の間隙比は、試料の水分値と締固め方法により決まる。よって、液状化物質判別試験においては、締固め方法を規定するとともに、締固めを行う際の試料の水分値も規定する必要がある。

試料を飽和状態にする方法としては、試料中の空気を真空引きし、その後水を注入する方法を採用した。試料中の空気を真空引きする際に、試料が水分を含んでいると、水の蒸発により容器内の圧力が下がり難くなる。そのため、試料は予め乾燥させることにした。即ち、締固めは乾燥状態の試料で行うことにした。締固めの際の試料の状態として乾燥状態だけを採用することについては、クライテリアの設定において考慮する必要がある、この点については3.5.3節で述べる。

排水の再現性を確保するため、供試体の寸法を規定するとともに、容器の底部の孔の大きさも規定した。

液状化物質判別試験の概略の手順は以下の通りである。

- (1) 試料を乾燥させる。
- (2) 所定の手順で締固めを行い、容器に試料を挿入する。
- (3) 容器の空気を真空引きし、その後水を入れることにより、試料を飽和状態にする。
- (4) 容器のカラーを外し、余分な試料を取り除くことにより、供試体を所定の寸法に整形する。
- (5) 容器底部の孔から所定の時間排水する。

なお、試料の固体比重の計測、試料の排水前後の重量の計測、排水後の試料の水分値の計測及び飽和度の計算方法等を含む詳細な手順については後述する。

3.4 液状物質判別試験法の開発⁽³¹⁾⁻⁽³⁹⁾

3.4.1 試験法の概要

開発した液状物質判別試験法の仕様を ANNEX B に示す。この節では、試験手順の概略を示すとともに、仕様の決定の際の考え方について述べる。

液状物質判別試験には真空ポンプ、天秤等の各種の装置が必要があるが、中でも特徴的なものは、試験容器である。試験装置の詳細については ANNEX B の第 2 節を参照されたい。試験容器は、図 3.2 に示すように、モールド (Mould)、延長カラー (Extension collar) 及び蓋 (Lid) から構成される。

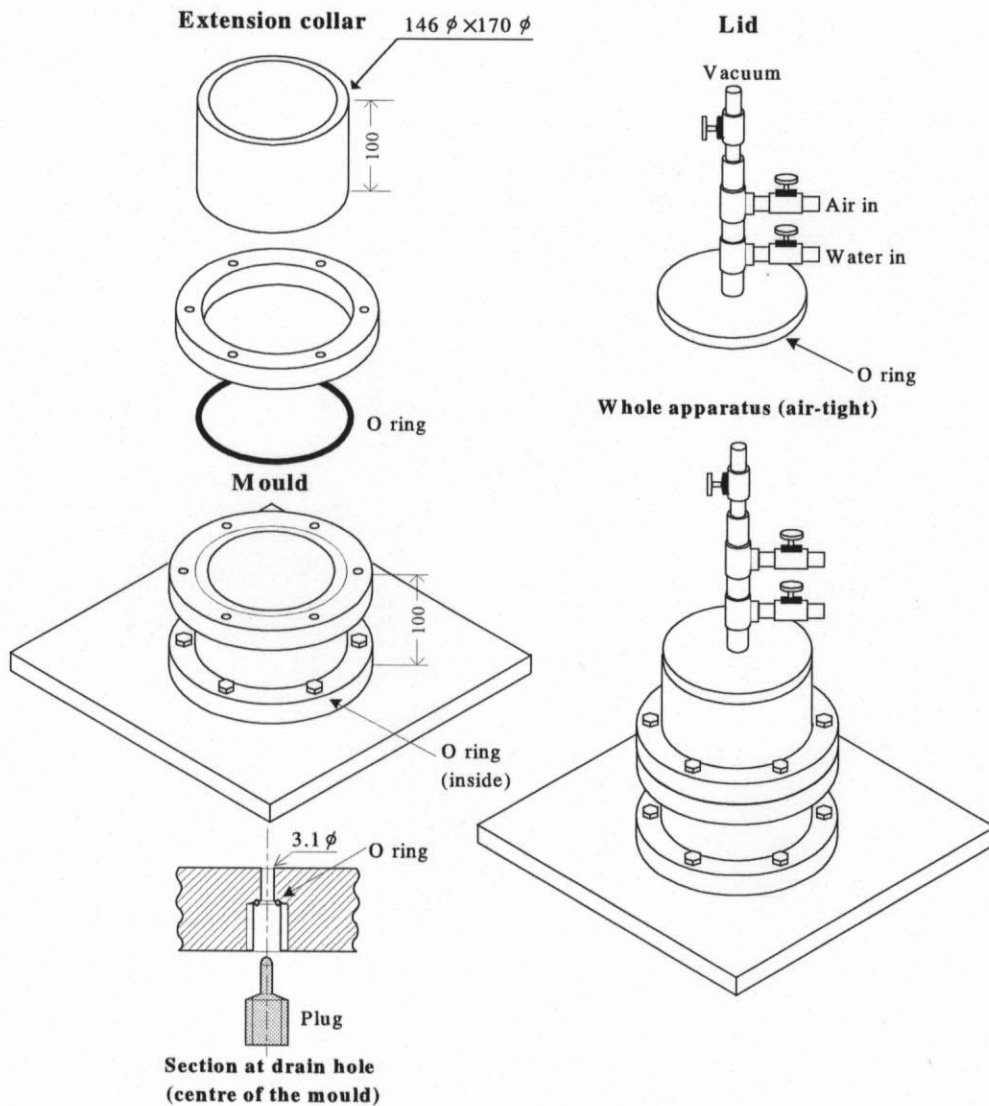


図 3.2 液状物質判別試験容器

容器の寸法は流動水分値を計測するための貫入法の小型モールド (c.f. A.4.7.5、表 A.7) に倣って決定した。また、液状化物質判別試験のモールド、即ち延長カラーを除いた容器の下部の容積は、貫入法試験の小型容器を用いる際の供試体の体積に倣って約 1,700 cm³ とした。モールドの底部中央には、小さな孔があり、この孔は栓及び O リングにより気密にできる構造とした。孔の大きさは、孔からの試料の粒子の流出を防ぐため、また、孔が目詰まりして水の流出を大きく妨げることが無いよう、孔の仕様を変えての実験の結果に基づき、直径 3.1 mm に決定した。さらに、試料による孔の目詰まりを防ぐため、孔の栓を閉めた状態では、栓の頂部が底面より僅かに上になるようにした。容器は、全て組み立てた状態では気密となり、内圧を下げるができる構造にした。

試験の概略の手順は以下の通りに設定した。

- (A) 固体比重の計測
- (B) モールドの容積 (供試体の体積) 及びモールドの空重量の計測
- (C) 試料の乾燥
- (D) 液状化物質判別試験容器の組み立て及び気密性の確認
- (E) 試料の挿入及び締固め
- (F) 飽和試料の作成及び供試体の形成
- (G) 供試体の重量計測 (排水前)
- (H) 供試体からの排水
- (I) 供試体の重量計測 (排水後)
- (J) 供試体の水分値計測
- (K) 飽和度等の解析
- (L) 液状化物質か否かの判定

以下、各手順の内容及び手順を決定する際の考え方について述べる。

3.4.2 固体比重の計測から試料挿入前まで

試料の固体比重の計測は、JIS A1202「土粒子の密度試験方法」(1999)などの適当な標準に従って実施すれば良い (c.f. B.3.2)。モールドの容積 (供試体の体積) 及び空の重量は、予め計測しておく必要がある (c.f. B.3.3)。容器への挿入の前に試料を乾燥させることは、試料の締固めの再現性を得るため及び試料の間隙の空気を速やかに抜くために必要である (c.f. B.3.4)。

試料の挿入に先だって、蓋をした状態で容器の気密を確認しておくことは、容器の気密が保たれないことによる実験のやりなおしを避けるのに有効であることが分かった。そのため、「容器の気密性の確認」を試験手順に含めた。

気密が保たれない原因となり易いのは、まず、モールド底部の栓の部分であり、この部分の気密性を確認するには、真空引きを実施してみることが最も簡単で効果的である。また、試験を繰り返して実施する場合、ブロアー（圧縮空気による吹き出し）等を用いて容器の内部に水が残らないようにするが、特に蓋の配管の中には、僅かな水が残る易い。こうした僅かな水を蒸発させ、真空引きを確実にを行うためにも、試料の挿入に先立って容器を完全に組み立てた状態で、真空引きを行うことが有効と言える。(c.f. B.3.5)。

3.4.3 試料の挿入及び締固め

締固めは、図 3.3 に模式的に示すように、モールドと延長カラーを組み立てた状態で、試料を挿入し、その上部からランマーで突き固めることにより行うことにした。ランマーはプロクター／ファガベリ法のもの、即ち、底面の直径 50 mm で、質量 0.35 kg のハンマーを高さ 0.2 m から落下させる形式のものを用いることとし、締固めの度合いは、層の数とハンマーの落下回数により調整することにした。

締固めの度合いは、(3.3)式で示される締固め仕事量 (Compactive effort) で表される。

$$E_C = \frac{M_R \cdot g \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (3.3)$$

ここで

E_C : 締固め仕事量	[J/m ³]
M_R : ランマーの質量	[kg]
g : 重力加速度	[m/sec ²]
H : ランマーの落下高さ	[m]
N_B : 一層当たりのランマーの落下回数	
N_L : 層の数	

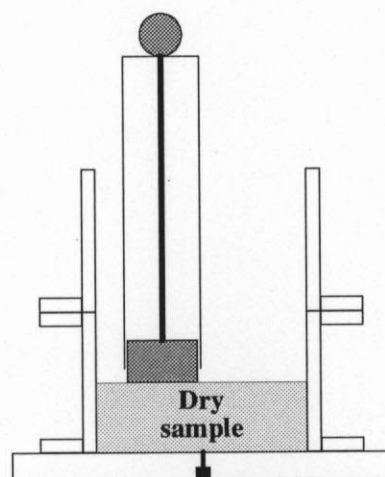


図 3.3 試料の挿入及び締固め

V: モールドの容積 (供試体の体積) $[m^3]$

液状化物質判別試験では、締固め仕事をプロクター／ファガベリ法に合わせた。プロクター／ファガベリ法の締固め仕事量は約 86 kJ/m^3 である。液状化物質判別試験においては、ハンマーの質量 (0.35 kg) 及び落下高さ (0.2 m) はプロクター／ファガベリ法のそれと同じであるから、ハンマーの総落下回数は供試体の体積に比例させれば良い。プロクター／ファガベリ法では、 $1,000 \text{ cm}^3$ の供試体に対して、計 125 回 (5 層×25 回/層) ハンマーを落下させるのに対して、液状化物質判別試験では、供試体の体積は約 $1,700 \text{ cm}^3$ であるから、ハンマーの総落下回数は 213 回とした。層の数は 5 とし、各層に対するランマーの落下回数は 42、42、43、43、43 回とした。以下は、特にことわらない限り、液状化物質判別試験における締固めは、この方法で実施した。なお、一部の実験では 6 層、一層当たり 50 回、計 300 回のランマーの落下による締固めを実施した。

容器内に注水した際に、供試体、即ちモールド内の試料が水により乱されることを防ぐため、締固めが終わった状態では、図 3.4 に模式的に示すように、モールド (延長カラーを除く部分) より 2~3 cm 程度上まで達するよう、試料を挿入することにした。

3.4.4 飽和試料の作成

試料を飽和状態にするためには、図 3.5 に示す通り、まず、容器に蓋をした状態で、真空引きにより、容器内の空気を除去する。真空引きの時間については 3.4.9 節で述べる。真空引きの後に容器内に注水するため、蓋の所定の配管 (図の Water in) にはビニールチューブ等を接続し、その一端は十分な量の水を入れたタンク (バケツ等) 内の水の中に入れておく必要がある (図 B.2 参照)。

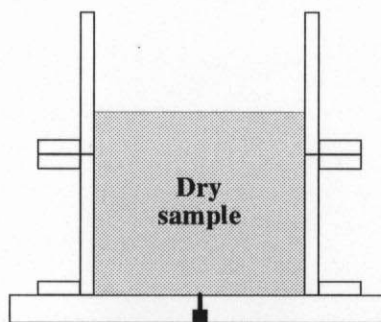


図 3.4 締固めが終了した状態

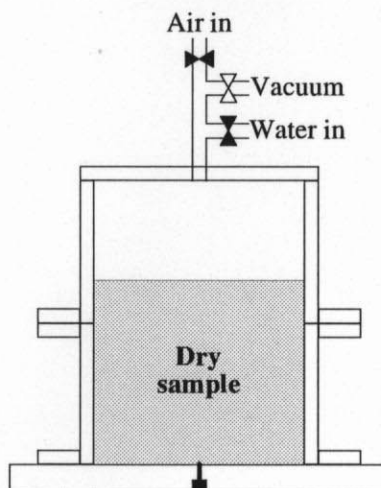


図 3.5 真空引き

所定の真空引きが終了したら、図 3.6 に示すように、真空ポンプへのバルブを閉めて、蓋の配管、即ち試料の上部から注水する。

試料を飽和状態にする目的では、試料の下部から注水することも考えられるが、その場合、注水の際の流速を十分に低くしないと、締め付けた試料を乱す恐れがある。そのため、また簡単のため、注水は上部から行うことにした。そして、水が試料を乱すことを防ぐため、モールドの上部 2~3 cm 程度まで試料を入れることにした。これにより、水配管に接続するタンクの圧力は大気圧としたま

ま、注水速度を調整することなく、容器内部の負圧により注水することを可能にした。注水後に容器内部の圧力を回復させる際 ("Air in" のバルブを開けた際) には、水が試料の中に浸透していくことが多いため、水は試料の上 3 cm 程度に達するまで、十分な量を入れることにした (B.3.7 節、手順 (F-2) 参照)。

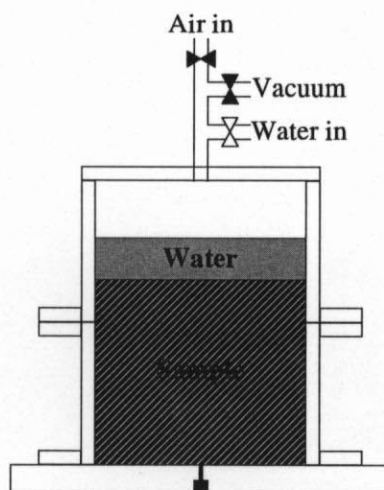


図 3.6 注水後の状態

3.4.5 供試体の形成及び重量計測 (排水前)

供試体を形成するには、図 3.7 に示すように、延長カラーを外し、モールドの外側の試料や水を取り去る。この状態で重量を計測することにより、排水前の供試体の重量が得られる。

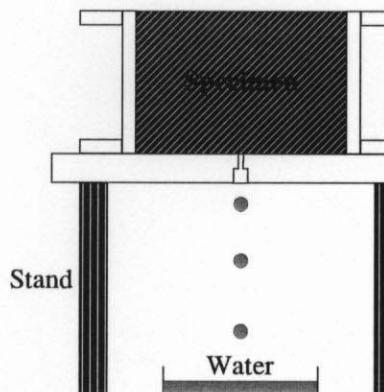


図 3.7 供試体

3.4.6 供試体からの排水及び重量計測 (排水後)

図 3.8 に示すような適当な架台に供試体が入ったモールドを乗せ、底部の栓を外すことにより、供試体から排水する。排水時間については後述する。

排水が終了したら、底部の孔に栓をし、供試体が入ったモールドの重量を計測する。



3.4.7 供試体の水分値計測

排水後の供試体は部分によって水分値が異なるため、供試体を形成する試料の全量を用いて水分値を計測することが重要である。ま

た、試料を乾燥用のバットに移しかえる際に、容器内に水が残ることがないようにするため、モールドの内側をペーパータオルで拭うことも重要である。そのため、水分値計測の際には、ペーパータオルを用いることにした (c.f. B.3.10)。

3.4.8 飽和度等の解析及び判定

試験により、排水前並びに排水後の供試体の重量及び排水前後の供試体の重量変化、即ち排水された水の量 ΔW が求められる。これらの値と、試料の固体部分の単位体積重量及び排水後の試料の水分値から、試料の間隙比、排水前の試料の水分値及び排水前並びに排水後の試料の飽和度が、以下の式により得られる。ここで、水の単位体積重量は $1,000 \text{ kgf/m}^3$ と仮定し、空気の重量は無視する。

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{W_T^{DR} \cdot (1 - M_C^{DR})}{\gamma_s} \quad (3.4)$$

$$V_v = V_T - V_s \quad (3.5)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.6)$$

$$V_w^{DR} = \frac{W_w^{DR}}{\gamma_w} = \frac{W_T^{DR} \cdot M_C^{DR}}{\gamma_w} \quad (3.7)$$

$$S_r^{DR} = \frac{V_w^{DR}}{V_v} \quad (3.8)$$

$$V_w^{SR} = \frac{W_w^{SR}}{\gamma_w} = \frac{W_T^{DR} \cdot M_C^{DR} + \Delta W}{\gamma_w} \quad (3.9)$$

$$S_r^{SR} = \frac{V_w^{SR}}{V_v} \quad (3.10)$$

ここで、記号は以下の通り。

V : 体積

γ : 単位体積重量

W : 重量

M_C : 水分値

e : 間隙比

S_r : 飽和度

また、下付の記号及び上付きの記号は以下の通り。

S : 固体部分

W : 水

T : 供試体全体

V : 空隙

SR : 排水前

DR : 排水後

(3.8)式で得られる排水後の供試体の飽和度が 70 %以上であれば液状化物質と判定し、70 %未満であれば液状化物質では無いと判定する。判定のためのクライテリアの設定については 3.5 節で述べる。

この試験は、基本的には排水後の試料の飽和度で当該試料が液状化物質か否かを判定するものであるため、排水前の試料の飽和度が十分に高くないと、試験は意味をなさない。そのため、(3.10)式で得られる排水前の飽和度が低い場合、その試料は、この試験の適用対象外と考えるべきである。即ち、この試験により、排水前の飽和度が低い試料が液状化物質か否かを判定するのは適当ではない。本研究においては、全ての実験⁽³²⁾において排水前の飽和度は 95 %以上であったことを考慮し、試験の適用範囲は、排水前の飽和度が 95 %以上の場合に限ることとした。

3.4.9 真空引きの時間

液状化物質判別試験手順において、真空引きの時間は、実験結果に基づいて決定した。真空引きの時間を決定する実験においては、ニッケルスラグ（ニッケル鉍滓）を試料として用いた。固体比重は 3.05、有効径 D_{10} は 0.058 cm であった。試料の粒径分布を図 3.9 に示す。また、真空引きの時間と容器の内圧の関係を図 3.10 に示す。この実験においては、試料の締固めは 6 層、一層当たり 50 回のランマーの落下により行った。

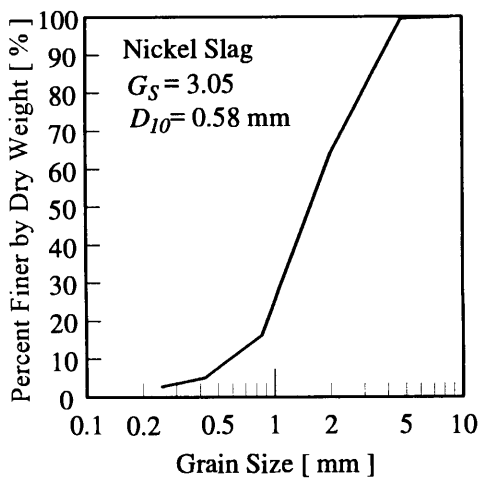


図 3.9 真空引き実験用試料の粒径分布

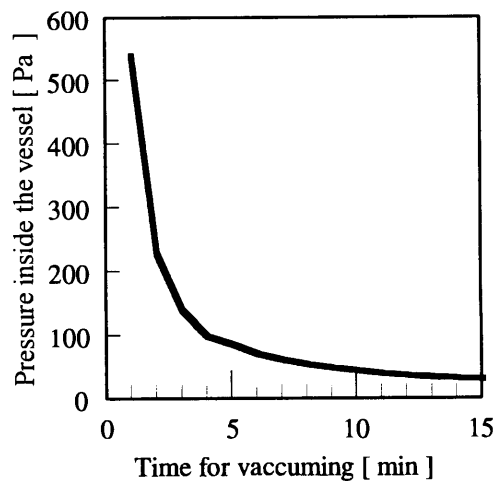


図 3.10 真空引き時間と容器の内圧
(絶対値)

図 3.10 において、真空引き開始までは容器の内圧は 1.0×10^5 Pa (大気圧) であり、この試料については、5 分以内に容器の内圧は 100 Pa、即ち大気圧の 1/1000 より低くなった。一般に 5 分程度の真空引きを行えば、試料を飽和状態にする意味では十分と考えられるため、余裕を見込んで真空引きの時間は 15 分とした。

3.4.10 排水時間

排水時間は実験結果に基づいて決定した。実験では、排水後の飽和度が液状化物質の判定のクライテリアである 70 %に近い試料を用いて、供試体から排出される水の量を時系列的に調べた。締固めは 6 層、一層当たり 50 回のランマーの落下により行った。実験に用いた試料は、ニッケルスラグとカoppersラグ (銅鉱滓) であり、ニッケルスラグは粒径を調整したものである。ニッケルスラグの固体比重は 3.05、有効径 D_{10} は 0.037 cm であった。カoppersラグの固体比重は 3.69、有効径 D_{10} は 0.062 cm であった。試料の粒径分布を図 3.11 に示す。試験では、容器の下に天秤及び器を置き、供試体から排出される水の重量を計測した。排出された水の重量の時系列を図 3.12 に示す。

図 3.12 に示した実験において、30 分間の排水前後の供試体の重量変化は、カoppersラグのそれが 192 g、ニッケルスラグのそれが 129 g であった。また、排水後の飽和度はそれぞれ 67.2 %、76.5 % であった。図より、液状化物質のクライテリアに近い排水後の飽和度を有する供試体からの排水重量は、約 20 分を過ぎると変化速度が低くなるため、余裕を見込んで排水時間は 30 分とした。

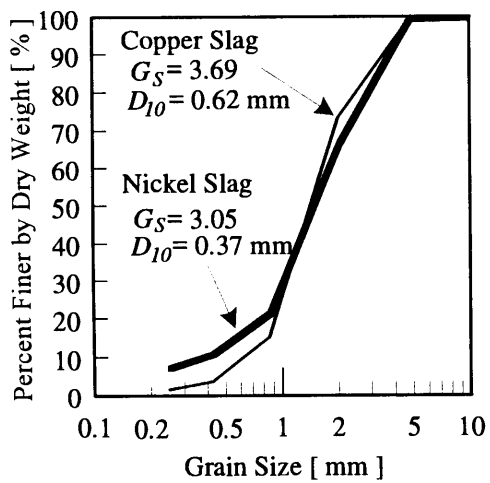


図 3.11 排水時間実験用試料の粒径分布

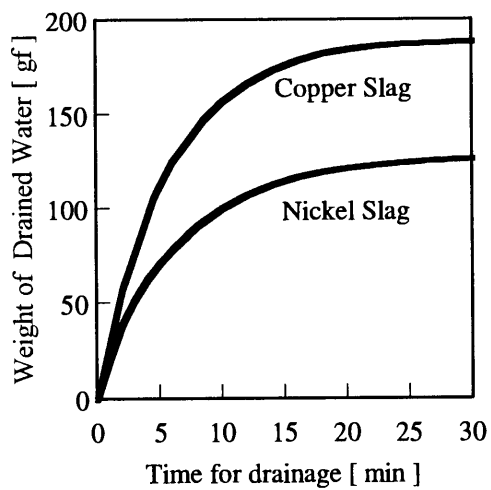


図 3.12 排水時間と排水重量

3.5 液状化物質判定のためのクライテリア

3.5.1 クライテリアの考え方

プロクター／ファガベリ法では、試料の水分値を変化させて所定の方法で締固めを行い、飽和度が 70 %となる水分値を運送許容水分値としている。よって、プロクター／ファガベリ法は、飽和度 70 %以下の物質は液状化を起こさないことを直接保証するものではないが、この飽和度以下の物質は液状化の恐れがないことを示唆していると言える。ここで、飽和度 70 %に対応する水分値は流動水分値ではなく運送許容水分値、即ち、安全余裕を見込んだ値であることに留意されたい。また、プロクター／ファガベリ法の適用範囲は、粗い精鉱とこれに類似する物質に限られることにも留意されたい。さらにプロクター／ファガベリ法では、モールドの水密性については規定していない。即ち、この試験法は、供試体からの排水条件を規定するものではない。一方、液状化物質判別試験は、飽和状態の供試体から小孔を通して排水させ、その後の飽和度を評価するものであり、排水後の飽和度は、試験法により大きく変わる。よって、液状化物質判別試験により得られる飽和度の位置付けについては慎重に検討する必要がある。

液状化物質判別試験は、岸壁や貯鉱場に積載されていた貨物が、積付の際に、液状化の観点からみてどのような水分値になり得るかを、典型的な条件の下で試料からの排水の性質を調べることにより、判定しようとするものである。試験において容器底部の孔が供試体中の微細な水の流路に比較して十分に大きく、且つ、排水時間が十分に長ければ、排水後の供試体中には、表面張力と重力の作用の結果として毛管水⁽²⁹⁾が残る。そこで、液状化物質判別試験において排水後の供試体中に残る水を、乾燥した供試体が吸い上げる毛管水に置き換えて考えてみる。毛管水の量は毛管上昇高に依存する。毛管上昇高 h_c は土粒子の有効径 D_{10} と間隙比 e により、大体次式によって求めることができる。

$$h_c = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad (3.11)$$

ここに、 C は粒子の形状と粒子表面の化学的なよごれによって決まる定数であって $0.1 \sim 0.5 \text{ cm}^2$ の範囲である。即ち、毛管上昇高は、有効径と間隙比におおよそ反比例する。そして、液状化物質判別試験では、供試体の毛管上昇高が供試体の高さ (100 mm) より十分に大きければ、試験において殆ど供試体からの排水は殆ど無いと考えられる。一方、毛管上昇高が数十センチメートルの鉱滓を、貯鉱場に 1 m 程度積み

上げた場合を考慮すれば、毛管水が残るのは底部付近だけである。よって、液状化物質判別試験で排水後の供試体に残る水のうち毛管水が一定程度の割合を占めるとしたら、実際の貨物では、間隙比の問題を別にすれば、平均の水分値は液状化物質判別試験の排水後の供試体の平均水分値よりも低くなると考えられる。

以上を踏まえて、液状化物質判別試験における液状化物質の判定のためのクライテリアは、各種の物質について各種の試験を実施し、その結果を踏まえて総合的に検討したうえで決定した。

3.5.2 クライテリアの検討のための実験^{(31), (38), (39)}

3.5.2.1 実験に用いた試料

実験に用いた試料及びこれら試料の固体比重を表 3.1 に示す。表に示した固体比重は、5回の計測結果のうち、最大値と最小値を除いた平均値である。

表 3.1 試料の名称及び固体比重

英名	和名	略称	固体比重
Zinc Concentrate	亜鉛精鉱	Zinc Conc.	4.14
Copper Concentrate	銅精鉱	Copper Conc.	4.05
Carol Lake Iron Ore Concentrate	キャロルレイク鉄精鉱	Iron Conc.	4.98
Sedimentary Galena	沈殿方鉛鉱	Galena	7.05
Granulated Nickel Slag	粒状ニッケル鉱滓	Nickel Slag	3.06

Carol Lake Iron Ore Concentrate はカナダから送付された試料、Sedimentary Galena はポーランドから送付された試料である。以下、各試料は略称で示す。

Zinc Conc.及びCopper Conc.は液状化物質の代表的なものである。Iron Conc.は、経験的には液状化物質と判断される物質のなかで、比較的粒径が大きなものとして選定された。Galena は、経験的には液状化物質では無いと判断される物質のなかで、比較的粒径の細かいものとして選定された。Nickel Slag は、経験的には液状化物質ではないと判断される物質である。試料の粒径分布を図 3.13

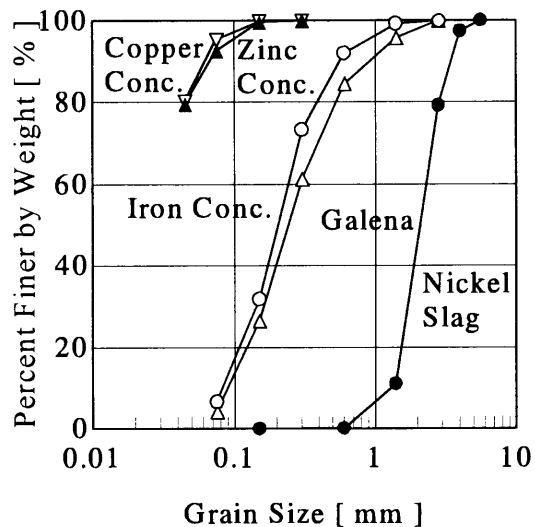


図 3.13 試料の粒径分布

に示す。Copper Conc.と Zinc Conc.、Iron Conc.と Galena はそれぞれ粒径分布が近いと言える。

3.5.2.2 プロクター／ファガベリ法試験

これらの試料を用いて、プロクター／ファガベリ法 (c.f. BC Code) による試験を実施した。この試験は、所定の締固め条件下における試料の水分値と間隙比の関係を求める試験（プロクター試験）と、これに基づく運送許容水分値の判定（ファガベリ法）から成り立っている。プロクター試験は、土の締固めに関する性質を調べる際の基礎的試験である。この試験では、モールドは、JIS A1210, 1999-「突固めによる締固め方法」に規定されている内径 100 mm、容積 1,000 cm³ のモールドを用いることができる。モールドは鋼製で、底板及び円筒から構成されており、締固めの際には、カラーを取り付ける。試験の概略の手順は以下の通り。

- (1) 試料の固体比重を計測する。
- (2) 試料の水分を調製する。
- (3) モールドからカラーを外した状態で、重量（モールドの空重量）を計測する。
- (4) モールドにカラーを取り付ける。
- (5) 締固めを行い、試料をモールド（カラー付き）に挿入する。
- (6) カラーを外し、モールドの上縁に沿って、試料をストレートエッジで切り取り、余分な試料を除去することにより、供試体を形成する。
- (7) 供試体の入ったモールドを清掃した後、重量を計測し、供試体の重量を求める。
- (8) 供試体の水分値を計測する。

締固めは試験基準に従って 0.35 kg のランマーを 0.2 m の高さから一層当たり 25 回、5 層で実施した。供試体の体積は 1,000 cm³ である。供試体の重量、水分値、固体比重から、間隙比が計算できる。

試験においては、乾燥状態の試料と、可能な限り多くの水分を含む試料を用意し、これらの試料について試験を行うとともに、これらを適宜混ぜ合わせて適当な水分値の試料を調製し、試験した。結果を図 3.14～3.18 に示す。

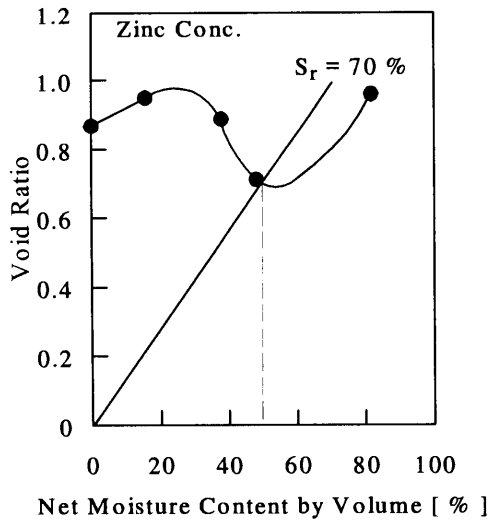


図 3.14 Zinc Conc.の締固め曲線

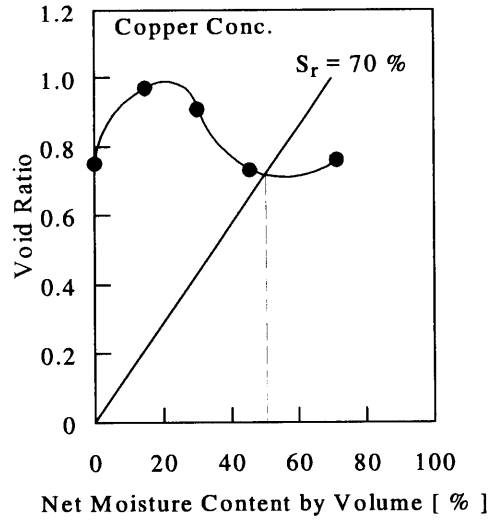


図 3.15 Copper Conc.の締固め曲線

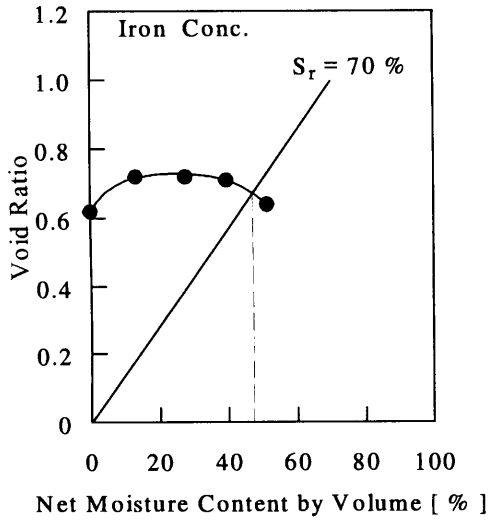


図 3.16 Iron Conc.の締固め曲線

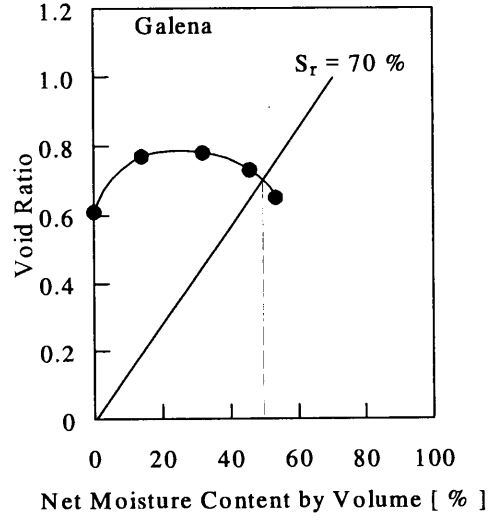


図 3.17 Galenaの締固め曲線

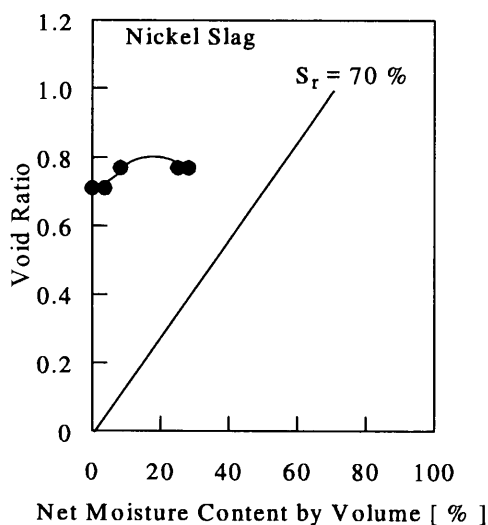


図 3.18 Nickel Slag の締固め曲線

各図の横軸は体積ベースの正味水分値、即ち、試料中に占める水の体積を固体部分の体積で割った値であり、縦軸は間隙比である。図中の直線は飽和度 70 % に対応する線である。この直線の式は、以下の通り。

$$M'_c = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V_v \cdot S_r}{V_s} = e \cdot S_r \quad (3.12)$$

ここで、

M'_c : 体積ベースの正味水分値

V_s : 固体部分の体積

V_w : 水の体積

V_v : 空隙の体積

S_r : 飽和度 (V_w/V_v)

e : 間隙比 (V_v/V_s)

この図の書式は試験法 (c.f. BC Code) の中で指定されている。この直線とグラフ (Compaction curve) の交点に対応する水分値が、プロクター/ファガベリ法による運送許容水分値である。

各試料の最大水分値における試験では、いずれもモールドの円筒部と底部の間隙から水が出てきているのを確認した。Nickel Slag を試料とした試験では、試料の締固めの間に水が流出し、試料の水分値は、図に示した値までしか試験できなかった。各試料の運送許容水分値及び試験することのできた最大水分値並びに飽和度を表 3.2 に示す。

表 3.2 プロクター／ファガベリ法による運送許容水分値及び最大水分値

Sample	Transportable Moisture Limit [%]	Maximum value [%]	
		Moisture content	Degree of saturation
Zinc Conc.	10.8	16.5	85.3
Copper Conc.	11.1	15.0	94.0
Iron Conc.	8.7	9.4	80.6
Galena	6.6	7.0	82.2
Nickel Slag	決定不能	8.4	36.5

プロクター／ファガベリ法試験では、飽和度一定のグラフが直線となるよう、図 3.14～3.18 のように結果を示すことが規定されている。これらの試験の結果は、横軸を水分値、縦軸を乾燥時の単位体積重量（乾燥時の見かけ単位体積重量）として、図 3.19～3.23 のようにも表現できる。締固め試験（プロクター試験）の結果の表現方法としては、これらの図の方が一般的である。図中の曲線は、飽和度が一定となる線である。図 3.19～3.23 では、飽和度 70 % に対応する水分値を示してある。

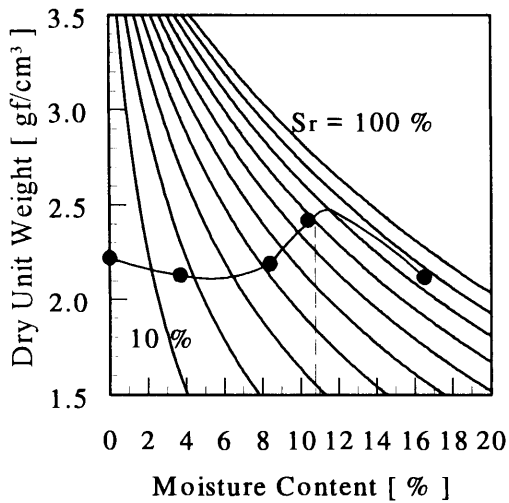


図 3.19 Zinc Conc.の締固め曲線

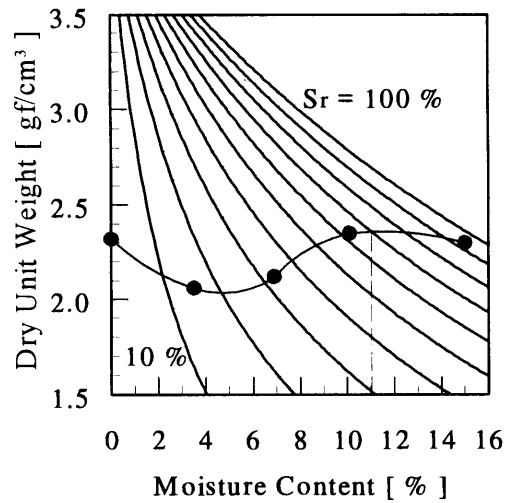


図 3.20 Copper Conc.の締固め曲線

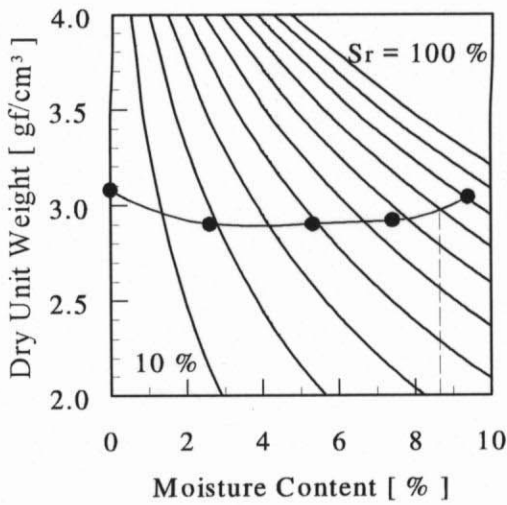


図 3.21 Iron Conc.の締固め曲線

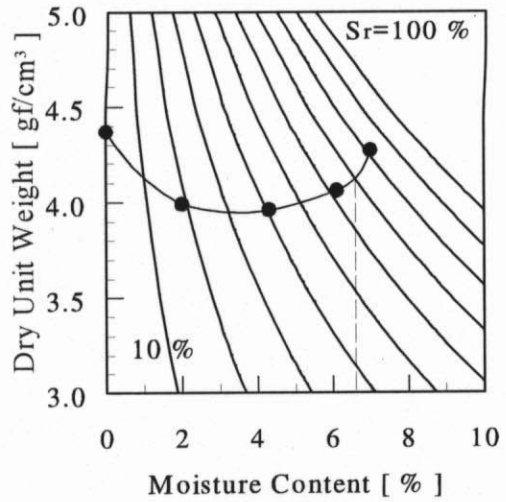


図 3.22 Galenaの締固め曲線

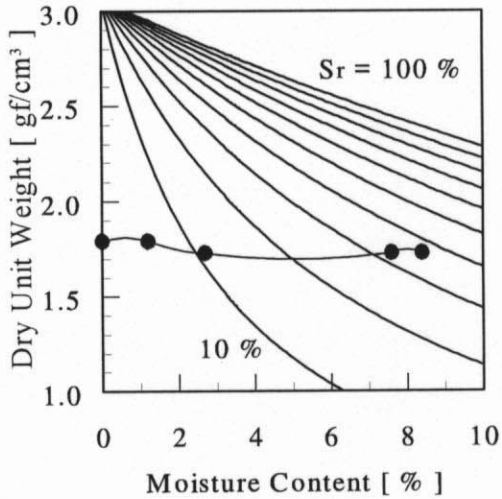
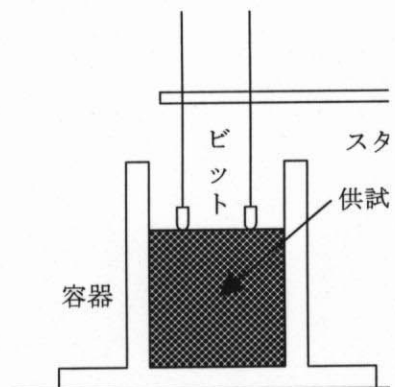


図 3.23 Nickel Slagの締固め曲線

3.5.2.3 貫入法試験

プロクター／ファガベリ法は、試料の締固め試験の結果から運送許容水分値を決定する方法であり、液状化現象の発生の可否を観察するものではない。そこで、各試料における液状化現象の発生の有無を確認するため、貫入法試験を実施した。試験においては精鉱用の容器 (c.f. A.4.7.5 節、表 A.7) を用いた。試験装置を図 3.24 に模式的に示す。試験の概略の手順は以下の通り。

- (1) 試料の水分値を調製する。
- (2) 所定の締固めを行い、試料を容器に挿



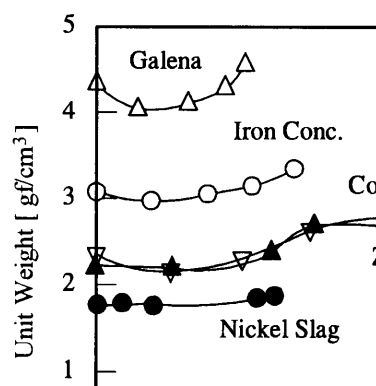
入する。

- (3) 容器を加振機（振動台）に設置する。
- (4) 容器内の供試体の上に、液状化を検出するためのビットを 2 本セットする。
- (5) ビットの高さ（スタンドからの突出長さ）を計測する。また、容器の上縁から供試体の上面までの深さを計測する。
- (6) 2G rms の上下加速度で 6 分間振動させる。
- (7) ビットの高さ（スタンドからの突出長さ）を計測する。また、容器の上縁から供試体の上面までの深さを計測する。
- (8) ビット貫入量を求める。供試体の上面が明確に沈下していれば、ビット貫入量を補正する。
- (9) 試料の水分値を計測する。

液状化物質については、ビット貫入量が 50 mm を超える場合、液状化が発生したと判定される。試料の水分値を変えて試験を行い、液状化が発生する最も低い水分値と、液状化が発生しない最も高い水分値の平均値を流動水分値と呼ぶ。運送許容水分値は流動水分値の 90 % とされる。試料の準備や水分値の精度については、BC Code を参照されたい。

貫入法試験では、締固めは、試料の上面に静かに圧力を加える、いわゆる静的タンピングによる。タンピングの圧力は、貨物の見かけの密度、最大の積付深さ及び重力加速度の積とするように規定されている。プロクター／ファガベリ法試験により得られた試料の水分値と見かけの単位体積重量（水分を含む）の関係を図 3.25 に示す。

図の横軸は水分値、縦軸は見かけの単位体積重量である。図より、Galena と Iron Conc. は見かけ単位体積重量が大きいことが分かる。これらの試料については、タンピング圧力を 120 kPa とした。これは、Galena については積付高さが 3 m 弱、Iron Conc. については積付高さが 4 m 弱の際の貨物底部の圧力に相当する。他の試料については、タンピング圧力を 90 kPa とした。これは、積付高さにすると約 4 m に相当する。タンピングは、試料の上面が平坦になるまで行うのが基本である。IMO



フローテーブル法では、直径 30 mm のタンパーを用いるが、貫入法の場合、こうした圧力では、タンパーの径 30 mm では、タンパーが試料に貫入してしまい、締固めが容易ではない。そのため、タンパーとしては直径 100 mm のものを用いた。貫入法試験では、供試体の体積を計測しないため、一般には間隙比は得られない。そこで参考のため、各試料の水分値を流動水分値に近い値に調製した上で、Nickel Slag については水分値を高め調製した上で、この締固め方法（タンパー径 100 mm、タンピング圧力 90/120 kPa）により形成した供試体の重量、水分値及び概略の体積を計測した。結果を表 3.3 に示す。

表 3.3 貫入法試験の締固め条件における締固めの度合い

試料	固体比重	試料重量 [gf]	体積 [m ³]	見かけ単位体積重量 [gf/cm ³]	水分値 [%]	間隙比	飽和度 [%]
Zinc Conc.	4.14	4591.1	1736.2	2.64	8.8	0.717	55.7
Copper Conc.	4.05	4410.7	1736.2	2.54	8.7	0.747	51.8
Iron Conc.	4.98	5183.7	1668.8	3.11	7.1	0.726	52.7
Galena	7.05	7188.9	1635.1	4.40	5.6	0.699	60.3
Nickel Slag	3.06	3821.0	1904.8	2.01	9.2	0.680	45.6

この表に示された間隙比と、プロクター／ファガベリ法試験により得られる同程度の水分値における間隙比を比較することにより、貫入法試験における上記の締固めの程度を、プロクター／ファガベリ法試験の場合のそれと比較できる。図 3.19～3.23 のグラフ（Compaction curves）より、各試料の表 3.3 に示した水分値（流動水分値付近）における乾燥時の見かけ単位体積重量を読みとり、間隙比を求めた。結果を表 3.4 に示す。但し、Nickel Slag は、プロクター／ファガベリ法試験では水分値が 9.2 %まで達しなかったため、外挿した値である。

表 3.4 貫入法試験時の締固めとプロクター／ファガベリ法試験による間隙比の比較

試料	固体比重	水分値 [%]	貫入法試験時の締固めによる間隙比	プロクター／ファガベリ法試験	
				乾燥時見かけ単位体積重量 [gf/cm ³]	間隙比
Zinc Conc.	4.14	8.8	0.717	2.33	0.777
Copper Conc.	4.05	8.7	0.747	2.31	0.753
Iron Conc.	4.98	7.1	0.726	2.91	0.711
Galena	7.05	5.6	0.699	4.03	0.749
Nickel Slag	3.06	9.2	0.680	1.73	0.769

表より、本研究の貫入法試験時の締固め方法による締固めの程度が分かる。貫入法試験における締固めにより、Zinc Conc.、Galena 及び Nickel Slag では、この水分値で

は、プロクター／ファガベリ法の場合（締固め仕事量約 86 kJ/m^3 の突固めによる締固め）と比較して、間隙比が小さくなっていることが分かる。このことから、タンピング圧力を 90 kPa 及び 120 kPa に設定し、従来の試験の際よりも大型のタンパーを用いたことにより、貫入法の試験基準が想定する範囲内ではあるが、比較的強めの締固めが行われたと考えられる。

砂等の液状化強度に及ぼす過圧密（overconsolidation）の影響については、これまでに各種の研究がなされているのに対して^{(40), (41)}、貫入法試験における締固めの程度と流動水分値の関係については、十分に研究されてはいないが、締固めの強さが流動水分値に及ぼす影響については、以下の通りと考えられる。貫入法試験では、試料を強く締固めた場合は、試料を弱く締固めた場合と比較して、加振開始前の試料の半径方向に垂直な面における直応力（以下、「水平直応力」と呼ぶ。）について言えば、(3.1)式右辺第一項の有効直応力のうち(3.2)式右辺第一項の直応力が大きくなる。この加振開始前の試料の粒子間における水平直応力の増大は、液状化を発生させ難くする、即ち、流動水分値を上昇させる原因になると考えられる。一方、締固めを強くした場合は、間隙比が低下する。間隙比の低下は、試料の透水性を低下させるとともに、同一飽和度における水分値を小さくする（c.f. 3.2.2）。よって、間隙比の低下は、流動水分値を低下させる原因になると考えられる。貫入法試験のように 18,000 または 21,600 回（6 分間 50/60 Hz）の繰り返し加速度を作用させた場合は、加振前の試料の粒子間に作用する水平直応力の増大よりも、間隙比の低下の方が流動水分値に及ぼす影響が大きいと考えられるため、貫入法試験では、一般に、締固めを強くすると流動水分値は低下すると考えられる。貫入法試験の開発の際には、直径 56μ のガラスビーズを用いて、当時の貫入法試験（片振幅 2 G）における締固め（圧力 0.4 kgf/cm^2 のタンピング）の有無の影響が調べられた⁽⁴²⁾。その結果、締固めを行った場合は水分値 16.52 %で6分間の加振時のビット貫入量が 50 mm を超えたのに対して、締固めを行わなかった場合は水分値 17.49 %ではビット貫入量は 50 mm 未満であり、17.88 %でビット貫入量が 50 mm を超えたことが報告されている。また、Barite Concentrate（重晶石。 $D_{60} = 0.05 \text{ mm}$ 。 D_{10} は計測されていない。）を用いて締固めの際のタンピング圧力を変化させて当時の貫入法試験（片振幅 2 G）を実施した結果^{(20), (42)}、タンピング圧力が 0.42 kgf/cm^2 の場合は流動水分値が 10.2 %であったのに対して、タンピング圧力を 1.05 kgf/cm^2 にした際には、流動水分値が 9.5 %まで下がったことも報告されている。これらの試験結果からも、貫入法試験で

は、締固めを強くすると流動水分値が低下することが分かる。貫入法試験とプロクター／ファガベリ試験を比較する際には、この点を考慮する必要がある。

Zinc Conc.、Copper Conc.、Iron Conc. 及び Galena における水分値とビット貫入量
の関係を図 3.26～図 3.29 に示す。Nickel Slag の試験では、水分値に関わらず、ビット
貫入量は全て 50 mm を超えた。但しこのことは、乾燥状態であっても試料の粒子
が振動により運動してしまい、ビットを支えることができなかつたことによるもの
であり、水分値によらず、液状化現象は観察されなかつた。

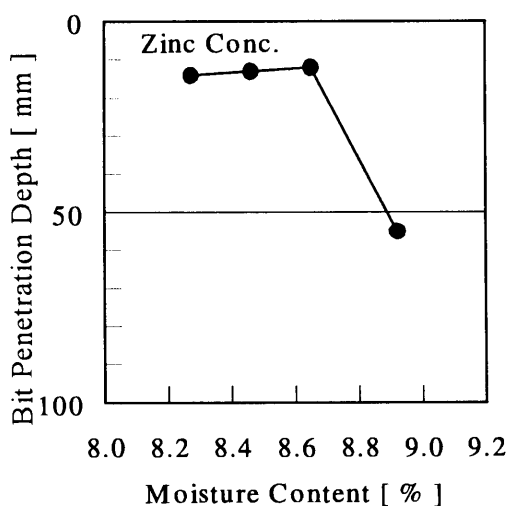


図 3.26 Zinc Conc.の水分値と
ビット貫入量

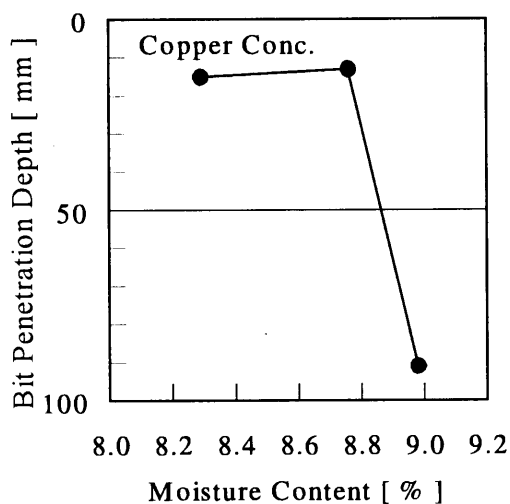


図 3.27 Copper Conc.の水分値と
ビット貫入量

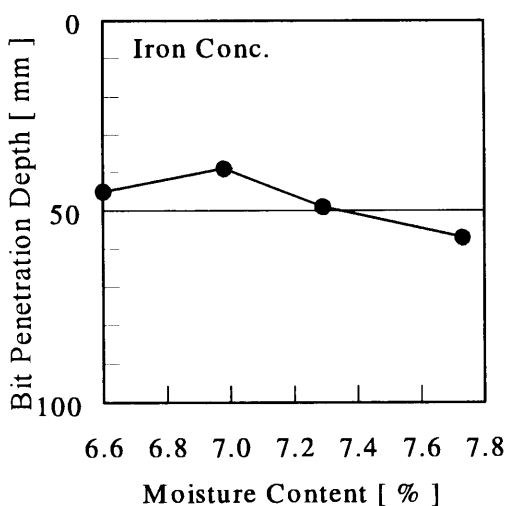


図 3.28 Iron Conc.の水分値と
ビット貫入量

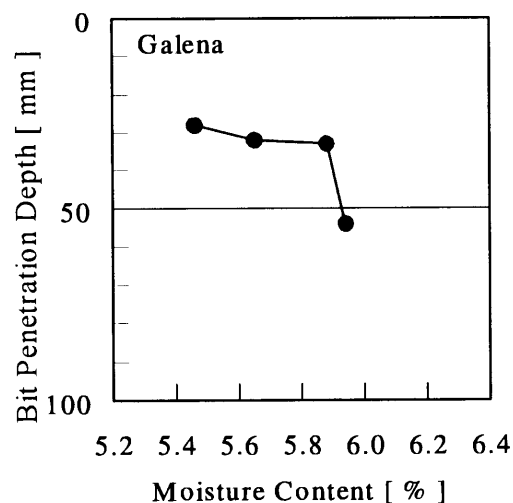


図 3.29 Galena の水分値と
ビット貫入量

貫入法試験により求めた流動水分値並びに運送許容水分値及びプロクター／ファ

ガベリ法試験により求めた運送許容水分値 (c.f. 表 3.2) を表 3.5 に示す。

表 3.5 貫入法試験による流動水分値、運送許容水分値と
プロクター／ファガベリ法試験による運送許容水分値

試料	貫入法試験		プロクター／ ファガベリ法試験
	流動水分値 [%]	運送許容水分値 [%]	運送許容水分値 [%]
Zinc Conc.	8.8	7.9	10.8
Copper Conc.	8.9	8.0	11.1
Iron Conc.	7.5	6.8	8.7
Galena	5.9	5.3	6.6
Nickel Slag	測定不能	決定不能	決定不能

表より、プロクター／ファガベリ法試験は、貫入法と比較して、低い運送許容水分値を与えるものではない、即ち、安全側の値を与えるものではないと言える。但し、表 3.5 に示した貫入法試験による運送許容水分値は、前述の通り、低めの値となっている可能性があるため、本研究においてプロクター／ファガベリ法試験による運送許容水分値が貫入法試験によるそれよりも高い値を示したことは、プロクター／ファガベリ法試験に問題があることを意味するものではない。

貫入法試験において、Zinc Conc.と Copper Conc.は、水分値が高い場合、振動を与えると表面に水分が析出した。即ち、液状化の様子を示した。一方、Iron Conc.と Galena は、供試体全体が明確な液状化の様子を示すことはなかったが、水分値が高い場合、振動を与えると供試体のビットに接触した部分では、水分が析出した。

Galena は、荷送人により経験的に液状化物質では無いと判断される物質のなかで、比較的粒径の細かいものとして選定された (c.f. 3.4.2.1)。しかし、その粒径分布は、経験的に液状化物質と判断されている Iron Conc.に近く、また、貫入法試験により流動水分値を求めることができることから、本研究における実験結果からは、液状化物質と判定できる。

3.5.2.4 透水性試験

液状化現象は間隙水圧の上昇によるものであり、間隙水圧の上昇は粒子の間隙を水が通過する際の抵抗に依存する。粒子の間隙を水が通過する際の抵抗を代表する物性値が透水性 (permeability) である。透水性は(3.13)式で与えられる透水係数 (hydraulic conductivity)、いわゆるダルシー数 (Darcy coefficient) で表される。

$$k_r = \frac{L \cdot Q}{h \cdot A \cdot t} \quad (3.13)$$

記号は以下の通り。

- k_T : 温度 T におけるダルシー数
- L : 供試体の高さ
- Q : 時間 t の間に供試体を通過する水の量
- h : 水頭
- A : 供試体の断面積
- t : 流量を計測する時間

試験は、JIS A 1218, 1998「土の透水性試験方法」のうち、「定水位透水性試験」に基づき、実施した。試験方法を模式的に図 3.30 に示す。

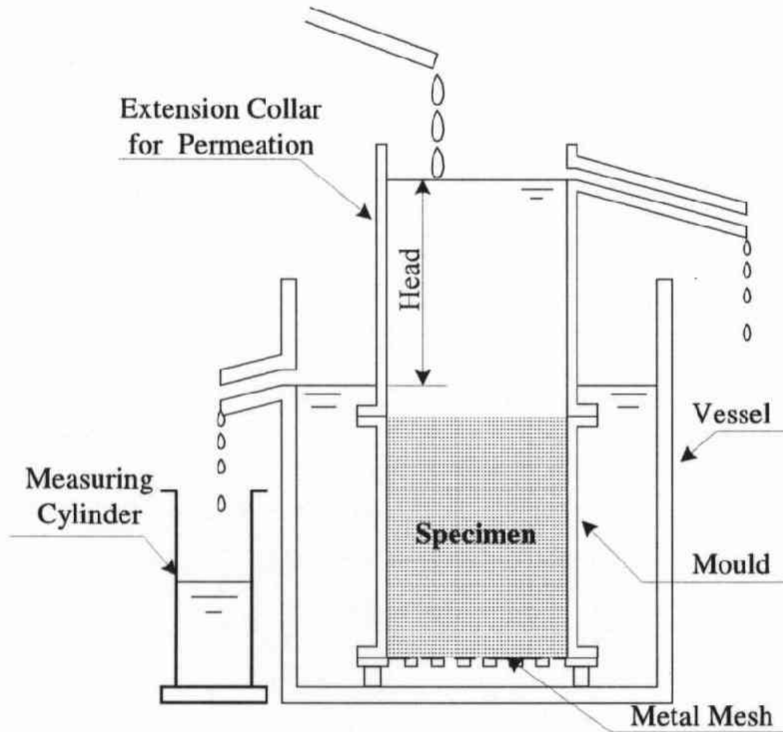


図 3.30 透水性試験のイメージ

試験装置は、モールド、延長カラー（締固め用と透水用）、越流水槽、メスシリンダ等から構成される。モールドは、内径 100 mm で供試体の体積は 991.2 cm^3 である。モールドの底部には多くの孔がある。供試体は、底部にのみ呼び径 $106 \mu\text{m}$ のメッシュを当てた。透水性の良い試料の実験における影響を避けるため、ポーラスストーン、濾紙等は使用しなかった。供試体を形成する際には、乾燥した試料を用いて、プロクター／ファガベリ法試験と同じランマーを用いて、一層当たりの落下回数 25 回、5 層で締固めを実施した。透水性計測は、乾燥状態の供試体に底部から水を浸透させて飽和状態にして実施した。試験手順は以下の通り。なお、固体比重

は事前に求めている。

- (1) 「Oリング」を使用してモールドを組み立て、モールド内部の底に金属メッシュ（メッシュ呼び径：106 μ m）を置く。
- (2) モールド（上部の延長カラーを除く）の空重量を測定する。
- (3) 締固め用延長カラーを取り付ける。
- (4) 乾燥試料を容器に入れ、プロクター／ファガベリ法試験に準じて締固めを行う。（5層、ランマー（質量350g、高さ0.2m）落下25回／層）
- (5) 締固め用延長カラーを取り外す。
- (6) ストレートエッジを使用し、モールドの上縁に沿って試料を切り取り、余分な試料を取り除く（乾燥供試体形成）。
- (7) 乾燥状態の供試体入りのモールドの重量を測定し、供試体の乾燥重量、嵩密度、間隙比を計算する。
- (8) 透水用延長カラーを「Oリング」を使用してモールド上部に設置する。
- (9) モールドを越流水槽に入れる。
- (10) 越流水槽に注水する。透水用延長カラーには注水しない。
- (11) 供試体の底部から水が浸透して、供試体上部に水が達するまで、静かに放置する。
- (12) 供試体に水を通すため、延長カラーに注水する。
- (13) 越流水槽からの流出が定常状態に達するまで待つ。
- (14) 越流水槽からの流出率を三回計測する。
- (15) 供試体の水分値を測定し、飽和度を計算する。

供試体からの排水が有意な場合、即ち、試料が粗い場合は、JISで規定されている通り、ステップ15は省略する。

供試体の寸法を表3.6に示す。

表 3.6 供試体の寸法

直径	高さ	断面積	体積
100.0 mm	126.2 mm	78.54 cm ²	991.2 cm ³

各試料の透水性に大きな差があることから、越流水槽の排水開始から透水性の測定開始までの時間、および測定開始から終了までの時間を、試料の透水性に応じて変更した。また、水頭も試料の透水性に応じて変更した。各試料に対する試験における排水開始から測定開始までの時間及び測定開始から終了までの時間（計測時

間) を表 3.7 に示す。

表 3.7 計測時間及び計測開始時間

試料	計測時間 [分]	排水開始から計測開始までの時間 [分]		
		第 1 回	第 2 回	第 3 回
Zinc Conc.	20	15	35	55
Copper Conc.	20	15	35	55
Iron Conc.	5	3	9	15
Galena	5	3	9	15
Nickel Slag	1	1	3	5

試験結果を表 3.8 に示す。

表 3.8 透水性試験結果

試料	Zinc Conc.	Copper Conc.	Iron Conc.	Galena	Nickel Slag	
固体比重	4.14	4.05	4.98	7.05	3.06	
試料乾燥重量 [kgf]	2.220	1.974	3.126	4.414	1.794	
見かけ単位体積重量 [kgf/m ³]	2.24×10 ³	1.99×10 ³	3.15×10 ³	4.45×10 ³	1.81×10 ³	
間隙比	0.85	1.03	0.58	0.58	0.69	
水頭 (水位) [mm]	172	172	172	172	13.8	
計測時間 [sec]	1200	1200	300	300	60	
越流水槽からの流出量 [cm ³]	No. 1	1.6	23.1	151	180	700
	No. 2	1.3	25.3	153	180	675
	No. 3	1.2	25.4	153	184	665
	平均	1.4	24.6	152.3	181.3	680.0
水温 [°C]	15.0	15.5	16.5	16.0	16.0	
透水係数 (試験水温) [cm/s]	1.1×10 ⁻⁵	1.9×10 ⁻⁴	4.7×10 ⁻³	5.6×10 ⁻³	1.3	
水温による補正係数	1.000	0.9875	0.9625	0.9750	0.9750	
透水係数 (15°C) [cm/s]	1.1×10 ⁻⁵	1.9×10 ⁻⁴	4.6×10 ⁻³	5.5×10 ⁻³	1.3	
水分値 [%]	15.1	18.4				
飽和度 [%]	87	88				

Iron Conc. と Galena の透水性は、Copper Conc. 及び Zinc Conc.、即ち典型的な液状化物質と比較して高いと言える。Nickel Slag の透水性は、試験した他の物質のその約 200~100,000 倍であった。

3.5.2.5 液状化物質判別試験

上述の各試料について、液状化物質判別試験を実施した。供試体の直径は 146 mm、高さは 101.5 mm であった。試験結果を表 3.9 に示す。

表 3.9 液状化物質判別試験結果

試料	排水重量 [gf]	排水後の 水分値 [%]	間隙比	飽和度 [%]	
				排水前	排水後
Zinc Conc.	5.7	16.8	0.851	98.8	98.0
Copper Conc.	4.7	16.9	0.854	97.4	96.8
Iron Conc.	11.1	10.2	0.584	98.6	96.8
Galena	2.1	7.1	0.563	96.7	96.4
Nickel Slag	359.6	8.7	0.673	97.2	43.1

表から明らかなように、供試体から有意な排水があったのは Nickel Slag のみであり、他の試料では、供試体からの有意な排水はなかった。この表中に示した排水前の飽和度から分かる通り、本試験手順により、粘土のように粒子の細かな物質については不明であるが、液状化物質か否かが問題となる程度の粗さの試料であれば、排水前の試料は殆ど飽和状態になると考えられる。

3.5.2.3 節の末尾で述べた通り、Galena は物質の性状からは液状化物質と判定すべきと考えられる。経験的には液状化物質と判定される物質の中で比較的粒子の粗い Iron Conc. と、経験的には液状化物質ではないと判定される物質の中で比較的粒子の細かい Galena は、透水性も同じオーダーである。一方、液状化物質判別試験の結果からは、どちらも排水後の飽和度は 95 % 以上であった。これに対して、液状化物質では無いと経験的に判断される Nickel Slag の排水後の飽和度は 43.1 % であり、他の物質と明確に異なっていた。これは、Nickel Slag は毛管上昇高が試験した他の物質のそれより小さいためと考えられる。

試験において、排水後の Nickel Slag は、供試体の上部と下部で明らかに水分値が違ふことが観察されたため、参考のため、供試体の上部約 6 割と、残りの部分（下部）を分けて水分値を計測した。その結果、供試体の上部では水分値が 3.3 %、下部では 16.7 % であった。平均の水分値は表 23 に示した通り 8.7 % であった。上部と下部で間隙比が同じと仮定すると、それぞれの飽和度は 15.0 % と 76.1 % となる。試料を取り分ける際の作業により供試体中の水分が下部に移動している恐れがあるため、平均の水分値や飽和度と比較して、上部及び下部の水分値及び飽和度は正確ではないが、この結果からも、Nickel Slag について言えば、明らかに試料の上部は飽和度が低く、下部は飽和度が高いことが分かる。

3.5.2.6 その他の液状化物質の液状化物質判別試験結果

過去に流動水分値が計測されている液状化物質について、液状化物質判別試験を

実施した。これらの試験では、締固めは6層、各層当たりのランマー落下回数50回で試験を実施した。結果を表3.10に示す。

表 3.10 液状化物質に関する液状化物質判別試験結果

試料	固体 比重	液状化物質判別試験			流動 水分値 [%]
		排水前 飽和度 [%]	排水後 水分値 [%]	排水後 飽和度 [%]	
バライト (重晶石) (Barite concentrate)	4.36	97	13.2	96	10.3
鉄精鉱 (カナダ) (Canadian iron concentrate)	4.74	100	10.5	97	8.2
鉄精鉱 (ノルウェー) (Norwegian iron concentrate)	5.06	100	7.0	99	5.2
鉄鉱粉 (Iron ore (fine))	3.75	100	14.4	97	11.1

表において流動水分値は別途計測されたものである。いずれの試料に関する試験でも、有意な排水はなく、排水後の供試体の飽和度は96%以上であった。

3.5.3 クライテリアに関する検討及び提案

液状化物質判別試験のクライテリアを検討するため、Nickel Slag を例として、液状化物質判別試験における毛管上昇高を推定してみる。

試料の固体比重は3.06であった。供試体の間隙比は一様と仮定する(間隙比:0.673)。また、排水後の供試体は毛管上昇高までは飽和状態とし、これより上は飽和度が15%と仮定する。平均の飽和度は43.1%であるから、飽和部分の占める割合は約33%となり、供試体の高さは101.5 mmであるから、毛管上昇高は約3.3 cmと計算される。図19より、Nickel Slagの有効径 D_{10} は0.13 cmである。毛管上昇高が有効径と間隙比に反比例する⁽²⁹⁾とすれば、比例定数は 0.29 cm^2 であり、この値は土の毛管上昇高の比例定数 $0.1 \sim 0.5 \text{ cm}^2$ の範囲にある(c.f. 3.5.1)。よって、土における有効径と毛管上昇高の関係を、本研究で用いた精鉱や鉱滓に当てはめることは、不適當とは言えない。もし、精鉱や鉱滓においても、 $0.1 \sim 0.5 \text{ cm}^2$ を比例定数として毛管上昇高が有効径及び間隙比に反比例するとすれば、Iron Conc.及びGalenaの有効径 D_{10} はそれぞれ0.008 cm、0.009 cmであることから、液状化物質判別試験における各供試体の毛管上昇高は、それぞれ、21~107 cm、20~99 cmの範囲と推定され、Iron Conc.やGalenaでは、液状化物質判別試験において、有意な排水がなかったことが理解できる。

排水後の飽和度は、供試体の寸法等の条件に依存する。よって、液状化物質判別試験により得られる排水後の飽和度を、流動水分値や運送許容水分値に相当する飽和度と直接比較することは意味がない。液状化物質の判定のためのクライテリアを検討するため、液状化物質判別試験における排水後の飽和度を、プロクター／ファガベリ法試験における最大の飽和度と比較したのが表 3.11 である。

表 3.11 液状化物質判別試験とプロクター／ファガベリ法試験時の飽和度の比較

試料	液状化物質判別試験 排水後飽和度 [%]	プロクター／ファガベリ法 試験時最大飽和度 [%]
Zinc Conc.	98.0	85.3
Copper Conc.	96.8	94.0
Iron Conc.	96.8	80.6
Galena	96.4	82.2
Nickel Slag	43.1	36.5

3.5.2.2 節で述べた通り、プロクター／ファガベリ法試験では、各試料の最大水分値での試験においては、締固めの間にモールドの円筒部と底部の隙間から水が出てきた。プロクター／ファガベリ法試験では、供試体は排水可能な条件下でランマーの落下により締固めが行われる。この方法で得られる供試体の最大の飽和度は、この実験結果ではいずれも液状化物質判別試験における排水後の飽和度より低かった。

実際の貯鉱場や船倉では、貨物は少なくとも 1 m 程度は積み上げられる。これに対して、液状化物質判別試験では供試体の高さが 10 cm であるため、即ち、貯鉱場や船倉内における貨物の積付高さと比較して液状化物質判別試験で問題となる毛管上昇高はオーダーが異なるため、液状化物質判別試験において供試体から有意な排水があれば毛管上昇高は 10 cm 以下であり、実際の貨物からは、大半の水は排水され、液状化は発生しないと考えられる。表 3.9 及び表 3.10 に示した液状化物質 (Nickel Slag 以外の試料) の試験結果からは、液状化物質であっても、排水前と排水後の飽和度が 3 %程度異なる異なることがあることが分かる。3.4.8 節で述べた通り、液状化物質判別試験の適用範囲は、排水前の飽和度が 95 %以上とした。よって、有意な排水があることを判定するためには、排水後の飽和度 92 % をクライテリアとすることが考えられる。この条件を一次的なクライテリアと考える。

一方、排水後の飽和度は供試体の間隙比によって変わるのに対して、液状化物質判別試験では、締固めは試料を乾燥状態にして行い、他の状態では行っていない。そのため、判定のためのクライテリアの設定は、実際の貨物の間隙比が、液状化物質判別試験時のそれより小さくなる可能性があることに留意して、安全余裕を見込

んで設定する必要がある。具体的には、液状化物質判別試験時の間隙比では試料から有意な排水があったとしても、実際の貨物では間隙比がより小さくなり、有意な排水が起こらない場合があり得ることを考慮して安全余裕を見込む必要がある。ここで、液状化物質判別試験における供試体の高さを実際の貨物の積付高さの違いを考慮すれば、安全余裕を見込む必要は無いとも考えられるが、こうした考え方が妥当であると言えるだけの実験結果は得られていないため、ここでは、安全余裕は不要との考え方は採用しない。よって、液状化物質の判別のクライテリアは、実際の貨物でも有意な排水が起こるであろうこと、即ち、毛管上昇高が 10 cm 程度となるであろうことを条件として設定する。

実際の貨物の間隙比の範囲についてはデータが無いため、各種試験時における間隙比の最小値を参照してクライテリアを検討する。液状化物質判別試験時の間隙比 (c.f. 表 3.9) と、プロクター/ファガベリ法試験 (c.f. 図 3.14~図 3.18)、貫入法の試験 (c.f. 表 3.3、表 3.4) 及び透水性試験 (c.f. 表 3.8) の際の間隙比の最小値との比較を表 3.12 に示す。

表 3.12 液状化物質判別試験時の間隙比とその他の試験時の間隙比の最小値の比較

試料	液状化物質判別試験における間隙比	その他の試験時における間隙比の最小値
Zinc Conc.	0.851	0.66 (c.f. 図 3.14)
Copper Conc.	0.854	0.69 (c.f. 図 3.14)
Iron Conc.	0.584	0.58 (c.f. 表 3.8)
Galena	0.563	0.58 (c.f. 表 3.8)
Nickel Slag	0.673	0.68 (c.f. 表 3.3)

表のうち Zinc Conc. のデータより、締固めの条件によっては、試料の間隙比は液状化物質判別試験時の 77 % (0.66/0.851) まで低下することがあると言える。よって、液状化物質判別試験のクライテリアは、間隙比が試験時の 77 % に低下した場合であっても、液状化物質を液状化物質と判定できるように設定すべきと考えられる。

間隙比が低下した場合であっても液状化物質を液状化物質と判定できるよう飽和度のクライテリアを設定するには、間隙比の変化に起因する毛管上昇高の変化が飽和度に及ぼす影響を安全側、即ち大きめに見積もる必要がある。そこで、排水後の供試体の飽和度の平均値と間隙比との関係について検討する。

簡単のため、供試体の間隙比は一樣で、下部、即ち毛管上昇高 h_c までは完全に飽和しており、上部は不飽和でその飽和度は一定と仮定すれば、毛管上昇高と飽和度の平均値との関係は、以下の式で表せる。

$$S_r^T = \frac{V_w^T}{V_v^T} = \frac{V_w^U + V_w^L}{V_v^T} = \frac{V_v^U \cdot S_r^U + V_v^L \cdot S_r^L}{V_v^T} \quad (3.14)$$

$$S_r^L = 1 \quad (3.15)$$

$$V_v^U = V_v^T \cdot \frac{H - h_c}{H} \quad (3.16)$$

$$V_v^L = V_v^T \cdot \frac{h_c}{H} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} S_r^T &= \frac{V_v^T \cdot S_r^U \cdot \frac{H - h_c}{H} + V_v^T \cdot \frac{h_c}{H}}{V_v^T} \\ &= S_r^U \cdot \frac{H - h_c}{H} + \frac{h_c}{H} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ここで、記号は以下の通り。

S_r : 飽和度 (S_r^T : 供試体の飽和度の平均値)

V_v : 空隙の体積

V_w : 水の体積

H : 供試体の高さ

h_c : 毛管上昇高 (供試体の飽和部分の高さ)

また、上付きの記号は以下の通り。

T : 供試体全体

U : 供試体上部 (不飽和部分)

L : 供試体下 (飽和部分)

(3.18)式を毛管上昇高 h_c で偏微分すれば、次の式が得られる。

$$\frac{\partial S_r^T}{\partial h_c} = \frac{1 - S_r^U}{H} \quad (3.19)$$

(3.19)式より、毛管上昇高が変化した際に飽和度が最も大きく変化するのは、供試体上部の不飽和部分の飽和度が零の場合であることが分かる。よって、毛管上昇高の変化が飽和度に及ぼす影響を安全側で考慮するには、不飽和部分の飽和度を零と仮定して、毛管上昇高と飽和度の関係を考慮すれば良いと言える。

(3.18)式より、不飽和部分の飽和度を零とした場合の毛管上昇高と飽和度との関係は次の通り。

$$S_r^T = \frac{h_c}{H} \quad (3.20)$$

間隙比と毛管上昇高の関係を (3.11) 式で表す。(3.11)式を再掲する。

$$h_c = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad (3.11)$$

(3.20)式、(3.11)式より、飽和度のクライテリアの設定のため考慮すべき間隙比を e' 、その時の毛管上昇高を h_c' 、飽和度を S_f' とすれば、以下の式が得られる。

$$h_c' = \frac{C}{e' \cdot D_{10}} = \frac{e}{e'} h_c \quad (3.21)$$

$$S_f' = \frac{h_c'}{H} = \frac{e}{e'} S_f \quad (3.22)$$

間隙比が低下して e' になった場合であっても、液状化物質を液状化物質と判定するためには、 S_f' を飽和度の一次的クライテリアとし、 S_f を飽和度のクライテリアとすれば良い。飽和度の一次的クライテリアは 92 % であり、 $e'=0.77e$ であることを考慮すれば、(3.22)式より、飽和度のクライテリアは 0.92 と 0.77 の積、即ち 71 % とするのが適当と考えられる。

次に、間隙比 e の違いによる透水性の違いについて検討する。3.3.3 節で述べた通り、透水性は $e^3/(1+e)$ に概ね比例すると考えられるため、間隙比が 77 % になれば透水性は約 1/4 になると考えられる。一方、貨物が貯蔵場に置かれる時間は日単位であるのに対して、液状化物質判別試験における排水時間は 30 分であること、即ち、問題となる排水の時間のオーダーが異なることから、間隙比の違いによる透水性の違いを考慮して液状化物質の判定のためのクライテリアの設定において安全余裕を見込む必要は無いと考えられる。以上を考慮して、液状化物質の判定のためのクライテリアとしては、排水後の供試体の飽和度 70 % を提案する。

3.5.4 液状化物質判別試験結果の適用範囲

液状化物質判別試験により、一つの固体ばら積み貨物が液状化物質では無いと判定されたとしても、その結果を適用できる範囲が明らかにならない限り、同種の物質であっても、運送の都度、試験を繰り返す必要が生じる恐れがある。そのため、液状化物質判別試験結果の適用範囲、即ち、一つの物質に関する試験結果で液状化物質では無いと判定して良い物質の範囲を明らかにする必要がある。

液状化物質判別試験の適用範囲（物質の同等性）を規定するためのパラメータとしては、以下のものが考えられる。

- (1) 製造工程及び原材料

(2) 固体比重

(3) 粒径分布

これらのパラメータの他にも、積付率、間隙比といったパラメータが考えられるが、製造過程（物質の成分、接触角に関係する。）、固体比重、粒径分布が同じであれば液状化物質判別試験の結果はほぼ同じになると考えられるため、積付率、間隙比といったパラメータは考慮しない。

スラグの製造・貯蔵工程については日本海事検定協会により調査⁽³²⁾が行われており、製錬の課程では製品の品質を安定させるため原材料も十分に調製されており、スラグであってもその成分は安定したものになることが報告されている。その結果、適用範囲については、「物質は同じ工場で、同じ生産工程により、表面活性剤を含めた同じ原材料から生産されたものであること。」との条件を設けることが適当であるとされている。よって、液状化物質判別試験結果の適用の条件を決定するには、試料の固体比重と粒径分布について検討すれば良いと言える。

固体比重及び粒径分布に基づく試験結果の適用の条件を検討するため、本研究においては、Nickel Slag（前述の試料とは別）と Copper Slag を、間隔をあけてそれぞれ 10 回サンプリングした送付していただき、これらの試料の固体比重を計測し、バラツキを調べた。また、これらの試料については、日本海事検定協会により粒径分布も計測され、有効径のバラツキが調べられた⁽³²⁾。固体比重の計測結果を、日本海事検定協会により調査された粒径分布と併せて、表 3.13 及び表 3.14 に示す。表に示した固体比重は 3 回の計測の平均値である。

表3.13 Nickle Slagの固体密度と有効径

試料番号	固体比重	有効径 D ₁₀
1	3.025	0.54
2	3.024	0.59
3	3.007	0.63
4	3.029	0.62
5	3.026	0.55
6	3.037	0.69
7	3.043	0.60
8	3.022	0.58
9	3.035	0.53
10	3.048	0.55
平均値	3.029	0.59
標準偏差	0.012	0.049
標準偏差／平均[%]	0.39	8.4

表3.14 Copper Slagの固体密度と有効径

試料番号	固体比重	有効径 D ₁₀
1	3.606	0.98
2	3.641	0.87
3	3.614	0.92
4	3.636	0.95
5	3.668	0.90
6	3.617	0.90
7	3.636	0.97
8	3.615	0.80
9	3.610	0.86
10	3.631	0.89
平均値	3.627	0.90
標準偏差	0.019	0.054
標準偏差／平均[%]	0.52	6.0

液状化物質判別試験を実施した試料と、同一の工場から同一の製造工程を経て得られた試料を考える。これらの試料の固体比重の差の分布は、固体比重が正規分布になると仮定とすれば、平均値が零で分散が二倍の正規分布になる。よって、試験した試料と同一工程による試料の固体比重の差が、固体比重の標準偏差の $\pm 1.96\sqrt{2}$ 倍以内になる確率は95%である。Nickel Slag、Copper Slagに関するこの値は、それぞれ平均値の約1.1%、1.4%である。よって、固体比重の違いとして、平均値の1.5%を許容すれば、同一の工場から同一の製造工程を経て得られた試料を別の試料と判断して再度試験を要求する確率は低い。

一方、有効径はバラツキが大きい。有効径が違えば、毛管上昇高や透水性が違ってくるため、安全を考慮して、液状化物質判別試験を実施した試料より有効径の小さい試料については、改めて試験を実施する必要があると考える。

以上により、液状化物質判別試験結果の適用の条件としては、以下を提案する。

- (1) 物質は同じ工場で、同じ生産工程により、表面活性剤を含めた同じ原材料から生産されたものであること。
- (2) 固体比重の差が、試験した試料の固体比重の平均値の $\pm 1.5\%$ 以内であること。
- (3) 有効径が、試験した試料の有効径以上であること。

これら全ての条件を満たす物質については、当該貨物について改めて液状化物質判別試験を実施することなしに、既に実施した液状化物質判別試験の結果を適用して良いと考える。

3.6 粒径分布に基づく液状化物質の判定

3.6.1 粒径分布に基づく判定の位置付け及び考え方

前述の通り、貨物が細かな粒子を含まなければ、通常の航海では、その貨物は航海中に液状化するだけの水分を含み得ないと考えられるため、粒径分布は、貨物の液状化の大まかな判定基準と成り得る。実際、直径 1 cm 以下の粒子を含まない物質であれば、経験的に液状化物質ではないと判断される。よって、粒径分布に基づく液状化物質の判定基準を設定することは、貨物によっては簡単に液状化の危険性が無いとの判定を可能にすることであり、規則の運用上、または、運送実務上有意義である。ここでは、液状化物質判別試験を実施せずに「液状化物質ではない」との判断を行うための粒径分布のクライテリアを設定する。この方法は、大まかな判定により貨物が液状化では無いと判定する方法であるため、判定のためのクライテリアは安全側に設定する必要がある。

粒径分布の代表値としては、有効径 D_{10} が適当である。但し、大きな粒子を含む物質の場合、試料の最大粒径により有効径が変わるため、有効径を求める際の試料の最大粒径を併せて規定する。

3.6.2 物質の種類と液状化物質の判定

運送許容水分値の決定法は、従来は IMO-フローテブル法だけであったが、この試験法は石炭には適用できず、新たに貫入法が開発された。また、プロクター/ファガベリ法は「粗い精鉱」に適用する試験法である。

石炭は、生物を起源とする物質で、鉱石等と比較して固体比重も小さい。液状化物質の可能性がある固体ばら積み貨物 (c.f. 表 2.2) の中でも、特殊な物質である。よって、粒径分布に基づいて液状化物質か否かを判定する際にも、別途検討する必要がある。以下では、鉱滓に代表される石炭以外の物質と、石炭を分けて、それぞれについて粒径分布に基づく液状化物質の判定法について検討する。

石炭以外の物質については、貫入法試験で流動水分値を計測する場合には小型容器を用いる。この際の試料の最大粒径は 10 mm である。このことを考慮して、また、篩の規格を考慮して、試料の最大粒径は 9.5 mm とした。また、石炭については、貫入法試験で流動水分値を計測する場合には大型容器を用いる。この際の試料の最大粒径は 25 mm である。このことを考慮して、また、篩の規格を考慮して、試料の最大粒径は 19 mm とした。

3.6.3 石炭以外の物質に対する有効径のクライテリア

3.6.3.1 有効径のクライテリア設定用実験の概要

2.4.4 節で述べた通り、液状化物質の判定において特に問題となるのは鉱滓である。また、典型的な液状化物質である Zinc Conc.や Copper Conc.は、粒径が細かく、粒径調製を行っても、液状化が発生しない粒径分布を得るのは困難である。そのため、代表的な試料として Nickel Slag と Copper Slag を用い、粒径を調製して有効径を変更しつつ液状化物質判別試験を実施することにより、有効径と液状化の関係を調べ、液状化物質判別試験を行うことなしに液状化物質でないことを判定するための有効径のクライテリアについて検討した。なお、以下で述べる液状化物質判別試験では、締固めは6層、各層50回のランマーの落下によっている。

3.6.3.2 試料及び粒径調製

試料は、最大粒径の調製を除き到着時のまま手を加えていないもの（原試料）と、細かな粒子の量を調節することにより有効径を変えたものを用いた。Nickel Slag 及び Copper Slag の固体比重はそれぞれ 3.05 及び 3.69 であった。実験に用いた試料の粒径分布を図 3.31 及び図 3.32 に示す。

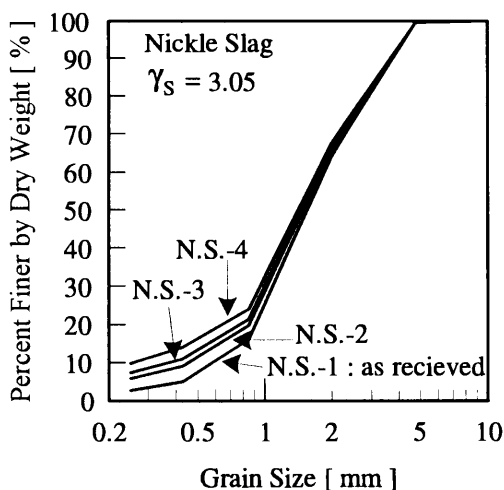


図 3.31 Nickel Slag の粒径調製

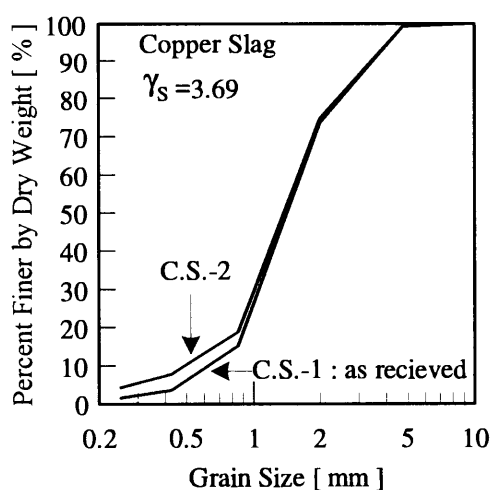


図 3.32 Copper Slag の粒径調製

図において、N.S.-1 及び C.S.-1 は最大粒径以外は調製していない試料、N.S.-2～N.S.-4 及び C.S.-2 は粒径を調製した試料である。

3.6.3.3 試験結果及びクライテリアの提案

各試料の有効径 D_{10} 及び液状化物質判別試験の結果を表 3.15 に示す。

表 3.15 試料の有効径及び液状化物質判別試験結果

試料	有効径 D_{10} [cm]	飽和度 [%]		液状化物質の判定
		排水前	排水後	
N.S.-1	0.058	97	64	液状化物質では無い
N.S.-2	0.045	97	69	液状化物質では無い
N.S.-3	0.037	98	76	液状化物質
N.S.-4	0.025	98	83	液状化物質
C.S.-1	0.062	97	65	液状化物質では無い
C.S.-2	0.049	97	70	液状化物質

この試験結果からは、液状化物質判別試験における排水後の飽和度 70 %に対応する有効径は約 0.05 cm と言える。3.6.1 節で述べた通り、有効径に基づく液状化物質の判定のクライテリアは十分な安全余裕を見込む必要があるため、有効径 0.1 cm を、鉍滓等の石炭以外の物質に対する液状化物質か否かのクライテリアとして提案する。なお、有効径に基づくクライテリアとしては、例えば道路橋示方書（1996 版）では、液状化判定対象土層の条件の一つとして、平均粒径 D_{50} が 10 mm 以下で、かつ、10 %粒径 D_{10} が 1 mm 以下であること挙げている（地盤工学ハンドブック⁽³⁰⁾P 1309 第 5 編 2.3.5 節表-5.2.9 参照）。つまり、この条件に当てはまらない土層は、液状化の判定対象としない、即ち、液状化しない土層であると判断して良いとしている。

3.6.4 石炭に対する有効径のクライテリア

3.6.4.1 有効径のクライテリア設定用実験の概要

石炭は無機の鉍物とは異なり、固体比重も小さく（1.3～1.4 程度）、飽和状態においては水による浮力が粒子間の直応力に及ぼす影響も無機の鉍物とは異なる。そのため、液状化物質判別試験を適用できるか否かについては、さらに研究を要する。一方、貫入法試験は元々石炭の流動水分値の計測法として開発されたものであり、石炭の液状化現象の有無を判定するのに特に有効である。そのため、石炭については、液状化物質である石炭（微粉炭）を用いて、粒径調製により各種の粒径分布の石炭を用意し、試料の水分値を所定の排水状態における最も高い値に調製して貫入法試験を実施することにより、有効径と液状化の関係を調べた。手順は以下の通り。

- (1) 試料の粒径を調製する。
- (2) 浅い水密の容器に試料を入れ、十分な量の水を加え、一様になるまで攪拌する。
- (3) 試料を容器の片側に集め、試料のある側を僅かに持ち上げて、容器を傾

け、試料から排出された水を除去する。

- (4) 貫入法試験に準拠して、試料を容器に所定の締固めにより充填し、加振時のビット貫入量を計測する。

(3)の手順で、ある程度高い水分値の試料が得られる。このとき、石炭は締固めされていないが、石炭は高く積み上げられてはいない点に留意されたい。実際に船舶に積付けられる石炭の水分値が、この方法により得られた水分値より高くなる可能性は厳密には論じられないが、非常に低いと考えられる。

個々の試料に対する液状化の試験は、貫入法試験に準拠し、且つ、試料の飽和度を求めるため、供試体の体積を計測した。容器は大型のもの（内径 194 mm。c.f. A.4.7.5 表 A.7）で、供試体の体積は約 4,700 cm³である。締固めは、いわゆる静的タンピングで、精鉱等の場合と同様に 4 層に分けて行った。タンピングの際の圧力は、石炭については 40 kPa と規定されており、40 kPa 用のタンパーを用いた。

3.6.4.2 試料及び粒径分布

二種類の石炭を用いた。それぞれの石炭を A、B と呼ぶ。まず、最大粒径を調製した上で、細かな粒子の量を調節し、各種の粒径分布の試料を得た。石炭 A については、最大粒径のみを調製した試料を実験に用いたが、石炭 B については、粒径調製を行ったもののみを実験に用いた。各試料及び石炭 B の最大粒径のみを調製した試料（原試料）の粒径分布を図 3.33 及び図 3.34 に示す。

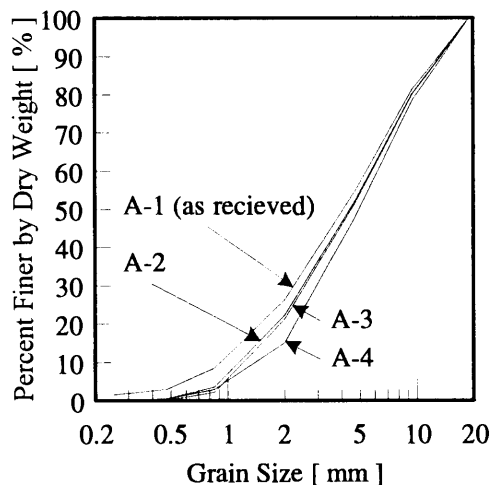


図 3.33 石炭 A 試料の粒径分布

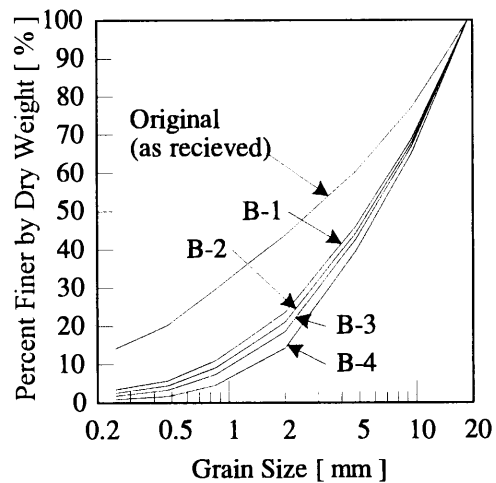


図 3.34 石炭 B 試料の粒径分布

3.6.4.3 試験結果及びクライテリアの提案

各試料の有効径、試験時の水分値、加振時のビット貫入量及び液状化の判定結果を表 3.16 に示す。

表 3.16 石炭試料の有効径、試験時の水分値、ビット貫入量及び液状化判定

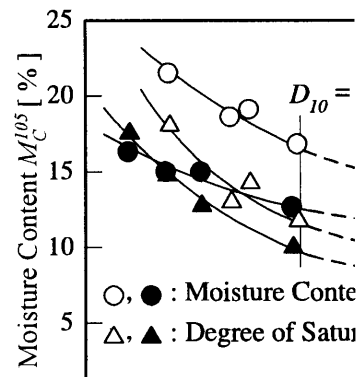
試料	有効径 D_{10} [mm]	試験時の 水分値 [%]	試験時の 飽和度 [%]	ビット貫入量 [mm]	液状化の発生
A-1	0.91	21.6	73	96	有り
A-2	1.14	18.7	53	60	有り
A-3	1.21	19.2	58	57	有り
A-4	1.39	16.9	48	38	無し
B-1	0.76	16.4	71	66	有り
B-2	0.90	15.1	60	59	有り
B-3	1.03	15.1	52	57	有り
B-4	1.37	12.8	41	24	無し

試験結果からは、有効径 D_{10} が 0.14 cm 以上であれば、液状化が発生しないと考えられる。有効径が大きい場合に石炭の液状化が発生しない原因としては、試料からの排水により水分値（飽和度）が上がらないことと、透水性が高いため試料内で水分の移動が起こっても間隙圧が上がらないことの二つが考えられ、この実験結果からは、液状化が発生しない原因としてどちらが支配的かは判断できない。一方、人為的に飽和度を高めた状態で試料に繰り返し加速度を与える実験結果（c.f. 3.3.1）からは、有効径が 0.14 cm 以上でも、人為的により水分値が高い状態を作り出して試験すれば、液状化が発生する可能性がある。そのため、石炭が液状化物質か否かを判定するためのクライテリアも、「貨物が液状化が危険となる水分値に達しないこと」を基礎として考える必要がある。よって、このクライテリアを決定するには、石炭の有効径と貨物として船舶に積付けられる際の最大の水分値について検討する必要がある。

前述の通り、この実験における試料の水分値は、試料を過剰な水分を含む状態にした後、試料を入れた浅い容器を傾斜させた際に排水された水を除去することにより、調製したものである。この方法では、水分調製の際には締固めを行っておらず、実際に岸壁等に積上げられている状態よりも間隙比が大きい状態で水分を調製したことになる。即ち、間隙比の観点からは、透水性が高く、毛管上昇高が低い状態で水分調製を行ったことになる。一方、水分調製の際の試料の高さはたかだか数 cm であり、試料の高さの観点からは、水分が高くなりやすい状態で水分調製を実施したと言える。実際に石炭が岸壁に積上げられた状態を想定すれば、試験における水分

調製時の試料との間隙比の違いは大きくても 2~3 倍程度と考えられ、これは、毛管上昇高では同じく 2~3 倍、透水性では概ね一桁程度違う可能性があることを意味する。一方、試験における水分調製時の試料の高さは、実際に積上げられる貨物の高さとは二桁程度異なると考えられる。よって、最大粒径を 19 mm とした際に有効径 0.14 cm 程度である石炭が実際に船積みされるとすれば、ここで試験したような 13~17 % といった水分値より低くなると考えられる。即ち、有効径 0.14 cm は、石炭が液状化物質であるか否かを判定するための一次的クライテリアとなり得る。

前述の通り、有効径に基づく液状化物質の判定のクライテリアは、安全余裕を見込んで設定する必要がある。そのため、石炭が液状化物質か否かの判定のためのクライテリアとしては、有効径 0.2 cm を提案する。図 3.35 は、表 3.16 に示した有効径と試験時の水分値及び飽和度の関係を示したものである。図より、ここで提案した有効径のクライテリア 0.2 cm は、有効径の一次的クライテリア 0.14 cm と比較



して、最大水分値にして 1~2.5 %、最大飽和度にして 5 % 程度の安全余裕を見込んだものと言える。

3.7 液状化物質の判別方法のまとめ

3.7.1 石炭以外の物質に関する液状化物質の判別方法

以上をまとめると、IMO-フローテブル法や貫入法により、通常の手順により流動水分値が計測できる物質は液状化物質であると考えられる。もし、ある物質が液状化物質か否か不明な場合、石炭以外の物質については、図 3.36 の流れに沿って液状化物質か否かを判定すれば良い。

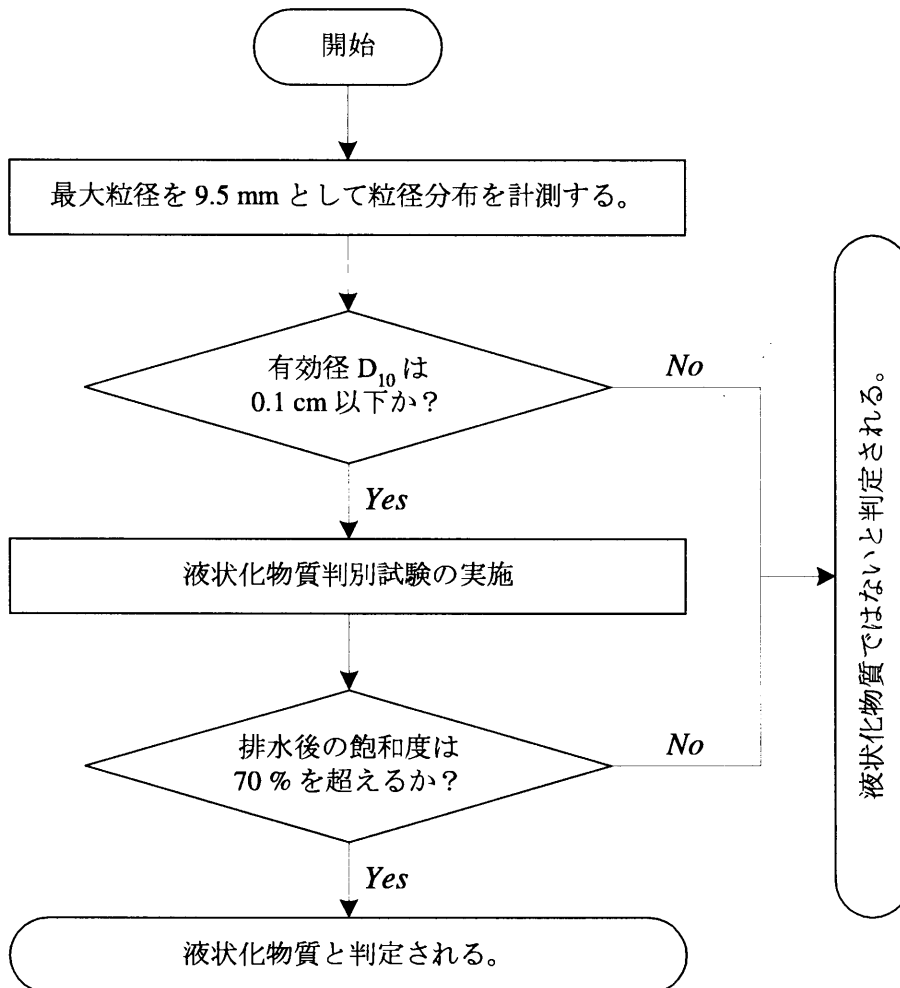


図 3.36 石炭以外の物質に関する液状化物質の判定の流れ

液状化物質判別試験による判定、ひいては、液状化物質判別試験の結果に基づき設定された有効径のクライテリアによる判定は、判定しようとする物質が、液状化の恐れのある水分値に達するか否かに基づいている。そのため、積付の時点では液状化が発生する恐れがなくても、航海中に貨物内部で水分の移動があり、貨物の一部の水分値が液状化の恐れのある範囲に達した場合は、液状化する恐れが残る。

よって、液状化物質では無いと判定された物質であっても、船倉のビルジ溜を清浄に保ち、貨物による目詰まりでビルジが引けないといったことがないように措置し、且つ、航海中は適宜船倉内のビルジを排出する必要がある。

3.7.2 石炭に関する液状化物質の判別方法

石炭については、液状化物質判別試験の適用の妥当性が検証されていない。よって、液状化物質か否かは粒径分布に基づき、安全側で判定せざるを得ない。判定の流れを図 3.37 に示す。

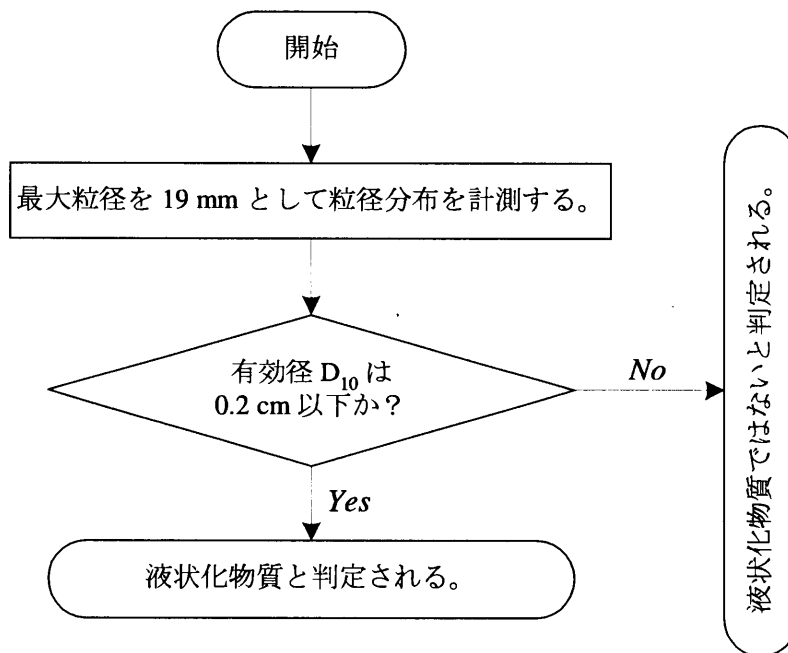


図 3.37 石炭に関する液状化物質の判定の流れ

石炭についても、液状化物質か否かの判定は、積付時に液状化の恐れ的水分値になるか否かに基づいているため、液状化物質でないと判断された場合であっても、船倉からのビルジの排出を適切に行う必要がある。

3.7.3 液状化物質判別試験が適用できる物質

液状化物質判別試験について、既に試験された物質がある場合の適用範囲については、3.5.4 節で述べた。一方、石炭の固体比重は約 1.3~1.4 であり、本研究で用いた鉍滓等の物質とは大きく異なる。よって、石炭に液状化物質判別試験を適用することは、妥当とは言い切れない。現時点では結論できないが、石炭のような生物起源の物質または木材チップ（液状化物質ではない）のような植物については、液状

化物質判別試験を適用することは妥当ではないと考えられる。これらの物質は、固体比重が 1 に近く、間隙に水があると固体の粒子は浮力の影響も強く受けるため、固体比重が 3 程度、またはそれ以上である鉍滓や精鉍とは、異なる性質を有するためである。液状化物質判別試験の適用対象物質を敢えて提案するのであれば、固体比重が 2 以上が適当と考えられる。

3.8 液状化物質の安全運送

液状化物質をばら積み船で安全に運送するには、液状化物質運搬船（現在日本にはない）を用いる場合を除き、貨物の運送許容水分値を求め、船積み水分値が運送許容水分値を超えないようにする必要がある。また、ある物質が液状化物質か否かを判定する方法については、BC Code にも特殊貨物船舶運送規則にも規定はないが、本研究により、一つの方法を提案した。

液状化物質の中でも、硫化金属精鉱（Metal Sulphide Concentrates。多くの銅精鉱、亜鉛精鉱、鉛精鉱は、硫化金属精鉱）や石炭、焼成硫化鉱（Calcined Pyrites）、石炭スラリー（Coal Slurry）、コークブリーズ（Coke Breeze）及びピートモス（Peat Moss）は化学的危険性を有しており、液状化の危険性に留意するとともに、化学的危険性にも配慮する必要がある。

近年 IMO に報告された事故の中で、液状化物質に関係すると考えられるものには、銅精鉱（copper ore-concentrate）を運送中の転覆事故（1998 年 7 月 13 日）⁽⁴³⁾及びチタン鉄鉱（Ilmenite sand）を運送中の荷の移動（7 航海中 2 航海）^{(44), (45)}がある。前者の事故は、貨物に関する情報提供が不十分なことに起因しており、事故により 4 名の命が失われた（6 名救助）。事故の報告では、船長への貨物資料の提供の要件をより厳しく実施することを求めている。また、後者の事故は、チタン鉄鉱の液状化による事故と報告されているが、貨物は"Ilmenite sand"または"Ilmenite clay"と呼ばれており、水分値は 25～32 %であったと併せて報告されていることから、砂状の物質の液状化ではなく、粘土状の物質の静的剪断強度の不足に起因する荷崩れの可能性も考えられる。なお、"Ilmenite sand"は、現行 BC Code では、液状化の危険性も化学的危険性もない物質のリストに記載されており、液状化物質のリストには"Ilmenite"が含まれている。しかし、調査の結果"Ilmenite"は一般に"Ilmenite sand"と呼ばれていることが分かり、改正 BC Code では、名称が整理される。

液状化物質の運送による事故の防止のためには、貨物の性状に関する正しい情報の提供が特に重要であり、本研究で開発した液状化物質の判定法は、貨物情報を把握するための現状の技術の問題点を解決するものである。