

# 我が国の船舶算法と復原性に関する小史

正会員 小嶋良一\*

A Historical Sketch on Ship Hydrostatic Calculation and Stability in Japan

by Ryoichi Kojima, Member

Key Words: Hydrostatic, History, Stability, Buoyancy, Bezaisen

## 1. はじめに

船が水に浮くのは浮力が作用するからという理屈は今日では誰でも理解している。浮力の原理はアルキメデスが発見したこともよく知られている。ところでそれに基づいて船舶の載貨重量や復原性を検討する方法はいつごろ誰がどのようにして考え出したのであろうか。本論文では、まず西欧におけるそれらの歴史的発展を概観し、続いて江戸期以降の我が国の造船分野ではどのように考えられていたのかを造船技術史の観点で考察してみたい。

## 2. 西欧における船舶流体静力学の歴史<sup>1)</sup>

流体静力学の基礎を作ったのは言うまでもなくアルキメデス(BC287-BC212)である。「液体中の物体は、その物体が排除した流体の重さと同じ大きさの浮力を受ける」といういわゆるアルキメデスの原理を発見した。それとともに、彼はこれと槌子の原理を組み合わせて浮体の安定性についても検討した。しかし彼の考え方は物理的には正しいが、単純形状でしかも homogeneous の浮体に限られており、船舶の復原性の検討に用いられるまでには至らなかった。

次に船舶の復原性の問題を取り上げたのは、それから1800年後に登場したフランドル生まれのS.Stevin (1548~1620)である。かれは水圧分布の考え方からアルキメデスの原理を導いたが、安定している浮体とは、浮心と重心が鉛直線上にあり、かつ重心が浮心より下にある場合と一面的な結論に達しただけであった。

16~17世紀になると、船体に大きな射撃口(gun port)が設けられるようになり、いわゆる海水流入角が減少したため、船体の重量管理を厳密に行う必要に迫られた。オランダの造船技師A.Deane(1638~1721)は、図面からフレームごとに断面形状を1/4円か矩形もしくは三角形で近似して、所定の吃水線下の断面積を求め、これを船長方向に積分し、吃水ごとの排水量を計算しておき、進水直後の船体の排水量(重量)を求め、その後の搭載可能重量を推定したとされる。また、当時オランダやデンマーク政府による、積載貨物の正確な重量把握要求に従い、オランダの数学者J.Huddeは、満載時と空載時の実船の水線面積を実測によってもとめ、これらの吃水間の船体排水量が搭載可能重量であるという考え方を示した(1652)。現在の載貨重量の考え方は、この時代にほぼ確立されたと考えられる。

さて、復原性についてはどうあったか。現在、我々が

使用しているメタセンターの概念はフランスの科学者P.Bouguer(1698~1758)によって導入された。

- (1) 直立している船の重心と浮心を通る直線と、(微小)傾斜時の浮心を通る浮力の作用線の交点がメタセンターである。
- (2) 船が安定して浮いているためには、その重心がメタセンターより下になければいけない。
- (3) メタセンターと浮心の(高さ方向の)距離は、水線面の2次モーメントを船の排水容積で割ることによって求めることができる。

など、現在の船舶の初期復原性を評価する方法が確立された。

## 3. 我が国の近世における浮力の概念

東洋で初めて浮力の概念を示したのは中国の「遠西奇器図説」であるとされる<sup>2)</sup>。この書物はスイス人イエズス会宣教師J. テレンツ(鄧玉函)(1576~1630)が中国滞在中に口述したものを、王徴が中国語に翻訳した記録である。この中に「凝体は水に在れば空に在るより軽し。これを占むる所の水の多少を視れば即ちそのこれを減ずる所の軽の多少なり」という記述があり、いわゆるアルキメデスの原理を述べていることが分かる。この書物は我が国で1685年に「国禁耶蘇書」に指定されて、一般に広まることはなかったようだが、逆に言えばそれ以前に浮力の概念は日本に紹介されていたことを意味している。

「改算記綱目大全」(1764)<sup>3)</sup>には、金の正確な密度を計測する方法に関して次のように記されている。

「金小判位の一吋四方六面の重さをためさんには方直立成る器物に金小判何十枚にてもいれ、その上に水を十分にもり、その後、水すたらざるよう右の小判を取出し、その水の減りを積もるとき、一吋四方六面の積もり何ほどと知る。是を法として取り出したる小判の重目を実としてこれを除は、小判位の金一吋四方六面の重さに程と知之。金にかぎらず積物余は是にならへ。」

これは、物体の体積を求めるために水を使ったのであるが、ここからすぐ到達できたのではと思われるアルキメデスの原理には言及していない。

浮力の概念が明確に出てくるのは文政7(1825)年、青木林宗が著した気海観瀾<sup>4)</sup>である。ここでは、物の密度を計測するには水中でその重さを測れば良いとしている。稱水術と称するその方法は次のとおりである。

「譬へば鉛と牙とあり。毎塊各々一錢なり。水中に之を稱(はか)れば、鉛は六十分錢の五十四又四分の一を為し、牙は六十分錢の二十九を為す。即ち鉛は六十分錢の五又四分の三を減じ、牙は六十分錢の三十一を減ず。(中略)試みに一個の木球を満水盆に投ずれば、その溢出する所の水は則ち其の木球の重を為す。(中略)往昔、亜而希默得(アルキメデ)始めて稱水の理を發明し、此に由り

\* 関西設計㈱

原稿受付 平成29年3月24日

春季講演会において講演 平成29年5月23,24日

©日本船舶海洋工学会

其の王冠の純金を為すや否やを驗知す。」

これによると鉛と象牙の比重はそれぞれ 10.4, 2.07 で今日一般的な値, 11.35 と 1.8~1.9 とは差異があるが、アルキメデスの原理は理解されていたことが分かる。

菱垣廻船、樽廻船が活躍した文化文政の時代でこの状況であったわけで、その考え方が我が国の造船技術に波及するにはなお程遠かったと考えて間違いない。

#### 4. 木割書等にもみる積載量の推定法

江戸期になると、船の積石数を計算するのに大工間尺という方法が用いられた。これは Fig.1 に示すように航長  $\ell$ 、肩幅  $B$ 、肩深さ  $D$  を尺で表して掛け合わせ、これを 10 で割ってその船の載貨重量（積載可能石数）を求める手法である。言い換えれば、貨物倉部の平均水線面積にその深さを掛け合わせて容積を求め、その 10 立法尺当たり 1 石の米が積めるとしたわけである。ここでは満載排水量から軽荷重量を差し引いた値が載貨重量であるという考え方は見えてこないが、問題が生じたという形跡もなく、結果的に一定の精度があったものと推定される。

因みに 1 石とは容積の単位であるが、1000 石積といえれば具体的には 1000 石分の重量の米が搭載できるという意味である。また米 1 石は 40 貫(150kgf)とされていたので、150tf の米が積めたということである。

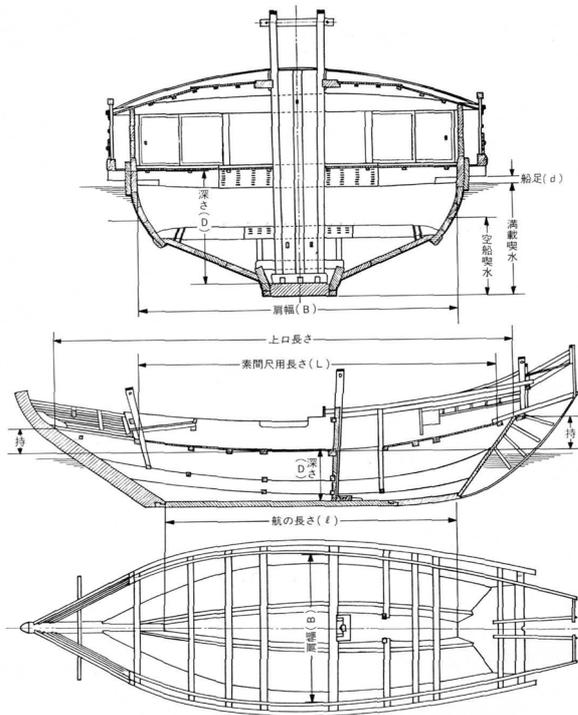


Fig.1 Principal dimension of Bezaisen<sup>5)</sup>

ところで、和船の部材寸法を設定する上でそのガイドラインとなったのが木割書である。これはたとえば、航（かわら、船底材）の長さ一尋を基準に各部材の寸法を指定したものである（これを尋掛りと呼んだ）。この他にも、帆 1 反を基準とする帆掛り、櫓 1 挺を基準とする櫓掛りなどがあった。木割書は流派ごとに異なり、代々伝えられた。以下に、木割書等で積石数（載貨重量）がどのように考慮されていたのかをみてみることにしよう。

##### 4.1 造船心得集<sup>6)</sup>

これは 19 世紀初頭の木割書であるが、積石数 DWK を

次のように定義している。Fig.1 に示す船足を  $d$  として、

$$DWK = \ell \times B \times (D - d) / 10 \quad (1)$$

貨物倉部の概略容積計算における  $D$  の代わりに  $D-d$  を用いており、物理的に正しい計算になっていないが、他の木割書でも使用されていた考え方である。また「米二十四石舥下候得は、船足壹寸浮。千石積内外の船、大概此の如し」とある。すなわち米 24 石 (3.6tf) を舥に積下ろすと、吃水が 1 寸 (3.03cm) 浅くなるということ。TPC(tons per cm immersion)が  $3.6/3.03=1.19\text{tf/cm}$  ということになる。大阪の海洋博物館「なにわの海の時空館」の実物大復元菱垣廻船「浪華丸」（大工間尺 865 石）の例によると Fig.1 の満載吃水線付近の水線面積は  $124\text{m}^2$  程度であるから、海水比重を 1.025 として  $TPC=124 \times 1.025/100=1.27\text{tf/cm}$  となっており、オーダー的には近い値を示している。この意味では吃水と搭載物件の重量とがリンクして考えられているが、浮力（排水量）の概念があったのかどうか明確でない。

##### 4.2 御廻米船心得書<sup>7)</sup>

成立は文化末(1818)年頃とされている。この史料の積石数の計算方法は(1)式と同様であるが、次のような記述が見える。

「壹才壹尺六面ヲ京升之法六四八式七ニ而割ハ、壹才之升目壹斗五升四合式勺六才内ト成、右之内五升四合余ハ碇并綱其外船具・粮米・船頭水主之所持之品々迄積石ト取、一斗五升四合式勺余之内、引之残一斗ヲ一才之升目ト取」。

1 立方尺(27.8 リットル)を 1 斗(18 リットル)で割ると、1.5426 となる。このうち 0.5426 は碇、綱その他船具・粮米・船頭や乗組員の所持品で残りが積石数であるという。

10 立方尺( $0.278\text{m}^3$ )に米 1 石 (重量 0.15tf) が積めるということは、積付率  $1.85\text{m}^3/\text{tf}$  となり、一般的な米俵の積付率  $1.67\sim 2.03$ <sup>8)</sup>から見ても妥当な数字である。

10 立方尺を排水容積と見れば、 $0.278 \times 1.025 = 0.28\text{tf}$  が排水量となり、搭載米の重量 0.15tf、残りが軽荷重量と Deadweight (DW) constant で 0.13tf ということになる。排水量 - 軽荷重量 = 載貨重量という概念に近いとも思えるが、排水量の求め方など物理的な合理性に欠ける手法であった。

##### 4.3 和泉流船作事書<sup>9)</sup>

本史料に含まれる、岩国の佐伯治平が嘉永 6(1853)年に著した「船造要用弁」の中に、次のような記述がある。

「・・・本法ハ算術ヲ以テ諸所ノ坪ヲ測知シテ、船舩亦諸道具ノ夫々量ヲ集、水力量ヲ以テ定也、弁曰、米一斗掛目四貫目ト定メ、一尺四方之坪へ一斗積ト成セハ即四貫目也、水力量ハ一尺四方へ七貫四百目積故ニ此内四貫目ヲ引キ、残三貫四百余力有り、是ヲ船舩諸道具ノ惣量トシタル者也」。

ここで坪と称しているのは 1 立方尺のことである。1 立方尺 (27.8 リットル) の水力量は七貫四百目 (27.75kgf) であるから、これに積める米 1 斗分の重量四貫目 (15kgf) をそこから引いた三貫四百目 (12.75kgf) が船体や艀装品などの合計となると言っている。

また水力之事として「水之力トスル処者空所ニ有り、(中略) 水一尺重目ト空所一尺四方の積所ノ重目ト対々也」と述べ、物体が排除した水の部分を空所と表現し、この空所に占める物体の重さが水のそれより重ければ沈

むし、軽ければ浮くとしている。「水力量」という言葉によって浮力を表しており、我が国の造船分野で初めて浮力の概念を明らかにした文書といえよう。

積載米重量／船体艀装品重量=4.0貫/3.4貫=1.18 (2) となるが、前述の御廻米船心得書のそれが、0.15tf/0.13tf=1.15で近い値を示しており、実情を反映していたのではないかと想像する。

一方、大和形船製造寸法書<sup>10)</sup>に「回船仕様書覚ト題スル書ノ抜粋」があり、ここに積石数と空船の重さの関係が示されている。それによると、

$$\text{空船重量} = 16 \times \text{大工間尺 (貫)} \quad (3)$$

とされている。例えば1000石積みの方船の場合、空船重量は16000貫となる。1000石は40000貫なので、

$$\text{積石数} / (\text{空船重量} + \text{艀装品} + \text{DW constant 等}) = 1.15 \quad (4)$$

$$\text{艀装品} + \text{DW constant} = 18,783 \text{ 貫} = 470 \text{ 石} = 70.5 \text{ tf} \quad (5)$$

復元菱垣廻船の例<sup>11)</sup>を見ると、空船重量74.6tf、艀装品その他13.4tfとなっており、(4)式によれば、積石数865石(130tf)として、DW constant等は167石(25.0tf)となる。

この当時は満載吃水線も統一されておらず、また軽荷重量の定義も曖昧で、定量的な議論は難しいが、ともかく江戸時代末期には排水量と載貨重量の関連が船大工たちに少なくとも定性的に把握され始めたのではないかと、また幕末には浮力の概念も取り入れられたのではないかとと思われる。

## 5. 弁才船の復原性

文化10(1813)年に浦賀同心組頭、今西幸蔵が著した『今西氏家船繩墨私記・坤』<sup>12)</sup>に次のような記述がある。

「風波に逢へは船横にする事なし。風波にまかせ、つかせるものなれば此所凌きにくし。(中略)船足の弱きといふは、船横に成事也。中棚能くひらけば足強し。(中略)水に卸、上棚と中棚・加敷の水をはなるをあをりのすくと言。是足の弱きと知へし。加敷ひらけば上棚水につく。是を足の強きと知るへし。」

即ち、風波に遭遇したときは船を横にして船側から風波を受けてはならず、つかせるのが良いという。「つかせる」とは、船首もしくは船尾を風波の来襲する方向に向け、帆を下ろし、あるときは碇を吊り下げてシーアンカーとして風波をやり過ごすことである。船側からの外力による傾斜やそれに伴う海水打ち込みを警戒していたことが分かる。

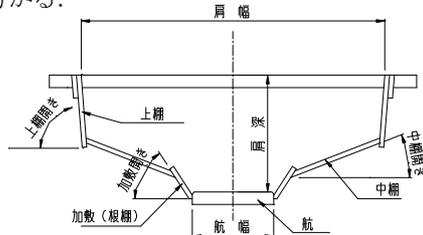


Fig.2 Hiraki (inclination) of shell plating

続いて、中棚を十分にひらけば足が強いという。棚板を「ひらく」とは、傾斜を小さくすること、水平方向に倒すことを指す (Fig.2)。因みに木割書などではこの角度を、1尺の棒を倒した時の水平面への投影長で表し、たとえば9寸といえ、 $\cos(\text{傾斜角})=0.9$ で、傾斜角は25.8degとなる。「足」は船足(吃水)を表現する場合が多いが、

ここでは復元力に近い意味で使われているようである。一般的には、こうすることによって搭載重量が増し、重心も下がる傾向にあるので、水線面の2次モーメントが同一であれば、復元力が增大することは頷ける。

さらに、和船では中棚と上棚の交点、即ちチェーンを「あをり」と呼ぶが、ここが水面上に出ると足が弱く、水面下に浸かれば足が強いとしている。「あをり」が没水すれば、水線面の2次モーメントが大きくなるのでメタセンター高さが増加し復原性が向上することを考えると納得できる。

前述のように、西欧でメタセンターの考え方を導入して船の復原性を定量的に把握し始めたのは18世紀前半のことである。江戸期の方船の船大工はもとよりこのような定量的な復原性についての概念を持っておらず、今西幸蔵のような認識が一般的であったと思われる。

そこで、ここでは江戸期の方船が実際にどの程度の復原性能を有していたかについて、当時の奉納雛形等を基に推定してみることにした。文献(13)には、雛形の一般図に加えて線図も示されているので、排水量等の計算が可能である。具体的には日本海航路で使用された北前型と太平洋航路で使用された上方型について各2隻ずつ合計4隻の雛形について検討を行った。

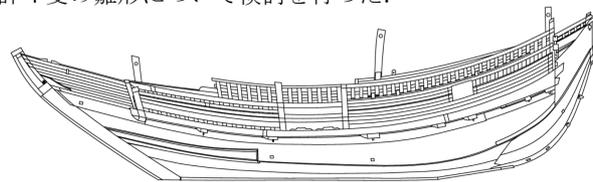


Fig.3 Kitamae-type, model dedicated to Kotohira-gu

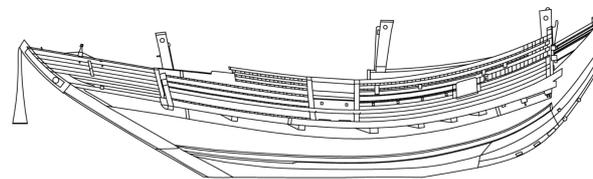


Fig.4 'Hachiman-maru', model owned by Ukon-ke

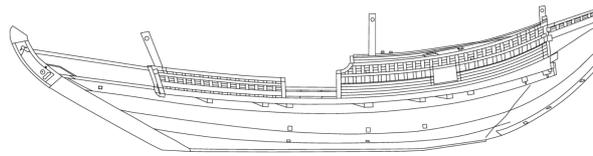


Fig.5 'Tamiyoshi-maru', model dedicated to Kotohira-gu

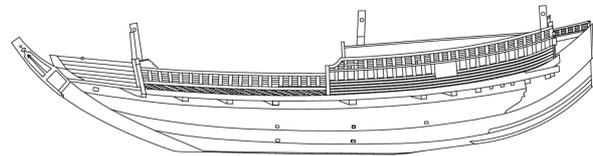


Fig.6 Model dedicated to Sakura-hachiman shrine

### ケース1：北前型 (その1)

讃岐金刀比羅宮所蔵北前型弁才船雛形である。慶応元(1865)年、小豆島の船大工の製作である。実船に忠実に作られた史料価値の高い雛形とされる (Fig.3)。

### ケース2：北前型 (その2)

福井県南越前町の「北前船主の館」右近家に展示されている「八幡丸」の雛形である。右近権左右衛門所有の弁才船雛形で、明治期の作である (Fig.4)。

### ケース3：上方型 (その1)

北前型（その1）との比較検討のため、積石数 350-360 石の規模的に同程度の弁才船として、時代はずれるが（享和 2(1802)年に讃岐金刀比羅宮に奉納された「民吉丸」を採り上げた（Fig.5）。

ケース 4：上方型（その2）

北前型（その2）との比較検討のため、積石数 1520-1530 石の規模的に同程度の弁才船として、香川県庵治町の桜八幡神社所蔵の弁才船を採り上げた。本雛形の製作年代は明らかではないが、18 世紀前期と考えられる（Fig.6）。

各対象船の主要寸法を Table 1 に示す。Table 2 はそれらの排水量、メタセンター等の計算結果である。いずれも実船換算ベースの値を示す。

Table 1 Dimensions of Bezaizen for stability evaluation

	北前		上方		北前		上方		
	讃岐金刀比羅宮 北前型 (慶応元年)	讃岐金刀比羅宮 民吉丸 (享和二年)	讃岐金刀比羅宮 民吉丸 (享和二年)	右近家 八幡丸 (明治期)	右近家 八幡丸 (明治期)	桜八幡神社 (18世紀前期)	桜八幡神社 (18世紀前期)		
(単位)	(尺)	(m)	(尺)	(m)	(尺)	(尺)	(m)		
全長	Loa	69.0	21.0	78.0	23.8	127.1	38.7	118.5	36.1
船長	L	37.1	11.3	38.2	11.6	52.2	16.1	20.0	17.2
船幅	B	18.6	5.7	17.4	5.3	28.9	8.8	26.1	8.0
船深	D	5.2	1.6	5.5	1.7	9.7	3.0	10.3	3.1
大工間尺	石	357	-	369	-	1,483	-	1,523	-
(単位)	(寸)	(deg.)	(寸)	(deg.)	(寸)	(deg.)	(寸)	(deg.)	
加算開き(標当:船体中央)		6.5	49.5	5.8	54.5	4.0	66.4	6.7	47.9
中棚開き(標当:船体中央)		9.8	12.2	9.6	16.3	9.8	11.5	8.8	28.4
上棚開き(標当:船体中央)		5.4	57.3	2.7	74.3	2.6	74.9	2.7	74.3

Table 2 Calculation results of displacement, metacenter, etc.

	W	tf	金比羅北前	民吉丸	右近八幡丸	桜八幡
排水量	W	tf	75	77	322	320
吃水	d1	m	1.73	1.74	2.81	3.01
船足(台下より)	d	m	-0.06	0.20	0.44	0.34
浮心高さ	KB	m	1.09	1.09	1.79	1.89
横メタセンター位置	TKM	m	3.07	2.83	5.14	4.16
重心高さ	KG	m	1.70	1.82	3.30	3.39
横メタセンター高さ	TGM	m	1.37	1.00	1.84	0.77
縦メタセンター位置	LKM	m	12.51	15.05	22.73	22.33
縦メタセンター高さ	LGM	m	10.80	13.22	19.43	18.94

なお Table 2 の d1 は、大工間尺に相当する載貨重量積載時の排水量に対する吃水を Hydrostatic table から求めた結果である。また重心高さ KG は、軽荷重量のそれを肩深の 1.8 倍、積荷のそれを 0.8 倍として計算している。これらから次のことが言えよう。

- 1) 横メタセンター高さ TGM は 0.77m~1.84m となっていて復原性は妥当なように見える。具体的に今日の一般貨物船と浮心やメタセンター位置で比較した結果が Table 3 である<sup>14)</sup>。いずれの係数も一般貨物船の標準値範囲以内に入っており、妥当な設計になっていると考えられる。なお、Table 3 の d は吃水を、TBM は浮心-メタセンター間距離を示す。

Table 3 Comparison on stability parameters between Bezaizen and contemporary cargo vessels

評価係数	金比羅北前	民吉丸	右近八幡丸	桜八幡	一般貨物船の標準値
C5 = KB/d	0.63	0.63	0.64	0.63	0.53~0.695
C6 = TBM x d / B <sup>2</sup>	0.11	0.10	0.12	0.11	0.085~0.120
C7 = TKM/B	0.55	0.53	0.57	0.52	0.43~0.58

- 2) 中棚の開きが小さい桜八幡の雛形の TGM は他のそれに比較して小さく、同船が今西幸蔵の言う比較的足が弱い（復原力が小さい）船になっていることがわかる。

6. 近代造船学の我が国への導入

明治 3(1870)年、横須賀製鐵所技術伝習學校「饗舎」が開設されここでフランス人教師による工学教育が開始された。その講義科目に造船学が含まれていた。1876 年のデュボン教授による講義のノート<sup>15)</sup>を見ると、材料力学

等とともに、排水量と安定性というタイトルでアルキメデスの原理や台形公式などの求積の手法が教えられていたことが分かる。また明治 10(1977)年には、後に三景艦の設計に携わる辰巳一らがシェルブールのフランス海軍造船工学応用学校に留学して、造船学の権威レイ・エミールベルタンの指導を受けることになる。同校で辰巳の残した講義ノートを見ると<sup>15)</sup> 浮体の復原性、慣性モーメントの計算、波の理論などが取り扱われていたようで現代の船舶算法に近い内容が既に教えられていたものと思われる。

7. おわりに

- (1) 西欧において、アルキメデスが浮力の原理を発見してから、船舶の復原性を定性的に論じることができるようになるまで約 2000 年の時間を要した。
- (2) わが国に浮力の概念が示されたのは、江戸時代末期であるが、幕末には造船分野にも浮力の考え方が導入された形跡がある。しかし造船技術に復原性等いわゆる船舶算法の考え方が導入されたのは明治に入ってからであった。
- (3) 一方、江戸期の弁才船の木割書等を見ると、少なくともその積石数の計算方法に合理性を持たせようとする努力の跡が見られる。
- (4) 江戸時代の弁才船は今日の貨物船標準と比較して遜色ない復原性能を有していたと考えられる。当時の船大工が経験や取得した技術を代々積み重ね伝えていった賜物なのであろうと思われる。

参考文献

- 1) H.Nowacki *et al.* : Historical Roots of the Theory of Hydrostatic Stability of Ships, 8<sup>th</sup> International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2003.
- 2) 中村邦光：江戸科学史話，創風社，2007，pp.45-46
- 3) 改算記綱目大全，1764，早稲田大学図書館蔵。
- 4) 青地林宗：気海観瀾，日本科学古典全書 第六巻，朝日新聞社，昭和 17 年，pp.47-48
- 5) 石井謙治：図説和船史話，至誠堂，昭和 58 年，pp.105
- 6) 石井謙治：今西氏家船繩墨私記坤 補註，日本庶民生活史料集成 第十巻，三一書房，1970，pp.670-671
- 7) 石井謙治：御廻米船心得書，海事史研究 第 17 号，1971
- 8) 日本造船学会：船舶工学便覧 第 2 分冊，昭和 37 年，pp.90
- 9) 佐伯治平：船造要用弁 全，和泉流船作事書，続海事史料叢書 第 1 巻，成山堂書店，pp.354-356
- 10) 逋信省管船局：大和形船製造寸法書，明治 35 年，pp.124
- 11) 小嶋良一，安達裕之：弁財船の復原性と耐航性について，関西造船協会誌，平成 12 年，pp. 268
- 12) 今西幸蔵：今西氏家船繩墨私記坤 補註，日本庶民生活史料集成 第十巻，三一書房，1970，pp.650
- 13) 安達裕之：雛形から見た弁才船，上・下，船の科学館叢書 5/6，2005/2011
- 14) 日本小型船舶工業会：通信教育造船科講座 基本設計（日本財団図書館のホームページ），平成 8 年
- 15) 小野雄司：辰巳一 造船大監，研成社，2009，pp.139-177