

未数値化の紙海図における日本測地系から世界測地系への変換手法

安城たつひこ：海洋研究室

高橋陽蔵：航海情報課

Conversion technique from the Tokyo Datum about un-digital Paper Charts to the World Datum

Tatsuhiko AJIRO: Ocean Research Laboratory

Yozo TAKAHASHI: Chart and Navigational Information Division

1 はじめに

水路業務法改正の施行（2002年4月）、改正SOLAS条約の発効（2002年7月）に対応するため、平成14年3月までに、航海用海図を全て日本測地系から世界測地系に変換する必要が生じ、大量の海図を短期間に改版しなければならなくなった。

ここでは、これに対応してベクタ変換してデジタル化した海図約300図以外の、残りの従来型のいわゆるラスタ変換ともいえるアナログ版海図の世界測地系への対応事例について、目的達成のために研究した技術のうち、投影法に関する変換手法の研究について紹介する。

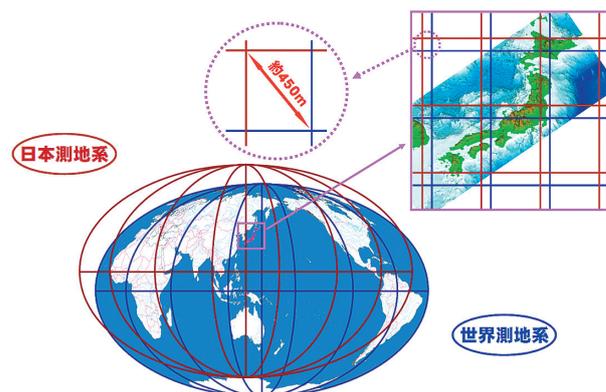
2 背景

海図の測地系を日本測地系から世界測地系に変更する理由は、GPSの普及に伴い船舶運航の世界では国際的な位置の基準は世界測地系が標準になったこと、改正SOLAS条約で大多数の船舶にAIS（船舶自動識別装置）の搭載を義務化することで自動送受信情報の位置の基準が世界測地系に限定されたこと、IHO（国際水路機関）の海図作製に関する技術基準の中で世界測地系で位置表示することが奨励されたことなどである。

また、変更の際して、日本測地系と世界測地系の海図が混在することは海難の誘発要因となりかねないことから、平成12年の年明けには可能な限り短期

間で処理するという基本方針が示された。

なお、根拠となる水路業務法の改正（平成14年4月1日施行）については、多々紹介されているので省略する。



第1図 日本測地系と世界測地系の位置関係の概念図
Fig. 1 Conception diagram of position relations of the Tokyo Datum and the World Datum

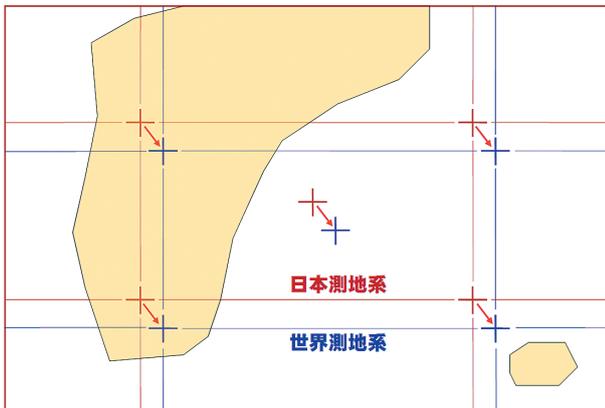
3 海図の測地系移行への問題点

我が国が刊行していた航海用海図約730図の測地系を世界測地系に移行させるための最大の問題点は、当時の海洋情報部の海図刊行能力であり、それは年間で100図程度であった。

水路業務法の一部改正が施行される直前の平成14年3月までに直営でベクタ変換してデジタル化処理できる海図は約300図であり、積み残される約430図の速やかな刊行への対応策が求められた。

そこで、未数値化の紙海図の測地系変換にはついては、図中の海図情報を固定し、経緯度線を測地系変換量だけ移動させるという簡便法を採用することとした。

また、図郭の四隅点全てを変換し格子線を作図する方法は、一見、より確からしく思えるが、それぞれの点の変換量が異なり緯線と経線の直交が崩れるため、変換に際しては、図面の包含区域を代表する左下隅点と右上隅点の経緯度値を変換し、変換量に合わせて経緯度格子線を移動させることとした。



第2図 海図情報と測地系の位置関係

Fig. 2 Position relations of the chart information and the Datum

なお、430図の紙海図を2年間で世界測地系様式的に的確に移行するための必須条件として、以下の3点に留意した。

- ・海図の骨格であり海上位置決定の基準でもある経緯度線を正確に新様式で表現する等、海図原版修正時における内容の精度保持。
- ・紙海図用原図の作成においては、経験のいる特殊な編集・製図技術とともに、原図作成用フィルム版の取り扱いに関する熟練技術による迅速な処理能力が必要。
- ・海図記載情報の最新維持が不可欠であり、原図作成作業中においても水路通報の安全に関する情報を適切に取り入れること。

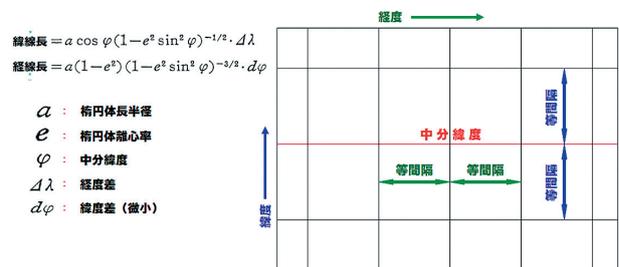
地球楕円体の定数比較（ただし、短半径は計算による参考値）

測地系	扁平率	長半径 (m)	短半径 (m)
日本測地系 (BESSEL)	1/299.152813	6377397.155	6356078.963
世界測地系 (WGS-84)	1/298.257223563	6378137.000	6356752.314
(参考)		長半径差 (m)	短半径差 (m)
BESSEL-WGS84		-739.845	-673.351

4 航海用海図の図法について

4.1 平面図

1/5万より大縮尺の図に使用しており、経線は等間隔平行直線群、緯線はこれに直交する等間隔平行直線群となる。地球表面の極小部を平面と見なして描く場合には、距離や角度の誤差は無視できるとの考えで作図する方法で、図のほぼ中央の緯度（中分緯度）における地球表面上の緯度・経度の単位長（度または分）に、図の縮尺を乗じた値を単位として、緯度・経度をそれぞれ等間隔に目盛る。



第3図 平面図の説明

Fig. 3 Explanation of the Plan map

4.2 メルカトル図法

1/5万以下の縮尺の図に使用しており、経線は等間隔平行直線群、緯線はこれに直交する平行直線群で、高緯度ほど緯線間隔は増大する。正角図法であり、方位（子午線となす角）は常に正しく表されることから、海図に適した図法として国際的にも広く使われている。なお、2地点を結ぶ大圏は、航程線より長く表現される。

また、地球の回転楕円体における緯度長及び経度長から計算式を求めると、次のとおりとなる。

$$\text{緯線長} = a \cos \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} \cdot \Delta \lambda \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

$$\text{経線長} = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2} \cdot d\varphi \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

①より緯度 φ における緯線方向の線拡大率 L_p を求めると

$$L_p = \frac{a \cos 0^\circ (1 - e^2 \sin^2 0^\circ)^{-1/2} \cdot \Delta \lambda}{a \cos \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} \cdot \Delta \lambda} = \sec \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} \quad \dots \dots \textcircled{3}$$

また、経線方向の線拡大率 L_m は次のとおりであり、正角条件を満たすため、 L_p と等しいと置く

$$L_m = \frac{dy}{a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2} \cdot d\varphi} = \sec \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} \quad \dots \dots \textcircled{4}$$

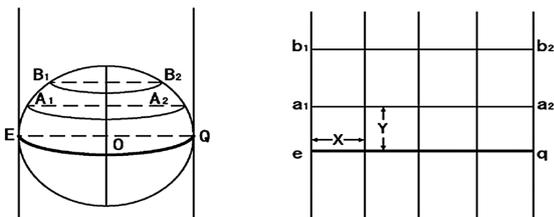
④より

$$dy = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2} \cdot \sec \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} d\varphi \\ = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1} \cdot \sec \varphi d\varphi$$

$$y = a \int_0^\psi \frac{1 - e^2}{(1 - e^2 \sin^2 \psi) \cos \psi} d\psi$$

途中計算省略

$$y = a \log \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right) \cdot \left(\frac{1 - e \sin \psi}{1 + e \sin \psi} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad X = a \lambda$$



第4図 メルカトル図の説明
Fig. 4 Explanation of the Mercator map

5 許容誤差の検討

海図の測地系変換に伴う図積等の位置精度の許容誤差を決定することは極めて重要である。

これを踏まえて慎重に検討した結果、海図は測量原図をベースに編集することが基本であり、これを念頭に、測量原図における原点記入時の許容誤差 0.2mm 以内（水路測量業務準則第23条）を準用することとした。

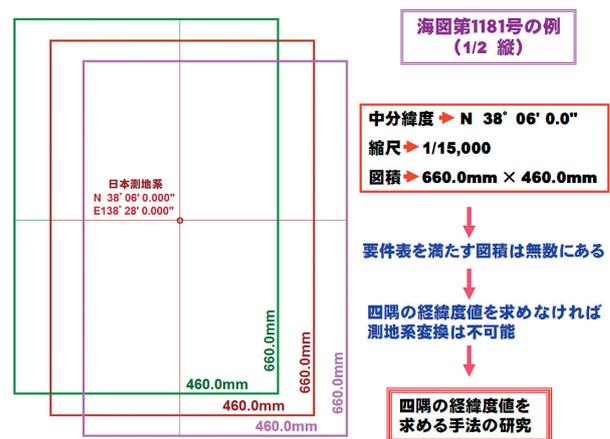
5.1 平面図の場合

最初に、海図の編集に必要な、海図の種別、番号、図名、縮尺、座標計算根拠、各種採用資料、磁気偏差値、図積寸法、編集の主旨等の海図作成の基本となる情報を記載した要件表の内容について、確認する必要がある。

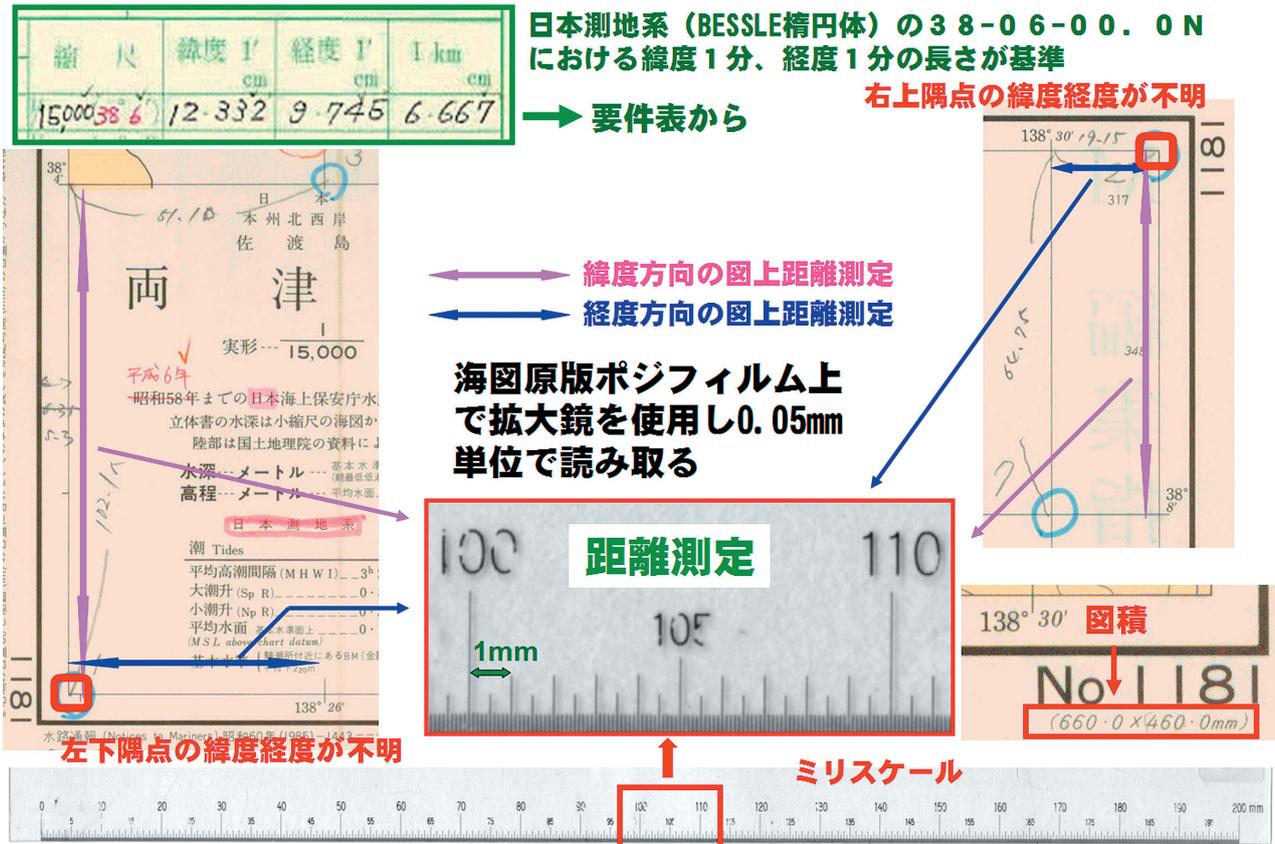
平面図については、要件表に図郭四隅の経緯度値が記載されておらず数値が不明のために、そのままでは測地系変換が不可能であり、この数値を求める手法の研究が必要となった。

ここでは、海図第1181号を例にして具体的に以下の第5図～第11図で説明する。

第5図 要件表の記載内容
Fig. 5 Mention contents of the Planning Note



第6図 隅点経緯度不明の説明
Fig. 6 Cannot get Geographical Co-ordinates value of corner points



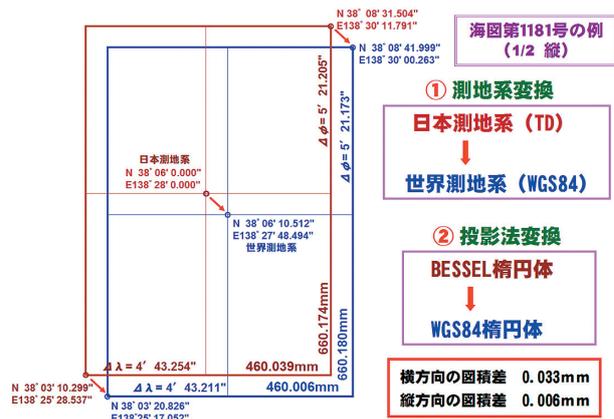
第7図 隅点経緯度を求める準備

Fig. 7 Preparations for calculation of Geographical Co-ordinates value for corner points



第8図 隅点経緯度の計算

Fig. 8 Calculation of Geographical Co-ordinates value for corner points



第9図 隅点経緯度の測地系変換計算

Fig. 9 Calculation of the Datum conversion for Geographical Co-ordinates value of corner points

(1) 楕円体の原子
 イ、ベッセルの算出した値
 長半径 $a = 6377397.155 \text{ m}$
 扁率 $f = \frac{1}{299.152813}$
 扁率 $f = \frac{1}{298.257223563}$
 ロ、GPSで使っている値
 長半径 $a = 6378137 \text{ m}$
 扁率 $f = \frac{1}{298.257223563}$

(2) 緯度、経度、高さから地心座標への変換
 $X = (N+H) \cos L \cdot \cos M$
 $Y = (N+H) \cos L \cdot \sin M$
 $Z = (N(1-e^2) + H) \cdot \sin L$
 $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 L}}$
 $e^2 = f(2-f)$
 ただし
 L: 緯度
 M: 経度
 H: 楕円体からの高さ (標高+ジオイド高)
 a: 長半径
 f: 扁率
 N: 卯酉線曲率半径
 e: 第一離心率
 (ジオイド高は別図から読み取る)
 とする。

(3) 地心座標から緯度、経度、高さへの変換
 $L = \tan^{-1} \left(\frac{Z - e \cdot H \cdot \sin(L_{i-1})}{P(1 - e^2)} \right)$ (Lは繰り返し計算)
 $M = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right)$
 $H = \frac{P}{\cos L} - N$
 $P = \sqrt{X^2 + Y^2}$
 $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 L_{i-1}}}$
 ただし
 $|H_i - H_{i-1}| < 0.00001 \text{ (m)}$
 $L_i = 0, H_i = 0$
 とする。

(4) 座標変換
 日本測地系をWGS-84座標系に変換
 $\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -146.383 \\ +507.298 \\ +680.443 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$
 ただし
 X_A, Y_A, Z_A : 日本測地系に準拠した地心座標系
 X_A, Y_A, Z_A : WGS-84座標系に準拠した地心座標系
 $\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A$: 日本測地系からWGS-84座標系に変換する時の地心座標の原点移動量
 とする。

第10図 測地系変換計算式

Fig. 10 Formula calculation for the Datum conversion

M表 (経緯度分秒長程表) の比較

TABLE M ベッセル		緯 度			経 度		
求点緯度	1度長 (m)	1分長 (m)	1秒長 (m)	1度長 (m)	1分長 (m)	1秒長 (m)	
0 0 0.000	110563.677	1842.72794	30.7121324	111306.578	1855.10963	30.9184939	
10 0 0.000	110597.062	1843.28437	30.7214062	109626.613	1827.11022	30.4518370	
20 0 0.000	110693.287	1844.88812	30.7481354	104634.825	1743.91375	29.0652292	
38 6 0.000	110986.458	1849.77431	30.8295718	87702.548	1461.70914	24.3618190	
40 0 0.000	111022.609	1850.37681	30.8396135	85383.598	1423.05996	23.7176660	

TABLE M WGS-84		緯 度			経 度		
求点緯度	1度長 (m)	1分長 (m)	1秒長 (m)	1度長 (m)	1分長 (m)	1秒長 (m)	
0 0 0.000	110574.276	1842.90460	30.7150766	111319.491	1855.32485	30.9220808	
10 0 0.000	110607.765	1843.46275	30.7243792	109639.364	1827.32273	30.4553789	
20 0 0.000	110704.288	1845.07147	30.7511911	104647.086	1744.11811	29.0686351	
38 6 0.000	110998.370	1849.97283	30.8328805	87713.058	1461.88429	24.3647382	
40 0 0.000	111034.633	1850.57721	30.8429535	85393.857	1423.23095	23.7205158	

第11図 平面図の投影法計算

Fig. 11 Projective calculation for the Plan map

以上の結果をもとに比較すると、
 海図第1181号 (縮尺1/15,000 中分緯度38°06'0.0" N 1/2 縦) の例

日本測地系 縦 (緯度方向) 660.174mm × 横 (経度方向) 460.039mm

世界測地系 縦 (緯度方向) 660.180mm × 横 (経度方向) 460.006mm

日本測地系と世界測地系の図積差

縦図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系
 = -0.006mm

横図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系
 = +0.033mm

この計算結果から、その差は許容誤差である0.2mm以内であることが確認できた。

5.2 メルカトル図の場合

海図第1208号 (縮尺1/300,000 基準緯度35°N 全紙横) の例

日本測地系 縦 (緯度方向) 672.917mm × 横 (経度方向) 973.624mm

世界測地系 縦 (緯度方向) 672.935mm × 横 (経度方向) 973.651mm

日本測地系と世界測地系の図積差

縦図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系
 = -0.018mm

横図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系
 = -0.027mm

日本測地系 (ベッセル楕円体)		縮尺 1/300000			海図第1208号の例 (全横)		
海図 1208号	縮尺	緯度	経度	緯度	経度	緯度	経度
入力値	横図積距離 (mm)	973.624					
出力値	縦図積距離 (mm)	672.917					
		度	分	秒	度	分	秒
左下		31	55	0.000	125	38	0.000
右上		33	47	0.000	128	50	0.000

横図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系 = -0.027 (mm)
 縦図積距離の差 = 日本測地系 - 世界測地系 = -0.018 (mm)

世界測地系 (WGS-84)		縮尺 1/300000			海図第1208号の例 (全横)		
海図 1208号	縮尺	緯度	経度	緯度	経度	緯度	経度
入力値	横図積距離 (mm)	973.651					
出力値	縦図積距離 (mm)	672.935					
		度	分	秒	度	分	秒
左下		31	55	12.237	125	37	53.208
右上		33	47	11.463	128	49	52.150

第12図 メルカトル図における図積差

Fig. 12 Difference of size on the Mercator map

この計算結果から、その差は許容誤差である0.2mm以内であることが確認できた。

6 海図編集の外注化

海洋情報部の歴史で前例の無い事態であり、これに適切に対処するため、以下の条件を設定した。

なお、地色版については墨版の海岸線等の区域を表す境界線と、また、水色版については墨版の等深線等の区域を表す境界線とそれぞれ一致していることから、基本的には各版の修正が不要なため編集・製図作業は行わなかった。

6.1 外注化に伴う海図編集者の技能的条件

海図の図式、使用方法、編集基準、製図基準に精通し、製図技術に熟練しており、かつ、海図記載内容の評価能力を有することを前提とした。

なお、以下の説明にある編集指示図とは、具体的な編集・製図作業が分かるように表示された素描図で、設計図のような役割を持つものである。

6.2 測地系変換海図の原版作成の作業方針

作業要領

各海図毎に修正内容を取りまとめて表示している編集指示図に従って作業を進める。

1 緯度経度線の変更

既存の日本測地系海図の緯度経度線を新規の世界測地系の緯度経度線に変更

ア 既存（日本測地系）海図の輪郭図（輪郭、緯度・経度目盛り、緯度・経度格子線、メートル尺及び欄外記事等）を削除する。

イ 世界測地系海図仕様の輪郭図に前記アの処理を施した原版を、世界測地系緯度経度共通基準点（「+」符号）を参考にして埋め込む。

ウ 前記アの作業で削除した等深線、等高線、地物（建物）があれば必要な描画を行い復元させるとともに、前記イの作業で描画されている緯度線、経度線について水深、地名（文字）等に重なる部分を削除する。

2 ローマ字のヘボン式つづりへの変更

編集指示図に従いローマ字のつづりについて、訓令式からヘボン式に変更

3 コンパスの変更

編集指示図に示したとおり、コンパスの磁針偏差値等の内容を訂正

4 港界のマゼンタ版への変更

港界、コンパスが墨版の場合、編集指示図に従い、マゼンタ版に転写するとともに必要な修正を施した後、墨版から削除する。

5 海図情報の最新維持

作業期間中において、水路通報による海図情報の訂正がなされた事項については最新維持のために必要な作業を行う。

6.3 測地系変換海図の原版作成の作業手順

1 作業用ポジフィルム作成のための準備

貸与する日本測地系海図墨版ネガフィルムの輪郭図（輪郭、緯度・経度目盛り、緯度・経度格子線、メートル尺等）を消去する。ただし、世界測地系海図輪郭図との共通点（「+」符）として指定した緯度・経度格子線の交点は残す。

2 作業用ポジフィルムの作成

前記1のネガフィルムから作業用ポジフィルムを作成する。

3 世界測地系海図輪郭図との重ね合わせ

前記2で作成したポジフィルムに表示している共通点を使用し、貸与する世界測地系海図輪郭図を重ね合わせる。

4 ピン穴の切り出し

前記3の2枚のポジフィルムと貸与するマゼンタ版（1枚）のポジフィルムの位置ズレ誤差の防止とともに、以後の作業の効率化のため、世界測地系海図輪郭図のポジフィルム版を基準として、3枚を重ね合わせた状態で「ピン穴」をあける。

5 作業用ポジフィルムの修正

ア 墨版の修正

（ア）前記1の作業で削除した等深線、等高線、地物（建物）があれば必要な補筆描画で復元させるとともに、前記3の作業により描画された緯度線、経度線について水深、地名（文字）等に重なる部分を削除する。

（イ）編集指示図に従いローマ字体について、訓令式からヘボン式に修正する。

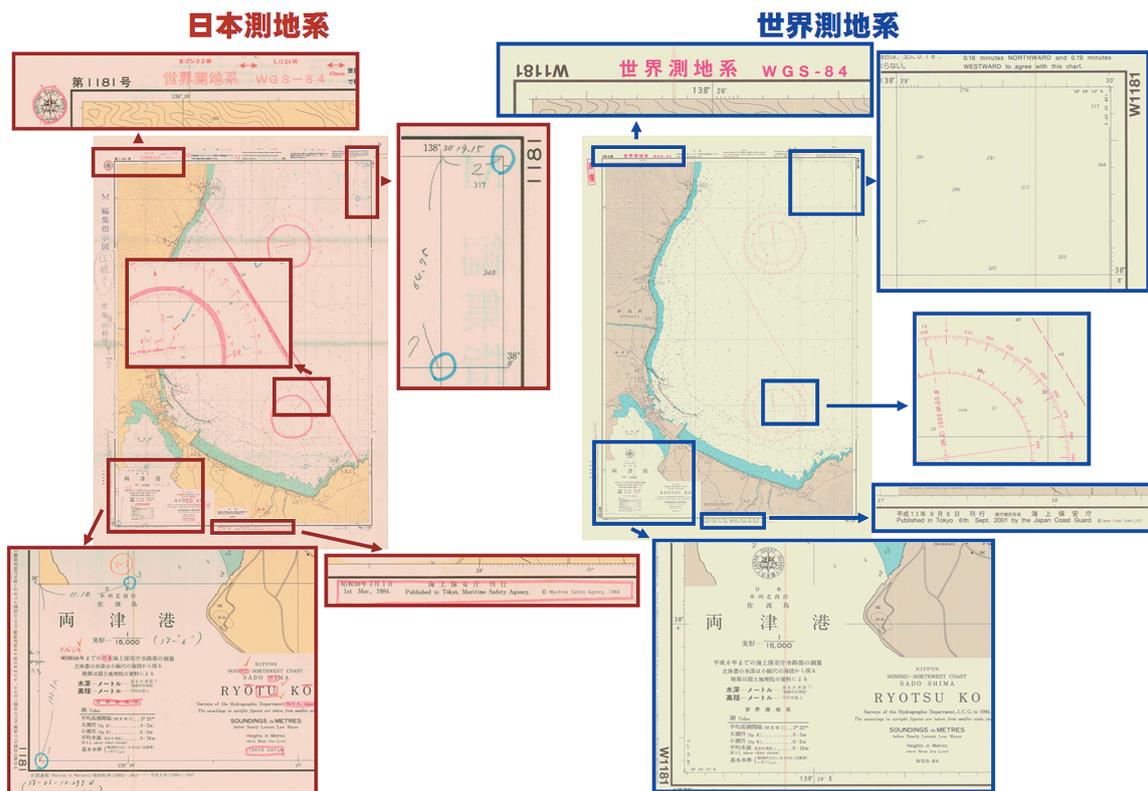
イ マゼンタ版の修正

コンパスの磁針偏差値等の内容を訂正する。ただし、港界が墨版の図の場合は、編集指示図に従い、港界をマゼンタ版に転写するとともに必要な修正を施したのち墨版から削除する。

ウ その他

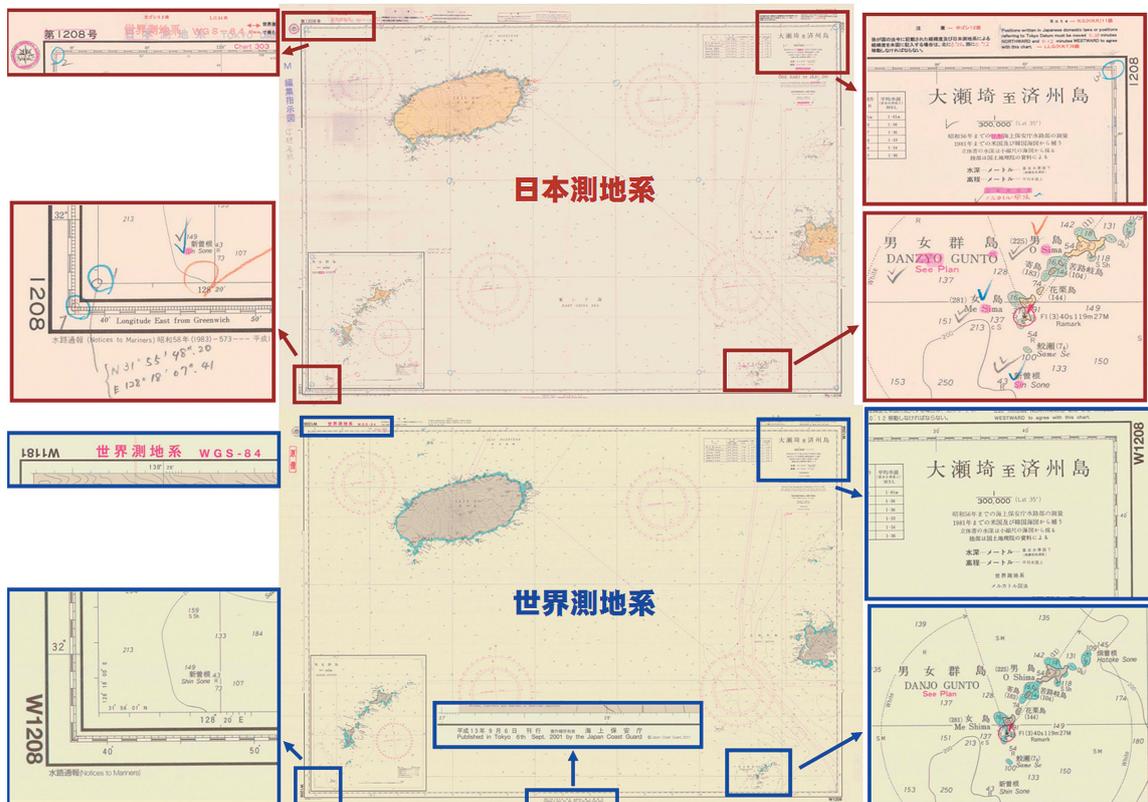
必要な写植は提供する。

6.4 日本測地系海図と世界測地系海図の比較



第13図 平面図における日本測地系と世界測地系の比較例 (海図第1181号)

Fig. 13 Comparison on the Plan map with the Tokyo Datum and the World Datum (Chart 1181)



第14図 メルカトル図における日本測地系と世界測地系の比較例 (海図第1203号)

Fig. 14 Comparison on the Mercator map with the Tokyo Datum and the World Datum (Chart 1203)

6.5 外注時の測地系変換海図編集の貸与品

1 編集指示図

海図編集に必要な内容を網羅した図面

2 日本測地系海図原版

ア 墨版ネガフィルム

イ マゼンタ版ネガフィルム（四隅の4点のトンボを記入したもの）

3 世界測地系海図原版

墨版ポジフィルム（世界測地系の輪郭図（輪郭、緯度・経度目盛り、緯度・経度格子線、メートル尺及び欄外記事等）及び四隅（4点）、格子点（4点）、中央（1点）計9点のトンボを記入したもの）

4 海図情報の最新維持に必要な資料

作業期間中における水路通報による海図情報の訂正がなされた事項についての最新維持のために必要な資料。

5 その他、本作業に必要な写植等

6.6 官民の作業分担

官は、刊行計画立案、編集指示図作成・日本測地系海図包含区域計算・世界測地系海図の輪郭図作成等の入口と内容審査等の出口の部分、また、民は、海図製図の実作業・原版用ポジフィルム修正等を分担した。

7 まとめ

この研究により、図中の海図情報を固定したまま経緯度線を測地系変換量だけ移動させる手法で、海図に求められる位置精度を確保しつつ、平成12年度（2000）及び13年度（2001）の2年間で計428図の未数値化海図を改版し、改正SOLAS条約の発効及び水路業務法改正の施行に合わせて海洋情報部が国内外から求められている海図刊行責務を的確に果たすことが出来た。

8 謝辞

この研究は、海図関係OB諸氏の絶大な協力無しでは成し遂げられなかった事実を踏まえて、ご指導、ご援助を頂戴した航海情報課をはじめ関係各課、関係団体の皆様に厚く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

野村正七：地図投影法，財団法人日本地図センター，447pp, (1983)

坂戸直輝・沓名景義：海図の知識，成山堂，407pp, (1994)

社団法人海洋調査協会：水路測量関係規則集，社団法人海洋調査協会，151pp, (2002)