

## ばら積み貨物の流動水分値の測定法の開発

浦 環\*・田中 正人\*\*

Development of a Test Method  
to Determine Flow Moisture Point of Bulk Cargo

Tamaki URA and Masato TANAKA

### Abstract

“Penetration Method” has been developed for the determination of the Flow Moisture Point of coal, which cannot be measured by the IMO Flow Table Test. On the basis of this method, new apparatus and criterion to judge the occurrence of liquefaction are introduced to establish a new method which can be applicable to mineral concentrates and similar materials. Test results show good agreements with those by the IMO Flow Table Method. It is concluded that the new method can be widely applicable with reasonable reliability.

A test procedure which includes the new version of the Penetration Method is proposed to IMO for amending Appendix D of the BC Code.

### 1. ま え が き

石炭の流動水分値を計測するための新しい方法として、筆者らは、「貫入法」を開発し<sup>(1)(2)(3)</sup>、これを国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) に提案してきた。本方法が合理的であり、精度や再現性が悪いことでこれまで問題視されていたフローテーブル法に置き換えることが可能であることが明らかになったので、微粉精鉱及び類似物質の流動水分値を計測する方法に貫入法を拡張した。本論文では、その基礎となる実験の結果並びに IMO に提案した BC CODE (Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes) 附属書D項の改正提案内容<sup>(4)</sup>について論じる。

### 2. 貫 入 法

船舶運送されるばら積み貨物の多くは、含水量によって土質工学の細粒土と同様のコンシステンシーを呈する。ばら積み貨物の船倉内での液状化は液性限界を越えた水分を含むときに起こり、安全運送上、荷崩れ及び化学的危険性と並び大きな課題の一つである。ばら積み貨物の液性限界を決める一つの方法としてIMOのBC CODEにフローテーブル法が定められている。しかしながら、この方法は、再現性が悪い、石炭などに使えない、液状化の判定が困難等の問題がある。

貫入法は、ばら積み貨物が外部からの刺激により流動化すると、剪断抵抗力を失い表面に置かれたその貨物より比重の大きい物体を支持できなくなるので貨物の中に貫入することを応用した方法である。図1は、石炭用に開発した装置の概念図である。中央にロッドを設けた貫入ビットと石炭の沈降量を捉える表面検出板とを同軸にし、その差により貫入量が分るようにした装置である。ビットの形状、ビットにかかる圧力等を適切に設定することにより(1)石炭に適用できる、(2)再現性が良い等の特徴がある。

その後の研究により本方法が石炭以外の微粉精鉱などにも適用出来ることが明らかになり、フローテーブル法

\* 正会員 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

\*\* 正会員 船舶機装品研究所 (〒189 東京都東村山市富士見町1-5-12)

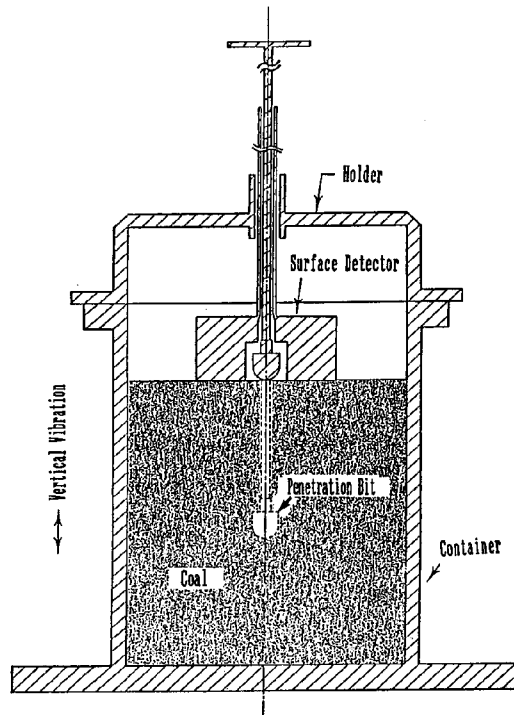


図1 貫入法試験装置の概念図

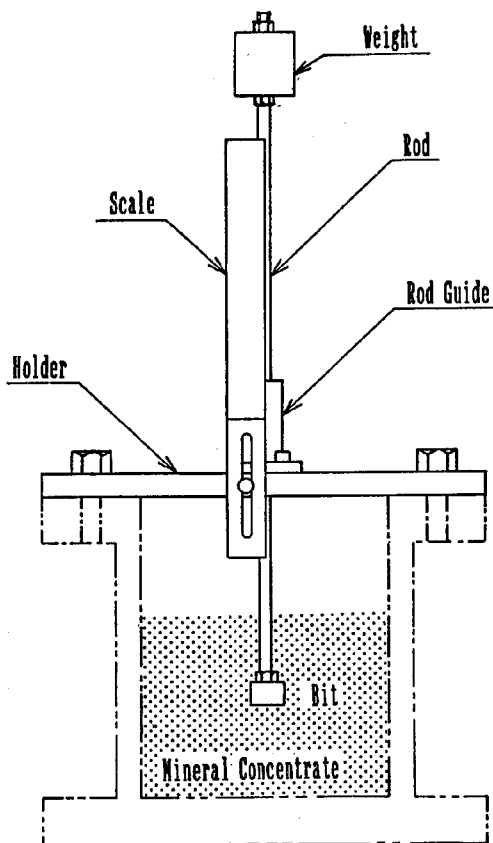


図2 微粉精鉱用液状化検出器

に置き代える方法として実用化が出来たので IMO に本方法を提案した。図2に装置の外観を示す。

### 3. 石炭と微粉精鉱との違い

工業用ばら積み貨物は、大きく分けて石炭、微粉精鉱及び類似物質がある。掘出された石炭は破碎され、石、カロリーの低い物質等が取除かれ一定の粒度分布に調整される。微粉精鉱は、浮遊選鉱される工程で微細粒状となる。類似物質は、浮遊選鉱工程以外で産出される物質で、概ね、土としての性質は、微粉精鉱と類似している。

貫入法は、土の液性限界を剪断抵抗力の低下を利用して見出す方法であり、土の骨格を形成する土粒子の基本的性質、すなわち、粒度、比重、コンシステンシー限界に大きく関係する。図3は、石炭(三井三池炭)と微粉精鉱の粒度分布を示す。三井三池炭は、粒径による土粒子の区分の2.0 mm以上すなわち、礫を半数以上含んでいる。一方、微粉精鉱は、2.0 mm 以下が大半で、分類上、粗砂からコロイドまでを含み、粒度分布に大きな違いがある。図4は、湿潤比重量と含水量との関係を示す。石炭の比重量は、 $1 \text{ g/cm}^3$  前後で世界的にも大差はない。一方、微粉精鉱の比重量は、石炭の2倍から4倍となっており土としての性質に違いがある。微粉精鉱用検出器は、これら微粉精鉱の性質を考慮し、開発研究に着手した。

### 4. 微粉精鉱用流動化検出器の開発

石炭用検出器のビットの形状は、先端が半球形である。石炭にはビットの半径に比べて大きい半径の粒が含まれている可能性があり、ビットがそれに当たった時それを避けて貫入するようにする為である。一方、微粉精鉱は、粒径が小さく分布の範囲が狭いので粒子を避ける必要はなく、円盤を採用した。図5にそれぞれのビットの形状を示す。

微粉精鉱用ビット開発に必要な検討項目は、(1)ビットの直径、(2)ビットに与える圧力、(3)石炭の試験方法に適用した加振加速度2 Gの適性、(4)貫入動作の再現性を良くするための圧密圧力、(5)液状化を判定する貫入量、の5項目である。

検討項目(1)、(2)について次のように実験を進めた。図2に示す容器を試験の実行性を考慮し、内径100mm、深さ150mmとし、試料に前記、IMOのBC CODEに定められているフローテーブル法による流動水分値(FMP: Flow Moisture Point)が12.1%の亜鉛精鉱を選び、このFMPより低い値(10.0%)と高い値(13.7%)の2種類の水分値の試料を用意する。試料の堆積量は、100mmとする。円盤ビットの直径5mm、10mm、15mm、20mmとし、加速度2 Gで加振し、それぞれの試料について貫入量とビットの圧力

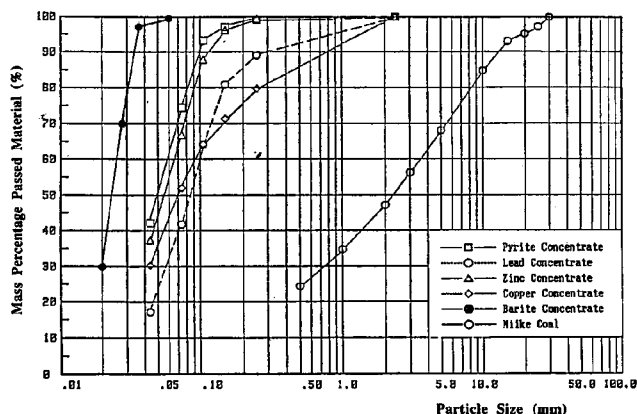


図3 微粉精鉱と石炭の粒度分布

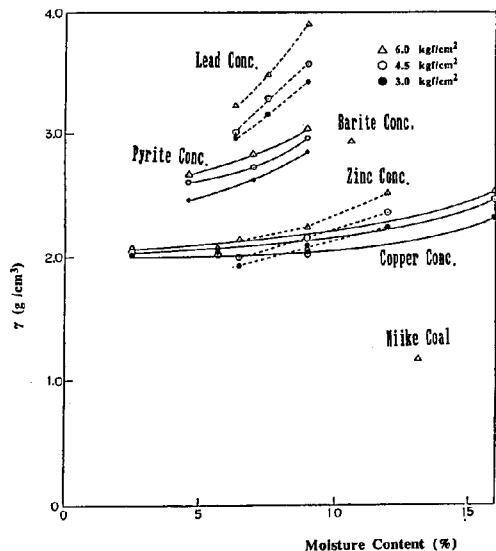


図4 微粉精鉱と石炭の湿潤比重量と含水量との関係

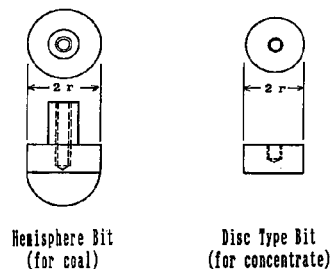


図5 半球形ビットと円盤ビット

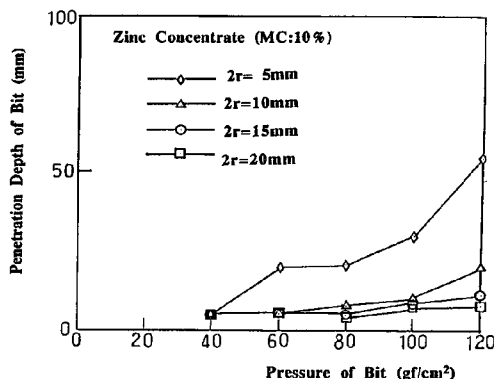


図6 FMP以下で6分加振後の貫入量とビット圧力の関係

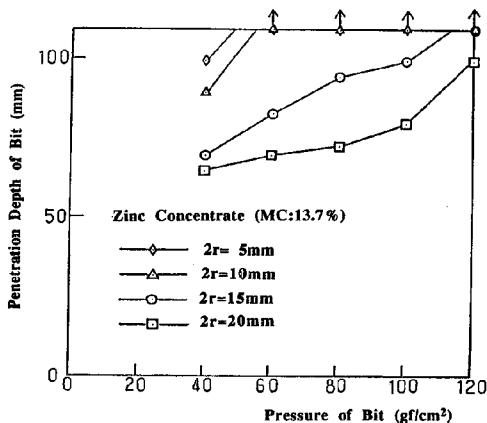


図7 FMP以上で1分加振後の貫入量とビット圧力の関係

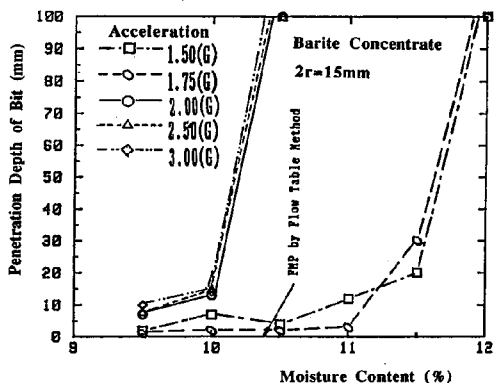


図8 加速度による直径15mmビットの貫入量と水分値の関係

との関係を求めた。図6は、10.0%の試料の実験結果である。FMP以下では貫入しないことが必要条件となる。直径5mmビットでは、60 gf/cm<sup>2</sup>以上のビット圧力で、直径10mmビットでは、100 gf/cm<sup>2</sup>以上で顕著な貫入量が認められ、15mm、20mmビットが選定できる。図7は、13.7%に調整した試料の実験結果である。FMP以上では迅速な貫入をすることが必要で、選定したビットの内、15mmビットは、100gf/cm<sup>2</sup>以上の圧力で必要な条件を満足している。

上記実験よりビットを直径15mm, 圧力100 gf/cm<sup>2</sup> と定め, 加振加速度 2 G の検証を行なった。試料は, 重晶石精鉱とした。図 8 は, 加振加速度をパラメタに 6 分加振後の貫入量と水分値の関係である。フローテーブル法による FMP と対比したとき, 2 G 以上が必要と判断できる。

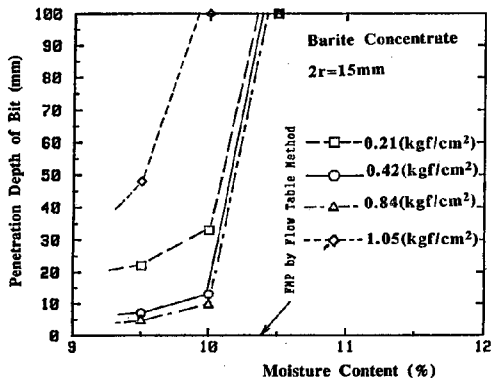


図 9 圧密圧力による直径15mmビットの貫入量と水分値の関係  
類について貫入特性の実験を実施した。

本試験法では, 容器への試料の堆積の方法が貫入動作の再現性に影響する。図 9 は, 同じ試料について, 加振加速度 2 G により, 堆積圧力をパラメタに貫入量と水分値との関係における再現性を調べた結果の一例である。1.05 kgf/cm<sup>2</sup> では, 圧密により流動化を起こした。0.21 kgf/cm<sup>2</sup> では大きな空隙を造り易く不適切な圧密圧力であり, 再現性がない。0.42 kgf/cm<sup>2</sup> と 0.84 kgf/cm<sup>2</sup> では, 再現性が良く, フローテーブル法による FMP と近似した結果が得られることが認められた。

図10は, 銅精鉱の水分値をパラメタにした貫入量と時間との関係である。流動化による急激な貫入動作は, ある水分値から僅かな増加により発生することを示している。同特性を 6 分加振後の貫入量と水分値の関係にし, 図11に示す。試料の流動化をこの装置が的確に捉えていることがわかる。他の 4 種類の試料についても同様の実験を行ない, 鉛精鉱について図12, 図13, 硫化鉄精鉱について図14, 図15, 亜鉛精鉱について図16, 図17, に示

液状化を判定する基準貫入量は, 求めた条件を用いて数多くの試料についての試験結果から定めた。微粉精鉱 4 種類, 類似物質 1 種

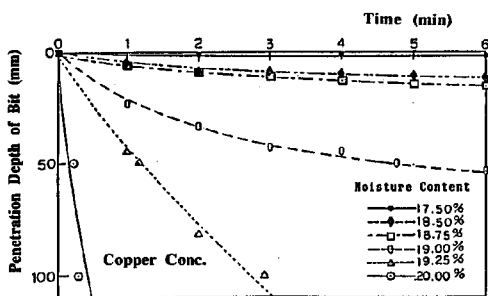


図10 微粉精鉱用液状化検出器の貫入量と時間の関係

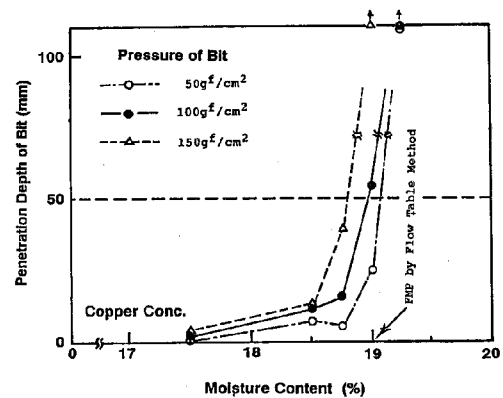


図11 微粉精鉱用液状化検出器の 6 分加振後の貫入量と水分値

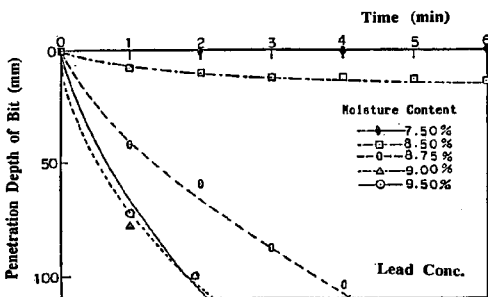


図12 微粉精鉱用液状化検出器の貫入量と時間の関係

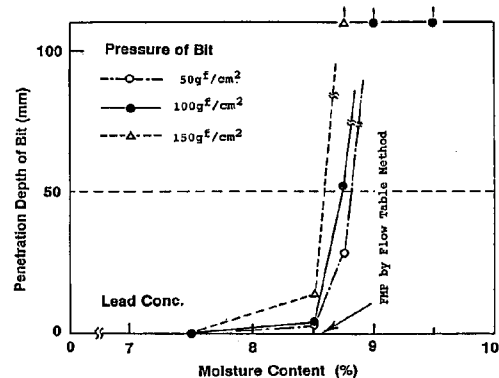


図13 微粉精鉱用液状化検出器の 6 分加振後の貫入量と水分値

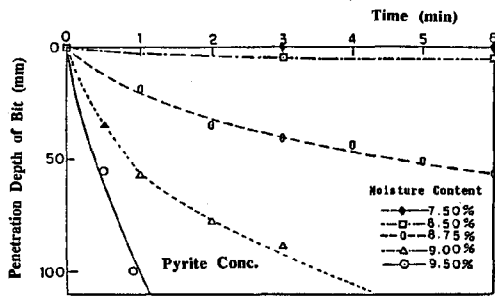


図14 微粉精鉱用液状化検出器の貫入量と時間の関係

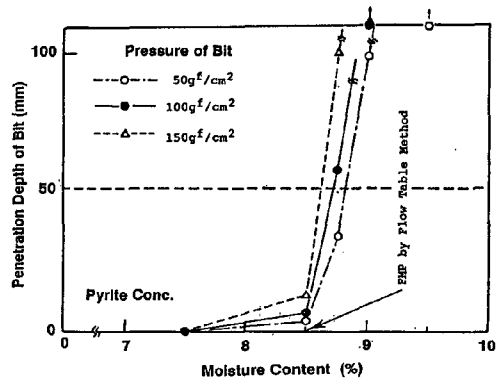


図15 微粉精鉱用液状化検出器の6分加振後の貫入量と水分値

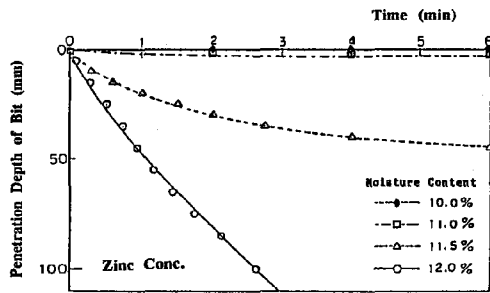


図16 微粉精鉱用液状化検出器の貫入量と時間の関係

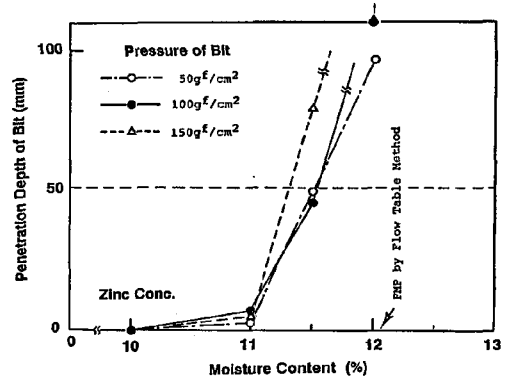


図17 微粉精鉱用液状化検出器の6分加振後の貫入量と水分値

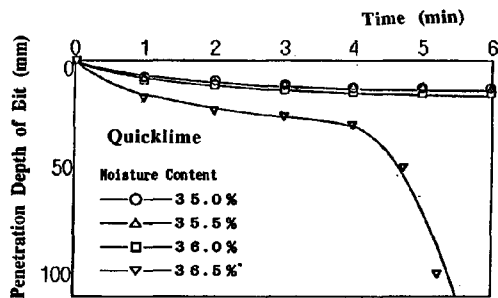


図18 微粉精鉱用液状化検出器の貫入量と時間の関係

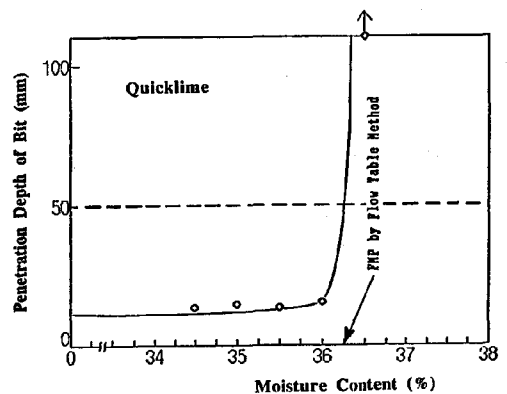


図19 微粉精鉱用液状化検出器の6分加振後の貫入量と水分値

す。これらの特性は、50mmの貫入量が流動化を判断するに適当な量であることを示しており、この値を流動化を判定する基準値とした。

本試験方法は、フローテーブル法が適用できないような類似物質に対しても適用可能であることを示す。図18、図19は、生石灰についての実験結果であり、微粉精鉱と同じ条件により FMP は36.25%と得られた。これより、貫入法が、これまで計測法がなかった粘着性の高い物質などにも応用できることが示された。

求めた微粉精鉱用流動化検出器の諸元等をまとめて表1に示す。

本装置による FMP をフローテーブル法と比較して表2に示す。定量的且つ合理的に流動水分値を測定できる事が示された。なお、両試験を並行して実施しているため水分値の調整が統一されている。

表1 微粉精鉱用流動化検出器の諸元

項目	諸元
直径	15 mm
ビット圧力	100 gf/cm <sup>2</sup>
加振加速度	2 G
加振時間	6 min
圧密圧力	0.42 kgf/cm <sup>2</sup>
流動化判定基準	50 mm
堆積容器の直径	100 mm
堆積容器の深さ	150 mm
試料の量	800 cm <sup>3</sup>

表2 貫入法とフローテーブル法によるFMPの比較 (%)

試料	貫入法	フローテーブル法
銅精鉱	19.0	19.0
鉛精鉱	8.7	8.6
硫化鉄精鉱	8.8	8.6
亜鉛精鉱	11.4	12.1

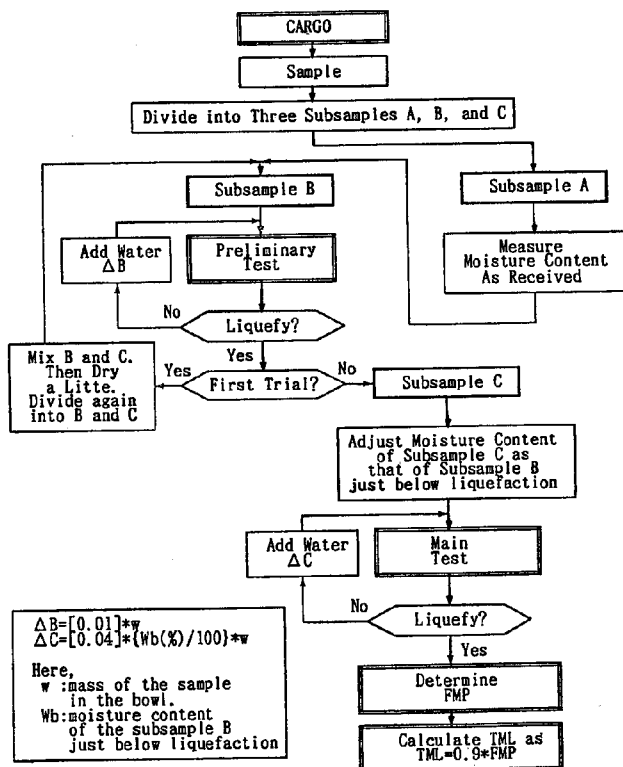


図20 IMO・BCコード附属書D項改正提案貫入法のフローチャート

5. IMO・BC CODE 附属書D項の改正提案

図20は、現行 IMO・BC CODE 附属書D項の改正提案の内容をフローチャートとして図示している。FMP の計測に供される試料は、A、BとCに分ける。試料Aは、受取った試料の水分値の計測に用いる。その計測結果は、試験の基本的な値とする。試料Bは、おおよその FMP を測定する予備試験に用いる。この試験で流動化しなかった最大の水分値に試料Cを調整し、本試験を行なう。本試験では、予備試験より小さいステップで水分の増加を行ないFMPを求める。FMPは、本試験で50mm以上貫入した水分値と50mm以下の貫入の水分値との平均値とする。ただし、石炭の場合には内径200φあるいは260φのコンテナを用いて、液状化判定の貫入量クライテリアを100mmとする。

予備試験での増加させる水分量 ΔB は、実験の手間に関係し、本試験での増加させる水分量 ΔC は、試験精度に関係する。ここでは、予備試験を1%きざみに、本試験の測定精度は、予備試験で流動化しなかった最大の水分値の試料中に含まれる水分の重量の4/100とするように提案した。又、ばら積み貨物の船倉内での液状化を防止するための最大水分値、すなわち運送許容水分値 (TML : Transportable Moisture Limit) は、IMO の BC CODE の附属書D項に定義されている  $TML = 0.9 * FMP$  をそのまま用いた。

6. おわりに

これらの実験結果を踏まえて、粒子の粗い石炭にたいしては半球形のビットを微粉精鉱のように細かい粒子のものには円盤状ビットを使用する一般的な「貫入法」が国際的な試験法として適応可能であることが明らかになった。したがって、普遍的な試験法として「貫入法」を BC CODE 附属書D項に取入れる全面改正案を作成した。

本研究は、(社)日本造船研究協会第7基準部会第8分科会第1小委員会の研究活動の一環として行なわれたもので、委員の方々及び事務局の方々より多々ご助言ご支援を賜った。ここに篤く感謝いたします。

参考文献

- (1) 浦 環, 田中正人: 石炭の運送許容水分値の測定法の開発, 日本航海学会論文集, 第80号, pp. 125-131, 1988
- (2) 浦 環, 田中正人: Development of The Penetration Method for Concentrates, IMO,

BC/30/5/12, 1989

(3) 浦 環, 田中正人: Determination of flow moisture point, IMO, BC 29/5/11, 1988

(4) 浦 環: Revised Appendix D of BC code, BC/31/5/-, 1990

#### 質 疑 応 答

奥村宗行(神戸商船大学): 実務的には, サンプリング・テストでもよいのだが, ローダーヘッドを積み荷のどのくらいの高さから落とし込めば十分に圧密されるという指針があればとも思うが, いかがですか。

浦 環: TML よりも水分値が低ければ, 圧密は荷を安定させる効果があります。しかし, 水分値がFMP以上では, いくら圧密しても効果はありません。本実験の結果にも, 圧密圧力が大きすぎてかえって少ない含水量で液状化が発生している例もあります。したがって, 積み込む前に, 含水量が TML より小さいことが第一義的に重要です。