16 世紀末－17 世紀初頭の英国の造船における数学の導入

日本海事史学会例会　2019 年 12 月 21 日

山田義裕

目次

1.はじめに

筆者は 16 世紀〜17 世紀のスペインとポルトガルの造船について関心をもっているが、それを深める一環としてスペインのサン・セバスチャンで建造が行われているサン・フアン号を、1〜2 年に 1 度訪問している。カナダのラブラドール島のレッド・ベイで発掘されたバスクの捕鯨船サン・フアン号のレプリカを建造しているのである。

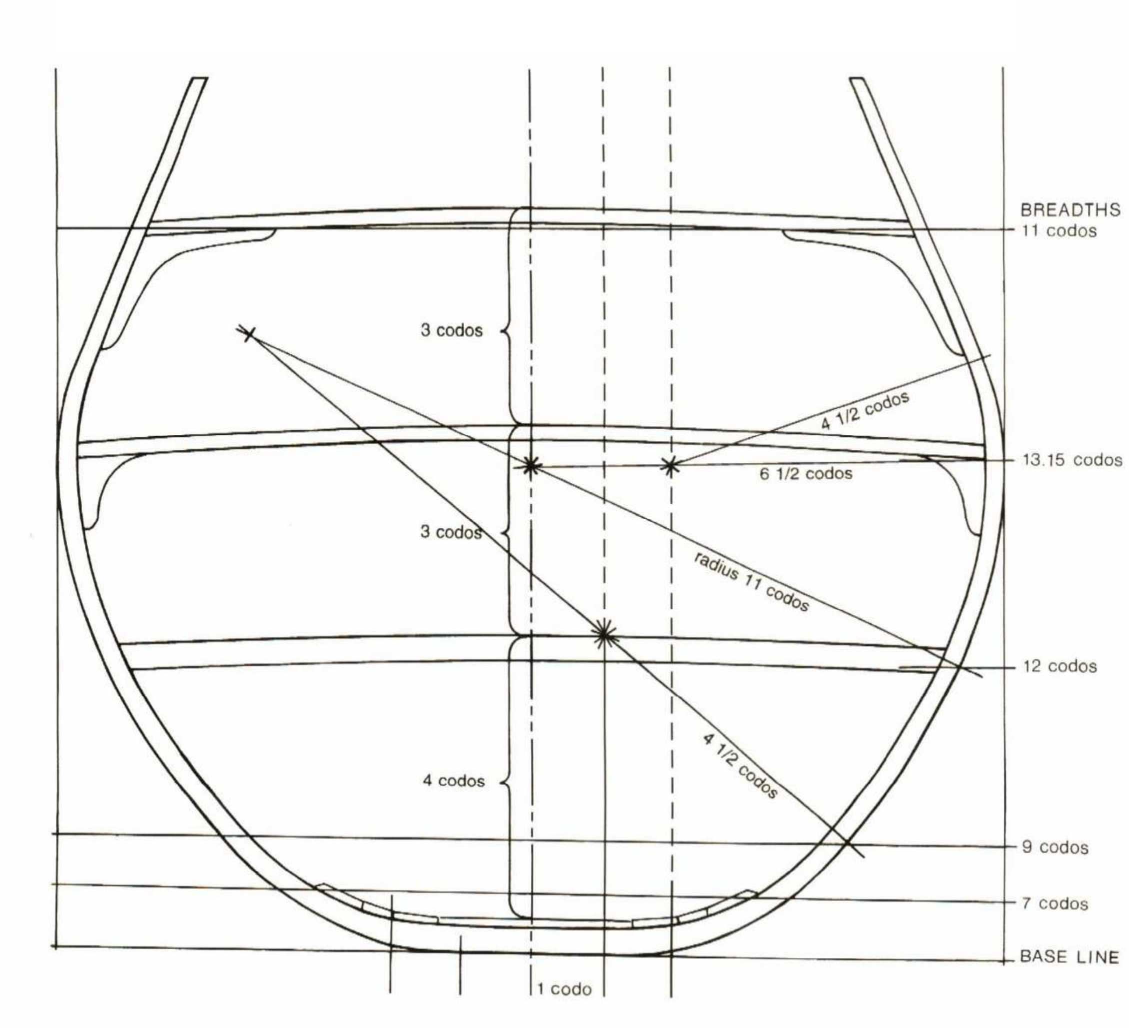
同船は 1565 年に沈没したと推定され、当時のスペインにおける船とその造船に関して極めて重要な考古学情報を提供している。

写真２．サン・ファン号の建造
2018 年 11 月筆者撮影

ヨーロッパ船の構造とその造船方法において、長年にわたって議論されているのが、船の大型化、マス・プロ化に伴う、大西洋ヨーロッパにおける、クリンカー・ビルトからカーヴェル・ビルトへの移行である。すなわち地中海からのカーヴェル・ビルトの方法の導入である。これについては、近年の沈船の考古学によって研究が進んでいる。そして、この建造方法の北方ヨーロッパ、まずは英国への移入に、その船体を形成する際に最も重要なファクターの一つである船殻の横断面の設計方法がそれに伴っていたかどうかである。イベリア半島のポルトガルとスペイン両国に残された文献からは、平らな船底から両船側のビルジへ立上ってゆく曲線は半円で設計されたと考えられていた。沈船の肋骨については、船底、即ち肋根材（フロアー・チンバー）しか残存していないものが多く、肋骨全体の形状を考古学的に知ることはなかなか出来なかった。ところが、サン・フアン号には極めて状態の良い肋骨が多く残っており、その形状を正確に復元することが出来た。同号の発掘・分析を行ったブラッド・ロウエンは 2011 年に発表した「16 世紀に大西洋で建造された船の構造」の中で、1545 年にヘンリー8 世の目の前で沈んだメアリー・ローズ号との対比をしながら、スペインにおいても、英国と同じ肋骨断面の設計が行われていたことを立証した。

そこで、昨年 11 月にポルトガルのアソーレス諸島で開催された海事科学国際会議に出席した後、サン・フアン号建造現場を訪ねて、全てが建てられた肋骨を確認した。帰国後、以前に調べていた英国の 16 世紀末から 17 世紀初頭の次の重要な論文の全文の翻訳を行った。

図１．サン・ファン号の中央断面の肋骨(同号の発掘報告書第 III 巻より）



１．「1620-1625 年ころに書かれた造船に関する論文」、著者不明（ジョン・ウェルズの可能性が強い)、W.ソールズベリー編集。マリナーズ・ミラー、増刊第 6 号、1958 年。

２．「1600 年頃の造船の手写本：ニュートンによるコピー」、著者不明、リチャード・バーカー編集、マリナーズ・ミラー、第 80 号、1994 年。

３．「ハリオットの造船と索具に関する手写本（1608－1610 年頃)」ハリオット著、ジョン・V.ペッパー編集、1979 年 9 月、グリーンウィッチ、国立海事博物館に於ける海事科学と水路学の歴史の第 3 回国際会議「海事科学の 500 年、1440－1900 年」。

上記の 3 書はいずれも転写されて印刷され、注釈が施されたものである。現在では、2．と 3．は大英図書館に所蔵されているものがデジタル化され、インターネットで入手出来る。しかしマシュー・ベイカー(と多分ジョン・ウェルズ)による「古い英国の船大工術の断片」（今後「船大工術の断片」と称する）は全く公刊されておらず、この書については、次を翻訳した。

４．「ペピシアン図書館の断片」、リチャード・バーカー著、ポルトガルのコインブラ大学報　別冊　Vol.XXXII,1985 年。

これらの諸書の中心テーマはいずれも、船体の設計をいかに行うかというものである。今回の報告は、その中でも、当時のヨーロッパの造船における船の設計に新しい局面を切り開いた数学（mathematics）の導入に焦点を当てた。ここで数学と称したのは、算数（arithmetic）と幾何（geometry）とは一線を画す意味で使っている。すなわち、代数(algebra)、対数(logarithm)と円錐曲線論（conic curve theory）の導入である。円錐曲線論を厳格に数学の範疇に入れるかどうかは議論の余地があるかもしれないが、その曲線を関数で表して使うようになったこともテーマの一つなので、数学に含めて扱った。本論のテーマはあくまで造船史であるので、数学史については深い入りするつもりはない。

船は安全であることが第一なので、16〜17 世紀の造船は、新しいものを取り入れることに積極的ではなかった。数学を導入したのは、その素地が出来ている中で、改良のために有用と認められた結果にすぎない。船が使われる目的を割り切って言えば、漁業、商業と軍事である。その目的に付随して、人を運ぶことがあり、近代初期には新しい土地への到達と発見があった。この商業と軍事の目的のために船を改良する意図が常に存在した。まずは安全性を増すこと、そして多くの物、また大砲のような重量物を積むためである。もちろん、スピードも、省力化（建造と操船の両方において）もそれらに付随した。船が使われる環境・条件も地中海から大西洋へと広がり、苛酷になった。ヨーロッパ文明は地中海を中心に生れ育ち、船も基本的には地中海で発達した。北欧でも船は発達したが、地中海の船に凌駕された時代が今回のテーマの時代である。　北方のクリンカー・ビルト船がカーヴェル・ビルト船にとって変わられ、地中海のガレー船がラウンド・シップに取って代わられた。

船は船大工によって造られたが、それは経験に裏打ちされた手工業の世界であった。中世を抜け出し、ルネッサンスを迎えると、地中海ではヴェネチアにおいて、ガレー船の大量生産が行われるようになった。大量生産のためには、単に設計基準を定めるだけでなく、同じ型板（モールド）を使って、同型船を何隻もつくるようになった。ラウンド・シップに対して、ガレー船は横断面が単純で、同型船の大量生産に向いていた。型板を図上で縮小・拡大して、大きさを自由に変えることも出来た。このような設計は紙上で行われ、それについてイタリアで何冊もの手写本が残されている。

ヴェネチアの造船については、F.C.レーンが名高い著作「Venetian Ships and Shipbuilders of Renaissance」を表し、須藤利一がそれを詳細に当会の海事史研究第 7 号、8 号、9 号(1966〜1968 年)において紹介している。

16 世紀のヴェネチアの造船設計方法についてはセルジオ・ベラバルバ著「船殻設計の古い方法」、マリナーズ・ミラー、第 79 号、1993 年に詳しい。ヴェネチアは、今回のテーマである英国の造船に大きな影響を与えており、そのことは後述する。

図２．ゾルチ・デ・トロンベッタ、1445 年、British Library Cotton MS Titus A26 より

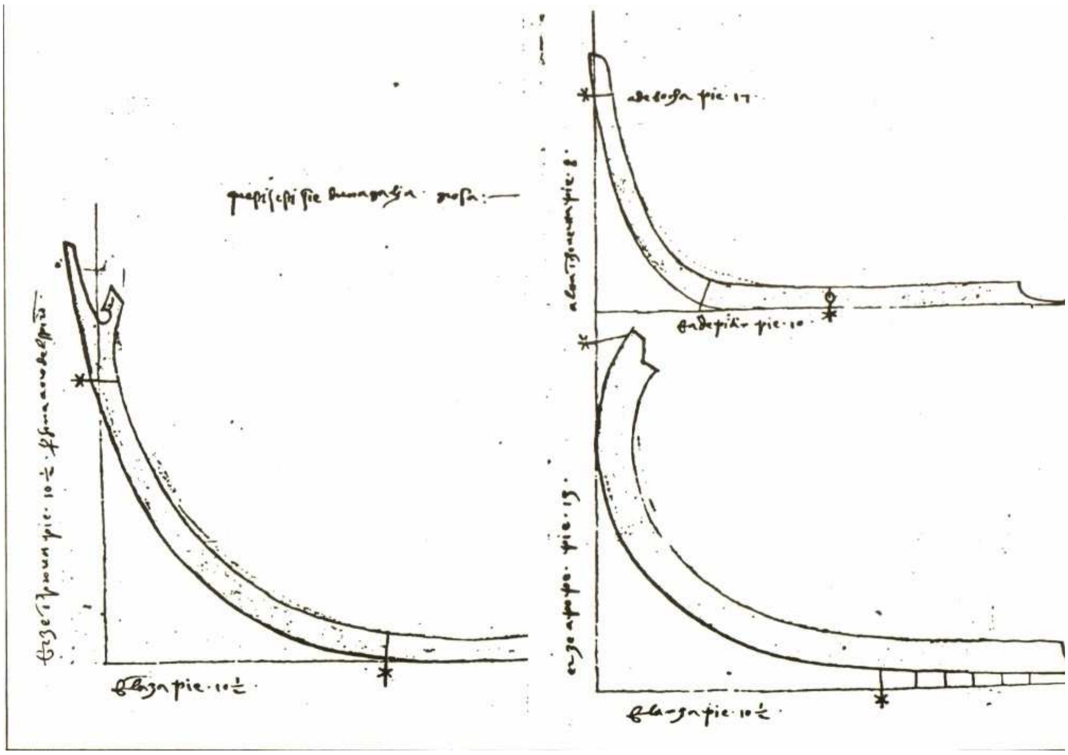


図３．プレ・テオドロ・デ・ニコロ、1550 年、 folio 26ff、Biblioteca Marciana, Venetia

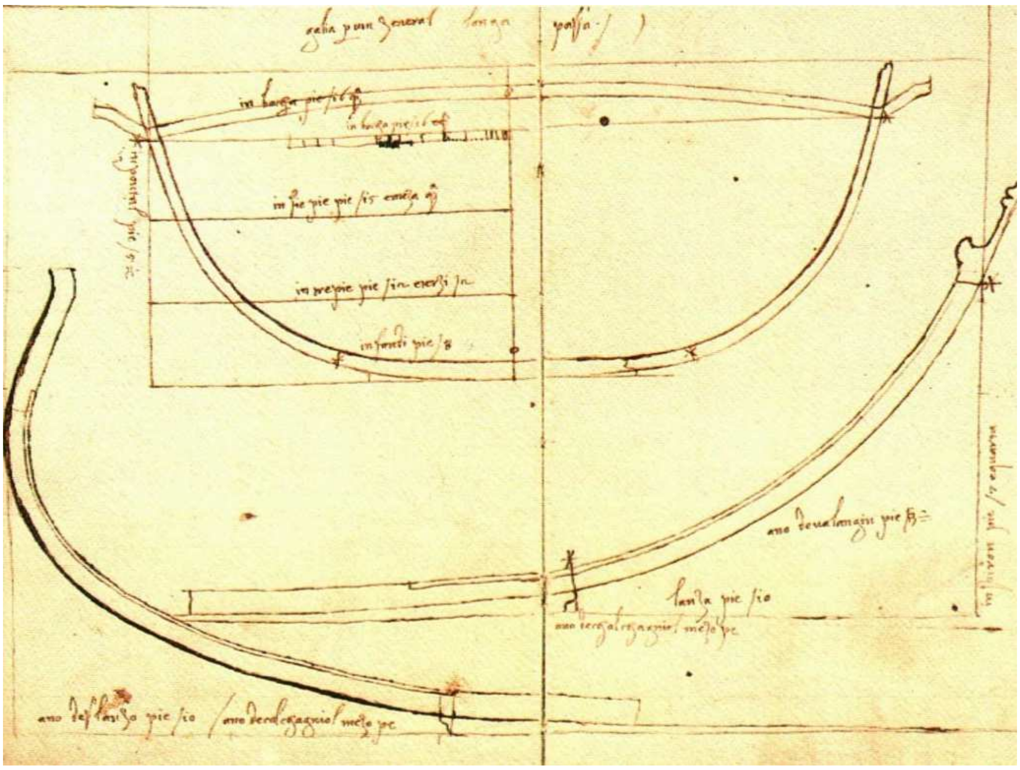
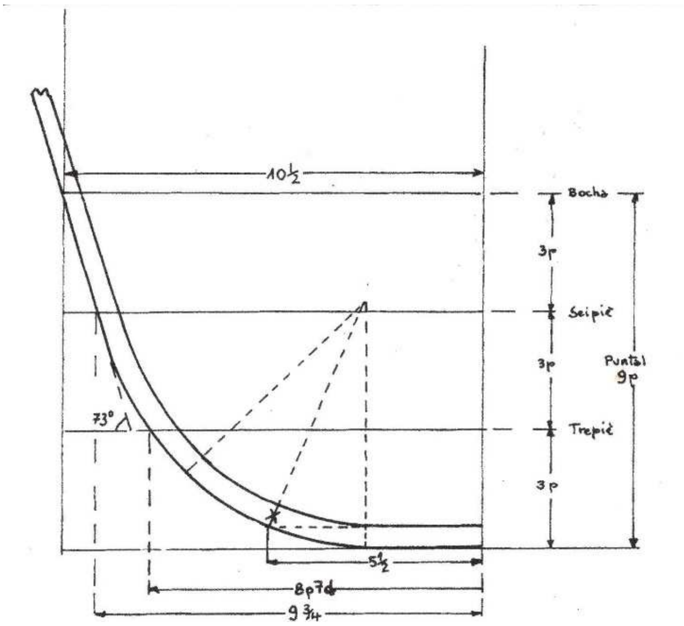


図4．S.ベラバルバの論文の Fig.3



Bocha（船幅）

Seipie(6 フィート)

Puntal(深さ)

Trepie(3 フィート)

図 5. S.ベラバルバの論文の Fig.4

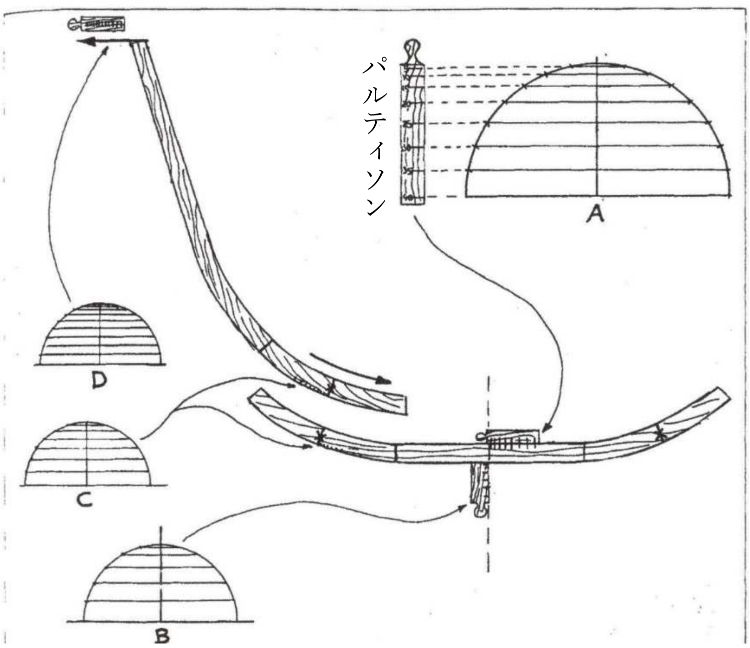


Fig.4　ヴェニスで使われた四つの「パルティソン」と半月の使用。

A：諸肋根材(フロアー)の狭まり(ナロウイング)(*fondi*(フォンディ))。

B: 諸肋根材(フロアー)の上昇(ライジング)（*stella*(ステラ))。

C: フトックの「引き下げ(ヘイリング・ダウン)(Haleing down、訳注：hauling down と言うことが多い)」(*scorer del sesto*(スコレール デル セスト))。

D: フトックの拡張(*ramo*(ラーモ))。

スペインでは、ナオ船とガレオン船の造船を標準化するために 17 世紀の初頭に基準寸法が法律によって定められたが、その主目的は、船の品質向上、国家が商船を軍艦に徴用するため、そして西インドとの間の船団方式による通商安定化であった。

ポルトガルではインドとの交易のために大型のナウ船（スペイン語はナオ船）の造船の書が、フェルナンド・オリヴェイラ、マヌエル・フェルナンデス、ラヴァーニャによって書かれ、当時の設計方法を知ることが出来る。

2.数学が導入される素地

1)紙の普及

16 世紀の終わりに英国の造船に数学が導入されたのは、同国でこの時期に数学が発達したからであるが、数学は、単に文章を書くのと違って、多くの計算を行い、計算過程を振り返ってチェックするために羊皮紙ではなく紙が必要であった。紙は東洋からアラビア人の手を経て、中世の終わり頃に南欧に渡ってきた。最初にヨーロッパで紙が生産されたのは、11 世紀初頭のスペインにおいてアラビア人の手によってであった。13 世紀にイタリアが紙の生産の中心地となり、ヨーロッパ各地に輸出された。英国もその重要な客先であった。英国で紙が生産されるようになったのは、無敵艦隊が襲来した 1588 年と言われる。今回のテーマとなる時期には、英国では未だ紙は大部分が輸入され、生産が始まったところであり、高価なものであった。しかしそれまでとは違って、国王のための造船においては紙が消費出来るようになっていた。

マシュー・ベイカー(1530 年〜1613 年)の「船大工術の断片」は全て紙に記されたものを 1 冊に綴じた手写本である。

このように紙に書かれているのであるが、どのような筆記用具で書かれたのであろうか。当時英国で大きな黒鉛(graphite lead)の鉱山が見つかった。これが鉛に似ているので、鉛の一種と考え、ラテン語の鉛 Plumbum(化学記号はこれから PL とされた)から来た Plumbago と称した。そして、現在の「鉛筆」に鉛の字(英語においても)が当てられることとなった。しかし、現在の黒鉛で鉛筆が作られるのは、ずっと後のことで、当時鉛筆はなかった。では何で書いたかというと、ローマ人達は鉛あるいは上等なものは銀で作った現在のペン状の棒で、油脂を塗った板などに罫書きしたのであった。「船大工術の断片」も紙をよく見ると薄く罫書きの跡の線が残っているそうである。そして完成した図面で、その罫書きの跡が残っているものは、最終的に採用されなかった線で、パンで鉛の跡を消したものであった。採用された線には黒インクで墨が入れられ、今日我々が見る図となっている。

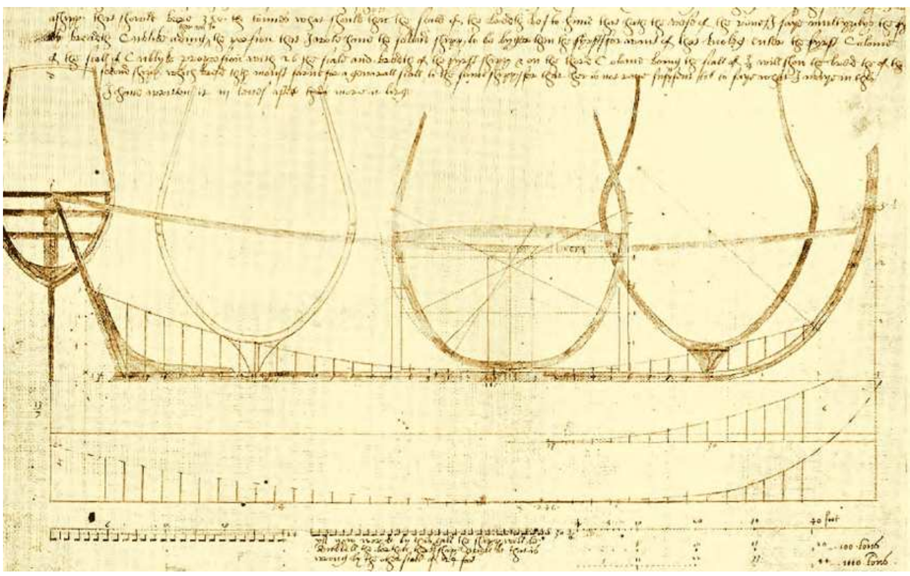


図 6.「船大工術の断片」罫書きの跡が残っているという。

2)インド・アラビア数字の浸透

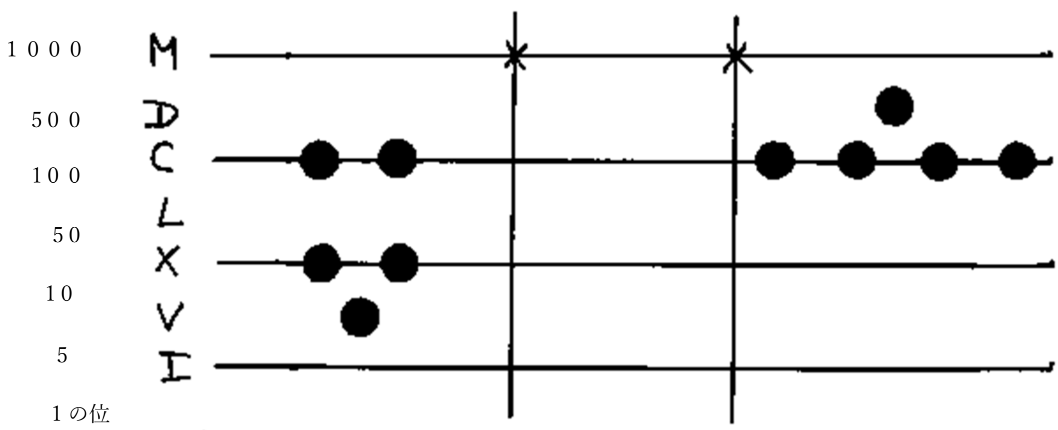
では、紙がかなり自由に使えるようになると、計算をする行為が容易になったかというと、そうではない。ルネッサンス期に現在我々が使っているアラビア数字が導入されるまで、数字を記すのにローマ数字が使われていたからである。例えば 2019×24 をローマ数字で表すと、MMXIX 掛ける XXIV となる。このローマ数字の表記法でもって、今日の我々が紙上で行うような計算を行うことはちょっと想像出来ない。その頃、どのようにして計算をしていたかというと、ジェトン(jetton)と呼ばれる貨幣あるいはメダルのような形をした計算チップ(casting counter)と、木製の机に縦横の線の刻み目を入れた計算板(counting board,アバカス)を使って、一定の規則に則って計算を行い、結果をローマ数字で書き残したのである。アバカスは現在、そろばんを意味する用語として生き残っている。

図 7. 計算板(アバカス)

図 8.ジェトン

1588 年に無敵艦隊に対する勝利を記念した作られたジェトン

図 9. アバカスによる計算



このアバカス計算(アバカシズム)に対してアラビア数字を使った計算は 9 世紀のイスラムの数学者アル・フワリズミの名前を冠したアルゴリズム計算であった。この新しい計算方法は一般的に「ペン書き（ペン・レコニング, pen-reckoning)」と呼ばれた。

マシュー・ベイカーの時代の造船所で使われていたのは当然ながらアバカシズムであり、海軍の勘定役は「計算チップの計算者(compters of casting counter)」と呼ばれ、ローマ数字で書かれた帳票、帳簿を作成していた。そうした環境の中で、ベイカーは、「ペン・レコニング」を行い、幾何学、算数を駆使するに留まらず、数学をも取り入れたのであった。

図 10.グレゴリオ・ライシュ著「マルガリータ・フィロソフィカ」、1503 年の挿絵

中央は算数を擬人化した女神(Arithmeticae)は「ペン・レコニング」をしている、向かって左のローマの哲学者ボエチウス(AD5-6 世紀)を見ている。
向かって右はアバカスの発明者と言われるピタゴラスで、歩が悪いからだろうか、困ったような表情をしている。

この図 10. の絵のように、16〜17 世紀には両計算法の優劣が議論されたが、紙の普及と相まって「ペン・レコニング」に徐々に移行していった。それでもロンドン市の会計表示にアラビア数字が使われるようになったのはようやく 1685 年になってからであった。アバカスの使用には算数的思考の必要がなく、商人、手工業者、会計に関わる官吏達にとって便利な技能であったからである。

3)英国における数学の実用的使用者

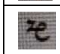
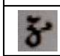
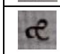
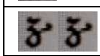
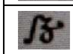
16 世紀前半から英国においては、ヘンリー8 世による外国からの文化の積極的な採り入れもあり、宮廷においてルネッサンスの気風が高まると同時に、イベリア半島両国の東西インドへの進出に刺激されて、商人、郷士階級を中心に、遠く海外にビジネス・チャンスを求めるようになり、新しい大陸、新しい水路（北極圏航路）の発見への機運が高まっていた。

ロンドンはいわばそうした「ヴェンチャー・ビジネス」を求める活気溢れる街であった。航海術の向上と海図の作成のために、算数、幾何が重要視され、当時新たに登場した数学を大学で学ぶ者が増えた。算数、幾何を含めて広い意味での数学を会得した者達は、ビジネス・チャンスを求める者達のために働き、その家庭教師となり、地図製作者、航海器具製作者になるなどした。彼らを指して英国ではマテマティカル・プラクティショナー(Mathematical Practitioner)と呼び、筆者はこれを「数学の実用的使用者」と翻訳した。

この職業を具体的にイメージするために、まず、その典型ともいえるロバート・レコード（1512 年頃～1558 年）を紹介しよう。1525 年頃オックスフォード大学に入学し、その後ケンブリッジへ行って 1545 年に薬学博士号を得た。1543 年の「技芸の土壌：The Ground of Artes」は英国で最初の代数学の書。北極圏航路を見つけるために設立されたモスクワ会社の求めに応じて、1551 年出版の「知識の城：The Castle of Knowledge」で球面幾何学、天文学、航海術を扱った。ユークリッド幾何学の書である「知識への小道：Pathway to Knowledge」を 1556 年に出版。そしてモスクワ会社のために出版した 1557 年の「知恵の砥石：Whetstone of Witte」は代数学の書で、現在の「＝の等号記号」を発案した。また英語圏の出版物として初めて「＋のプラス記号」を紹介したのも彼である。彼の著作の題名を見てわかるように、数学者向けの学術的な出版物を意図するのではなく、数学を学びたい者、関心を有する者のためであることが分かる。しかし内容は純粋に数学、天文学、航海術のレベルの高い書物である。マシュー・ベイカーはロバート・レコードの書物を勉強しており、レコードが使用した累乗及び累乗根の記号を用いている。

図 11.　ロバート・レコードの使用した累乗と累乗根の記号

ガレース・ロバーツ ＆ フェニー・スミス編「ロバート・レコード：チューダー朝数学者の生涯とその時代」より。

Table 3.　レコードの最初の 6 個の代数の数詞についての記述		
記号	レコードの記述	
	完全な未知数：符号が無いが如し	x^0
	全ての数の根を意味する	x
	平方根の数を示す	x^2
	立方根の数を表す	x^3
	2 乗の 2 乗の符号である、即ち 4 乗(ゼンジゼンジック)	x^4
	5 乗を表す	x^5

コペルニクスの地動説を初めて英国に紹介したトーマス・ディッグス（1546 年～1595 年）が「極めて技能が高く賢明な数学の達人」と絶賛したリチャード・チャンセラー（？～1556 年）はモスクワ会社による北東航路の探検隊の重要メンバーとしてイワン雷帝と謁見している。文化、学術を学ぶために、多くの若者たちが地中海、特にヴェネチアに派遣されたが、その船中に船大工として乗り込んでいた若い頃のマシュー・ベイカーと共にチ

ャンセラーが居た。チャンセラーはトーマス・ディッグスによって、間違って横断線形定規（transversal scale,トランスヴァーサル・スケール）の発明者に帰せられている（この定規の発明は 14 世紀に遡るものである。天文学者のチコ・ブラーエも使用している)。ディッグスは長さ 3 メートルに及ぶクロス・スタッフを使って天文観測をし、横断線形定規の使用を推奨した。ベイカーは多くの種類の定規（縮小、拡大、漸増、等々）を「船大工術の断片」の中に残しているが、この横断線形定規も使用している。

図 12. 現代の横断線形定規（トランスヴァーサル・スケール）

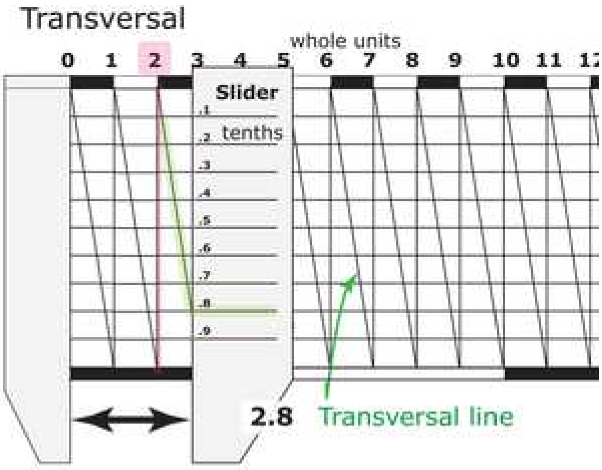
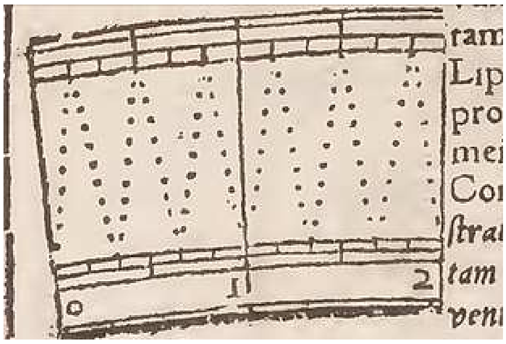


図 13. チコ・ブラーエの横断線形定規（トランスヴァーサル・スケール）



やはり北方探検家であったウィリアム・ボロウ(1536 年～1599 年)は、兄のステファンと共に 1573 年に政府の奨励金を得てジュディス号を建造したが、ベイカーの「船大工術の断片」の中にジュディス号の最大横断面、船首材、船尾材が 1 図にコンパクトに収められた珍しい図面が残っている。(図 14.）この図面の下には正方形の枠の中に対角線定規（diagonal scale,ディアゴナル・スケール）の図（当時、こうした図をプラッツ、platt と呼んだ）が書かれている。

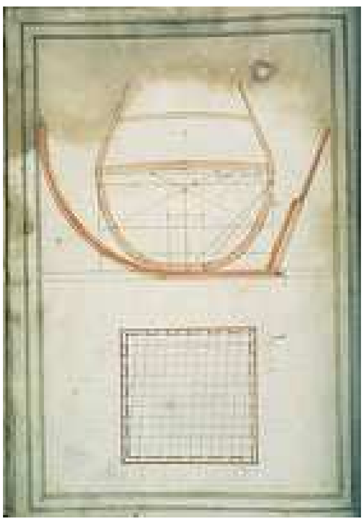


図 14. 「船大工の断片」の「ジュディス-ボロウ号」と対角線定規のページ。

この定規は他の最大横断面図にも表れる。

現代の相似三角形の性質を用いて短い長さを拡大して読み取り易くしたディアゴナル・スケールとは異なる。

マシュー・ベイカーの円熟期の盟友はウィリアム・ボロウであった。「船大工術の断片」中のスケールと同じ意匠のスケールが、フロビッシャーのためにボロウが書いた北方大西洋の海図の中に見られる。

ベイカーと親交が深かった重要な数学の実用的使用者にトーマス・ハリオット（1560 年頃〜1621 年）がいる。ハリオットはウォルター・ローリーと親しく、航海術の分野で大きな功績を残し、自らもアメリカ大陸に渡ったことがある。数学者であると同時に、重要な天文学者でもあり、太陽の黒点の発見者の一人であった。ガリレオよりも早くに望遠鏡で観測した月面のスケッチを残している。出版された彼の著作は 1 冊しかないが、膨大な手書きのメモを残した。その中に造船について重要なものがあり、それについては別途後述する。彼は「1608 年 2 月 28 日にこれを考え出し、船大工のベイカー氏のために、E.マアロウに渡した。」という 1 枚のメモが残っており、ベイカーとの付き合いが確認できる。（本稿 27 ページの図 28.及び付録「ハリオット文書フォリオ f.3 全文転写」参照）

ベイカーが接点を持った数学の実用的使用者達の中で、もう一人忘れられないのがウィリアム・ボーン（1535 年〜1582 年）である。ただし、彼はベイカーが腹を立てたと思われる相手である。

ベイカーは「船大工術の断片」の中に、次のような詩のような文言を書き残している。

「我々のことを熟読する者は多かろうが、我々を知る者はほとんどいない
　　我々は、彼らに見せているほど単純ではない
我々の著者は、我々が公開するために用いることを良いとは思わなかった
　　彼の敵がそれを盗まぬように自分の頭の中にとどめる
そうした盗みの盗人は今やもう、誠実な男によく知られてしまっている
　　何のために彼らは他人から盗むのか、自分のものとして自慢するのか？
継ぎはぎする馬の骨（??p?ching bourne）は他人の著作と継ぎはぎをした
　　そして今や売るために、彼の無学なペンでそれを描く」（筆者翻訳）

bourne がウィリアム・ボーンを指すのは定説である。筆者は脱字がある“??p?ching”を patching と読み、ボーンを骨との掛け言葉として下線部分のように翻訳した。

ベイカーとボーンの間に何があったのか、わかっていないが、ボーンは海軍の砦の砲手長であった時期があり、その時を含め、両者が接触する機会はいくらもあったようである。

両者は造船設計への数学の使用の姿勢が違っていた。ボーンは数学そのものを設計の中心に据えていたようなところがあったのに対して、ベイカーは、数学を直接に設計に持ち込むようなやり方を、観念的な設計であり、数学を理解できない現場にはそぐわないと考えて嫌ったことが「船大工術の断片」の中で伺える。ベイカーは当時の数学を十分に会得していた。しかし、造船所で育った彼は、現場は当然のことながら、幹部もまた数学を理解していないことを承知しており、出来る限り見た目で分かりやすい幾何学や、様々なスケールを使うことを好み、そうしたやり方は「幾何学的デモンストレーション」と呼ばれる。

しかしこの詩から読み取れることは、そのような技術上のすれ違いではなく、感情的にな

らざるを得なかった原因があったようである。この詩で非難しているのは、著作、あるいはアイデアの剽窃である。この頃の剽窃は、現代の論文などの剽窃よりはるかに重い意味を持っていた。剽窃したものを自分のもののようにして点を稼ぐ程度のことではなかった。とくに船大工頭達は仕事の内容を固く秘密にしており、弟子あるいは現場に対しても、具体的な作業指示しか出さず、設計の考え方、あるいは加工方法や組み立て方法の意味を教えることはなかった。経験に基づいて会得した技術・技能だけが自らの地位を守る時代であり、技術を盗まれることは絶対に避けたかった。

チャールズ 1 世のためにソヴァリン・オブ・ザ・シー号の計画書を船大工頭のフィネアス・ペット（1570 年～1647 年）が書き上げ、それをジョン・ウェルズ（1570 年～1630 年、ベイカーから「船大工術の断片」を遺贈され、後半を補筆したと考えられている数学者、造船家）が国王に提出した報告書の最後の部分は次のようになっている。

「陛下におかれて、次の報告書をお受けいただきますれば、お悦びいただけるものと存じます。

我々は十分な討議の後に、最大横断面（ミッドシップ・ベンド）の各曲線（スィープ）の比率が決められ、横断面(ベンド)が何処に置かれるかについてのルール、そして狭まり線（ナロウイング・ライン）と上昇線（ライジング・ライン）に関するルールについても合意いたしました。我々皆が願っておりますのは、陛下におかれてのみ、この事を知っていただけるであろうことであります。1635 年 4 月 7 日付けで国王が署名」

下線は筆者が付したが、国王に対しても守秘するように申し出ている点を強調したかったからである。

またこの文章から、国王という最高位レベルで、船の設計の良否が何によって判断されたかということが分かる。

すなわち、次の 4 点である。

１．最大横断面の各曲線

２．横断面の竜骨上に据える位置

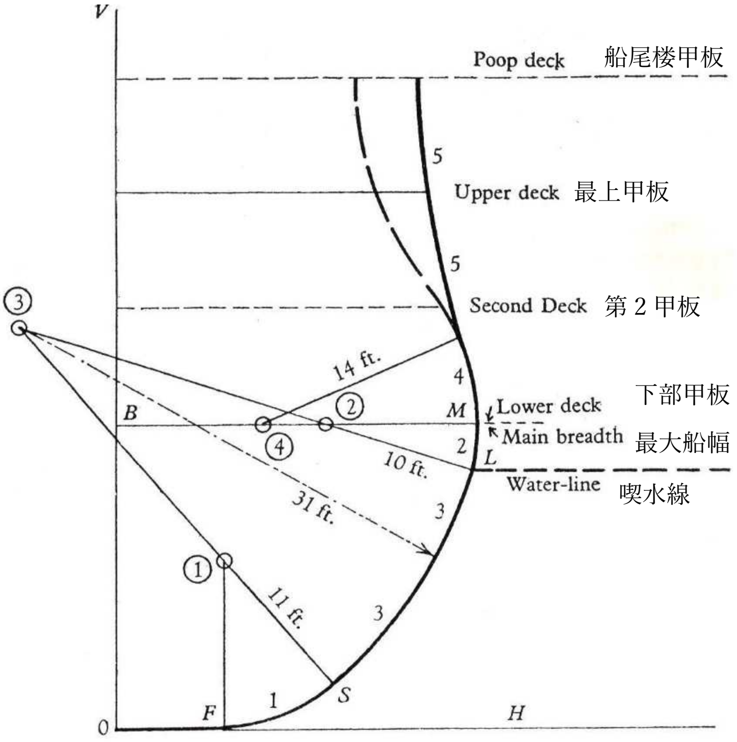
３．狭まり線

４．上昇線

本報告の最初に記した、当時の造船設計の文書である「1620-1625 年ころに書かれた造船に関する論文」、「1600 年頃の造船の手写本：ニュートンによるコピー」のいずれの書もこれら設計上の重要点について解説することが主眼となっている。

この最初の項目である１．最大横断面の各曲線について、ソヴァリン・オブ・ザ・シー号においてどのように描かれたかを、ウェスコット・アベル著「船大工商売」にもとづいて図 16.で示す。当時のほとんどの最大横断面の各曲線(スィープ)がこのように描かれたと考えてよい。

図 15.　ソヴァリン・オブ・ザ・シー号の最大横断面



'*Midship bend*' *for the* Sovereign of the Seas

この最大横断面は①から④を円の中心とする弧の 4 本の曲線（スィープ）とタンブル・ホームの船の内側への凹型（ホロウイング）の曲線（実線が採用案、破線は代案）から成り立っている。この横断面は次のような手順で描かれた：

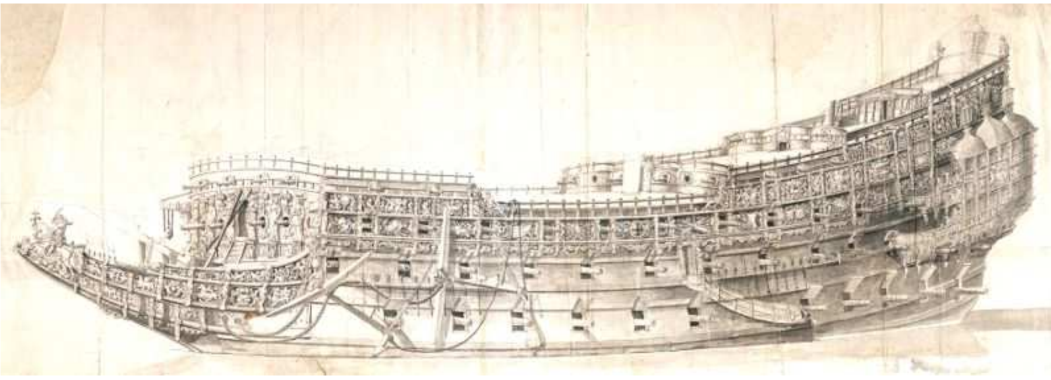
船幅が決められると、積荷を載せた時の喫水線の上約 3 フィートほどに最大船幅の高さが決められ、そうすることによって船が帆を張って傾いた時に、主たる船幅が水面上に維持された。高さは　－竜骨の上端というよりも船底を形成する板張りの内側の表面が竜骨の側面と出会う点と言った方が良かろう－　から決められた。同様に横断面の形状は、そこに板張り板が固定される肋骨材（フレーム・チンバー）、即ち肋骨の「外側」である板張り板の「内側」へと描かれる。

形状を描き出すのに、基準線 OH を竜骨用に、そして直立した線 OV を船の中央の線用に取る。主たる船幅の高さ OB を決め、ベースに平行な BM を、船幅の半分の長さの 23 フィート 3 インチとし、喫水線の上約 3 フィートになるように引く。竜骨から、船幅の半分のほぼ 3 分の 1 となる約 7 フィートの「肋根材（フロアー）の平たい部分」である平らな一片 OF を伴ってカーブが始まる。そこから 11 フィートの小半径の弧が F の 11 フィート上の中心①から始まる。これは図で見えている 1 の部分であるが、この時点では未だ線が何処まで届くかの距離は分からない。次のステップは 10 フィートの半径の曲線を主たる船幅から 3 フィート下の喫水線 L へと描くことである。中心②は主たる船幅の線上、内側 M に在る。　これら二つの弧の間に 31 フィートの大きな半径の結合の曲線が在る。L

でスムースな結合をするためには、中心③が L－②の線上で、L から 31 フィートの距離になければばならない。3 を 1 に結合させ、カーブ 1 が S で出会うようにして、曲線 3 - 3 を完成させる。これで船幅の下の形状が描かれた。

上部のカーブは、中心④が MB 線上の M から 14 フィートに在る船幅の「上の」曲線から始まり、その弧 4 は上方へ描かれる。これの上の部分は最上甲板の終端に結合するように裏返しの曲線でもって作られる。これは、大半径の型板（モールド）がセットになったものの一つでもって行われるが、形状は目で見て気に入ったものが選ばれる。甲板と甲板の間の高さは $7^1/_2$ フィートとされ、下部の大砲甲板（ガン・デッキ）は主たる船幅のレベル BM 上に在る。中央部甲板（ウェイスト）において、BM 上の最上甲板までの高さは 15 フィートである。船幅は与えられていないが、カーブの終りが二つの船幅で見られ、一つは 20 フィートで、これは大きすぎると考えられ、もう一つは約 15 フィートで、この方が姿形に近いようである。4 のカーブに接するように描かれたカーブ 5 - 5 で形状が完成する。そのカーブは船の終端の部分の側面の形状を導く形を作るために、その終端に存在するもう一つの甲板（船尾楼甲板）まで高くされている。

図 16.　ウィレム・ヴァン・デ・ヴェルデ画のソヴァリン・オブ・ザ・シー号



ウィリアム・ボーンに話を戻そう。彼は数学者で、一時海軍に席を置き、砲手長を務めたこともあり、数学による砲術の論文も書いている。航海術者でもあり、スペインのマルティン・コルテスの名高い「航海術」を英訳した。また、「発明とその器具」の中で、現代の潜水艦の原理となるアイデアを残していることでも名高い。

「旅行者の宝と呼ばれる本」の中で、船のサイズを変化させる数学を用いたアイデアを出している。この問題は、上述したように、図面が残されない当時の造船では大きな問題であった。

そのアイデアを数式に整理すると次の通りである：

積載量が b_1 の 1 隻の船が存在する時、積載量が b_2＝kb_1 の別のもう 1 隻を建造する。

2 隻目の船の各寸法が d_2 であるものに対するボーンのルールを要約した式は：

$d_2 = \sqrt[3]{kd_1^3}$　となる。ここで、d_2 は最初の船の寸法 d_1 に当たる。

具体的には、100 トンの船が 20ft の船幅を持っているならば、第 2 の船の主要寸法が同じ比率で建造される 125 トンの第 2 の船は次の船幅をもつことになる。

$$\sqrt[3]{\left(\frac{125}{100}\right)20^3}$$

しかし、ボーンは「大部分の人にとって、その類の数学は極めて難しく、学ぶことは容易でなく、立方根を求めることは出来ない」ことが分かっていたので、標準的な比率用の一連の近似値を提供している。

例えば、最初の船よりも 4 分の 1 大きな 2 番目の船を建造する際に、最初の船の主だった寸法を測定して、それらを四等分し、2 番目の船の、それらに対応する寸法を $4^1/_3$ とした。それは、4^3=64、4.33^3≒81、(81-64)÷64=0.265≒0.25 となる。

また、同プロセスに匹敵する代案としてボーンは、最初の船の 12 インチ分の長さを、全てについて、2 番目の船のこれに対応する寸法を 13 インチとすることであった。それは、次のようになる。

$(13^3-12^3)\div 12^3$≒0.271≒0.25

所与の船の 8 倍大きい船に至るまで、「合理的に十分と言えるほど正確」な近似値を与えるとしている。

ボーンのペンでもっての計算作業（ペン・レコニング）に対して、ベイカーは図表を出来る限り活用した。ベイカーはボーンと同じように、比率での船の建造用に近似値を提供したが、彼はそれを、比例定規（プロポーショナル・スケール）を用いて行った。ベイカーは「1 隻の船が他の船に対して有している比率を見せる」ためという比率目盛（スケール）を書いた。(船大工術の断片、65p, Figure 3.11)　これは共通比例因数(common proportional factors)の立方根に従って間隔を置いた 5 本の垂直な列柱から寸法を読み取る指標を使ったものであった。

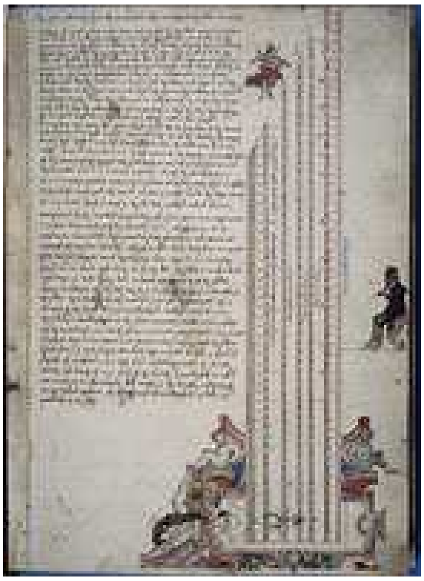


図 17.　ベイカーの「1 隻の船が他の船に対して有している比率を見せる比率目盛」

ただ、このベイカーの比率目盛の比率の範囲はボーンのものよりも狭く、所与の船の積載量の 2 倍までの船に対応した寸法しか求められなかった。ただベイカーはもっと広い範囲でも操作できる同じタイプの縮尺目盛を描き、これは 10 を因数として比率が変わる船をカバーしようとしたもので、「これらは 10 トンから 100 トン、そして 100 から 1000 に使える比率の 3 乗の比率目盛である」と述べているが、筆者は公開された図を見たことがない。

ベイカーは、数学による近似値を様々な比例定規（プロポーショナル・スケール）によって置き換えているのと同時に、比例関係にある諸寸法を求めるボーンのそれよりも正確かつ一般的な方法を提案し、ボーンに対抗している。ボーンは、船大工が全ての関係する寸法を 3 乗し、それぞれの 3 乗した値に比率の係数を掛け合わせ、その積の 3 乗根の値を得ることを求めたが、ベイカーは、それをすることは「得る結果の数ほど、私は何度も何度も掛け算をしなくてはならないので、疲れてしまう」と問題視した。確かに、ボーンのようにアラビア数字であっても、多くの計算（アラビア数字の計算を「サイファリング cyphering」と呼ぶ）をすることは、ベイカーの「幾何学的なデモンストレーション」が、数学計算において省力が出来る道筋を提案している以上、魅力的ではなかった。

4)対数の発明

今まで算数、幾何に代数を含めた数学が、16 世紀後半から 17 世紀にかけて英国において、数学の実用的使用者達によって活用されるようになり、造船においてはマシュー・ベイカーによって取り入れられたことを述べてきたが、17 世紀の初頭に数学にとって偉大な発明がなされた。それはジョン・ネイピア（1550 年〜1617 年）の対数である。ネイピアはスコットランドの有力な貴族に生まれた熱烈なプロテスタントであった。終末論的な信仰の書を 1593 年に出版すると、英国、オランダ、フランス、ドイツで数版を重ねるベストセラーとなった。それまでも数学には馴染んでいたが、対数の研究を始めたのはこの本の出版が終わってからである。そのきっかけは、ジェームス 6 世がデンマークに旅行した際同行した侍医のクレーグがチコ・ブラーエの天文台に寄り、そこで三角関数表を用いて天文計算の積を和に変える（例えば：$2\sin A\sin B=\cos(A-B)-\cos(A+B)$）方法が使われていることを帰国後ネイピアに話したことで、乗法を加法に変換して、計算を容易にすることが出来ると確信したのではないかと言われている。その場合、ネイピアは三角関数表のように介在する「人口の数：artificial number」が必要であろうと予測した。対数の考えをラテン語で 1614 年に「素晴らしい対数表の使い方：Mirfici Logarithmorum Canonis Descriptio、通称「Descriptio」を出版する時、artificial number をロガリズム，logarithm（比例、理念 logos ＋数 arithmos）という言葉を創案して置き換えた。Descriptio を入手したグレシャム・カレッジで天文学を教えていたヘンリー・ブリッグス（1561 年〜1631 年）は一読驚嘆して、ネイピアに会いに行き、二人の交流が始まった。ブリッグスはネイピアに対して底を 10 とする対数表（現在の常用対数）にすると、ずっと使い易いものになることを提案し、ネイピアもこれに同意した。しかし、ネイピアには寿命が残されておらず、ブリッグスがこれを完成させることになった。Descriptio のラテン語版は数学者で航海術書を著したエドワード・ライト（1560 年頃〜1615 年）が早速に英語に翻訳して、彼の死後 1616 年に出版された。

上記してきたように、対数の発明の背後には常に天文学、そしてそれを用いる航海術があった。航海術に用いる諸表の精度を上げるためには手間のかかる膨大な掛け算の計算作業が必要であった。掛け算を足し算にすることによって、どのように計算を簡略できるか、例をとってみよう：

81226703 と 59478362 の二つ数字を足し算と掛け算で計算すると次のようになる。
（志賀浩二「数の大航海」より）

```
   81226703
+  59478362
-----------
  140705065
```

```
         81226703
×        59478362
-----------------
        162453406
       487360128
      243680109
     649813624
    568586921
   324906812
  731040327
 406133515
-----------------
 4831231245100486
```

真数	対数
4.8312311	0.68405781
4.8312312	0.68405782
4.8312313	0.68405783

この掛け算に対数表を用いると、
対数表を引いて、
log8.1226703=0.90969882
log5.9478362=0.77435900
0.90969882+0.77435900=1.68405782
常用対数の整数部分は真数の桁数に 1 を加えたものを示していることに注意して 0.68405782 に近い真数を対数表から探すと、
log4.8312312=0.68405782 となり、
あとは位取りを調べて、
log(ab)=loga+logb の指数法則から
81226703×59478362=483123120000000
であることがわかる。
上から 7 桁までの値が一致している。

このように、対数を使用することによって、計算の労力を大いに省くことが出来た。数学の実用使用者のところで見たように、彼らは航海者と船大工頭と密接に連携を取り合っていたのである。マシュー・ベイカーは 1613 年に亡くなっており、Description が出版されたのが 1614 年なので、対数の恩恵にはあずかることが出来なかったと考えられる。しかしベイカーから「船大工術の断片」を引き継いだジョン・ウェルズは常用対数の第 1 表の作成にもかかわっており、対数を設計に活用した。

3.マシュー・ベイカー

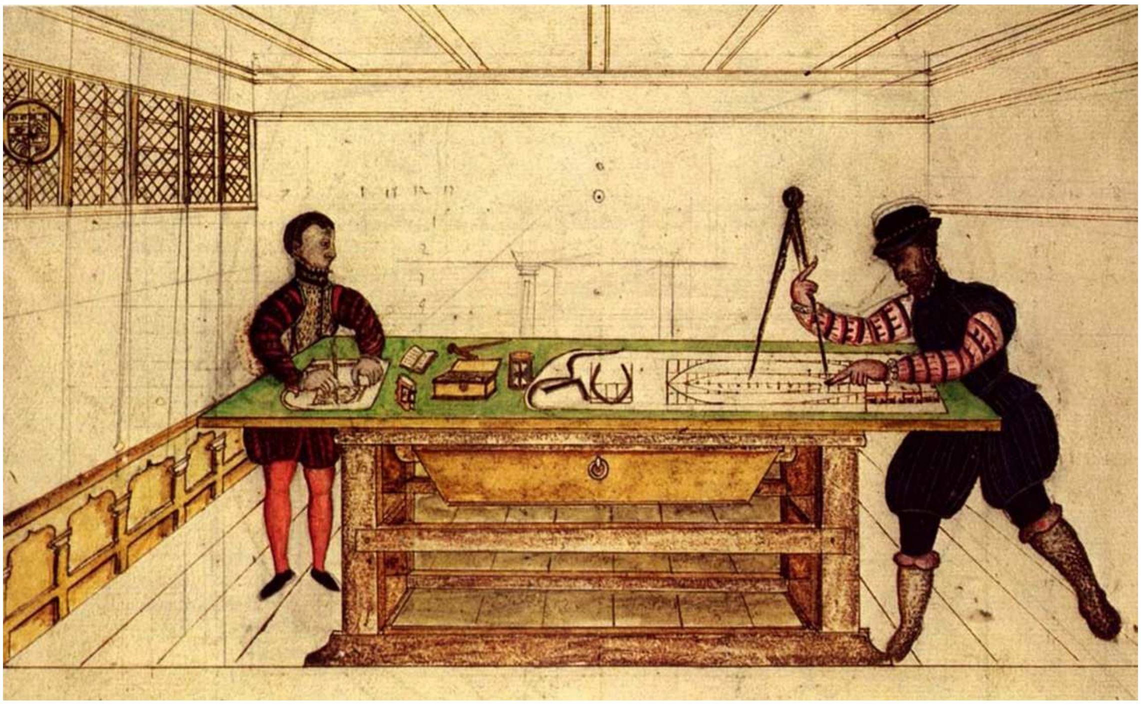
1)新しいタイプの船大工頭

マシュー・ベイカー（1530 年～1613 年）については度々言及してきたが、その経歴と「船大工術の断片」から、改めて彼がそれまでとは異なった数学を取り入れたどのように傑出した船大工頭であったかをまとめてみたい。マシューの父ジェイムス・ベイカーは、ヘンリー 8 世の船大工で、1537 年に同王が英国で初めて船大工頭(Master Shipwright)の職位を創設し、4 名をその職に任命した内の一人であった。マシューは父の下で見習い徒弟として造船所で仕事を始め、船大工を経て、1572 年、42 歳の時に船大工頭となった。

彼以前の造船は、図を用いて船殻を設計することは無く、船大工頭の記憶と経験の中にあった簡単な主要寸法の比率に応じて、現場で竜骨が置かれ、その前後に船首材と船尾材が嵌め込まれて接合され、実物大の型板（モールド）で作られた肋材が竜骨上に置かれて行くというものであった。その肋骨を立てて行く過程でリバンドが回されて、長さ方向の形状を決

めていった。いくつもの肋材から成る肋骨が竜骨上に組み立てられる以前に、床上でプレ・アセンブルされてから建てられるのは後の時代のことである。こうした作業を自らの経験によって、作業者を指揮したのが船大工頭であった。彼は建造が始まる前に、モールドを作業者に持たせて森林に分け入って、適切な形をした木に印を付けて材木として切り出させた。従って船大工頭が違えば、船は全て違うものとなった。良い船が出来て、それを再現、あるいは同じようなものを､同じ船大工頭が大きさを変えてもう 1 隻建造しようとしても、出来上がった船が異なることの方が普通であった。それが出来るようになったのは、紙が普及し図面として残せるようになったからである。大きさを変える際には、図面の縮尺を変えた。図上であれば、問題があればその問題点を改善するように検討することも出来た。ベイカーは図面による設計を、現場とは別の設計室を設けてそこで行った。極めて異例のことに、彼はその設計をしている自分の姿をわざわざ描かして、「船大工術の断片」に残している。

図 18.　「船大工術の断片」



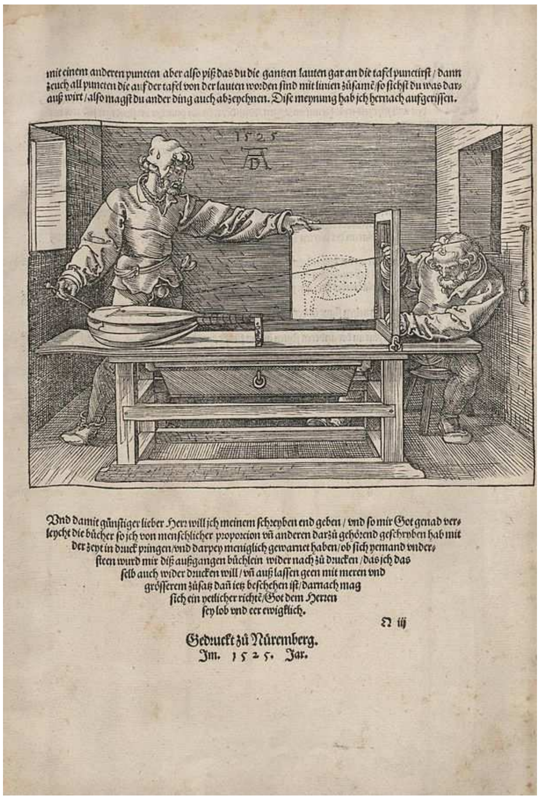
彼の船大工頭としての名声は高く、同僚達の評判も良かった。1605 年にジェームス 1 世から授与された英国の船大工の技能、即ち熟達に関する船大工組合の最初の憲章（チャーター）はマシュー・ベイカーを「我らの僕にして、最初のマスターとして最も古い船大工頭」として名前を挙げている。1637 年に進水したソヴァリン・オブ・ザ・シー号を建造する以前に、フィネアス・ペットは、1610 年にジェームス 1 世のために大軍艦プリンス・ロイヤル号を進水させた。マシュー・ベイカーがこの船を酷評したにもかかわらず、フィネアス・ペットはベイカーを「我々の時代の最も有名な技能者（アーティスト）」と讃たえた。図 19. は我々にとって、当時の造船設計の様子を知ることが出来る貴重な図であるが、ベイカー本人が当時、どうしてこのような図を残したかったのであろうか。それは自らがそれまでの船

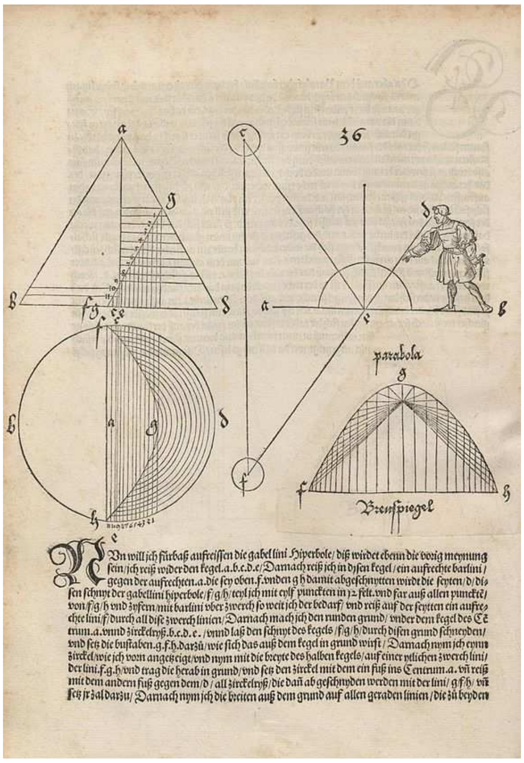
大工頭とは違う、紙を用いて(この図では羊皮紙に見える)、デバイダーを振るって、図面を描く新しい船大工頭像をアッピールしたかったからであろう。前記したジュディス号をベイカーに建造してもらったと考えられるウィリアム・ボロウはその著書「羅針儀の偏差についての論考」の中で算数と幾何学を「全ての科学と然るべき技の基礎」と述べ、マシュー・ベイカーについて次のように言及している：

「これらの技を熱心に稽古し練習することによって、滅多にない特別な知識に到達した者達。建築においては、ローマ人のヴィトゥルヴィウス。絵画においてはかの有名なアルブレヒト・デューラー。そして造船においてはわが国のマシュー・ベイカー。」

アルブレヒト・デューラー（1471 年～1528 年）は、画家であり、ヨーロッパ中に名を轟かせていた。幾何学についての本を著してもいる。ベイカーはデューラーと肩を並べたかったのである。図 18.のベイカーが設計中の図も、デューラーの次の版画をモデルにしたという説（ステファン・A.・ジョンストン著「数学の実用的使用の発展」）がある。

図 19. アルブレヒト・デューラー「技芸の知的性質, 1525 年」の図





ベイカーはデューラーの「技芸の知的性質, Underweysung der Messung」(ラテン語版)を読んでおり、「船大工術の断片」(26 ページ)の中で、「アルバルツス・デュレリ（デューラーのラテン語名）が彼の幾何学の本の中で見せている（デモンストレート）のを私が見つけた或る縮尺目盛（スケール）」を使っている」と述べ、数学を理解する者がいない当時の造船所の中では、ベイカーは数学よりも「幾何学のデモンストレーション」をする方が現実的であると考えたのである。

2)地中海／ヴェネチアからの造船技術

ヘンリー8 世は、様々な分野において、国力の増強と文化の向上のために、他国の芸術家や技術者を多数招聘した。その中で造船においては、ガレー船を建造するためにヴェネチアの造船技術者達を招いた。彼らの仕事は、「アンソニー・ロール」の絵巻に描かれた何隻ものガレー船とガレアッセ船に見ることが出来る。当然ながら、マシュー・ベイカーは彼らの影響を受けた。当時の造船所の給金簿中（「エリザベス朝海軍行政」44 ページ）ベイカーの3 人上の欄にヴェネチアから招聘された船大工頭のアウグスティーノ・レヴェーロの名前が見えている。彼は任務を終えた後も含め 40 年間英国に留まった。

既にリチャード・チャンセラーとの関係を述べたところで触れたが、ベイカーは若い頃に地中海に航海している。1551 年に英国を立ったバーク船オーチャー号の乗組み員であったが、多分船大工として乗り込み、地中海での造船を学ぶことが目的であったと思われる。この時、他にも若い船乗り達 70 人ほどが訓練のために乗り組んで、クレタ島、キプロス島に航海した。ベイカーはその後ヴェネチア、ジェノヴァなどで造船術を学んでいる。彼の技術用語にはヴァネチアの言葉が英語に訛ったものが散見される。ベイカーは行った先での最大横断面の図を残している。

図 20. 「船大工術の断片」のギリシャ船の横断面(R.バーカーによる）

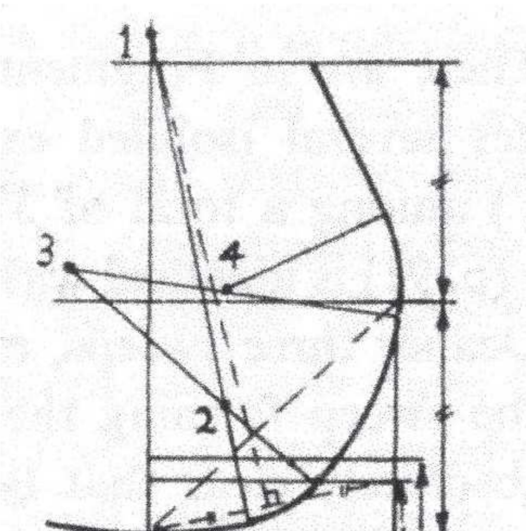
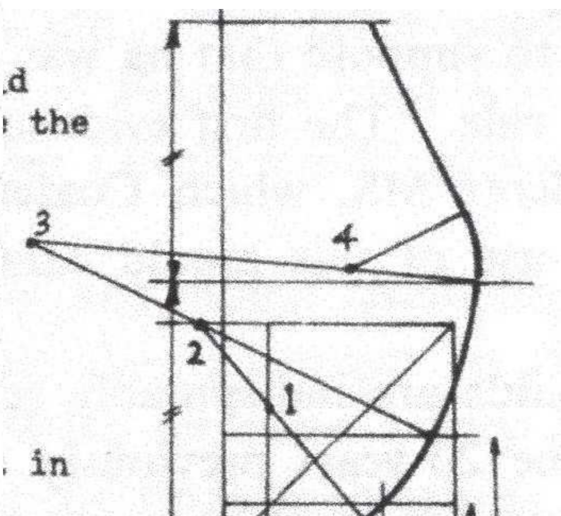


図 21. 「船大工術の断片」のヴェネチア船の横断面(R.バーカーによる）



ベイカーは図 21.に「このやり方でヴェネチア人達は今から 20 年前までは 4 個の(弧)の中心が有る型板を作っていた。今日では 3 個を用いる」と注意書きを付している。この注意書きのように、その後の英国では主に 3 個の弧が最大横断面の曲線（スィープ）に使われた。ただし、タンブル・ホーム用の船の内側に向けてのトップ・チンバーの曲線（図 25.「ホロ

イング・ポスト」参照))及び、船首と船尾において船底が上昇して行く時に船底下部と竜骨の下面のベースとなる地上線の間の凹型曲線（図 26.参照)）は別途に描かれた。

3)ジョン・ウェルズの数学を使った最大横断面の描き方

ベイカーがこのヴェネチア方式の最大横断面の曲線を取り入れて設計を始めた頃には、英国の船殻の造り方は北方のクリンカー・ビルトから地中海のカーヴェル・ビルトに完全に移行していたと思われる。当初は図 18.で彼が使っている大きなデバイダーと各種の定規(スケール）を用いて紙上に図を描いた（この図では、図面が大きいので羊皮紙)「幾何学的デモンストレーション」ともいえるものであった。しかし、その設計図を基に実際の船を建造していっても忠実に図面通りになることがなかった。そのことを、冒頭に挙げた「1620-1625 年ころに書かれた造船に関する論文」(著者はベイカーの後継者ともいうべきジョン・ウェルズの可能性が強い）は次のように述べている：

「見取り図（プロット）を上手に描き、また船も上手に建造する良い技術者達（アーティフィサー）が沢山いるとはいえ、彼らの建造した船を彼らの見取り図と比べてみると、ほとんど一致していないことがわかる。多くの場合、主な線図が、見取り図にする時には上手く作られているのに、建造中に駄目にされているのである。その最大の理由は、見取り図の全ての事を忠実に真似するための算数と幾何の技能の不足である。というのは、彼らが小さいスケールに頼る時、多くの場合、各インチが 12 に分割され、1 フィートに対するものは 1 インチの 10 分の 1 を超えることがないからである。もし目盛で 1 インチの 100 分の 1 を誤っただけでも船では 1 インチの誤りを犯すことになり、誤りは見取り図の 100 倍大きくなってしまう。それ故に、見取り図の真正の図面に従って、最大横断面から残り全ての横断面を描き出すためには、全ての部分を算数による寸法を見出さなければならない。」

このジョン・ウェルズは対数表の第 1 表を作成することに参加しており、対数に詳しかった。彼は上記の文章の後を次のように続けて、三角関数と対数を使用した計算を行い、最大横断面の描き方を説明している。：

「弦（サブスタンス、現代の英語ではコード;chord であるが、当時はサブスタン;substance と言った）は角度によって見付けられる。したがって、我々としては最初に 3 本の曲線の三つの角度∠L, ∠P,そして∠M を見付ける必要がある。最初の曲線の中心から第 3 曲線の中心へ線 LM を描くと、貴君は∠H が直角の三角形 LHM を得、その 2 辺 MH と LH が与えられ、直角平面三角形の第 4 のケースによって第 3 辺 LM を見付けられる。深さ GH は 15 フィート 6 インチで、下部曲線の半径 LG は 9 フィート 8 インチである。したがって LH は 5 フィート 10 インチである。EB は 18 フィートで、そこから半船底 EH の 4 フィート 6 インチを取ると、HB の 13 フィート 6 インチが残る。再び、上部曲線の半径 MB の 7 フィート 8 インチを 13 フィート 6 インチの HB から取ると、HM は 5 フィート 10 インチとなる。ここで、この三角形は二等辺なので、下辺の角度は等しく、どの平面三角形でも、三つの角度は直角二個分に等しい故に、H での角度は 90^{d} となる。したがって、L と M での角度は

各個が 45^d となる。したがって、貴君は辺 LM を、平方根あるいは比の二つの方法によって見付けられる。MH の正方形と LH の正方形を加えて一緒にすると、その平方根が求める辺 LM である LM の正方形となる。または、直角平面三角形の第 5 のケースによる比によれば、49.5 インチの HL に対して∠HML が $45^d0'$で、∠MHL が 90^d なので LM は 99 インチである。

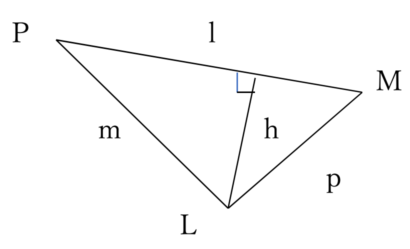
次に、3 辺の知られた非直角三角形 LPM で、角度を見付ける。LN は LG(9 フィート 8 インチ)と等しく、これを 21 フィート 8 インチの PN から取ると、12 フィートの PL が残る。また MO は MB（7 フィート 8 インチ）と等しく、これを PN と等しい PO から取ると、14 フィートの PM が残る。それ故に、このやり方にならって、そして**対数の助けによって大変楽々と、垂線を考慮せずに、いかなる角度でも見付けられる。**（下線は筆者山田）

LM が	101.8 インチ（訳注：正しくは 99）		
MP が	171*	（訳注：108･1+62･9）(*訳注：正しくは 14×12=168)	
LP が	147**	（訳注：108･1+38･9）(**訳注：正しくは 12×12=144)	
合計	419.8		
合計の$\frac{1}{2}$	209.9	・・・7677.9875	
第 1 の差異	108.1	・・・7966.1743	
第 2 の差異	38.9	・・・1589.9496	
第 3 の差異	62.9	・・・1789.6506	
		19032.7620	

この$\frac{1}{2}$は $18^d11'$の角度 P の半分の対数・・・・・・9516. 3810 なので、全角度は $36^d22'$である。

3 辺の合計の半分から各辺を引いて差を得る。合計の半分の算術補数（アリスメチカル・コンプルメント）、求める角度の対辺の差の算術補数を加える。それらに他の二つの差異の対数を加える。合計の半分は求める角度の半分の正接の対数である。

訳注：



辺 LM＝p
辺 MP＝l
辺 LP＝m　　とする。

p＋l＋m＝101.8＋171＋147＝419.8＝q とすると、　$s=\frac{1}{2}q=209.9$

第 1 の差異＝s－p=108.1　、第 2 の差異＝s－l=38.9　、第 3 の差異＝s－m=62.9

△PLM の面積を S とすると。

<u>ヘロンの定理</u>：

S=$\sqrt{s(s-l)(s-p)(s-m)}$

s=$\frac{(l+m+p)}{2}$

l ≧m,p なので　h=$\frac{2S}{l}$　，∠LPM=$\sin^{-1}\frac{h}{m}$　，　∠LMP=$\sin^{-1}\frac{h}{p}$

従って　∠LPM=$\sin^{-1}\frac{h}{m}$= $\sin^{-1}\frac{2S}{l\cdot m}$

S=$\sqrt{s(s-l)(s-p)(s-m)}$　=$\sqrt{209.9(108.1)(38.9)(62.9)}$=7451

∠LPM= $\sin^{-1}\frac{2S}{l\cdot m}$＝$\sin^{-1}$(7451×2÷147÷171)＝0.5928

三角関数表から

36°＝0.5878　　→　0.5928－0.5878=0.005

37°＝0.6018　　→　0.6018－0.5878＝0.014

0.005÷0.014＝0.36°＝21.6’≒22’

従って　∠LPM=36°22’

訳注：7677.9875 以下の対数はどこから採ったものなのか不明。

同じやり方で L と M での二つの角度を見付けられるが、通常の比に拠るのが容易である。たとえば、LM が 101.8 に∠LPM 36^{d}0’に対して、168 インチの MP に対して、∠MLP 85^{d}20’、そして 144 インチの LP に対して∠LMP 58^{d}40’である。∠MLP 85^{d}20’から∠HLM45^{d}0’を取り除くと、そこには∠PLH 40^{d}20’が残り、これは肋根材頭部の曲線のための角度∠GLN に等しい。そして三角形 GLN は二等辺なので底辺の角度は等しいので、180^{d}から∠GLN 40^{d}20’を取ると、他の二つの角度に 139^{d}40’が残り、それぞれは 69^{d}50’となる。そして、116 インチの LN に対して∠LNG 69^{d}50’なので、∠GLN 40^{d}20’に対する GN は 79･98 インチとなり、弦 GN は 6 フィート 8 インチである。

　また、三角形 PNO は二等辺なので N と O での二つの角度は等しく、P での角度は 36^{d}0’であることが知られているので、他の二つの角度は 144^{d}0’で、それぞれは 72^{d}0’となる。そこで∠PNO 72^{d}0’なので PO は 260 インチとなるので、∠NPO 36^{d}0’に対して NO は 160.6 インチ、即ちほぼ 13 フィート 5 インチのフトックの曲線の弦となる。

最後に、上部曲線は全体の角度∠LMP 58^{d}40’から角度∠LMH 45^d を取り除くとそこに、角度 13^{d}40’ の∠OMB に等しい角度∠PME が残り、これを後のために取って置く。ST を MB に等しく描き、MT を BS に平行に描いたら、もう 1 本の線を〔M〕から、柱（ポスト）頭部 Q へ引く。そうすると、T で直角の新しい三角形 MTQ が出来、その辺 MT と TQ が与えられる。MT は 15 フィート 6 インチで、これは深さに等しい。TQ は 1 フィート 8 イ

ンチである（半船幅半船幅は 18 フィートの$\frac{1}{3}$と上部フトック 7 フィート 8 インチの半径の差)。それゆえに、186 インチの MT は 100000 の MT のものであるとして(訳注：対数計算に 10^5 を使うこと)、20 インチで∠TMQ $6^{d}8'$の正接である。したがって、MQ はその正割（セカント sec；訳注：余弦の逆数。）である。QM の長さには、この正割に 186 を掛け合わせ、全部で 5 桁の数から切り取ると、QM の長さの 187.08 インチを得る。そして、V で直角の三角形 QVM において角度∠QVM により、90^{d}の∠QVM に対して、QM は 187.08 であり、∠MQV $29^{d}33'$に対して MV は 92 インチである。したがって、∠QMV は $61^{d}29'$で、これを $6^{d}8'$の∠TMQ に加えて、∠TMV の全角度は $67^{d}35'$となる。直角∠TMB から角度∠QMV を取り除くと、そこに∠VMB $22^{d}25'$が残る。最後に角度∠OMB（先に $13^{d}40'$であることを見出した）を角度∠VMB $22^{d}25'$に加えると、角度∠VMO $36^{d}5'$を得て、これから求める弦 VO を見つける。三角形 VMO も V と O での角度が等しくて、二等辺三角形である。180^{d} から $36^{d}5'$を引くと、$143^{d}55'$が残り、その半分の $71^{d}58'$ が V または O での角度である。そして∠MVO $71^{d}58'$が 92 インチの MO に対してであり、∠VMO $36^{d}5'$に対しては VO57 インチ（4 フィート $8\frac{4}{5}$インチ）となり、これが上部曲線 VO の弦である。

最大横断面から他の全ての横断面の肋骨を作るための型板を作成することも、やはり幅と深さのこの平面図に依るものであり、それは次の三つである。肋根材の型板、フトックの型板、そしてトップ・チンバーの型板である。しかし、それらは段階（グラデュエーション）が付けられて初めて役に立つものであり、他の平面図の線から描かれるべきものなので、もっと適切な個所で述べることとしよう。

図 22. ソールズベリーによる復元図に筆者・山田が数値を記入

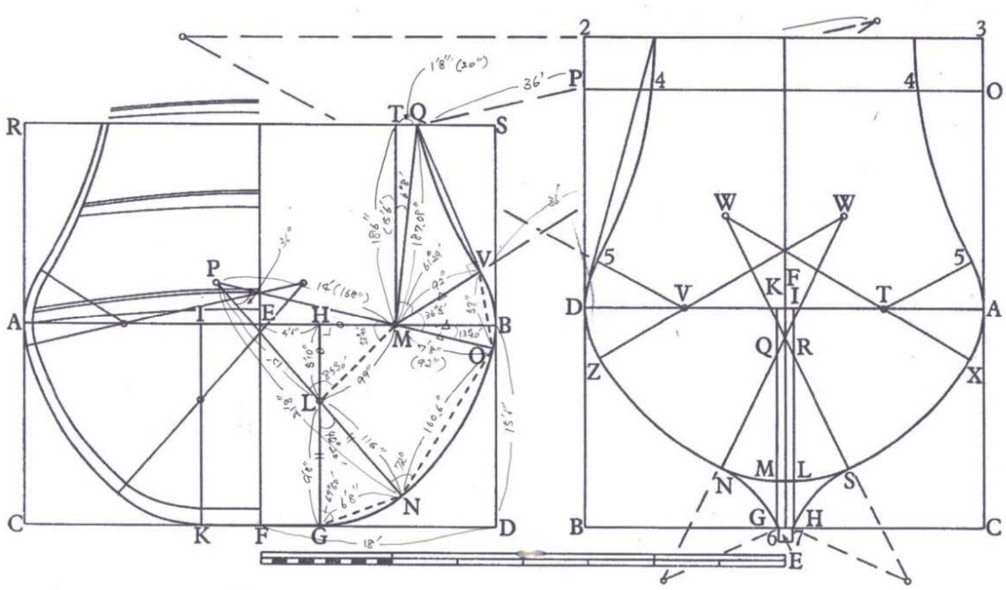
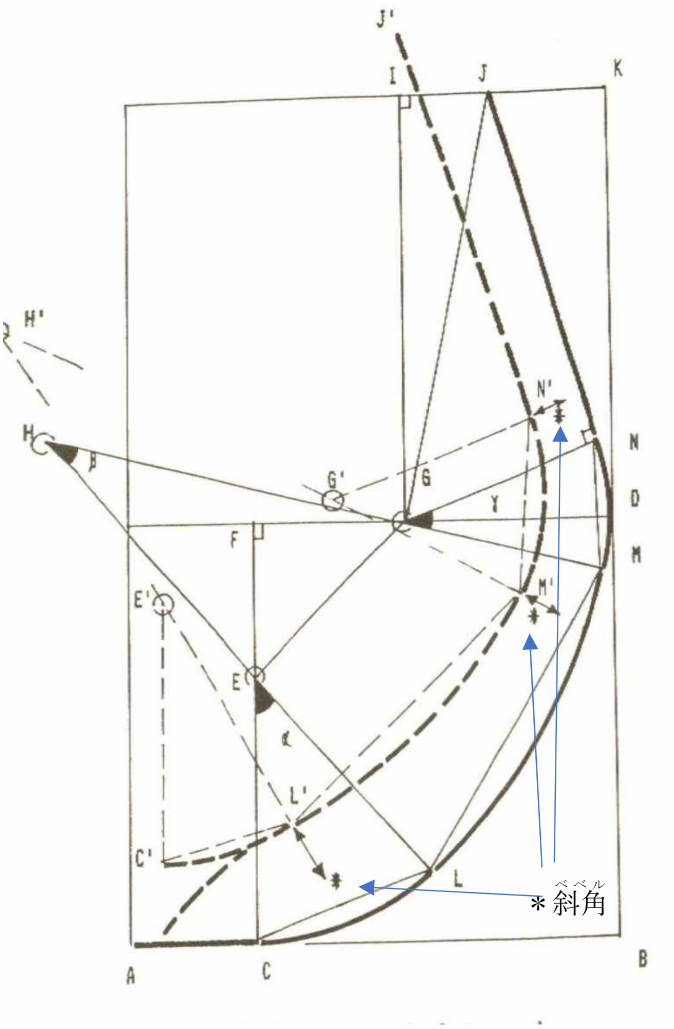


Fig. 1　　Fig. 2

上記に対して、リチャード・バーカーは「造船所における設計、1600 年頃」(1988 年)の中で次のような解釈をしているので、参考までに引用する。

図 23.ジョン・ウェルズの「弦(サブスタンス)」の計算のリチャード・バーカーの解釈



凡例：中央断面：

AB=船幅の半分

AC=船底

CF=BD=DK=IG=深さ

JK=トップ・チンバーの狭まり

(以上与件)

E と G の位置を決める。(弧の中心を決めたのは船大工頭の経験)

EC=EL, GN=GD=GM,

HM=HL 曲線の半径。

こうして HG,HE,FE,IJ が直接に分かる。

∠EFG, ∠ GNJ, ∠GIJ は直角,

E と G を決める時点で∠FEG,

∠FGE, ∠EGH は分かっているので、EHG＝β が正弦定理：

$\frac{EG}{sin\beta} = \frac{EH}{sinEGH}$によって分かる。

∠HGF=∠HGE－∠FGE＝∠DGM　となり、∠FEH=∠HEG－∠FEG＝α が分かる。

JG が分かっているので$\frac{IJ}{sinJGI} = \frac{JG}{sin90^\circ} = JG$、sin∠$JGI$=$\frac{IJ}{JG}$ ∴∠JGI が分かり、JN が分かる。

∵JN²＋GN²＝JG²、 JN $= \sqrt{(JG^2 - GN^2})$　、　$\frac{JN}{sinJGN} = \frac{JG}{sin90^\circ} = JG$、sin∠$JGN$=$\frac{JN}{JG}$

∴∠JGN がわかる。

∠HGF＝∠DGM、∴∠HGF＋90°＝∠DGM＋90°＝∠IGM＝∠JGN＋∠JGI＋∠NMG、

∴∠NMG＝∠HGF＋90°－∠JGN－∠JGI、γ ＝∠NGM。

こうしてスィープの扇形の角度 α、β、γ が全て分かる。

他の横断面は、番号で表された各横断面用に、それぞれに対応する上昇と狭まりによって調整された中心 E'と G'を伴って、同じように計算されたのであろう。

4.ジョン・ハリオット

今まで主にマシュー・ベイカーの「船大工術の断片」とジョン・ウェルズの論文によって、英国の造船設計に数学が導入された状況を見てみたが、「船大工術の断片」は原典のほとんどが公刊されていないこと、そしてベイカー自身が現場を意識して「幾何のデモンストレーション」の形でしか、設計方法を見せていないことにより、数学が取り入れられて計算が行われる実際の状況を直接に目で見ることがなかったので、ここで同時代の造船に関わる文書で、原典がファクシミリで公表されているほぼ唯一ともいえる例であるジョン・ハリオットの大英図書館の手写本 BL Add 6778, ff2-48 を紹介しよう。

1)ハリオットの船殻の設計

図 24.は、この手写本の造船に関する最後の図 25.のフォリオ f.48 の記述から冒頭に挙げた「ハリオットの造船と索具に関する手写本」中にジョン・V.ペッパーが再現し、筆者が寸法を記入したものである。ハリオット自身が作図したものは残されていない。

図 25. ハリオットの最大横断面の型板(f.48)

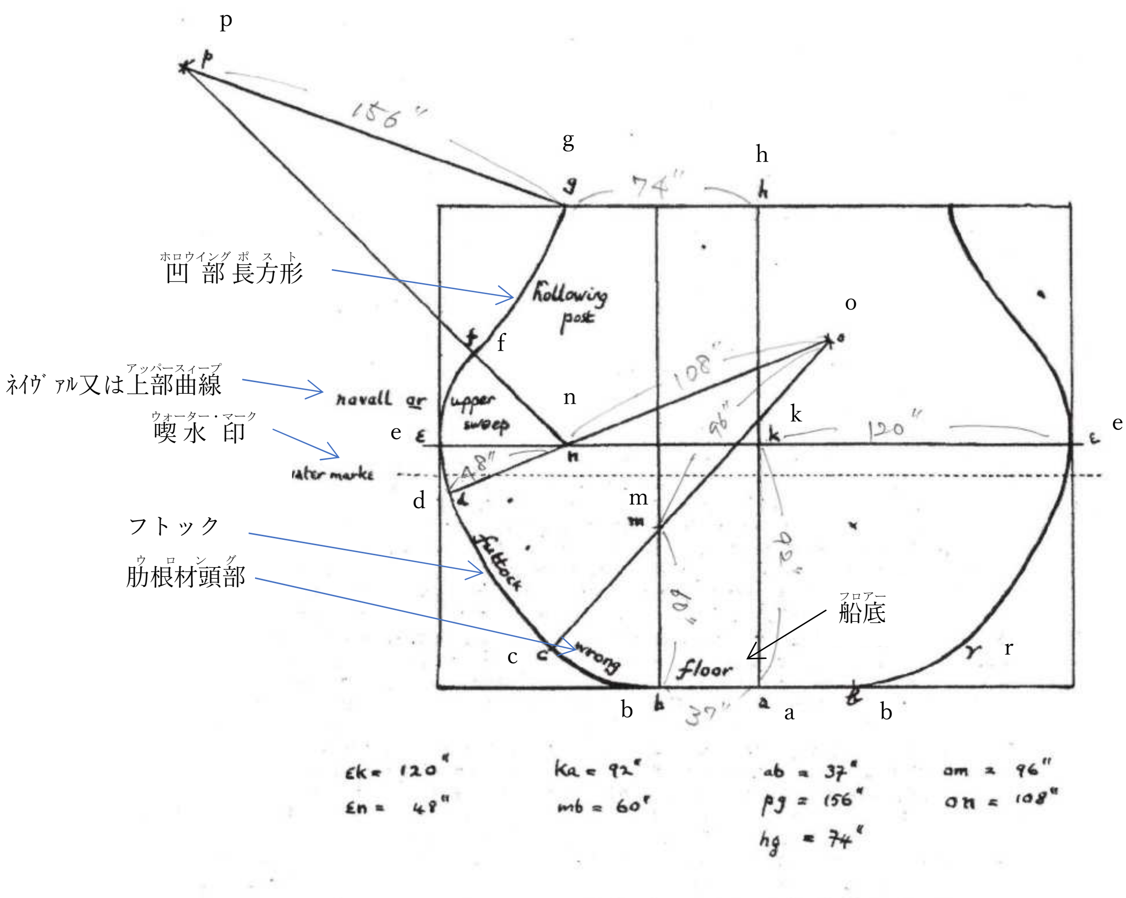


図 25. ジョン・ハリオットの手写本 BL Add 6778，フォリオ f.48

The midship mould or midship bende
the playne of breadth & depth.

The greatest breadth must not be lesse the triple the depth.
nor greater then 3 times the depth.
of this diagram. ke. the half breadth. 102 ynches.
ka. the depth. 92y
ab. 27.y.the half floore. generally:
bc, the wrong. m, the center, mb, the sweep. 60.y
cbaβγ. the floor timber.
bc. βγ. the wronges. c. γ. the wrong heds.
cd. the Futtock. or staddle or studdle by some of the contry.o.
center. oc. the sweep thereof. 156. y.
dfg. the top timber.
df. the upper sweep. n. center. nd. 48.y.
fg. arke. p. center. pf=oc. if fg be strayt: it is called
by some the poste.
in times past a right line [tangent to] df.
as, ke. 3. so hg. 2. usually. here 74.y.

The playne of lengthe & depthe qrun.

un, the keele: unto ee the breadth not above 3, to, 1. nor lesse
then 21
comonly. 52.
na, to un. generally. as. 2, to. 1.
The floor timber cbaβγ being at rectangles with the keele
must have breadth & thickenes as followeth.
In a ship of 20 foote brode: the thickenes in & out, 7 yardes.
the breadth, 8 inches. in 38 foot brode of kings ships. in & out.
12,y.
14 & 15 y broade.
The middest of the first bend standes on a.
The second bendes flore timber must stand so farre of that the
futtocke
may come betweene with some advantage which is called
timber
& space. where the flore tymbers are 8y inch brode, tymber &
space is
used to be 18y. that is, 8y for timber & so 10 ynches for space.
& by such distances you must marke fore & afte as farre as they
will go in bre the playne of breadth & length.
In this plot the lines represent every second bend. & of 30y
distance.

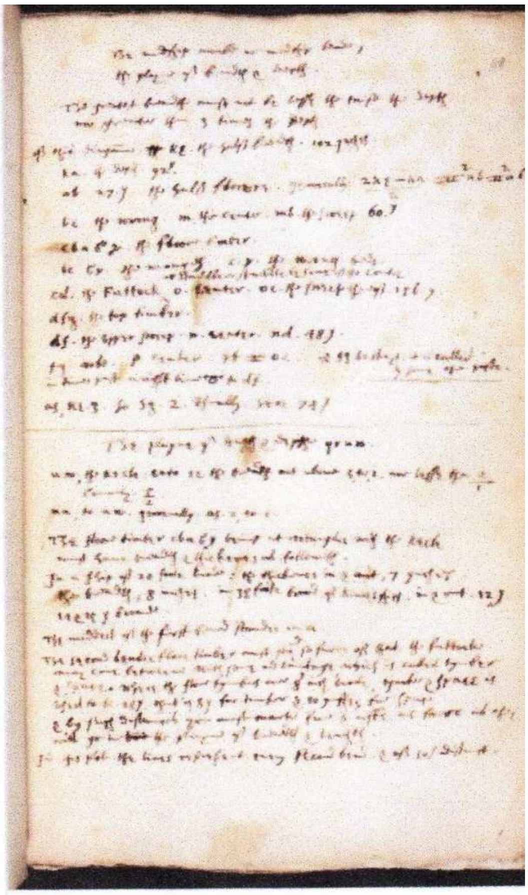


図 24.の横断面の曲線（スィープ）は従来のように円の弧で描かれているが、弧 bcd に、楕円の使用も提案している。

図 26.にフォリオ f.43 の記述に基づいてペッパーが再現した船尾方向第 18 番目の横断面を、また図 28.にフォリオ f.45～48 の記述に基づいて再現した船体の側面図と平面図を転写した。

図 26.　ハリオットの船尾方向第 18 番目の横断面図の再現

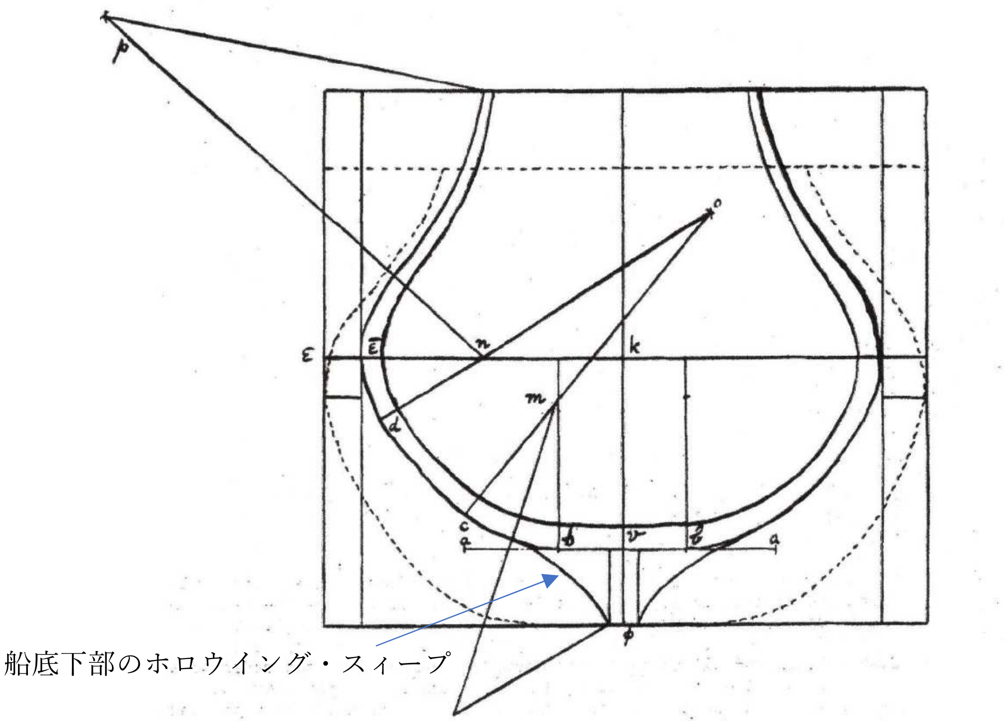
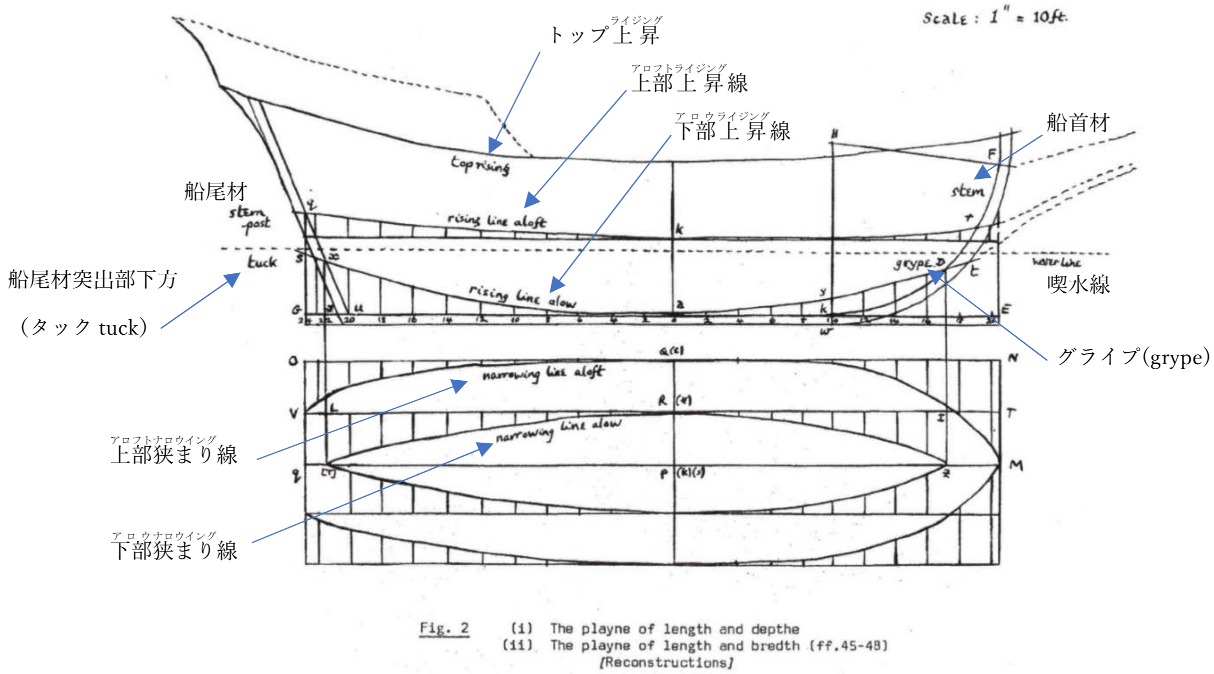


図 27.　ハリオットの船体側面図と平面図の再現

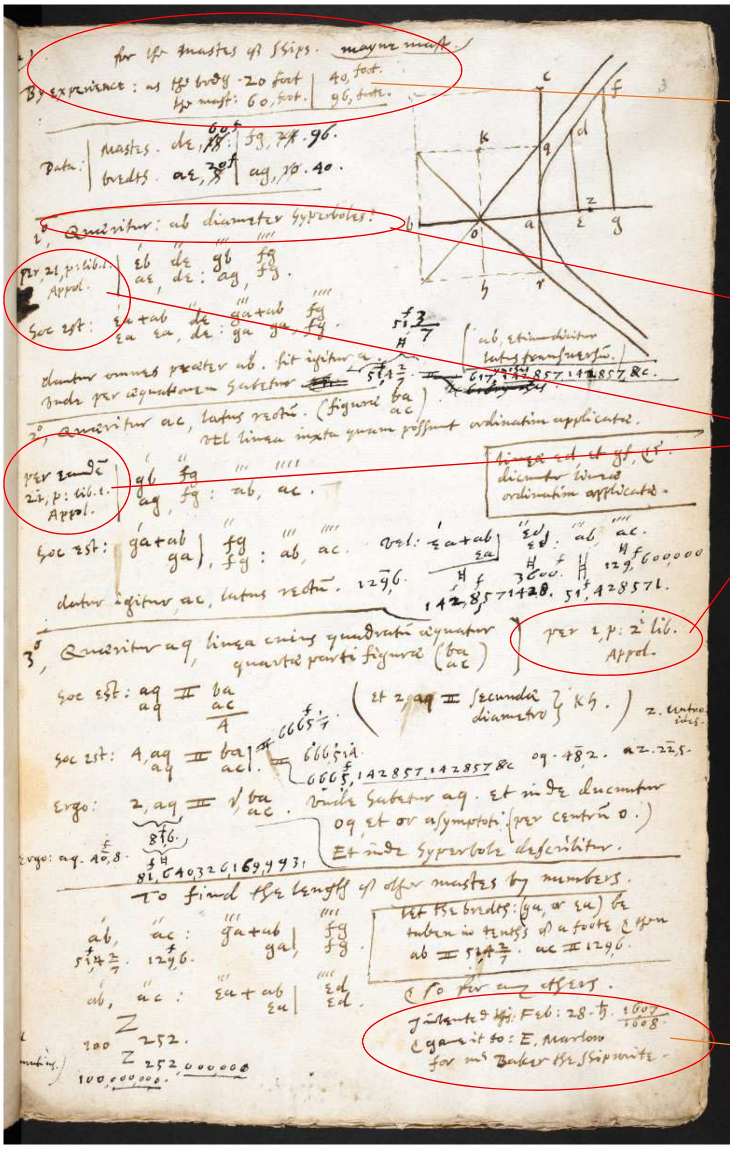


2)アポロニウスの双曲線の利用

ハリオットは、上記の船殻の設計に、楕円の使用を示唆してはいるが、上掲の諸図では数学で導き出されたことが明快に現れているものはない。

数学の使用がスケッチと共に明確に記述されているのは、帆柱の長さの求め方である。ハリオットは主帆柱の長さに関し、竜骨からの主帆柱の長さと船幅が双曲線の縦座標と横軸のような関係にあると考え、アポロニウスの円錐曲線論を用いた。アポロニウスは紀元前2～3 世紀のアレクサンドリアの数学者、天文学者で円錐曲線、双曲線の研究で名高い。長く忘れられていたが、1566 年にボローニャで出版されたコマンディヌスの翻訳版によって、広く知られるようになった。その後、円錐を「大衆化した」のはケプラーとニュートンである。

図 28.　ハリオットの手写本フォリオ f.3　（付録に全文転写）



船のマスト（ﾒｲﾝ･ﾏｽﾄ）用

経験により：

船幅	20 ﾌｨｰﾄ	40 ﾌｨｰﾄ
マスト	60 ﾌｨｰﾄ	96 ﾌｨｰﾄ

ab を求める：双曲線(hyperboles)の直径？

アポロニウスの命題 I,21

アポロニウスの命題 II,1

このページの中では、

＊$(aq)^2 = ba \cdot \frac{1}{4}ac = \frac{360}{7} \cdot \frac{129.6}{4} = \frac{11664}{7}$
$=1666$

＊2/7=1666.285714285･･･

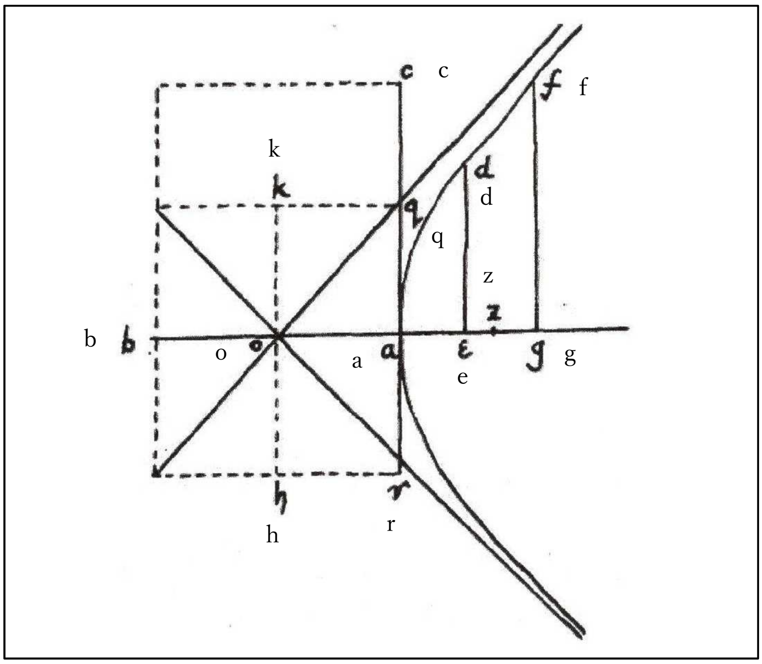
＊6651/7=6665.14285714285･･･

＊ab＝360/7＝51 3/7=51.428571

等が計算されている。

1607/1608 年 2 月 28 日にこれを考え出し、船大工のベイカー氏のために、E.マアロウに渡した。

図 29.　ハリオットの手写本フォリオ f.3 図 28.の双曲線のスケッチを転写拡大



上図 29.の双曲線についてのハリオットの計算式は当時の表し方で次のようなものである：

‘	‘ ‘	‘ ‘ ‘	‘ ‘ ‘ ‘
eb	de	gb	fg
ae	de	ag	fg

現代の表記法にすると、eb×ae：de^2＝gb×ag：fg ^{2} となり、

eb=ea+ab, gb=ag+ab なので、(ea+ab)×ae: de^2=(ga+ab): fg ^{2} となり、

ae=20, eg=20, ag=40, de=60, fg=96 なので、双曲線の直径 ab＝360/7＝51 $^3/_7$ となる。

次にハリオットは通経(ラツス・レクツム、latus rectum)ac を求めるとしているが、通経は図 31.のように焦点 z で横軸に垂直な線が横軸の両側の双曲線と交わる 2 点間の距離なので、これは間違っている。

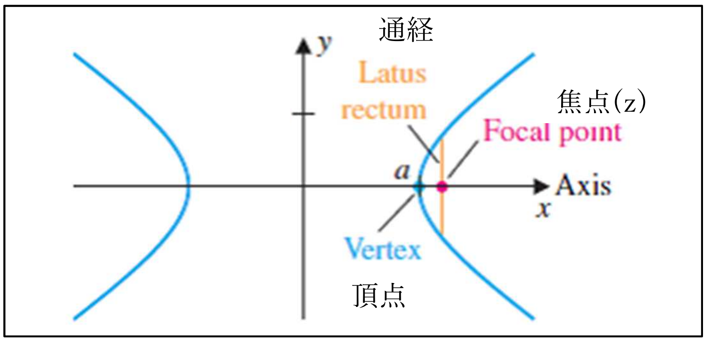


図 30.通経 latus rectum の定義

双曲線の関数より、gb×ag：fg ^{2}=ab：ac、故に、ac＝129.6 が得られる。

アポロニウスの命題 第 II. 1 から　aq ^{2}=ba×$\frac{1}{4}$ac=$\frac{360}{7}$・$\frac{129.6}{4}$　となり、

$4aq^2$=6665 $^1/_7$、そして aq=40.820 を得る。

アポロニウスは、焦点(z)という特性を定義も使いもしなかったことはよく知られているが、有心円錐曲線（セントラル・コーニックス）の場合に、
az×zb と az’×z’b が$\frac{1}{4}$ac×ba または aq^2 に等しい点 z 及び z'を含むという特性があり（アポロニウスの命題 69〜73, III, 45-52)、この特性を利用したのである。この z が焦点。
次に $oq^2 = oa^2 + aq^2 = (180/7)^2 + (40.8...)^2 = 2327.51$、故に $oq = 48.24...$
従って、$aq^2 = az \times zb = (oz - oa)(oz + ob) = oz^2 - oa^2$、
oa=ob 故に、$oz^2 = oa^2 + aq^2 = oq^2$
そして oz=oq、az=oz－oa なので az=oq－oa、$oa = {}^1/_2 ab = {}^1/_2 \times 51\,{}^3/_7 = 25\ 5/7$
故に $az = 48.24... - 5\,{}^5/_7 = 22.52999068$
帆柱の長さ ed は
$(ea+ab) \times ea : ed^2 = ab : ac = 100 : 252$、
故に $ed^2 = (7ea + 360) \times 36/100$ の式は船幅 ea から帆柱の長さ ed を与える。
<u>$ed^2 = (7ea + 360) \times 36/100$ の式の検証</u>
$ab = 360/7$,　$(ea+ab) \times ea : ed^2 = ab : ac = 100 : 252$,　$ac = 129.6$ ${}^{129.6}/_{360} = 36/100$

$$\therefore\ ed^2 \times ab = (ea+ab) \times ea \times ac$$

$$ed^2 = \{(ea+ab) \times ea \times ac\} \div ab = (ea/ab+1) \times ea \times ac = (ea \div 360/7 + 1) \times ea \times ac$$

$$= (7ea+360) \times ea \times ac \div 360 = (7ea+360) \times ea \times ac/360 = (7ea+360) \times ea \times 129.6/360$$

$$= (7ea+360) \times ea \times 36/100$$

$$\therefore\ ed = \sqrt{(7ea + 360) \times ea \times 36/100} = \frac{6}{10}\sqrt{(7ea + 360) \times ea}$$

ここで、ハリオットの原本 f.3 にある船幅 ea= 20 フィートを入れると、

$$ed = \frac{6}{10}\sqrt{(7 \times 20 + 360) \times 20} = \frac{3}{5}\sqrt{(7 \times 20 + 18 \times 20) \times 20} = \frac{3 \times 20}{5}\sqrt{(7 + 18)} = 60$$ となり、

ハリオットがマストの長さとしている 60 フィートとなる。

図 28.の f.3 の赤丸で囲った部分に記されている船幅が 20 フィートの時に、マストが 60 フィートとなる。

5. 結論

ヨーロッパでは紙が自由に使えるようになって、アバカス計算から紙上でのペン・レコニングによる計算に移行した。この状況はイタリア、スペイン、ポルトガルの南欧諸国で先行し、これらの国での造船には単純な算数、幾何が取り入れられていた。英国はそれをヴェネチアから学んだ。その先端に居たのがマシュー・ベイカーであった。彼は、算数計算も覚束ない造船所の現場のために、出来るだけ計算を現場に持ち込まないように、いわば「幾何のデモンストレーション」を優先させ、様々な定規（スケール）を作って用い、船大工頭としての彼は、現場の実物大の型板(モールド)の製作による設計を事務所での紙上での設計図の作成に変えた。

その頃、英国では数学の研究が盛んになり、数学で生計を立てる数学の実用的使用者（マ

テマティカル・プラクチショナー）が輩出した。ベイカーは彼らと積極的に交流し、数学の実用的使用者達の中には、ジョン・ウェルズやジョン・ハリオットのように造船に精通する者も多かった。英国の造船に幾何学や数学が取り入れられる環境が作られた背景には英国における航海術に対する関心の高まりが大きく影響した。探検航海において先行したスペインとポルトガルは航海術、航海図を発達させたが、競合者達に対して秘密主義を貫いた。英国はこれを打破して、新世界へ航海すること、そして新たに北極経由の航路を開発することに力を注いだ。航海術は天文学と密接に関係しており、天文学においては、膨大な計算をすることに大変な時間をかけていた。この計算を大幅に軽減したのが、ジョン・ネイピアが 1616 年に発表した乗算を加算に変換する対数(ロガリズム)である。ネイピアのアイデアが出版されると、ヘンリー・ブリッグスはネイピアを訪れ、10 を底とする常用対数を提案、これが広く世に普及することとなった。

このように数学が造船設計に使用されるようになったことを、船の重要な要素が今日のように科学的に決められ、その際に数学が使われるようになったと混同してならない。17 世紀になっても船の設計は、船殻のみならず、帆柱と帆桁も、あくまでも船大工頭の経験で行われたのである。船の設計に科学的な手法が取り入れられるのは、18 世紀になって数学者オイラーの解析学的な手法等が開発されて、重心、メタセンターの計算、そして流体力学が発達して以降のことである。17 世紀までは、それまでに建造された船に対する腕の良い船長などの評判をもとに試行錯誤を重ねながら設計が行われ、幾何学的な方法は、作図や型板の作成に用いられたのである。しかし、縮尺で作図された図面から実物大の型板を作成する過程で齟齬が生じることが多く、また同型船を再現することもうまくゆかないことが多かった。ベイカーのように様々なスケールを用いたり、曲線の作成に円の弧を用いたりすることによって、作図の精度や型板への再現性は改善されたが、それだけでは不十分であった。それを改善する方法は、ベイカーもある程度取り入れたが、数学計算によって、実物大の寸法を計算することであった。ハリオットの例で見たように、円錐曲線や累乗根のグラフの曲線が用いられるようになったことも精度を上げることに貢献したと考えられる。

終わり

附録：Harriot 文書フォリオ f.3 全文転写

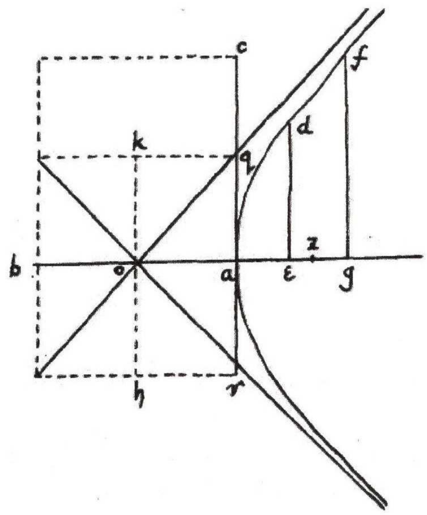
（一部ラテン語は英訳）

By experience : as the bredth ・20feet | 40feet

The mast : 60feet | 96feet

Data masts de 60f | fg 96

Bredths ae 20f | ag 40



1° There is sought ab, the diameter of a hyperbola?

By Proposition I. 21 of Apollonius | eb ae ‘ de de “ : gb ag ‘” fg fg “” .

That is : ea + ab ea ‘ ea de “ de : ga + ab ga ‘” ga, fg fg “” .

ab is also said to be the latus transversum

There are given all besides ab, therefore let there be a

Whence by the equation are had $51f4^2/_7 = 51f^3/_7$

617,142857. 142857 & c

2° There is sought ac, the latus rectum (ab, ac in the figure)

or adjacent lines which can be applied ordinates.

By the same Proposition I. 21 of Apollonius | gb ag ‘ fg fg “ : ab ‘” ac “”

the lines ed and gf etc. are said to be the applied

That is: ga+ab ga , ‘ fg fg “ : ab ‘” ac “” is: ea+ab ea ‘ ed ed. “ ab ‘” ac “”

Therefore there is given ac, the latus rectum. 129,6

3600f 129f600,000

1428f,571428. 51f,428571

訳注：eb×ae=(ea+ab)×ea=(20+51³/₇)×20=1428,571428, 51f³/₇

3° There is sought aq, the line whose square equals a fourth prt of the figure. ba ac — By the same Proposition II. 1 of Apollonius

and 2, aq = second diameter kh

z. center ????

That is: $\frac{aq}{aq} = \frac{ba}{\frac{ac}{4}}$ $666^{f}5^{1}/_{7}$

That is: 4, aq = ba ac = 666514 6665f,142857142857&c

訳注：ba×ac＝51f³/₇×129.6=6665,142857

Therefore: 2, aq = √ba ac .

訳注：2 乗根

$\underbrace{81^{f},6}$ ‖ 81^{f}, 640,326,169,993

Therefore: aq. 40^{f},8

Whence is had aq, and hence there may be drawn *oq and or, the asymptotes (by the center o),* and hence the hyperbola is described.

To find the lengths of other mastes by numbers.

‘	“	‘”	“”
ab	ac :	ga+ab	fg
$51^{f},4^{2}/_{7}$	129f,6	ga,	fg
‘	“	‘”	“”
ab,	ac :	ga+ab	ed
		eu	ed
100	252		
100,000,000.	252,000,000		

Let the bredth: (ga or ea) be taken in lengths of a foote & then ab= $51,4^{2}/_{7}$, ac=129,6

& so for any others.

Invented this : Feb: 28th 1607

& gave it to E. Marlow 1608

for Mr Baker the shipwrite.

山田検証

前提：ae=20, eg=20, ag=40, de=60, fg=96、 eb×ae : de² = bg×ag : fg²

(20+ab)×20 : 60² = (40+ab)×40 : 96²、 (20+ab): 10² = (40+ab)×2 : 16²

100 (40+ab) = 128(20+ab)、 25×40 + 25ab = 32×20 + 32ab

360 = 7ab、 ∴ ab = 360/7 = $51^{3}/_{7}$、

gb×ag : fg² = ab : ac、 (ga + ab)×ga : fg² = ab : ac、 (40 + ab)×40 : 96² = ab : ac

ac =(96²×360/7)÷ {(40+360/7)×40} =(96²×360)÷(40×640) =1296/10

∴ ac＝129.6

References： 順不同

1. Wescott Abell, "The Shipwright's Trade", 2nd edition,1981, London
2. E.G.R. Taylor, "The Mathematical Practitioners of Tudor & Stuart England", 1954, London
3. John Napier, "A Description of the Admirable Table of Logarithmes, translated by Edward Wright from the Latin "Mirifici Logarithmorum Canonis Descriptio by Ioanne Népero,1614",2010, facsimile edition, UK
4. Gareth Roberts & Fenny Smith ed. "Robert Recorde, The Life and Times of a Tudor Mathematician", 2013, UK
5. Richard Barker, "Fragments From The Pepysian Library", Separata da Revista da Universidade de Coimbra, Vol.XXXII, 1985, Coimbra
6. Richard Barker, "Design in the Dockyards, about 1600", 5th International Symposium on Boat and Ship Archaeology, 1988, Amsterdam
7. Sergio Bellabarba, "The Ancient Methods of Designing Hulls", The Mariner's Mirror Vol. 79, 1993, London
8.Stephen Andrew Johnston, "Making Mathematical Practice – Gentlemen, practitioners and artisans in Elizabethan England", 1994, Cambridge
9. John V. Pepper, "Harriot's manuscript on shipbuilding and rigging (ca. 1608-1610)", The 3rd International Reunion for the History of Nautical Science and Hydrography, 1979, Greenwich
10. Brad Loewen, "The Structures of Atlantic Shipbuilding in the 16th century – An archaeological perspective", 1998, International Symposium on Archaeology of Medieval and Modern Ships of Iberian-Atlantic Tradition, Lisbon
11. Jonathan Adams, "A Maritime Archaeology of Ships – Innovation and social change in Medieval and Early Modern Europe", 2013, UK
12. W. Salisbury & R.C. Anderson ed. "A Treatise on shipbuilding and A Treatise on Rigging written about 1620-1625 ", 1958, Occasional publications no.6 of The Society for Nautical Research, London
13. Richard Barker ed. "A Manuscript o shipbuilding, circa1600 copied by Newton", 1994, The Mariner's Mirror Vol. 80, 1994, London
14. C.S. Knighton and David Loades ed. "Elizabethan Naval Administration", 2013, UK
15. Robert Grenier and others ed."The Underwater Archaeology of Red Bay, Vol. III", 2007, Parks Canada
16. T.L. Heath ed. "Apollonius of Braga －treaties on conic sections, 1896, Cambridege
17. Thomas Harriot,"Mss. 6788, British Library, digitalized by Max Planck,ECHO

18. Francisco Alves ed. "Proceedings: International Symposium o Archaeology of Medieval and Modern Ships of Iberian-Atlantic Tradition, 1998 Sept., Lisbon
19. 志賀浩二,"数の大航海－対数の誕生と広がり"、1999、日本評論社