ISSN
 1346-7328

 国総研資料
 第834号

 平
 成
 27年3月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.834

March 2015

超大型バルク船の減載時の船舶挙動に関する分析

谷本 剛・安部 智久

An Analysis on the Motions of Very Large Bulk Carrier under Reduced Draft

Tsuyoshi TANIMOTO, Motohisa ABE



National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

超大型バルク船の減載時の船舶挙動に関する分析

谷本 剛* · 安部智久**

要 旨

新興国の旺盛な資源需要やパナマ運河拡張計画を踏まえて超大型船の建造・竣工が進展している 中で,我が国においても国際バルク戦略港湾政策が進められている.しかし,超大型バルク船を対 象とした複数寄港の場合での減載状態における喫水の推計方法、航路諸元(航路水深,航路幅)の 算定手法は存在しない.

以上のことから,本研究では,今後の上記算定手法開発の基礎的検討として 2007 年に改訂され た「技術基準」より導入された第二区分の航路諸元算定手法の考え方等に基づいて,減載時の船舶 挙動に関する分析を行い,超大型バルク船の減載状態での喫水の推計,航路幅及び航路水深の試算 を行った.

キーワード:超大型バルク船,航路幅員,航路水深,減載状態

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所 電話:046-844-5027 Fax:046-844-5027 e-mail: tanimoto-t87kd@mlit.go.jp

 ^{*} 港湾研究部 港湾計画研究室 研究官
 ** 港湾研究部 港湾計画研究室長

An Analysis on the Motions of Very Large Bulk Carrier under Reduced Draft

Tsuyoshi TANIMOTO * Motohisa ABE **

Synopsis

While very large bulk carriers are built in order to respond to the rapid growth of demand by developing countries and the Panama Canal Expansion, an initiative called international strategic port policy has been implemented. However, planning method of navigation cannel design for bulk carriers under reduced draft in case of multiple ship calls, has not been developed.

Based on the above, this technical note is aiming at analyzing vessel motions under reduced draft, by applying the detailed designing methods adopted in the 2007 Technical Standard of Port Facilities, as the first step toward the development of such planning method.

Key Words: Very Large Bulk Carriers, Width of Channel, Depth of Channel, Reduced Draft

Researcher of Planning Division, Port and Harbor Department
 Head of Planning Division, Port and Harbor Department

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure , Transport and Tourism 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5027 Fax : +81-468-44-5027 e-mail: tanimoto-t87kd@mlit.go.jp

目

次

1.	はし	こめに	1
2.	減載	歳時における喫水の推計方法⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯	1
	2.1	分析の実施方法	1
	2.2	VLOC・鉄鉱石に関する分析	3
	2.3	ケープサイズ船・石炭に関する分析	5
	2.4	ポストパナマックス船・穀物に関する分析	7
	2.5	品目別の分析	9
	2.6	減載状態での喫水推計方法	10
	2.7	貨物積載率の算定	12

3.	水平	『方向の挙動	14
	3.1	航路幅員の算足手法	14
	3.2	基本操船幅員 W_m の試算結果	15
	3.3	側壁影響対応幅員 W_b の試算結果	21
	3.4	行き会い影響対応幅員 W_c の試算結果	23
	3.5	追い越し影響対応幅員W _{ov} の試算結果	25
	3.6	必要航路幅員Wの試算結果と考察	26
	3.7	必要航路幅員の試算結果(K値=7)	27
	3.8	各影響幅員の試算結果(船型別)	28

4.	鉛匯	直方向の挙動	29
	4.1	航路水深の算定手法	29
	4.2	減載状態において変化する項目	30
	4.3	C _b に関する分析	30
	4.4	GM に関する分析	32
	4.5	減載時における鉛直方向の挙動の変化	34
5.	おれ	っりに	37
謝	辞…		37
参	考文	献	37

1. はじめに

新興国の旺盛な資源需要やパナマ運河拡張計画を踏ま えて超大型船の建造・竣工が進展している中で、我が国 においても国際バルク戦略港湾政策が進められている. 国際バルク戦略港湾(以下,戦略港という.)においては, 我が国におけるバルク貨物(穀物,鉄鉱石,石炭)の受 け入れ拠点となる港湾が選定(鹿島港,志布志港,名古 屋港,水島港,釧路港,木更津港,水島港·福山港,徳山 下松港・宇部港、小名浜港)されており、これらの港湾に は満載での入港が前提とされている. さらに、戦略港か ら積み替えなどの2次輸送によって、連携する港湾(以 下,連携港という.)への輸送がなされることとなるが, この際には戦略港で貨物を一定量卸し、半載等の減載の 状態で入港するケースが想定されている. 連携港の候補 として、戦略港についての計画書に掲載されている港湾 の一部を表-1.1 に示す. しかし, 超大型バルク船を対象 とした複数寄港の場合での減載状態における喫水の推計 方法, 航路諸元(航路水深, 航路幅)の算定手法は見当 たらない.

本研究は、2007年に改訂された「港湾の施設の技術上 の基準・同解説」¹⁾(以下,「技術基準」という.)より導 入された第二区分の航路諸元算定手法等に基づき上記算 定手法開発のための基本的検討として減載時の船舶挙動 に関する分析を行った.検討内容は以下のとおりである. (1)減載状態での喫水の推計方法の検討

ローディングマニュアルデータ, TPC(Ton Per Centimeter)データを用いて減載状態における喫水を推計 する方法について検討した.

(2)減載状態での水平方向の船舶挙動に関する分析

減載時における水平方向の船舶挙動を分析した.減載 時は喫水が小さくなり風圧面積が増え,風による水平方 向の挙動が大きくなると予想される.このため実際に水 平方向の挙動を試算することで確認した.

品目	港湾名
鉄鉱石	川崎港,東播磨港,呉港,北九州 港,室蘭港,千葉港,鹿島港,和歌 山下津港,福山港,水島港など
石炭	宇部港,徳山下松港,酒田港,相馬 港,広野港,茨城港,青森港など
穀物	八戸港,釜石港,石巻港,神戸港, 釧路港,清水港,田子の浦港,水島 港,鹿児島港,矢代港,鹿島港,苫 小牧港,八戸港,新潟港など

表-1.1 連携港の候補

(3)減載状態での鉛直方向の船舶挙動に関する分析

減載時における鉛直方向の船舶挙動を分析した.減載 時は満載時と比べて重心の位置が変化し,うねり等の波 浪の影響により船舶の横揺が発生しやすいと予想される が,これらについて鉛直方向の挙動を試算することで確 認した.

2. 減載時における喫水の推計方法

2.1 分析の実施方法

減載時の喫水を求めるためのデータとしては, ローデ ィングマニュアルとTPCの二つがあり,本研究ではこれら のデータを使用して以下のとおり分析を行った.

2.1.1 分析の基本方針

大型バルク船において,積載貨物重量が減載の状態での喫水は式(1)の考え方により推計することとした.

喫水率は対象船舶の満載喫水に対する減載状態での喫水の比率(無次元値)である.喫水率の最大値は1.0ではあるが,積載貨物量が0の場合であってもバラスト水等により喫水調整がなされるために最小値は0.0ではなく一定の値を有する.

この喫水率は、減載時における喫水の特性に考慮し、 さらに式(2)に示す 2 つの変数に分解して算定することと した.

相当喫水率とは、貨物積載率に対応した排水量からイ ーブントリム状態(トリム=0)の喫水を求めたものであ る.ここで貨物積載率は対象船舶における最大積載貨物 重量に対する減載状態として積載されている貨物重量の 比率(無次元値)で0.0~1.0の値となる.最大積載貨物 重量は実際に積載される貨物重量のみを対象とする.す なわち DWT で定義される重量には、貨物以外にも燃料, バラスト水他の重量が含まれるがこれらは含まない.

実際の減載状態では、船尾トリム(船尾が下がっている状態)で航行する場合もあり、これを考慮するため船 尾トリム率(相当喫水に対する船尾喫水の比率)により 補正を行う必要がある.ここでいうトリムとは船の前後 方向の傾き、すなわち船首喫水と船尾喫水との差を意味 する.船首喫水のほうが大きいときは船首トリム、逆は 船尾トリム、等しいときはイーブントリムという.図-2.1 に概念図を示す.



2.1.2 船型区分

本資料では、大型バルク船を国総研資料第525号²⁰に基づき DWTを基本として以下の3種類に区分した.なお全船舶について船幅が33m以上を対象としている.

VLOC (Very Large Ore Carrier)	200,000 DWT 以上
Capesize	120,000~199,999 DWT
Post Panamax	\sim 119,999 DWT

2.1.3 貨物積載率に対応した相当喫水率の分析

(1)ローディングマニュアルによる方法

新造船のバルク船には貨物積付ソフトが同時に提供さ れることが一般的であり、このソフトによる満載状態、 バラスト状態,減載状態等の様々な積付事例を示してい るのがローディングマニュアル (Loading Manual,以下, LM という.)である.このLM の記載形態は造船会社, 船主等により異なるが、一般的には貨物・燃料・飲料水・ バラスト水他の積載状態に対応した船体の構造的安全性 の確認と喫水やトリムの値等が明示されている.

このため,この LM を入手できれば対象船舶における 貨物の様々な積載状態(貨物積載率)に対応した喫水を 得ることができ,それを用いて相当喫水率を算定するこ とができる.さらにそれらの結果を多く得ることができ れば,両者の関係から相関モデルを作成することで任意 の貨物積載率に対応した相当喫水率を推計するモデル (以下,LM Model という.)を得ることが可能となる.

しかしこの LM は一般的には公開されていないことか ら本研究の実施に際して関係者に依頼した結果,先に整 理した各船型(VLOC, Capesize, Post Panamax)に対応 して1隻ずつ入手できた.なお,VLOCと Capesize, Post Panamax では造船所が異なることから LM の記載内容も 異なっている.

(2)TPC による方法

LM による貨物積載率に対応した相当喫水率を求める 手法は精度が高いものの,一隻のみの解析で対象とする 船型を代表させることには問題も内在する.言い換えれ ば,LMにより得られた結果はその船舶固有の結果であり, 汎用的に使用するには何らかの検証が必要である.

このため TPC (Ton Per Centimeter: 毎センチ排水トン 数:船を 1cm 平行沈下させるのに必要な重量トン数) を 用いた手法でも分析を行った. TPC は満載喫水から lcm 平行上昇させるために必要な【減量】重量トン数でもあ る.例えば,満載喫水から 10%の積載貨物重量を減らし た場合(すなわち貨物積載率 0.9)での喫水及び相当喫水 率をこの TPC から推計することができる.

LM での分析と併せて以下の方法により,船型ごとに TPC による分析(TPC Model の作成)を行った.

- ロイズデータのバルク船のうち TPC データを保有する船舶を DWT の定義に基づく船型区分に応じて分類した.結果は、VLOC:16 隻、Capesize:402 隻、Post Panamax:152 隻である.
- 各船型の1 隻毎に当該船舶の TPC データを用いて, 貨物積載率 0.1, 0.2~0.9, 1.0 での喫水及び相当喫水 率を算定した.
- 船型ごとに各貨物積載率に対する全相当喫水率デー タの平均値を算定した。

この結果の船型ごとの各貨物積載率に対する相当喫水 率を代表データとしたモデルを TPC Model とした.

なお, DWT に対する TPC の相関性を確認しており, その分析結果を図 2.2~2.5 に示す.



図-2.2 DWTとTPCの関係(全船舶)





図-2.4 DWTとTPCの関係(Capesize)



図-2.5 DWTとTPCの関係 (Post Panamax)

2.1.4 LM Modelに対するTPC Modelによる検証

ロイズデータのみでなく一般的に公開されている TPC データは満載時から貨物を調整するための値であること から、半載状態のように貨物積載率が 1 から大きく減少 する場合には実態から大きく乖離するものと考えられる. 他方LM Model は各船型1隻のデータしか得られておらず 汎用性に関する懸念がある. このため TPC Model と LM Model の両者について比較検証を行うこととした.

貨物積載率が 1.0 に近い場合に TPC Model と LM Model の両者が同様の結果を示している場合には, 1 隻の LM から得られた LM Model であっても当該船型を代表できるものと判断した.

なお、この検証に際しては TPC データが満載時に近い トリムが無い状態での喫水での値であること、すなわち 相当喫水に対応した値であることから LM Model の構築 に際しては相当喫水を用いて行った.

2.2 VLOC・鉄鉱石に関する分析

対象船舶をVLOCとして、減載状態での喫水,船尾トリムを推計するために行った分析結果を以下に示す.

2.2.1 相当喫水率に関する分析

VLOC として入手できた 30 万 DWT 級バルク船(船舶 諸元を表-2.1 に示す)のLMでは,鉄鉱石を対象とした 貨物積載の状態としてバラスト(貨物積載率 0.0)から満 載状態(貨物積載率 1.0)までの7 ケースが示されている. この7ケースについて,LMに示された結果の一部と貨物 積載率と相当喫水率について整理した結果を表-2.2 に, また 2.1.3 で示した手法により得られた VLOC の TPC Model の結果を表-2.3 に示す. さらに,これらの分析結 果を併せて示した結果を図-2.6 に示す.ここでは,LM Model を得るために指数関数で回帰した結果も合わせて 示している.

この図-2.6 の結果から, 貨物積載率が 1.0 に近づく程 に両者は整合していることから, ここで得られた LM Model は VLOC (鉄鉱石) を代表していると判断される.

表-2.1 船舶諸元(VLOC)

	30万DWTクラス VLOC
全長	327.0 m
垂線間長	318.0 m
船幅	55.0 m
満載喫水	21.43 m
最大積載貨物重量	292,772 DWT

表-2.2 LM の一部結果と LM Model (VLOC)

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	相当喫水 (m)	貨物積載 率	相当喫水 率
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 喫水
1	0	9.69	0.000	0.452
2	49,267	11.52	0.168	0.538
3	97,169	13.46	0.332	0.628
4	146,386	14.83	0.500	0.692
5	195,698	17.80	0.668	0.831
6	243,555	19.88	0.832	0.928
7	292,772	21.43	1.000	1.000

表-2.3 TPC Model (VLOC)

貨物積載率	相当喫水率
0.0	0.188
0.1	0.269
0.2	0.350
0.3	0.432
0.4	0.513
0.5	0.594
0.6	0.675
0.7	0.756
0.8	0.838
0.9	0.919
1.0	1.000



2.2.2 船尾トリム率に関する分析

この LM での 7 ケースについて,相当喫水に対する船 尾トリム率について整理した結果を表-2.4 に示す.また, この表-2.4 の相当喫水率と相当喫水に対する船尾トリム 率の関係を図-2.7 に示す.ケース4 ならびに5 のように, 相当喫水率が下がる場合に船尾トリムでの状態の航行が 想定されている.

ただし, 表-2.4 でのケース 1~3 については, プロペラ 没水率(Propeller Immersion)が 100%未満, すなわちプ ロペラの一部が海面上に出ている通常運航では想定され ない状態であるため, この 3 ケースについては今後の検 討対象から除くことが妥当であると判断される.

ケース No.	相当喫水 (m)	船尾トリム (m)	相当喫水 率	相当喫水 に対する 船尾トリム 率
	(A)	(B)		(B)∕(A)
1	9.69	9.73	0.452	1.004
2	11.52	11.60	0.538	1.007
3	13.46	13.47	0.628	1.001
4	14.83	15.41	0.692	1.039
5	17.80	19.09	0.831	1.072
6	19.88	19.89	0.928	1.001
7	21.43	21.54	1.000	1.005

表-2.4 LM データによる喫水関連分析(VLOC)



- 4 -

2.3 ケープサイズ船・石炭に関する分析

対象船舶をケープサイズ船として,減載状態での喫水, 船尾トリムを推計するための分析結果を以下に示す.

2.3.1 相当喫水率に関する分析

Capsize として入手できた 17 万 DWT 級バルク船 (船舶 諸元を表-2.5 に示す)のLMでは,石炭と鉄鉱石を対象 とした貨物積載の状態としてバラスト (貨物積載量 0.0) から満載状態 (貨物積載量 1.0)までの 20 ケースが示さ れている.この 20 ケースについて,LM に示された結果 の一部を表-2.6 に,また 2.1.3 で示した手法により得ら

表-2.5 ⇒	船舶諸元((Capesize)
---------	-------	------------

	17万DWTクラス Capesize
全長	289.0 m
垂線間長	277.0 m
船幅	45.0 m
満載喫水	17.60 m
最大積載貨物重量	167,108 DWT

表-2.6 LM の一部結果と LM Model (Capesize)

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	相当喫水 (m)	貨物積載 率	相当喫水 率
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 喫水
1	0	5.98	0.000	0.339
2	146,441	16.03	0.876	0.909
3	148,799	16.03	0.890	0.909
4	128,100	14.20	0.767	0.805
5	76,743	9.40	0.459	0.533
6	69,698	8.77	0.417	0.497
7	78,913	9.60	0.472	0.545
8	69,886	8.78	0.418	0.498
9	167,108	17.45	1.000	0.990
10	140,701	15.24	0.842	0.864
11	164,750	17.63	0.986	1.000
12	167,108	17.63	1.000	1.000
13	164,750	17.63	0.986	1.000
14	167,108	17.63	1.000	1.000
15	89,050	10.52	0.533	0.597
16	75,700	9.31	0.453	0.528
17	91,408	10.73	0.547	0.609
18	75,700	9.31	0.453	0.528
19	164,750	17.63	0.986	1.000
20	167,108	17.63	1.000	1.000

注)網掛箇所は石炭,それ以外は鉄鉱石を示す.

れた Capesize の TPC Model の結果を表-2.7 に示す. 20 ケースのうち石炭に関する貨物積載率と相当喫水率につ いて整理した結果を図-2.8 に,鉄鉱石に関する貨物積載 率と相当喫水率について整理した結果を図-2.9 に示す.

図-2.8の石炭に関するLM Modelの係数と図-2.9での 鉄鉱石に関するLM Modelの係数が同程度であること,ま た両者が同様の傾向を示していることから貨物積載率と 相当喫水率の相関性について品目による大きな相違はな いと判断される.データ数が多い方がより精度の高い相 関モデル(CapesizeにおけるLM Model)を構築できると ことから,図-2.8と図-2.9のデータならびにこれらによ る指数回帰式LM Modelを示した結果に,TPC Modelを併 せて示した結果を図-2.10に示す.

この図-2.10の結果から、貨物積載率が1.0に近づく程 にTPC Modelの方が高めの傾向がみられるものの両者は 互いに近い値となっており、ここで得られた LM Model は Capesize(石炭)を代表していると判断される.

貨物積載率	相当喫水率
0.0	0.196
0.1	0.277
0.2	0.357
0.3	0.437
0.4	0.518
0.5	0.598
0.6	0.679
0.7	0.759
0.8	0.839
0.9	0.920
1.0	1.000

表-2.7 TPC Model (Capesize)



図-2.8 LM の分析結果と LM Model (Capesize-Coal)



図-2.9 LM の分析結果と LM Model (Capesize-Ore)



2.3.2 船尾トリム率に関する分析

同じLM での20ケースについて,相当喫水に対する船 尾トリム率について整理した結果を表-2.8に示す.また, この表-2.8の相当喫水率と相当喫水に対する船尾トリム 率の関係について図化した結果を図-2.11に示す.

図-2.11 から貨物積載率が減少するにつれて船尾が下がる(船首が上がる)傾向が VLOC よりも顕著に確認できる.

表−2.8	LM デー	-タによ	る喫水関連分析	(Capesize)
-------	-------	------	---------	------------

ケース No.	相当喫水 (m)	船尾トリム (m)	相当喫水 率	相当喫水 に対する 船尾トリム 率
	(A)	(B)		(B)/(A)
1	5.98	8.24	0.339	1.378
2	16.03	16.03	0.909	1.000
3	16.03	16.03	0.909	1.000
4	14.20	14.20	0.805	1.000
5	9.40	9.60	0.533	1.021
6	8.77	9.96	0.497	1.136
7	9.60	10.31	0.545	1.074
8	8.78	9.99	0.498	1.138
9	17.45	17.45	0.990	1.000
10	15.24	15.24	0.864	1.000
11	17.63	17.63	1.000	1.000
12	17.63	17.63	1.000	1.000
13	17.63	17.63	1.000	1.000
14	17.63	17.63	1.000	1.000
15	10.52	11.17	0.597	1.062
16	9.31	10.36	0.528	1.113
17	10.73	11.87	0.609	1.106
18	9.31	10.36	0.528	1.113
19	17.63	17.63	1.000	1.000
20	17.63	17.63	1.000	1.000

注)網掛箇所は石炭,それ以外は鉄鉱石を示す.



図-2.11 相当喫水に対する船尾トリム率 (Capesize)

2.4 ポストパナマックス船・穀物に関する分析

対象船舶をポストパナマックス船として,減載状態での喫水,船尾トリムを推計するための分析結果を以下に示す.

2.4.1 相当喫水率に関する分析

Post Panamax として入手できた 8.7 万 DWT 級バルク船 (船舶諸元を表-2.9 に示す)のLMでは,穀物と鉄鉱石 を対象とした貨物積載の状態としてバラスト(貨物積載 量0.0)から満載状態(貨物積載量1.0)までの28ケース が示されている.この28ケースについて,LMに示され た結果の一部を表-2.10に,また2.1.3で示した手法によ り得られた Post PanamaxのTPC Modelの結果を表-2.11 に示す.28ケースのうち穀物に関する貨物積載率と相当 喫水率について整理した結果を図-2.12に,鉄鉱石に関す る貨物積載率と相当喫水率について整理した結果を図 -2.13に示す.

図-2.12の穀物に関する LM Model の係数と図-2.13 で の鉄鋼石に関する LM Model の係数がほぼ同じであるこ と、また両者が同様の傾向を示していることから貨物積 載率と相当喫水率の相関性には品目による大きな相違は ないと判断される.データ数が多い方がより精度の高い 相関モデル (Post Panamax における LM Model)を構築で きるとことから、図-2.12 と図-2.13 のデータならびにこ れらを用いた指数回帰式 (LM Model)を示した結果に、 TPC Model を併せて示した結果を図-2.14 に示す.

この図-2.14の結果から、貨物積載率が 1.0 に近づく程 に両者は互いに近い値となっていることから、ここで得 られた LM Model は Post Panamax (穀物)を代表している ものと判断される.

表-2.11 TPC Model (Post Panamax)

貨物積載率	相当喫水率
0.0	0.213
0.1	0.291
0.2	0.370
0.3	0.449
0.4	0.528
0.5	0.606
0.6	0.685
0.7	0.764
0.8	0.843
0.9	0.921
1.0	1.000

表-2.9	船舶諸元	(Post Panamax)

	87,000DWTクラス
	Post Panamax
全長	229.0 m
垂線間長	219.9 m
船幅	36.5 m
満載喫水	14.14 m
最大積載貨物重量	85,701 DWT

表-2.10 LM の一部結果と LM Model (Post Panamax)

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	相当喫水 (m)	貨物積載 率	相当喫水 率
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 喫水
1	83,243	14.11	0.971	0.998
2	83,243	13.91	0.971	0.984
3	85,701	14.11	1.000	0.998
4	70,129	12.01	0.818	0.849
5	72,587	12.34	0.847	0.873
6	0	6.82	0.000	0.482
7	81,821	13.89	0.955	0.982
8	77,179	13.04	0.901	0.922
9	63,145	11.22	0.737	0.793
10	53,431	10.04	0.623	0.710
11	68,952	11.96	0.805	0.846
12	64,358	11.42	0.751	0.808
13	52,706	9.83	0.615	0.695
14	44,598	8.58	0.520	0.607
15	38,081	9.99	0.444	0.707
16	45,162	10.42	0.527	0.737
17	27,949	9.22	0.326	0.652
18	21,131	8.09	0.247	0.572
19	21,049	8.30	0.246	0.587
20	49,080	10.23	0.573	0.723
21	48,998	10.94	0.572	0.774
22	42,180	9.80	0.492	0.693
23	83,243	14.11	0.971	0.998
24	85,701	14.11	1.000	0.998
25	83,243	14.11	0.971	0.998
26	85,701	14.11	1.000	0.998
27	83,243	13.72	0.971	0.970
28	83,243	13.72	0.971	0.970

注)網掛箇所は穀物,それ以外は鉄鉱石を示す.



図-2.12 LMの分析結果とLM Model (Post Panamax-Grain)



図-2.13 LM の分析結果と LM Model (Post Panamax-Ore)



図-2.14 LM Model と TPC Model (Post Panamax)

2.4.2 船尾トリム率に関する分析

同じLM での28 ケースについて,相当喫水に対する船 尾トリム率について整理した結果を表-2.12 に,またこの 表-2.12 の相当喫水率と相当喫水に対する船尾トリム率 の関係について図化した結果を図-2.15 に示す.

この図-2.15においても図-2.11と同様に貨物積載率が 減少するにつれて船尾が下がる傾向が顕著に確認できる. また,同じ相当喫水であっても,船尾トリムをつける場 合とそうでない場合(例えば相当喫水率が0.6の場合)の あることが確認できる.

ケース No.	相当喫水 (m)	船尾トリム (m)	相当喫水 率	相当喫水 に対する 船尾トリム 率
	(A)	(B)		(B)∕(A)
1	14.11	14.11	0.998	1.000
2	13.91	13.91	0.984	1.000
3	14.11	14.11	0.998	1.000
4	12.01	12.12	0.849	1.009
5	12.34	12.34	0.873	1.000
6	6.82	7.49	0.482	1.098
7	13.89	13.89	0.982	1.000
8	13.04	13.04	0.922	1.000
9	11.22	11.22	0.793	1.000
10	10.04	10.04	0.710	1.000
11	11.96	11.96	0.846	1.000
12	11.42	11.42	0.808	1.000
13	9.83	9.83	0.695	1.000
14	8.58	8.58	0.607	1.000
15	9.99	10.07	0.707	1.008
16	10.42	10.70	0.737	1.027
17	9.22	10.24	0.652	1.111
18	8.09	8.09	0.572	1.000
19	8.30	9.66	0.587	1.164
20	10.23	10.74	0.723	1.050
21	10.94	12.14	0.774	1.110
22	9.80	10.29	0.693	1.050
23	14.11	14.11	0.998	1.000
24	14.11	14.11	0.998	1.000
25	14.11	14.11	0.998	1.000
26	14.11	14.11	0.998	1.000
27	13.72	13.26	0.970	0.966
28	13.72	13.95	0.970	1.017

表-2.12 LM データによる喫水関連分析 (Post Panamax)

注)網掛箇所は穀物,それ以外は鉄鉱石を示す.



図-2.15 相当喫水に対する船尾トリム率 (Post Panamax)

2.5 品目別の分析

2.3~2.4 では船型別・品目別に分析を行ったが、ここでは船型に拘らずに品目別に分析を行った.この場合にはより船型が多い方が望ましいと考えられるため先の3 船型のLMを入手した際に同時に得られた5.6万DWT級バルク船のLMに関する分析結果も含めて分析した.

穀物の結果を図-2.16 に,石炭の結果を図-2.17 に,鉄 鉱石の結果を図-2.18 に示す.さらに,分析を実施した全 船型の全品目を一括した結果を全船型の TPC Model と合 わせて図-2.19 に示す.

これらの結果から、貨物積載率と相当喫水率の相関性 には品目による大きな相違はないと判断されるとともに、 今回分析対象とした LM のデータはバルク船全体の傾向 とも大きく異ならないことが考察された.





2.6 減載状態での喫水推計方法

2.6.1 相当喫水率

(1)LM Model と TPC Model の比較

2.2.1, 2.3.1, 2.4.1 において分析した LM Model と TPC Model との結果を3 船型について比較する.VLOC, Capesize, Post Panamax, 全船型の結果を図-2.20~図-2.23 に示す.

この結果, VLOC と Post Panamax は貨物積載率が 1.0 から小さくなるに伴い, TPC Model の相当喫水率は LM Model に比べて小さくなり,その差も拡大する傾向にある. それに対して, Capesize は貨物積載率が 0.4~1.0 付近にお いて, TPC Model の相当喫水率が LM Model に比べて大き くなる結果となった.

(2)LM Model の船型比較

各船型(56,000DWT バルク含む)のLM Model を一括 して比較した結果を図-2.24 に示す.この結果, Capesize を除いた3船型はほぼ同様の傾向を示している.

(3)TPC Model の船型比較

各船型の TPC Model を一括して比較した結果を図 -2.25 に示す.この結果,3船型は全く同様の傾向を示し ている.

(4)相当喫水率推計式についての一般化

上記から以下の点が考察される.

- ・今回分析対象とした LM のデータは, TPC との比較分 析から Capesize を除いて各船型を代表しているものと 判断される.
- ・貨物積載率と相当喫水率の相関性において積載貨物の
 品目別による大きな相違はない.
- ・貨物積載率と相当喫水率の相関性に船型による大きな 相違はない.
- Capesize についても TPC Model については他の船型と
 同様の傾向が見られバルク船の中で船型そのものが特殊とは考えにくい. Capesize については今回入手した
 LM がやや特殊であった可能性がある.

この結果から大型バルク船での積載貨物重量が減載状 態での喫水を推計する式は、Capesize を除いた今回のLM の全データを対象にして作成されるLM Model の式が汎 用的に活用され今後の基準化への適用が検討される式に なると考えられる.また図-2.24 において 56,000DWT バ ルクについても VLOC ならびに Post Panamax と同様の傾 向を示すことから、より汎用化を高めるためこのデータ を追加する.さらに、減載状態で我が国港湾に入港実績 のある船社より喫水と貨物積載率の関係について実デー タを頂き、解析に加えることとした. 以上より Capesize を除く一方で 56,000DWT バルク, 船 社から入手した実データを追加した LM の全データ及び LM Model の結果を図-2.26 に示し, この LM Model に対 応する全船型の TPC Model との比較結果を図-2.27 に示 す.図-2.26 に示された式(3)をバルク船の相当喫水率に 関する推計式とする.船社から入手したデータにはケー プサイズの実績も含まれているが,全体の傾向から大き く外れていない.





図-2.22 LM /TPC Model 比較 (Post Panamax)



図-2.23 LM /TPC Model 比較(全船型)







図-2.27 Capesize を除く LM Model と TPC Model (全船型)の比較

2.6.2 船尾トリム率

2.2.2, 2.3.2, 2.4.2 において分析した船尾トリム率の 傾向がほぼ同様であることから,これらのデータ(2.2.2 で整理したように VLOC での3ケースを除く)を一括し て整理し,船尾トリム率に関する LM Model を作成した結 果を図-2.28 に示す.

このようにして得たバルク船全体の船尾トリム率推計 式は式(4)で示される.

Z=1+3.975・exp(-7.001Y) (4) ここに, Y:相当喫水率 Z:船尾トリム率



図-2.28 船尾トリム率に関する LM Model

2.6.3 減載状態での喫水推計式

これまでの検討を踏まえ、大型バルク船での積載貨物 重量が減載状態での喫水について式(5)を得る.

減載状態での喫水

- =満載喫水×相当喫水率×船尾トリム率
- $= \mathbf{d} \cdot 0.4724 \cdot \exp(0.745X) \cdot (1+3.975 \cdot \exp(-7.001Y))$ (5) $\geq \geq \langle \zeta, \rangle$
 - d: 満載喫水
 - X:貨物積載率
 - Y:相当喫水率

ただし回帰式まわりにデータのばらつきも見られこの式 の適用においてはこの点も留意すべきである.

2.7 貨物積載率の算定

これまでの検討において,貨物積載率については積載 重量ベースの数値として扱っている.しかし現実には, 容積勝ちの貨物もあり,船倉の容積に対して積載率を設 定する場合も想定される.例えば Post Panamax 船が穀物 の半載状態(船倉に穀物が 50%積載されている状態)で の喫水の推計が必要となる場合もある.このため,船倉 の容積に配慮した貨物積載率の算定手法の検討を行った.

2.7.1 大型バルク船の DWT から船倉の容積を推計するモ デル式の構築

バルク船のデータでは船倉の容積を示す指標として Grain Capacity (以下 GC) があり,クラークソンデータ 等により公開されている.このため国土技術総合研究所 港湾計画研究室が所有している 2012 年クラークソンデー タから DWT と GC を有するバルク船データ (B≧33m) を整理する.その結果,両方を有する 1381 隻のデータが 確認され,その両方の指標の関係を図-2.29 に船舶 TYPE 別に示す.各 TYPE 別の隻数は次のとおりである.

Ore Carrier	67 隻
Chip Carrier	30 隻
Bulk/Oil Carrier	21 隻
Bulk Carrier	1263 隻
合計	1381 隻

図-2.29から特性の異なる2程度の船舶の集団が確認される.本検討において対象となるのは Bulk Carrier であることから,これのみを対象とした分析結果を図-2.30に示す.この結果,大型バルク船の DWT から船倉容積を推計する相関性の高い式(6)が得られた.

バルク船の船倉容積推計式	
G=1.1067 • D	(6)
ここで	
D: DWT(t)	
G : Grain Capacity(m ³)	



図-2.29 DWT と GC の相関性(船舶 TYPE 別)



図-2.30 DWT と GC の相関性(Bulk Carrier)

2.7.2 具体的な算定手法

大型バルク船の減載状態での喫水について,船倉の容 積を用いて推計する方法は次のように整理される.以下 は船倉容積に対して 50%の積載率とする場合を示す.

- ・計算①:対象船舶のDWTから船倉容積を算定
- ・計算②:推計された船倉容積×50%により積載貨物容 積を算定
- ・計算③:積載貨物容積×比重=積載貨物重量
- ・計算④:積載貨物重量と対象船舶の最大積載貨物重 量(LM や船社ヒアリングより設定)から 貨物積載率を算定
- ・計算⑤:貨物積載率に基づき,喫水を算定

ここで比重を把握するため、今回入手した LM から比 重ないしは S.F.値を調べたが、十分なデータ数を確保する ことが出来なかった.そこでこの S.F.値について文献³⁾ のデータを整理し,その比重 (t/m3) に換算した結果を**表** -2.13 に示す.ここで S.F.値とは, Stowage Factor 貨物の 1 重量単位 (LT) あたりの容積量 (ft³) で比重とは逆の概 念の値である.

実際の算定に際して S.F.値が特定されない場合には、この表-2.13 に示す中間値を適用することが考えられる.

表-2.13 海上貨物としての比重

対象貨物	S.F.値	海上貨物としての 比重 (t/m3)
鉄鉱石	13 ~ 17	2.72 ~ 2.08
(中間値)	(15)	(2.35)
石炭	42 ~ 50	0.84 ~ 0.71
(中間値)	(46)	(0.77)
穀物	44 ~ 57	0.80 ~ 0.62
(中間値)	(50)	(0.71)

2.7.3 算定の一例

本研究で検討した算定手法の適用の一例として,石炭 の半載状態(船倉に石炭が 50%積載されている状態)の 喫水について計算した結果を以下に示す.

- ・対象船舶: Capesize, 170,000DWT
- ・最大積載貨物重量:167,108t
- ・満載時喫水:17.6m
- 計算①:式(6)より
 - 船倉容積=1.1067×DWT=188,139m3
- 計算②:積載貨物容積=船倉容積×50%=94,070m3
- 計算③:表-2.13より,比重=0.77t/m3

積載貨物重量=積載貨物容積×比重≒72,434t 計算④:貨物積載率=積載貨物重量/最大積載貨物重量

- 計算⑤:式(3)より
- 相当喫水率=0.4724・exp(0.745X)≒0.65 式(4)より 船尾トリム率=1+3.975・exp(-7.001Y)≒1.04 (d:満載喫水,X:貨物積載率,Y:相当喫水率)
- 計算⑥:式(5)より

減載状態の喫水

=満載喫水×相当喫水率×船尾トリム率<u>≒12m</u>

なお,減載状態の喫水は相当喫水と船尾トリム量の和 であり各々の値は以下のとおりとなる.

相当喫水=d·0.4724 · exp (0.745X) ≒11.5m

船尾トリム量=相当喫水×3.975・exp(-7.001Y) ≒0.5m

3.水平方向の挙動

超大型バルク船の減載状態における水平方向の挙動に ついて把握するため、「技術基準」(第4編第3章 水域施 設 P771~802)で規定されている第2区分の性能照査によ る必要航路幅員の算定手法に基づき、満載時と減載時に おける船舶挙動の違いを分析した.減載時は船体が上昇 して風圧面積が大きくなり、風による水平方向の挙動が 大きくなると予想され満載時とは異なる数値となりえる ことから試算を行い検証した.

対象船型とする超大型バルカー (Capesize)の諸元等は, 「技術基準」(第4編第3章 水域施設 P776 表-2.3.1)に 示されているものとした.ここでは,航行環境条件を, 船速 7.5kt,最大風速 12m/s (=23.3kt),潮流 1.0kt,航路 水深は対象船型の最大喫水 d の 1.2 倍 (D/d=1.2),減載時 の積載状態は半載 (貨物積載率: 50%)と仮定して試算を 行った.なお,この設定値は特定の港湾を想定して設定 したものではない.

3.1 航路幅員の算定手法

第2区分の性能照査における必要航路幅員は,式(7)~式(9)により算定することができる(「技術基準」P771~772).

①対象船舶の行き会いを想定しない航路

(図-3.1 単航路)

$$W = W_{b1} + W_{m0} + W_{b2} \tag{7}$$

②対象船舶の行き会いを想定する航路

(図-3.2 往復航路)

$$W = W_{b1} + W_{m1} + W_c + W_{m2} + W_{b2}$$
(8)

③対象船舶の行き会い及び追い越しを想定する航路 (図-3.3 追い越しが想定される場合の往復航路)

$$W = W_{b1} + W_{m1-1} + W_{ov1} + W_{m1-2} + W_c + W_{m2-1} + W_{ov2} + W_{m2-2} + W_{b2}$$
(9)

- ここに,
 - W:必要航路幅員(m)
 - W_m:基本操船幅員(m)
 - W_b: 側壁影響対応幅員(m)
 - Wc: 行き会い影響対応幅員(m)
 - W_{ov}:追い越し影響対応幅員(m)



図-3.1 単航路



図-3.2 往復航路



図-3.3 追い越しが想定される場合の往復航路

3.2 基本操船幅員Wmの試算結果

対象船型の基本操船幅員Wmの試算結果を以下に示す.

3.2.1 風と潮流及びヨーイングによる影響等に対応する ための必要幅員*W_m(β,y)*の試算結果

航行中の船舶が風や潮流といった外力の影響を受けな がら直進の針路を確保するためには、図-3.4 に示すよう に斜航することで、その状態での船体流体力、舵力及び 外力のバランスを取ることが必要である.ここで、航路 中心線と斜航した船舶の船体中心線の成す角度が漂流角 β,漂流角βを発生させるために必要となる舵角が当舵角δ である.この漂流角βを求めることにより、風と潮流によ る影響に対応するための必要幅員 W_{β} を算定することができる(「技術基準」P773~780).

なお、一般的な船舶における舵角の上限値は35°である が、上限値の35°までを使用するのは緊急時の危機回避の 場合であり、航行時の外力に抵抗する場合の舵角は15° 程度である.よって、当舵角δの上限値は15°として、15° を超える場合は入港条件としての最大風速等を再検討す ることが必要である.

また,外力を受けない場合でも,船舶は図-3.5 に示す ように左右にヨーイングしながら航行する.そのため, ヨーイングによる蛇行量*W*,を必要航路幅員に加算する必 要がある.



図−3.4 風と潮流による漂流角の考え方

図-3.5 ヨーイングによる蛇行量

(1)風影響による漂流角β1の試算結果

a)流体力係数の算定結果

船体に関する流体力係数は,平野他⁴⁾により提案されて いる式を踏まえ,舵による安定効果を考慮して,式(10) により算定することができる.

$$Y'_{\beta} = \frac{\pi}{2} \frac{k}{\frac{d}{2D}k + \left\{\frac{\pi d}{2D}\cot\left(\frac{\pi d}{2D}\right)\right\}^{2.3}} + 1.4C_{b}\frac{B}{L} - 0.4Y'_{\delta}$$

$$N'_{\beta} = \frac{k}{\frac{d}{2D}k + \left\{\frac{\pi d}{2D}\cot\left(\frac{\pi d}{2D}\right)\right\}^{1.7}} + 0.49(0.4Y'_{\delta})$$

$$\uparrow = \frac{k}{\frac{d}{2D}k + \left\{\frac{\pi d}{2D}\cot\left(\frac{\pi d}{2D}\right)\right\}^{1.7}} + 0.49(0.4Y'_{\delta})$$

$$\downarrow = \frac{2d}{L}$$

$$(10)$$

ここに,

- Y'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける 横方向への反力係数Y₈の無次元値
- N'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける 回頭反力モーメント係数N₈の無次元値
- D: 航路水深(m)
- *d*:対象船舶の係船状態等の静水状態における最大喫水(m)
- $L: 垂線間長(=L_{PP})$ (m)
- B:船幅 (m)
- Y'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する横力係数Y_δの 無次元値
- C_b :ブロック係数

各軸各舵に対応した舵力に関する流体力係数は,藤井他 ⁵⁾により提案されている式を踏まえ,船体伴流,プロペラ スリップ効果を考慮して,式(11)により算定することがで きる.

(1軸1舵,2軸2舵の場合)

$$Y'_{\delta} = -\frac{6.13\lambda_a}{(\lambda_a + 2.25)} \frac{A_R}{L_{PP}d} (1 + a_H) 1.1$$

$$N'_{\delta} = -0.5Y'_{\delta}$$
(11)

- ここに,
 - Y'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する横力係数
 Y_δの無次元値
 - N'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する舵力モー メント係数N_δの無次元値
 - λ_a: 舵の有効アスペクト比(舵の縦 b と横 c の 長さの比b/c)
 - A_R : 舵面積 (m²)
- $A_R/(L_{PP}d): 舵面積比$
 - a_H: 舵の干渉係数

式(10),式(11)による,対象船型の流体力係数の算定結 果を表-3.1に示す.ここでの満載状態での値は,「技術基 準」に示されている値とした.

一方,減載状態での値は,全長,型幅他の満載状態と 同値とされるものは満載状態の値とし,減載であること で変化する項目については以下に示す手法により算定し た.なお,ここでの減載状態とは満載状態での積載重量 トンの50%を積載している半載の状態として設定する.

・ 喫水 d: 式(3)より算定

・ブロック係数 C_b:後述する推計式,式(42)より算定

表-3.1 流体力係数の算定結果(超大型バルカーCapesize)

積載状態	満載	半載
貨物積載率	100	50
DWT	172,900	172,900
$L_{OA}(\mathbf{m})$	289.0	289.0
$L_{PP}(\mathbf{m})$	279.0	279.0
<i>B</i> (m)	45.0	45.0
<i>d</i> (m)	17.8	12.2
C _b	0.8042	0.7810
λ_a	1.85	1.85
$A_R(m^2)$	78.0	78.0
a _H	0.47	0.47
Υ' _β	1.612	1.305
N'_{β}	0.562	0.407
Y' _δ	-0.0699	-0.1021
N'_{δ}	0.0350	0.0510

·水面上正面投影面積:

Ax=満載時 Ax+(満載状態-半載状態による)喫水差 ×垂線間長 L_{pp}

- ・水面上側面投影面積:
 Ay=満載時 Ay+(満載状態-半載状態による)喫水差
 ×垂線間長 Lop
- ・舵面積比,流体力係数:半載状態での主要目により「技術基準」で示される手法により算定

b)風圧抵抗係数・風圧モーメント係数の算定結果 風圧抵抗係数・風圧モーメント係数は、山野他のにより 提案されている式(12)により算定することができる.

$$C_{x} = C_{x0} + C_{x1}\cos\theta_{w} + C_{x2}\cos2\theta_{w} + C_{x3}\cos3\theta_{w} + C_{x4}\cos4\theta_{w} + C_{x5}\cos5\theta_{w}$$

$$C_{y} = C_{y1}\sin\theta_{w} + C_{y2}\sin2\theta_{w} + C_{y3}\sin3\theta_{w}$$

$$C_{m} = 0.1(C_{m1}\sin\theta_{w} + C_{m2}\sin2\theta_{w} + C_{m3}\sin3\theta_{w})$$

$$(12)$$

ここに,

- C_x:正面風圧抵抗係数
- C_v : 側面風圧抵抗係数
- Cm:船体中心周りの風圧モーメント係数
- θ_w :船首から図った風向角 (rad)

それぞれの係数は、 A_y/L^2 、 X_G/L 、L/B及び A_y/A_x と「技術 基準」(P777)の係数の積和によって与えられる.

式(12)による,対象船型の各風向角度における風圧抵抗 係数・風圧モーメント係数の試算結果を表-3.2~表-3.3 に示す.

c)平衡状態での運動方程式に基づく当舵角δ及び漂流角β₁
 の算定結果

定常風下における舵角δ, 漂流角βの船舶の平衡状態での運動方程式は式(13)によって表される.

$$Y_{\beta}\beta + Y_{\delta}\delta + C_{y}\left(\frac{\rho_{a}}{\rho_{w}}\right)\left(\frac{A_{y}}{Ld}\right)\left(\frac{U_{a}}{U}\right)^{2} = 0$$

$$N_{\beta}\beta + N_{\delta}\delta + C_{m}\left(\frac{\rho_{a}}{\rho_{w}}\right)\left(\frac{A_{y}}{Ld}\right)\left(\frac{U_{a}}{U}\right)^{2} = 0$$

$$(13)$$

この方程式に基づき,式(14)により,舵角 δ ,漂流角 β を 算定することができる.

舵 角
$$\delta = -\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{U_a}{U}\right)^2 \left(\frac{A_y}{Ld}\right) \left(\frac{C_m Y'_\beta - C_y N'_\beta}{Y'_\beta N'_\delta - Y'_\delta N'_\beta}\right)$$

漂流角 $\beta = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{U_a}{U}\right)^2 \left(\frac{A_y}{Ld}\right) \left(\frac{C_m Y'_\delta - C_y N'_\delta}{Y'_\beta N'_\delta - Y'_\delta N'_\beta}\right)$
(14)

- ここに,
 - *Y_β*:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受け る横方向への反力係数
 - Y'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受け る横方向への反力係数Y_βの無次元値
 - N_{β} :船体が漂流角 β で斜航するときに流体から受ける回頭反力モーメント係数
 - N'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける回頭反力モーメント係数N_βの無次元値
 - Y_{δ} : 舵角 δ の場合において舵が発生する横力係数
 - Y_{δ} : 舵角 δ の場合において舵が発生する横力係数 Y_{δ} の無次元値
 - U:航海速力 (m/s)
 - U_a : 風速 (m/s)
 - ρ_w :海水密度 (t/m³)
 - ρ_a :空気密度 (t/m³)
 - d:対象船舶の係船状態等の静水状態における最大 喫水(m)

- $L: 垂線間長 (=L_{PP}) (m)$
- A_v :水線上側面投影面積 (m²)
- C_v : 側面風圧抵抗係数

C_m:船体中心周りの風圧モーメント係数

ここで,風速/船速比(U_a/U)をK値とする.

式(14)による,対象船型の各風向角度における K 値 1~ 7 の場合の当舵角δ及び漂流角β₁の算定結果を表-3.4~表 -3.7 に示す. なお,これらの表は,実務において式(14) を解くことなく必要航路幅員を算定できるようにするた めのものであり, K 値は風速/船速比である.本研究にお ける必要航路幅員の試算では,船速 7.5kt,最大風速 12m/s (=23.3kt)と航行環境を仮定したため, K=3.1 の場合の 当舵角δ及び漂流角β₁を算定している.

表-3.2 風圧抵抗・風圧モーメント係数の算定結果(満載時)

風向角(°)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
風向角 (rad)	0.000	0.262	0.524	0.785	1.047	1.309	1.571	1.833	2.094	2.356	2.618	2.880	3.142
C _x	1.063	1.096	1.119	1.010	0.758	0.459	0.165	-0.171	-0.581	-0.973	-1.213	-1.280	-1.279
Cy	0.000	0.132	0.288	0.470	0.655	0.796	0.852	0.804	0.669	0.487	0.302	0.140	0.000
C _m	0.000	0.023	0.040	0.045	0.037	0.017	-0.010	-0.038	-0.058	-0.065	-0.056	-0.032	0.000

表-3.3 風圧抵抗・風圧モーメント係数の算定結果(半載時)

風向角(°)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
風向角 (rad)	0.000	0.262	0.524	0.785	1.047	1.309	1.571	1.833	2.094	2.356	2.618	2.880	3.142
C _x	1.025	1.037	1.020	0.892	0.666	0.425	0.197	-0.087	-0.464	-0.845	-1.091	-1.171	-1.177
Cy	0.000	0.177	0.367	0.568	0.756	0.893	0.945	0.897	0.763	0.576	0.374	0.181	0.000
Cm	0.000	0.033	0.057	0.067	0.058	0.034	-0.001	-0.036	-0.063	-0.074	-0.064	-0.037	0.000

表-3.4 平衡状態における当舵角δの算定結果(満載時)

国注(例)主任	風向角(°)												
風速/船速比	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
K=1	0.000	0.015	0.039	0.077	0.123	0.168	0.198	0.206	0.188	0.152	0.104	0.052	0.000
K=2	0.000	0.060	0.157	0.308	0.494	0.672	0.793	0.822	0.753	0.607	0.417	0.210	0.000
K=3	0.000	0.135	0.354	0.692	1.111	1.512	1.784	1.850	1.695	1.367	0.938	0.472	0.000
K=3.1	0.000	0.144	0.378	0.739	1.186	1.615	1.905	1.975	1.810	1.459	1.002	0.504	0.000
K=4	0.000	0.239	0.629	1.230	1.975	2.688	3.172	3.288	3.014	2.430	1.668	0.839	0.000
K=5	0.000	0.374	0.982	1.922	3.086	4.201	4.956	5.138	4.709	3.797	2.606	1.311	0.000
K=6	0.000	0.538	1.415	2.768	4.443	6.049	7.137	7.399	6.781	5.467	3.752	1.888	0.000
K=7	0.000	0.732	1.925	3.768	6.048	8.233	9.714	10.070	9.229	7.442	5.107	2.569	0.000

表-3.5 平衡状態における漂流角β1の算定結果(満載時)

国注 / 例 注 中						厦	風向角(°)						
風速/ 脂速比	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
K=1	0.000	0.002	0.005	0.008	0.010	0.012	0.012	0.010	0.008	0.005	0.003	0.001	0.000
K=2	0.000	0.010	0.021	0.031	0.041	0.046	0.047	0.041	0.031	0.020	0.011	0.004	0.000
K=3	0.000	0.022	0.046	0.071	0.092	0.105	0.105	0.092	0.070	0.045	0.024	0.010	0.000
K=3.1	0.000	0.024	0.049	0.075	0.098	0.112	0.112	0.098	0.074	0.048	0.026	0.010	0.000
K=4	0.000	0.040	0.082	0.126	0.163	0.186	0.186	0.163	0.124	0.080	0.043	0.017	0.000
K=5	0.000	0.062	0.128	0.196	0.255	0.291	0.291	0.255	0.193	0.125	0.067	0.027	0.000
K=6	0.000	0.090	0.185	0.282	0.367	0.418	0.419	0.367	0.279	0.180	0.096	0.038	0.000
K=7	0.000	0.122	0.252	0.384	0.500	0.570	0.570	0.500	0.379	0.245	0.131	0.052	0.000

表-3.6 平衡状態における当舵角δの算定結果(半載時)

国法 (41)法社						厘	虱向角(°)						
風速/ 船速比	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
K=1	0.000	0.023	0.060	0.116	0.187	0.258	0.312	0.333	0.318	0.267	0.191	0.099	0.000
K=2	0.000	0.094	0.241	0.466	0.748	1.032	1.246	1.334	1.271	1.069	0.763	0.395	0.000
K=3	0.000	0.211	0.542	1.048	1.684	2.323	2.804	3.001	2.859	2.405	1.717	0.890	0.000
K=3.1	0.000	0.226	0.579	1.119	1.798	2.480	2.994	3.204	3.053	2.568	1.834	0.950	0.000
K=4	0.000	0.376	0.964	1.863	2.993	4.129	4.985	5.335	5.082	4.275	3.053	1.582	0.000
K=5	0.000	0.587	1.506	2.911	4.677	6.451	7.790	8.336	7.941	6.679	4.770	2.471	0.000
K=6	0.000	0.845	2.169	4.191	6.735	9.290	11.217	12.004	11.435	9.618	6.869	3.559	0.000
K=7	0.000	1.150	2.953	5.705	9.168	12.645	15.268	16.338	15.565	13.091	9.350	4.844	0.000

表-3.7 平衡状態における漂流角β1の算定結果(半載時)

国油加油品						厦	虱向角(°)						
風速/ 施速比	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
K=1	0.000	0.010	0.020	0.029	0.036	0.040	0.039	0.034	0.026	0.018	0.010	0.004	0.000
K=2	0.000	0.040	0.079	0.116	0.144	0.159	0.156	0.136	0.105	0.071	0.040	0.017	0.000
K=3	0.000	0.090	0.179	0.260	0.324	0.357	0.350	0.306	0.236	0.159	0.091	0.039	0.000
K=3.1	0.000	0.096	0.191	0.278	0.346	0.381	0.374	0.327	0.252	0.170	0.097	0.042	0.000
K=4	0.000	0.160	0.318	0.463	0.576	0.634	0.623	0.544	0.420	0.282	0.162	0.070	0.000
K=5	0.000	0.250	0.496	0.723	0.900	0.991	0.973	0.850	0.656	0.441	0.252	0.109	0.000
K=6	0.000	0.360	0.715	1.041	1.296	1.427	1.401	1.224	0.944	0.636	0.363	0.157	0.000
K=7	0.000	0.490	0.973	1.417	1.764	1.942	1.907	1.666	1.285	0.865	0.495	0.214	0.000

(2)潮流影響による漂流角角の試算結果

潮流影響による漂流角 β_2 は、船速と正横成分潮流速度から、式(15)により算定することができる.

 $\beta_2 = \arctan(U_c/U) \tag{15}$

ここに,

β₂:潮流影響による漂流角(°)

U:航海速力(m/s)

Uc: 航路中心線に対する正横成分潮流速度(m/s)

本研究における必要航路幅員の試算では,船速 7.5kt, 潮流 1.0kt と仮定したため,潮流影響による漂流角β,は, 式(15)により 7.595°と算定される.

(3)風と潮流による影響に対応するための必要幅員*W*(β)の 試算結果

風と潮流による影響に対応するための必要幅員 $W(\beta)$ は、 風影響による漂流角 β_1 と潮流影響による漂流角 β_2 を合計 した、風と潮流影響による漂流角 β から、式(16)により算 定することができる.

$$\beta = \beta_1 + \beta_2$$

$$W(\beta) = L_{OA} \sin\beta + B \cos\beta$$
(16)

ここに,

W(β):風と潮流による影響に対応するための必要幅

員 (m)

- L_{OA}: 全長 (m)
 - B:船幅 (m)
 - β:風と潮流影響による漂流角(°)

β₁:風影響による漂流角(°)
 β₂:潮流影響による漂流角(°)

式(16)による,対象船型の風と潮流による影響に対応す るための必要幅員*W*(*β*)の試算結果を**表**-3.8に示す.

船 型	積載状態	$L_{OA}(\mathbf{m})$	<i>B</i> (m)	$\beta_1(^\circ)$	$\beta_2(^\circ)$	$W(\beta)$ (m)
超大型バルカー (Capesize)	満載	289.0	45.0	0.112	7.595	83.4
	半載	289.0	45.0	0.381	7.595	84.7

表-3.8 風と潮流による影響に対応するための必要幅員W(β)の試算結果

(4)ヨーイングによる影響に対応するための必要幅員W(y)の試算結果

ヨーイングによる影響に対応するための必要幅員W(y) は,式(17)でのヨーイングによる最大蛇行量(片側)によ り算定することができる.

$$W(y) = U \int_0^{T_y/4} \sin\varphi(t) dt = \frac{1}{4} U T_y \sin\varphi_0$$
(17)

ここに,

- W(y):ヨーイングによる影響に対応するための必要 幅員(m)
 - U: 航海速力 (m/s)
 - T_{v} :ヨーイング周期 (s)

$$\varphi_0$$
:最大ヨーイング角度(°)

 $\varphi(t)$:時刻 t におけるヨーイング量 $\varphi(t) = \alpha \sin(2\pi t/T)$ (m)

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin\left(2\pi t/T_y\right)$$
 (m)

対象船型のヨーイング周期及び最大ヨーイング角度は 不明なため、本研究における必要航路幅員の試算では、 「技術基準」において記載されている安全側の値として、 ヨーイング周期 12s、最大ヨーイング角度 4°と仮定した. よって、ヨーイングによる影響に対応するための必要幅 員W(y)は、式(17)により 0.8m と算定される. (5)風と潮流及びヨーイングによる影響に対応するための 必要幅員W(β,y)の試算結果

風と潮流及びヨーイングによる影響に対応するための 必要幅員*W_m(β,y)*は,式(18)により算定することができる.

$$W_m(\beta, y) = W(\beta) + 2W(y)$$

$$= L_{OA} \sin\beta + B\cos\beta + 0.5UT_y \sin\varphi_0 \tag{18}$$

ここに,

- *W_m*(β,y):風と潮流及びヨーイングによる影響に対応
 するための必要幅員(m)
 - W(β):風と潮流による影響に対応するための必要 幅員(m)
 - W(y):ヨーイングによる影響に対応するための必要幅員(m)

式(18)による,対象3船型の風と潮流及びヨーイングに よる影響に対応するための必要幅員*W*(β,y)の試算結果を **表-3.9**に示す.

半載状態においては,風圧抵抗の増加による航路幅員の増加が見られるが,その程度は1.3m程度と試算された.

表-3.9 風と潮流及びヨーイングによる影響に対応するための必要幅員W(β,y)の試算結果

船 型	積載状態	$W(\beta)$ (m)	W(y) (m)	$W(\beta,y)$ (m)
超大型バルカー	満載	83.4	0.8	85.0
(Capesize)	半載	84.7	0.8	86.3

3.2.2 横偏位を認知するための必要幅員W_m(S)の試算結 果

D・GPS (ディファレンシャル GPS) により横偏位を認 知する場合の必要幅員 $W_m(D \cdot GPS)$ は式(19)により算定す ることができる.

$$W_m(D \cdot GPS) = 0.5B \ (m) \tag{19}$$

ここに,

B:船幅 (m)

横偏位を認知するための必要幅員 $W_m(S)$ は,目視または レーダにより航路両舷浮標を利用して横偏位を認知する 場合の必要幅員 $W_m(\alpha)$, $W_m(R)$ により算定するのが一般的 であるが、その場合、実際の港湾における航路両舷浮標 間距離 W_{bouy} の値が必要となる.また、導標(導灯)を利 用して横偏位を認知する場合の必要幅員 $W_m(L)$ を算定す るためには、実際の導標(導灯)の高さや設置間隔の値 が必要である.

そのため、本研究における必要航路幅員の試算では、 これらの値は使用せず D・GPS を利用して横偏位を認知す る場合の必要幅員 $W_m(D \cdot GPS)$ を、横偏位を認知するため の必要幅員 $W_m(S)$ として試算を行った.

式(19)による,対象3船型のD·GPSを利用して横偏位を認知する場合の必要幅員*W_m(D·GPS*)の試算結果を表-3.10に示す.

表-3.10 GPS を利用して横偏位を認知する場合の必要幅員Wm(D·GPS)の試算結果

船 型	積載状態	<i>B</i> (m)	$W_m(D \cdot GPS)$ (m)
超大型バルカー	満載	45.0	22.5
(Capesize)	半載	45.0	22.5

3.2.3 基本操船幅員Wmの試算結果

基本操船幅員*W_m*は, 次の2つの要素から求めることができる(「技術基準」P772).

- W_m(β,y):風と潮流及びヨーイングによる影響等に対応するための必要幅員
- 2) W_m(S): 横偏位を認知するための必要幅員

ここで,基本操船幅員 W_m は、中心線からの片側を対象 とした幅員の最大量として、式(20)により算定することが できる.

$$0.5W_m = W_m(S) + 0.5W_m(\beta, y)$$
(20)

したがって、式(21)により基本操船幅員 W_m を算定することができる.

$$W_m = 2W_m(S) + W_m(\beta, y) \tag{21}$$

式(21)による,対象船型の基本操船幅員Wmの試算結果 を表-3.11に示す.

半載時の方が満載時よりも基本操船幅員が約1.3m大き いという結果となった.

表-3.11 基本操船幅員Wmの試算結果

船 型	積載状態	$L_{OA}(\mathbf{m})$	<i>B</i> (m)	$W(\beta, y)$ (m)	W(S) (m)	$W_{m}(\mathbf{m})$	W_m/B
超大型バルカー (Capesize)	満載	289.0	45.0	85.0	22.5	130.0	2.89
	半載	289.0	45.0	86.3	22.5	131.3	2.92

3.3 側壁影響対応幅員Wbの試算結果

対象船型の側壁影響対応幅員W_bの試算結果を以下に示 す.なお、本研究では、側壁形状を直立壁(片側)と想 定し、側壁形状に基づく側壁影響対応幅員の修正は行っ ていない.

船舶が側壁の近くを航行する場合,図-3.6 に示すよう に,船舶に対して横力と回転モーメントの流体力が外力 として作用する.そのため、この外力に対して当舵角δの 上限値でバランスを取るために必要となる側壁からの距 離を側壁影響対応幅員*W*_bとして算定する(「技術基準」 P786~793).なお,側壁影響は通常の外力と比べて長時 間にわたり連続的に作用することから,当舵角δの上限値 は通常の外力に対して用いる 15°よりさらに低い 5°とす る.



図-3.6 側壁影響対応幅員の考え方

(1)直立壁(片側)により船体に働く横力・回転モーメントの試算結果

貴島他⁷による図-3.7から、それぞれの S_P/L (= S_{Pb}/L) 値に応じた側壁近傍を航行する船体に作用する横力 C_F 及 び回転モーメント C_M 値を読み取ることができる.ここで, C_F (= C_{Fb}), C_M (= C_{Mb})は,式(22)により定義される値で ある.

$$C_{Fb} = \frac{F_b}{0.5\rho_w L dU^2}$$

$$C_{Mb} = \frac{M_b}{0.5\rho_w L^2 dU^2}$$

$$(22)$$

ここに,

S_{Pb}:船体中心線から側壁までの距離(図-3.7ではS_P) (m)

- L: 垂線間長 (= L_{PP}) (m)
- F_b: 側壁近傍を航行する船体に作用する横力(N)
- C_{Fb}: 側壁近傍を航行する船体に作用する横力の無次 元値
- $M_b: 側壁近傍を航行する船体の作用する回転モーメント (N・m)$
- *C_{Mb}*: 側壁近傍を航行する船体に作用する回転モーメントの無次元値
 - U:航海速力(m/s)
 - d:対象船舶の係船状態等の静水状態における最大 喫水(m)
- ρ_w :海水密度 (kg/m³)





図-3.7 側壁近くを航行する船舶の吸引力及び反発モーメント⁷⁾ (この図において $S_P = S_{Pb}$)

図-3.7より, *S_{Pb}/L*=0.1, 0.2, 0.3 に対応した*C_F*(=*C_{Fb})値 及び<i>C_M*(=*C_{Mb})値は表-3.12 に示すとおり読み取ることが できる.ここで,読み取る値は,定常状態(<i>S'_T*=*S_T/L*>1.5) を対象としている.

表-3.12 $C_F(=C_{Fb})$ 及び $C_M(=C_{Mb})$ の読み取り値

		S_{Pb}/L								
	0.1	0.2	0.3							
$C_F(=C_{Fb})$	-0.044	-0.021	-0.012							
$C_M(=C_{Mb})$	0.0050	0.0012	0.0002							

(2)平衡状態での運動方程式に基づく当舵角δの試算結果 舵角δ,漂流角βにおいて航行する船舶の平衡状態の運 動方程式は,式(23)により示される.

$$-C_{Fb} + Y'_{\beta}\beta + Y'_{\delta}\delta = 0$$

$$-C_{Mb} + N'_{\beta}\beta + N'_{\delta}\delta = 0$$
 (23)

この方程式から,式(24)により舵角*δ*,漂流角*β*を算定することができる.

$$\delta = \frac{C_{Mb}Y'_{\beta} - C_{Fb}N'_{\beta}}{Y'_{\beta}N'_{\delta} - Y'_{\delta}N'_{\beta}}$$

$$\beta = -\frac{C_{Mb}Y'_{\beta} - C_{Fb}N'_{\beta}}{Y'_{\beta}N'_{\delta} - Y'_{\delta}N'_{\beta}}$$
(24)

ここに,

- δ : 舵角 (rad)
- β:漂流角 (rad)
- C_{Fb}: 側壁近傍を航行する船体に作用する横力の無次 元値
- C_{Mb}: 側壁近傍を航行する船体に作用する回転モーメントの無次元値
- Y'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受け る横方向への反力係数Y₈の無次元値

表-3.13 当舵角δの試算結果(満載時)

		S_{Pb}/L			
	0.1	0.2	0.3		
C _{Fb}	-0.044	-0.021	-0.012		
C _{Mb}	0.0050	0.0012	0.0002		
Y'_{β}	1.612	1.612	1.612		
N' _β	0.562	0.562	0.562		
Y'_{δ}	-0.0699	-0.0699	-0.0699		
N'_{δ}	0.0350	0.0350	0.0350		
δ (°)	19.629	8.224	4.230		

- N'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける回頭反力モーメント係数N_βの無次元値
- Y'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する横力係数Y_δ の無次元値
- N'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する舵力モーメント係数N_δの無次元値

式(24)による,対象3船型のS_{Pb}/L=0.1,0.2,0.3におけ る当舵角δの試算結果を表-3.13~表-3.14に示す.

(3)必要当舵角が 5°となる側壁影響対応幅員W_bの試算結 果

ここで、側壁影響対応幅員 W_b を求めるために必要となるのは、当舵角 δ =5°に対応する S_{Pb}/L の値であるが、表 -3.14~表-3.15に示した S_{Pb}/L に対応する当舵角 δ の試算 結果は δ =5°となっていない、そこで図3.8~図-3.9に示 す回帰式を作成し、対象船型の当舵角 δ =5°に対応する S_{Pb}/L を求めた、

さらに、その結果から式(25)により、側壁影響対応幅員 W_bを算定した.その結果を表-3.15に示す.

$$W_b = S_{Pb} - 0.5B$$
 (25)

ここに, *W_b*:側壁影響対応幅員(m) *S_{Pb}*:船体中心線から側壁までの距離(m) *B*:対象船舶の船幅(m)

半載時の方が満載時よりも側壁影響対応幅員が約 9m 小さいという結果となった.本検討では直立壁(水面ま で壁がある状態)を対象に試算を行ったが,航路内と航 路外の水深差がより小さい場合や法面勾配が緩やかなに は,側壁対応幅員自体の数値が減少するため満載時・半 載時の差は小さくなる.



	S_{Pb}/L			
	0.1	0.2	0.3	
C_{Fb}	-0.044	-0.021	-0.012	
C_{Mb}	0.0050	0.0012	0.0002	
Y' _β	1.305	1.305	1.305	
N'_{β}	0.407	0.407	0.407	
Y'_{δ}	-0.1021	-0.1021	-0.1021	
N'_{δ}	0.0510	0.0510	0.0510	
δ (°)	12.942	5.357	2.725	

表-3.14 当舵角るの試算結果(半載時)



表-3.15 側壁影響対応幅員Whの試算結果

船 型	積載状態	$L_{PP}(\mathbf{m})$	<i>B</i> (m)	S_{Pb}/L	$S_{Pb}(\mathbf{m})$	$W_{b}(\mathbf{m})$	W_b/B
超大型バルカー	満載	279.0	45.0	0.269	75.1	52.6	1.17
(Capesize)	半載	279.0	45.0	0.237	66.2	43.7	0.97

3.4 行き会い影響対応幅員W。の試算結果

対象船型の行き会い影響対応幅員Wcの試算結果を以下 に示す.

(1)行き会い状態において船体に働く横力及び回転モーメントの試算結果

「技術基準」(P796) より, *S_{Pc}/L*=0.3, 0.4, 0.5 に対応した*C_M*(=*C_{Mc}*)の最大値は**表**-3.16に示すとおり読み取ることができる.

表-3.16 C _M (=C _{Mc})の読み取り	値
--	---

	S_{Pc}/L		
	0.3	0.4	0.5
$C_M(=C_{Mc})$	0.023	0.015	0.011

(2)平衡状態での運動方程式に基づく当舵角るの試算結果

当舵角δ, 漂流角βにおいて航行する船舶の平衡状態の 運動方程式は,式(26)により示される.また,行き会い影響の場合は,連続的な影響を受ける側壁影響の場合と異なり,影響を受ける時間が比較的短いことから,船舶が 直進状態から急激に定常値の漂流角に達することは無い と考えられる.この場合,漂流角の発達は殆ど無いので, $\beta=0$ とすることで,式(27)により示される.

$$-C_{Fc} + Y'_{\beta}\beta + Y'_{\delta}\delta = 0$$

$$-C_{Mc} + N'_{\beta}\beta + N'_{\delta}\delta = 0$$
 (26)

$$-C_{Mc} + N'_{\delta}\delta = 0 \tag{27}$$

したがって,式(28)により当舵角δを算定することがで きる.

$$\delta = \frac{C_{Mc}}{N'_{\delta}} \tag{28}$$

ここに,

- $\delta:$ 舵角 (rad)
- β:漂流角 (rad)
- *C_{Fc}*: 行き会い航行において船体に作用する横力の
 無次元値
- C_{Mc}: 行き会い航行において船体に作用する回転モ ーメントの無次元値
- Y_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける 横方向への反力係数Y_βの無次元値

- N'_β:船体が漂流角βで斜航するときに流体から受ける
 回頭反力モーメント係数N_βの無次元値
- Υ_δ: 舵角δの場合において舵が発生する横力係数Y_δの 無次元値
- N'_δ: 舵角δの場合において舵が発生する舵力モーメン ト係数N_δの無次元値

式(28)による,対象船型の*S_{Pc}/L*=0.3, 0.4, 0.5 におけ る当舵角δの試算結果を表-3.17~表-3.18 に示す.

(3)必要当舵角が 15°となる行き会い影響対応幅員W_cの試 算結果

ここで、行き会い影響対応幅員 W_c を求めるために必要 となるのは、当舵角 δ =15°に対応する S_{Pc}/L の値であるが、

		S_{Pc}/L				
	0.3	0.4	0.5			
C _{Mc}	0.023	0.015	0.011			
Y' _β	1.612	1.612	1.612			
N'β	0.562	0.562	0.562			
Y' _δ	-0.0699	-0.0699	-0.0699			
N'_{δ}	0.0350	0.0350	0.0350			
δ (°)	37.652	24.555	18.007			

表-3.17 当舵角るの試算結果(満載時)

$\mathbf{x} = 0$ $\mathbf{x} = 0$ $\mathbf{x} = 0$	表-3.	18	当舵角δの試算結果	(減載時)
--	------	----	-----------	-------

	S_{Pc}/L				
	0.3	0.4	0.5		
C _{Mc}	0.023	0.015	0.011		
Y'_{β}	1.689	1.689	1.689		
N' _β	0.585	0.585	0.585		
Y' s	-0.0730	-0.0730	-0.0730		
N'_{δ}	0.0365	0.0365	0.0365		
δ (°)	25.820	16.839	12.349		

表-3.17~表-3.18 に示した S_{Pc}/L に対応する当舵角 δ の試 算結果は δ =15°となっていない.そこで図-3.10~図-3.11 に示す回帰式を作成し,対象船型の当舵角 δ =15°に対応す る S_{Pc}/L を求めた.その結果から式(29)により,行き会い 影響対応幅員 W_c を試算した.その結果を表-3.19に示す.

$$W_c = S_{Pc} - (0.5B + 0.5B) = S_{Pc} - B$$
⁽²⁹⁾

ここに,

W_c: 行き会い影響対応幅員(m)*S_{Pc}*: 船体中心線間の距離(m)

B:船幅(m)

側壁影響対応幅員等と同様に,満載時よりも半載時で の行き会い影響対応幅員が小さい結果となった.



図-3.10 *S_{Pc}/L−δ*(満載時)



図-3.11 S_{Pc}/L-δ (半載時)

表-3.19 行き会い影響対応幅員Wcの試算結果

船 型	積載状態	$L_{PP}(\mathbf{m})$	<i>B</i> (m)	S_{Pc}/L	$S_{Pc}(\mathbf{m})$	$W_{c}(\mathbf{m})$	W_c/B
超大型バルカー	満載	279.0	45.0	0.516	143.8	98.8	2.20
(Capesize)	半載	279.0	45.0	0.448	125.0	80.0	1.78

3.5 追い越し影響対応幅員*W_{ov}*の試算結果

対象船型の追い越し影響対応幅員*W_{ov}*の試算結果を以下に示す.

(1)追い越し状態において船体に働く横力・回転モーメン トの試算結果

「技術基準」(P799) より, *S_{Pov}/L*=0.5, 0.6, 0.7 に対応した*C_M*(=*C_{Mov})値は表-3.20 に示すとおり読み取ることができる.*

表-3.20 C_M(=C_{Mov})の読み取り値

		S_{Pc}/L	
	0.5	0.6	0.7
$C_M (= C_{Mov})$	-0.0190	-0.0144	-0.0111

(2)平衡状態の運動方程式に基づく当舵角δの試算結果

当舵角 δ , 漂流角 β において航行する船舶の平衡状態の 運動方程式は,式(30)により示される.また,追い越し影 響の場合は,行き会い影響と同様に,影響を受ける時間 が比較的短いことから,船舶が直進状態から急激に定常 値の漂流角に達することは無いと考えられる.この場合, 漂流角の発達は殆ど無いので, $\beta=0$ とすることで,式(31) により示される.

$$-C_{Fovi} + Y'_{\beta i}\beta_{i} + Y'_{\delta i}\delta_{i} = 0$$

$$-C_{Movi} + N'_{\beta i}\beta_{i} + N'_{\delta i}\delta_{i} = 0$$

$$(30)$$

$$-C_{Movi} + N'_{\delta i}\delta_i = 0 \tag{31}$$

したがって,式(32)により当舵角δ_iを算定することがで きる.

$$\delta_i = \frac{C_{Movi}}{N'_{\delta i}} \tag{32}$$

ここに,

C_{Fovi}: 追い越し航行において船舶 *i* の船体に作用す る横力の無次元値

- *C_{Movi}*: 追い越し航行において船舶 *i* の船体に作用する回転モーメントの無次元値
 - Y'βi: 船舶iの船体が漂流角βで斜航するときに流体 から受ける横方向への反力係数Ygの無次元値
 - N'_{βi}:船舶iの船体が漂流角βで斜航するときに流体 から受ける回頭反力モーメント係数N_βの無次 元値
 - Y'_{δi}: 舵角δの場合において船舶 i の舵が発生する横 力係数Y_{δi}の無次元値
 - N'_{δi}: 舵角δの場合において船舶 i の舵が発生する舵 カモーメント係数N_{δi}の無次元値
 - $\delta: 舵角$ (rad)
 - β:漂流角 (rad)

式(32)による,対象船型の*S_{Pov}/L*=0.5,0.6,0.7 におけ る当舵角δの試算結果を表-3.21~表-3.22 に示す.

 (3)必要当舵角が 15°となる追い越し影響対応幅員Wovの試 算結果

ここで,追い越し影響対応幅員 W_{ov} を求めるために必要 となるのは、当舵角 δ =15°に対応する S_{Pov}/L の値であるが、 表-3.21~表-3.22に示した S_{Pov}/L に対応する当舵角 δ の試 算結果は δ =15°となっていない.そこで図-3.12~図-3.13 に示す回帰式を作成し、対象船型の当舵角 δ =15°に対応す る S_{Pov}/L を求めた. さらに、その結果から式(33)により、 追い越し影響対応幅員 W_{ov} を試算した. その結果を表 -3.23に示す.

$$W_{ov} = S_{Pov12} - (0.5B + 0.5B) = S_{Pov12} - B$$
(33)

ここに, *W_{ov}*:追い越し影響対応幅員(m) *S_{Pov12}*:船体中心線間の距離(m) *B*:船幅(m)

側壁影響対応幅員等と同様に,満載時よりも半載時で の追い越し影響対応幅員が小さい結果となった.



表-3.21 当舵角δの試算結果(満載時)

表3.22	当舵角δの試	算結果((半載時)
-------	--------	------	-------

	S_{Pov}/L			
	0.5	0.6	0.7	
C _{mov}	-0.019	-0.014	-0.011	
Y'_{β}	1.689	1.689	1.689	
N'_{β}	0.585	0.585	0.585	
Y'_{δ}	-0.0730	-0.0730	-0.0730	
N'_{δ}	0.0365	0.0365	0.0365	
δ (°)	21.345	16.178	12.470	



表-3.23 追い越し影響対応幅員Wowの試算結果

船 型	積載状態	$L_{PP}(\mathbf{m})$	<i>B</i> (m)	S_{Pov}/L	$S_{Pov}(\mathbf{m})$	$W_{ov}(\mathbf{m})$	W_{ov}/B
超大型バルカー	満載	279.0	45.0	0.743	207.2	162.2	3.60
(Capesize)	半載	279.0	45.0	0.657	183.2	138.2	3.07

3.6 必要航路幅員Wの試算結果と考察

3.2~3.5 にて算出した各影響幅員(基本操船幅員 W_m , 側壁影響対応幅員 W_b , 行き会い影響対応幅員 W_c , 追い越し影響対応幅員 W_{ov})の算出結果を表-3.24 に示す.

式(1),式(2)及び式(3)による,本研究で仮定した航行環 境条件における対象船型の必要航路幅員Wの試算結果を 表-3.25 に示す.

各幅員の算定において基本とする運動方程式は同一で ある.外力に対し船舶は舵を切ることでバランスを保と うする.この際の船体の応答の度合いを方程式上で表現 したのが表-3.1で算定した流体力係数である.

基本操船幅員W_mは半載状態の方が若干大きな値となった.これは半載の場合,船体が上昇(喫水dが小さくなる)し,風圧面積が大きくなることで外力が増加し, 漂流角β₁の値が大きくなったことによる.流体力係数の 変化により船舶の外力に対する応答の度合いも変化して いるが,外力の影響がそれを上回ったと考えられる.

その他の影響幅員(側壁影響対応幅員 W_b ,行き会い影響対応幅員 W_c ,追い越し影響対応幅員 W_{ov})は半載状態の 方が小さい値となった.これらの算定においては、減載 した場合でも外力は変化しないが,減載状態では船舶の 流体力係数が変化し,より少ない当舵角で外力に対応で きるためであると考えられる.その結果,側壁や他船と の距離が満載時より小さくても安全に航行することが 出来る.

この結果,必要航路幅員Wは、本試算においては単航路・往復航路・往復+追い越し航路のいずれの場合も満載時に比べて半載時の方が小さくなる結果となった.

表-3.24 各影響幅員の試算結果

船 型	積載状態	L _{OA} (m)	L _{PP} (m)	<i>B</i> (m)	<i>d</i> (m)	$W_{m}(\mathbf{m})$	$W_{b}(\mathbf{m})$	$W_{c}(\mathbf{m})$	$W_{ov}(\mathbf{m})$
超大型バルカー (Capesize)	満載	289.0	279.0	45.0	17.8	130.0	52.6	98.8	162.2
	半載	207.0	279.0		12.2	131.3	43.7	80.0	138.2

表-3.25 必要航路幅員Wの試算結果

船 型	積載状態	L _{OA}	L_{PP}	B	d	単舟	抗路	往復	航路	往 追い越	复+ し航路
		(m)	(m)	(m)	(m)	$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}	$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}	$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}
超大型バルカー	満載	289.0	279.0	45.0	17.8	235.1	0.81	463.8	1.60	1,048.1	3.63
(Capesize)	半載	207.0	279.0	45.0	12.2	218.6	0.76	429.9	1.49	968.8	3.35

3.7 必要航路幅員Wの試算結果(K値=7)

これまでの航行環境条件から船速を3.4ktに落とし風の 影響が大きい場合(K値:風速/船速比=7)を想定して航路 幅員,航路幅を試算した結果を表-3.26,表-3.27,図-3.14 に示す.船速を減じているため,基本操船幅員のみでな く側壁影響幅員等の他の幅員の数値も変化している.図 -3.14から満載時,減載時ともに船速を落としたことによ り風の影響が顕著となる.単航路で側壁影響幅員のみを 考える場合,満載時は280.1(m),半載時は268.6(m)とな り満載時の方がやや大きいがこれらの差は小さくなる.

表-3.26 各影響幅員の試算結果(K 値=7)

船 型	積載状態	L _{OA} (m)	L _{PP} (m)	<i>B</i> (m)	d (m)	$W_m(\mathbf{m})$	$W_{b}(\mathbf{m})$	$W_{c}(\mathbf{m})$	$W_{ov}(\mathbf{m})$
超大型バルカー (Capesize)	満載	289.0	279.0	45.0	17.8	175.0	52.6	98.8	162.2
	半載	207.0	279.0		12.2	181.3	43.7	80.0	138.2

表−3.27 必要航路幅員Wの試算結果(K 値=7)

船 型	積載状態 <i>L_{OA}</i> (m)	L _{OA}	$\begin{array}{c} OA \\ m \end{pmatrix} \qquad \begin{array}{c} L_{PP} \\ m \end{pmatrix} \\ (m) \end{array}$	<i>B</i> (m)	<i>d</i> (m)	単航路		往復航路		往復+ 追い越し航路	
		(m)				$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}	$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}	$W\left(\mathbf{m} ight)$	W/L_{OA}
超大型バルカー (Capesize)	満載	289.0	279.0	45.0	17.8	280.1	0.97	553.9	1.92	1,228.4	4.25
	半載	207.0	279.0		12.2	268.6	0.93	529.9	1.83	1,168.8	4.04



図-3.14 各影響幅員, 航路幅(往復航路)の比較

3.8 各影響幅員の試算結果(船型別)

Capesize 以外の船型として,30万DWT クラス(VLOC) と 10万DWT クラスバルクキャリアの各影響幅員につい て, Capesize と同じ航行環境条件(K 値=3.1)で試算した 結果を表-3.28に示す.3船型の各影響幅員について比較 した結果を図-3.15に示す.

30万 DWT クラス (VLOC), 10万 DWT クラスバルク キャリアともに、基本操船幅員 W_m は半載状態の方が若干 大きな値、その他の影響幅員 (W_b , W_c , W_{ov}) は半載状 態の方が小さな値となっており、Capesize と同様の傾向が 見られる.

本研究の試算によれば、半載の場合の航路幅員は満載 時よりも同程度ないしは小さくなっている.しかしこれ は風速等の航行条件や側壁の形状等の条件によっても変 化し得る.半載時の航路計画については、今後本手法に より実際の港湾でのケーススタディを行うことで検討を 深める必要がある.

表-3.28	各影響幅員	の試算結果	(船型別)
--------	-------	-------	-------

船 型	積載状態	L _{OA} (m)	L _{PP} (m)	<i>B</i> (m)	<i>d</i> (m)	$W_{m}(\mathbf{m})$	$W_{b}(\mathbf{m})$	$W_{c}(\mathbf{m})$	$W_{ov}(\mathbf{m})$
30万DWTクラス VLOC	満載	327.0	318.0	55.0	21.4	155.0	57.0	107.0	177.8
	半載	527.0	510.0		14.7	155.7	53.1	84.6	143.5
10万DWTクラス バルクキャリア	満載	240.0	236.0	38.0	14.5	109.5	42.3	79.1	129.8
	半載	240.0	236.0		9.9	111.7	33.6	77.2	101.5



4. 鉛直方向の挙動

超大型バルク船の減載状態における鉛直方向の挙動に ついて把握するため、「技術基準」(第4編第3章 水域施 設 P766~770)で規定されている第2区分の性能照査によ る必要航路水深の算定手法に基づき、満載時と減載時に おける船舶挙動の違いを分析した.

4.1 航路水深の算定手法

第2区分における必要な航路水深は,式(34)により算定 することできる.

$$D = d + D_1 + \max(D_2, D_3) + D_4$$
(34)

ここに,

- D : 航路水深(m)
- d :対象船舶の係船状態等の静水状態における
 最大喫水 (m)
- D₁: 航走中の船首沈下量(m)
- D₂: Heaving と Piching による船首尾沈下量(m)
- D₃: Heaving と Rolling による船底ビルジ部沈下量(m) D₄: 余裕水深(m)
- (1) D₁は,式(35)より算定することができる.

$$D_{1} = \left(0.7 + 1.5 \frac{d}{D}\right) \left(\frac{C_{b}}{L_{pp}/B}\right) \frac{U^{2}}{g} + 15 \frac{d}{D} \left(\frac{C_{b}}{L_{pp}/B}\right)^{3} \frac{U^{2}}{g} \quad (35)$$

ここに,

- D : 航路水深(m)
- d :対象船舶の係船状態等の静水状態における 最大喫水(m)
 L_{pp}: 垂線間長(m)
 B:船幅(m)
 C_b: ブロック係数
 DT:対象船舶の排水トン(t)
 γ:海水の密度(t/m³)
 U:航海速力(m/s)
 g: 重力加速度(m/s²)

(2)D₂は, うねり等の波浪の波長: λ >0.45L_{pp}の場合に技

術基準(P768の図-2.2.2)より算定することができる.

(3)D₃は、対象船舶の固有横揺周期 TR と検討の対象とな るうねり等の波浪と対象船舶との出会い周期 TE がほぼ 等しい場合(図-4.1)に式(36)により算定できる.

$$D_{3} = 0.7 \left(\frac{H_{1/3}}{2} \right) + \left(\frac{B}{2} \right) \sin \Theta$$

$$\Theta = \mu \gamma \Phi$$

$$\Phi = 360 \left(0.35 H_{1/3} / \lambda \right) \sin \psi$$
(36)



図-4.1 D₃の発生状況

ここに,

D₃: Heaving と Rolling による船底ビルジ部沈下量 (m)

- H_{1/3}:うねり等の波浪の有義波高(m)
- B:船幅 (m)
- $\Theta:$ 対象船舶の最大横揺角度(°)
- μ:規則波による強制横揺れ倍率
- γ:有効波傾斜係数
- Φ:船首尾方向に対して直角にはかった表面波の最大波 傾斜角(°)
- $\lambda:$ うねり等の波浪の波長(m)
- Ψ:船舶の進行方向と検討の対象となるうねり等の波浪 との出会い角度(°)

①TRとTEは,式(37),(38)により算定することができる.

$$TR = 0.8 B / (GM)^{0.5}$$
 (37)

$$TE = \lambda / (\lambda / TW + U \cos \psi)$$
⁽³⁸⁾

ここに,

- TR:対象船舶の固有横揺周期(s)
- TE:検討の対象となるうねり等の波浪と対象船舶との 出会い周期(s)
- B:船幅(m)
- GM:船の重心と傾心の距離(m)
- TW:うねり等の波浪の周期(s)
- λ: うねり等の波浪の波長(m)
- U:航海速力(m/s)
- Ψ:船舶の進行方向と検討の対象となるうねり等の波浪 との出会い角度(°)
- 船の重心と傾心の距離 GM は, GM=B/25 が適当であるとされているが, 実際の GM の値は変動することから GM は式(39)により算定される値を参考にすることができる.
 GM=a (B/25) (39) ここに、

GM:船の重心と傾心の距離(m) B:船幅(m) a:0.5~2.0

- 29 -

(4)D₄は, 舵をとった場合の船体傾斜による沈下等に対応 するための余裕であり,式(40)により算定することがで きる.

$D_4 = 0.5 \text{ (m)}$	$d \leq 10 \mathrm{m}$	
$D_4 = 0.05d$ (m)	$d > 10 \mathrm{m}$	۲ (40)

ここに,

D₄:余裕水深(m)

d :対象船舶の係船状態等の静水状態における
 最大喫水 (m)

4.2 減載状態において変化する項目

4.1の算定式において L_{pp}(垂線間長), B(船幅)他の 項目は減載状態においても満載状態と比較してほぼ変化 しないことから,減載状態で変化するのは次の項目とな る.

d:対象船舶の係船状態等の静水状態における
 最大喫水(m)

C_b:ブロック係数

GM:船の重心と傾心の距離(m)

上記の項目が変化する場合, $D_1 \sim D_4$ のうち, D_2 以外の 値は変化する.ただし, D_4 は減載時のdが分かれば容易 に算定することが可能である.よって,本分析では鉛直 方向の船舶挙動を把握するため,減載時と満載時の D_1 と D_3 について算定し比較した.

ここで、D₁はトリム(航行による船舶の沈下)による 必要航路水深を算定する項目であり、この項目に影響す るのはdおよびC_bとなる.減載状態でのこれらの数値に ついて以下の通り算定した.

d:2. で示した結果に基づき貨物積載率から推計する. C_b :式(41)から算定されることから,LMで示される排 水トンに基づき喫水率と同様に貨物積載率から満載時の C_b に対する比率 (C_b 比率)を推計するモデル (C_b Model) を構築する.分析結果を4.3 に示す.

$C_b = DT/(L_{pp} \cdot B \cdot d \cdot \gamma)$	(41)
ここに,	
DT:船舶の排水トン(t)	
L _{pp} : 垂線間長(m)	
γ:海水密度	

また, D₃ はうねりから生じる船体運動による必要航路 水深を算定する項目であり,この項目に影響するのは GM である. 減載状態での GM についても LM に示されてい ることから,その GM に基づき喫水率と同様に貨物積載 率から推計するモデル (GM Model)を構築する. 分析結果を4.4 に示す.

4.3 C_bに関する分析

減載時における C_b値の推計方法について分析した結果 を以下に示す.

4.3.1 各船型のC_bに関する分析

各船型の LM から得られる Cb について 2. での喫水率

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	C _b	貨物積載 率	C _b 比率(満載 C _b に対する比 率)
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 C _b
1	0	0.812	0.000	0.935
2	49,267	0.823	0.168	0.947
3	97,169	0.833	0.332	0.959
4	146,386	0.840	0.500	0.967
5	195,698	0.854	0.668	0.984
6	243,555	0.863	0.832	0.993
7	292,772	0.869	1.000	1.000

表-4.1 LM から抽出した C_b(VLOC)

表-4.2	LM から抽出し	た C _b (17	万 DWT 糸	汲 Capesize)
-------	----------	----------------------	---------	-------------

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	C _b	貨物積載 率	C _b 比率(満載 C _b に対する比 率)
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 C _b
1	0	0.806	0.000	0.950
2	146,441	0.131	0.876	0.994
3	148,799	0.131	0.890	0.994
4	128,100	0.130	0.767	0.988
5	76,743	0.127	0.459	0.968
6	69,698	0.127	0.417	0.965
7	78,913	0.127	0.472	0.969
8	69,886	0.127	0.418	0.965
9	167,108	0.132	1.000	1.000
10	140,701	0.130	0.842	0.992
11	164,750	0.132	0.986	1.000
12	167,108	0.132	1.000	1.000
13	164,750	0.132	0.986	1.000
14	167,108	0.132	1.000	1.000
15	89,050	0.128	0.533	0.973
16	75,700	0.127	0.453	0.967
17	91,408	0.128	0.547	0.974
18	75,700	0.127	0.453	0.967
19	164,750	0.132	0.986	1.000
20	167.108	0.132	1.000	1.000

注)網掛箇所は石炭,それ以外は鉄鉱石を示す.

と同様の手法による分析により、満載時のC_b値に対する 減載状態での Cb値の比率 (Cb比率) の結果を表-4.1~4.3 に示す.これに C_b Model (貨物積載率に対応した C_b 比率 を推計するモデル)を併せて示した結果を図-4.2~4.4に 示す.

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	C _b	貨物積載 率	C _b 比率(満載 C _b に対する比 率)
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 C _b
1	0	0.817	0.000	0.949
2	83,243	0.861	0.971	1.000
3	83,243	0.860	0.971	0.998
4	85,701	0.861	1.000	1.000
5	70,129	0.849	0.818	0.985
6	72,587	0.850	0.847	0.987
7	81,821	0.860	0.955	0.998
8	77,179	0.855	0.901	0.992
9	63,145	0.844	0.737	0.980
10	53,431	0.836	0.623	0.971

表-4.3 LM から抽出した C_b (8.7 万 DWT 級 Post Panamax)

				1.2
	(A)	(B)	(A)/最大 積載貨物 重量	(B)/満載 C _b
1	0	0.817	0.000	0.949
2	83,243	0.861	0.971	1.000
3	83,243	0.860	0.971	0.998
4	85,701	0.861	1.000	1.000
5	70,129	0.849	0.818	0.985
6	72,587	0.850	0.847	0.987
7	81,821	0.860	0.955	0.998
8	77,179	0.855	0.901	0.992
9	63,145	0.844	0.737	0.980
10	53,431	0.836	0.623	0.971
11	68,952	0.848	0.805	0.985
12	64,358	0.844	0.751	0.980
13	52,706	0.835	0.615	0.969
14	44,598	0.827	0.520	0.961
15	38,081	0.837	0.444	0.971
16	45,162	0.839	0.527	0.974
17	27,949	0.832	0.326	0.966
18	21,131	0.825	0.247	0.958
19	21,049	0.826	0.246	0.959
20	49,080	0.838	0.573	0.973
21	48,998	0.842	0.572	0.977
22	42,180	0.835	0.492	0.969
23	83,243	0.861	0.971	1.000
24	85,701	0.861	1.000	1.000
25	83,243	0.861	0.971	1.000
26	85,701	0.861	1.000	1.000
27	83,243	0.859	0.971	0.997
28	83,243	0.859	0.971	0.997

注)網掛箇所は穀物,それ以外は鉄鉱石を示す.









LM から抽出した C_b と C_b Model (Post Panamax) 図-4.4

4.3.2 C_b Modelの構築

3 船型の C_b Model の結果(図-4.2~4.4)は同様の傾向 を示していることが確認されることから,2.と同様に全 船型のデータを一括して C_b Model の構築を行う.その結 果を図-4.5 に示す.

この結果から、式(42)を用いることで全船型に対して貨物積載率から C_b 値を推計することが可能となる.





図-4.5 C_b Model (全船型)

4.4 GMに関する分析

減載時における GM 値の推計方法について分析した結 果を以下に示す.

4.4.1 各船型の GM に関する分析

各船型のLMから得られるGMについて2.での喫水率 と同様の手法により,満載喫水(d)に対する減載状態で のGM値の比率(GM/d)の結果を表-4.4~4.6に示す. これにGM Model(貨物積載率に対応したGM値比率を推 計するモデル)を併せて示した結果を図-4.6~4.8に示す. なお,貨物積載率が同じ場合でも貨物の積載方法が違う 場合,GM値は同じにはならない.

表-4.4 GM に関する LM の結果 (VLOC)

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	GM (m)	貨物積載 率	GM/d
1	0	0.812	0.000	0.746
2	49,267	0.823	0.168	0.705
3	97,169	0.833	0.332	0.662
4	146,386	0.840	0.500	0.640
5	195,698	0.854	0.668	0.475
6	243,555	0.863	0.832	0.364
7	292,772	0.869	1.000	0.263

表-4.5 GMに関するLMの結果(17万DWT級Capesize)

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	GM (m)	貨物積載 率	GM/d
1	0	17.740	0.000	1.008
2	146,441	5.410	0.876	0.307
3	148,799	5.160	0.890	0.293
4	128,100	5.660	0.767	0.322
5	76,743	8.690	0.459	0.494
6	69,698	9.520	0.417	0.541
7	78,913	8.310	0.472	0.472
8	69,886	9.490	0.418	0.539
9	167,108	5.110	1.000	0.290
10	140,701	6.330	0.842	0.360
11	164,750	6.560	0.986	0.373
12	167,108	6.350	1.000	0.361
13	164,750	9.940	0.986	0.565
14	167,108	9.800	1.000	0.557
15	89,050	11.660	0.533	0.663
16	75,700	13.080	0.453	0.743
17	91,408	11.390	0.547	0.647
18	75,700	13.080	0.453	0.743
19	164,750	8.910	0.986	0.506
20	167,108	8.750	1.000	0.497

注)網掛箇所は石炭,それ以外は鉄鉱石を示す.

ケース No.	積載貨物 重量 (DWT)	GM (m)	貨物積載 率	GM/d
1	0	9.760	0.000	0.690
2	83,243	4.480	0.971	0.317
3	83,243	4.300	0.971	0.304
4	85,701	4.480	1.000	0.317
5	70,129	4.370	0.818	0.309
6	72,587	4.330	0.847	0.306
7	81,821	4.460	0.955	0.316
8	77,179	4.370	0.901	0.309
9	63,145	4.680	0.737	0.331
10	53,431	5.200	0.623	0.368
11	68,952	5.130	0.805	0.363
12	64,358	5.280	0.751	0.374
13	52,706	5.820	0.615	0.412
14	44,598	6.480	0.520	0.458
15	38,081	5.570	0.444	0.394
16	45,162	5.320	0.527	0.376
17	27,949	6.320	0.326	0.447
18	21,131	7.230	0.247	0.511
19	21,049	7.050	0.246	0.499
20	49,080	5.170	0.573	0.366
21	48,998	5.180	0.572	0.366
22	42,180	5.610	0.492	0.397
23	83,243	9.620	0.971	0.681
24	85,701	9.570	1.000	0.677
25	83,243	7.850	0.971	0.555
26	85,701	7.720	1.000	0.546
27	83,243	9.660	0.971	0.683
28	83,243	7.850	0.971	0.555

表-4.6 GM に関する LM の結果(8.7 万 DWT 級 Post Panamax)

注)網掛箇所は穀物,それ以外は鉄鉱石を示す.







図-4.7 LM の分析結果と GM Model (Capesize)



図-4.8 LM の分析結果と GM Model (Post Panamax)

4.4.2 GM Modelの構築

これまでの分析結果(図-4.6~4.8)について全船型の 全品目一括した結果を図-4.9に示す.図-4.9から,穀物 と石炭は同様の傾向を示しているものの鉄鉱石は異なる 傾向がみられる.これは貨物のS.F.値(表-2.13)が影響 していると考えられる.特に,鉄鉱石の貨物積載率1.0の 場合には,貨物の積載方法(各船庫に均等に積載,ある いは特定の船庫にのみ積載等)によりGM/dの値が大きく ばらつく結果となっている.



図-4.9 GM の分析結果(全船型・全品目)

4.5 減載時における鉛直方向の挙動の変化

満載時と減載時の船舶挙動について比較するため、減 載時に変化する $D_1 \ge D_3$ に着目して分析を行った.分析 方法としては、「技術基準」に基づき満載時と減載時の $D_1 \ge D_3$ を試算して、船舶挙動の変化を考察した.

対象船型とする超大型バルカー (Capesize)の諸元等は, 詳細な諸元が必要なため, 2. での LM の船舶とする. こ こでは,航行環境条件を以下のとおり設定し試算を行っ た. なお,この設定値は特定の港湾を想定して設定した ものではないが,重要なうねりの条件については実際の 港湾の数値を参照し現実的な値であることを確認した.

・うねり等の波浪の有義波高 H_{1/3}: 2.0m
 (パイロットの乗船等を考慮して設定)

 ・うねり等の波浪の周期 TW:6~14 秒 (全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)より有義波高
 2.0m±10%の1.8~2.2mのデータを抽出し設定,図-4.10)
 ・航海速力:7.0kt

・船舶の進行方向と検討の対象となるうねり等の波浪との出会い角度:90°(真横からの波浪を想定)

- ・航路外水深:15m
- ・減載時の積載状態:船倉容積率 50%(船倉容積に対し て貨物が 50%積載されている状態, 2.7 参照)



図-4.10 うねり等の波浪の有義波高と周期

詳細な設定条件を表-4.7に示す.

4.5.1 D₁の比較

D₁試算結果を表-4.7の下欄に示す.減載時のD₁は, 満載時に比べて約0.04m小さい結果であった.よって, 航走中の船首沈下量D₁は減載状態となっても殆ど変化 はないと考えられる.

	表-4.	7 設	定条件	ŁΙ	D ₁ 試算	結果
--	------	-----	-----	----	-------------------	----

	項目	満載 減載		単位	算定方法
1	船長	289		m	2.でのLMの船舶とする
2	垂線間長	27	77	m	11
3	船幅	4	5	m	11
4	満載時喫水	17	'.6	m	11
5	排水トン	191,	,074	t	11
6	満載時Cb	0.8	50		=DT/(Lpp・B・d・ γ)・・・式(41)
7	載貨重量トン(公称)	170,	,000	t	2.でのLMの船舶とする
8	載貨重量トン(最大積載貨物重量)	167,	,108	t	11
9	船倉容積	188,	,139	m3	=1.1067・載貨重量トン(公称)・・・式(6)
10	積載貨物容積	94,070		m3	=船倉容積×想定する船倉容積率(50%)
11	対象貨物	石炭			
12	積載時の比重	- 0.77		t/m3	表-2.12での中間値
13	積載貨物重量	- 72,434		t	=積載貨物容積・積載時の比重
14	想定する船倉容積率	_	0.50		対象貨物の比重が1.0未満の場合
15	設定貨物積載率	1.000	0.433		=積載貨物重量/載貨重量トン(最大積載貨物重量)
16	設定貨物積載時でのCb	0.850 0.822			=(0.0557・貨物積載率+0.9433) ・満載時Cb…式(42)
17	相当喫水率	- 0.65			=0.4724·exp(0.745·貨物積載率) …式(3)
18	相当喫水	-	11.5	m	=満載時喫水・0.4724・exp(0.745・貨物積載率) …式(3)参照
19	静止状態の船尾トリム量	_	0.5	m	=3.975 · exp(-7.001 · 相当喫水率) · 相当喫水…式(4)参照
20	静止状態の最大喫水(d)	17.6	12.0	m	=相当喫水+静止状態の船尾トリム量
21	D1	0.43	0.39	m	

4.5.2 D₃の算定と比較

「技術基準」の航路算定手法を参考に D₃ を試算することで、満載時と減載時の船舶挙動について比較した.

(1) TR と TE の試算

D₃は、対象船舶の固有横揺周期 TR と、検討の対象と なるうねり等の波浪と対象船舶との出会い周期 TE がほ ぼ等しい場合に考慮することが必要である. TR と TE を 試算した結果を以下に示す.

①TR

TR を試算するためには,まず GM を設定する必要がある.本論文では LM の GM 値から設定することにした. 表-4.8 に対象船舶の GM と貨物積載率の値を示す.これは表-4.5 の中から石炭のケースのみを示したものである.

表-4.8 より, 満載時の GM 値は貨物積載率が 1.000 の 場合の 5.11 (ケース No.9) に設定した. 減載時の GM 値 は貨物積載率が半載状態に近い 0.472 の場合の 8.31 (ケー ス No.7) に設定した. TR は式(37)より算定する. 結果は 以下のとおりで, TR の範囲は±2s とした. GM/d の数値 も合わせて示している.

半載:TR=12.49≒12s, 10s≦TR<14s 満載:TR=15.93≒16s, 14s≦TR<18s

積載貨

物重量

(DWT)

146,441

148,799

128,100

76,743

69,698

78,913

69,886

167,108

140,701

0

ケース

No.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

表-4.8 GM と貨物積載率との関係

GM

(m)

17.740

5.410

5.160

5.660

8.690

9.520

8.310

9.490

5.110

6.330

貨物

積載率

0.000

0.876

0.890

0.767

0.459

0.417

0.472

0.418

1.000

0.842

GM/d

1.008

0.307

0.293

0.322

0.494

0.541

0.472

0.539

0.360

減載時

0.290 満載時

2TE

試算の前提条件である「船舶の進行方向と検討の対象 となるうねり等の波浪との出会い角度」は90度で真横か らの波浪を想定しており、TEは式(38)より算定するため、 うねり等の波浪の周期 TW の値(6~14 秒)となる.

(2) D3の試算とその結果

D₃は、TE≒TR の場合に式(36)より算定できる.「技術 基準」においては、横揺れ角度の増幅度を示すローリン グ応答倍率 μγ は、図-4.11 での浅水域の最大値として 7.0 までの値を用いることができるとされている.

本分析では、横揺れを詳しく評価するため高木⁸⁾を参 照しTRに対応したローリング応答倍率を実際に算定し てD₃を試算した.具体的にはTRを同期円周波数(ω_e =2π/TR)に変換し、図-4.11の浅水域の曲線(点線)から ローリング応答倍率(縦軸)の数値を読み取った.

試算結果を, 表-4.9に示す. D₃が発生するうねりの周 期 TE は,減載時 10~13 秒,満載時 14 秒の場合であり, 減載時は満載時と比べてうねり周期が小さい場合に D₃が 発生する可能性があることが確認できる. D₃の数値その ものは,両者に明確な相違は認められない.



表-4.9 D₃の試算結果

うねり等の波浪の周期TW (s) =TE (真横からの波浪の場合)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	対象船舶の 固有横揺周期 TR (s)
D3(m): 減載	-	-	-	-	1.24	1.59	2.16	3.96	_	-	_	_	_	$10.00 \leq TR < 14.00$
D3(m): 満載	Ι	Ι	Ι	Ι	_		_	-	1.62	2.41	3.72	3.13	2.10	$14.00 \le TR < 18.00$
ローリング応答倍率μγ:減載					0.6	1.1	2.0	4.9		_	-			—
ローリング応答倍率μγ:満載	-	-	_	_	-	-	_	-	1.5	3.0	5.7	4.9	3.0	_

(3) D₃の試算結果についての考察

(2)の結果について,船の復元力⁹⁾の考え方から,以下 のとおり考察した.

図-4.12 に示すとおり,船は垂直に立っている場合,船の中心線上に重心Gと浮心Bが存在し,安定してつりあっているが,船が傾いた場合には浮心Bは傾いた方向に移動して,船を元の安定した状態に戻そうする.この性質を復元力という.また,傾斜時の作用線と中心線の交点が傾心Mで,そこから重心までの距離がGMであり,このGMが復元性に大きな影響を及ぼす.よって,GMの距離が長ければ,つまり重心の位置が下になるほど,復元力は強く逆に短ければ復元力は弱くなる.しかし復元力が強くなりすぎると船の横揺周期が短くなり,小刻みに揺れることになり少しの波に対しても横揺れしやすい状態になる.

図-4.6~4.8に示すとおりLMのGMの値をみると減載 時は、満載時に比べてGMの値が大きい傾向にある.こ れは減載時の復元力が満載時に比べて大きくなることを 意味する.従って、減載時は船の横揺周期が小さくなる ことで、満載時に比べて小さい波に対して横揺れしやす い状態になるため、(2)に示す結果になったと考えられる.



図-4.12⁹⁾ 船の復元力

4.5.3 本分析の航路水深への適用

4.5.1, 4.5.2 で示すとおり,「技術基準」の第2区分の 航路水深算定手法を適用して,減載時のD₁とD₃を試算 することができた.

減載時と満載時の必要航路水深を試算した結果を表 -4.10に示す.うねり等の波浪の周期は、図-4.10より、 設定した周期6~14秒の中間値である10秒で試算した. 静止状態の喫水dは、満載喫水17.6mに対して、減載時 は11.5mとかなり小さくなる.船尾トリムは図-2.28より、 満載時はほとんどなく、貨物積載率が小さくなるにつれ て大きくなることから、減載時のみ考慮することとした. 船首の沈下量 D_1 は減載時と満載時にて同程度であった. D_2 は今回の条件の場合、うねり等の波浪の波長 $\lambda <$ 0.45 L_{pp} となるため発生しない. D_3 は減載時のみ発生し、 合計値である必要航路水深は、満載に比べて減載の方が 小さくなる結果となった.

半載についてみると,第一区分を適用した場合には船 尾トリムを考慮すると

$(11.5+0.5) \times 1.2 = 14.40(m)$

となり、第一区分における「強いうねり等の波浪が想定 される外洋等の航路」を算定するための数値(最大喫水 に対する余裕水深20%)のケースとほぼ等しい値となる.

本検討では真横からの波を与えて試算しているが,今 後は様々な波浪の周期や方向などの条件を与えたケース スタディを重ねていく必要がある.

項目	減載(m)	満載(m)		
d	11.50	17.60		
船尾トリム	0.50	-		
D ₁	0.39	0.43		
D ₂	-	-		
D ₃	1.24	-		
D_4	0.60	0.88		
航路水深 D	14.23	18.91		
D/d	1.24	1.07		

表-4.10 航路水深の試算結果

5.おわりに

本研究は,超大型バルク船を対象として,「技術基準」 で規定されている,第2区分の性能照査による必要航路 水深・幅員の算定手法に基づき,減載時における船舶挙 動について基本的な分析を行ったものである.本研究の 結論は以下のとおりである.

(1)減載状態での喫水の推計方法

実際の超大型バルク船のローディングマニュアルデー タを用いて、減載状態での喫水の推計式を求めた.

(2)減載状態での水平方向の船舶挙動

減載状態においては、喫水が小さくなることで船体が 上昇して風圧面積が増え、風の影響による水平方向の挙 動は大きくなる一方で、喫水が小さくなることで流体力 係数が変化し、側壁や行き会いの影響による水平方向の 影響は小さくなることを試算した.

(3)減載状態での鉛直方向の船舶挙動

減載時は満載時と比べて、うねり等の波浪の周期 TW が小さい場合に、「検討の対象となるうねり等の波浪と対象船舶との出会い周期 TE」と「対象船舶の固有横揺周期 TR」が同程度になり、D₃(船舶の横揺れ)が発生しやすい傾向にあることを試算した.

本研究では、減載状態の航路諸元の算定を試み、その 算定が可能であることや上記(2)、(3)のように結果を考察 することができた.しかし例えば航路水深(鉛直方向) についてはD₃の算定に関して汎用的なGM値の設定とい った課題も残された.また船尾トリムに関する取扱いに ついては、さらに船舶航行の実際の考え方などを考慮し 回帰式の適用方法などを検討する必要がある.

今後の課題としては、本研究の成果を基に、超大型船 の入港が見込まれる国際バルク戦略港湾の連携港等を対 象とした、実際の港湾における航行条件や自然条件等を 考慮したケーススタディを重ね、本手法の妥当性を確認 するとともに、汎用性・適用の容易性の向上を図り、航 路計画手法としての技術基準への盛り込みに向け検討し ていく必要がある.

(2015年2月16日受付)

謝辞

本研究に際して,東京海洋大学の大津名誉教授,津金 博士(東海大学元教授),北海道大学の芳村教授,京都大 学の赤倉准教授,(一財)みなと総合研究財団の高橋客員研 究員,港湾研究部の皆様から貴重なご助言を頂きました. また,いくつかの船会社から減載時の喫水に関する貴重 なデータをご提供いただきました.ここに記して感謝の 意を表します.

参考文献

- (社)日本港湾協会,国土交通省港湾局監修:港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成19年7月),2007
- 2)赤倉泰寛,二田義規,渡部富博:北東アジアにおける 三大バルク貨物の輸送動向の分析,国土技術政策総合 研究所資料 No.525, p4, 2009
- 3)三原荘衛,山田秀哲:新訂 載貨係数表と積付実務, 1970
- 平野雅祥,高品純志,森谷周行,中村喜昭: An Experimental Study on Maneuvering Hydrodynamic Forces in Shallow Water,西部造船学会々報,第69号, 1985
- 5)藤井斉,津田達夫:自航模型船による舵特性の研究(2), 造船協会論文集,第110号,1961
- 6) 山野惟夫,斉藤泰夫:船体に働く風圧力の一推定法, 関西造船協会誌,第228号,1997
- 7) 貴島勝郎,何青:側壁近くを航行する船の操船運動, 日本造船学会論文集,第162号,1983
- 8)高木幹雄:浅海域における船体運動-その3,西部造船会々報,第54号,1977
- 9)橋本進,矢吹英雄,岡崎忠胤:操船の基礎,2012

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 834 March 2015

編集·発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは ^{〒239-0826} 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018