

2005 年度卒業論文

GPS コンパスの性能評価

日本工業大学 工学部 電気電子工学科

渡辺 康夫研究室

1022227 桑名 淳

指導教員 渡辺 康夫教授

内容梗概

GPS (Global Positioning System)は、地球上で場所・時間にかかわらず実時間の連続測位が可能な測位システムを目指し開発された、高精度衛星測位システムである。このシステムの利点は地球上のほぼ全地域にて天候などに左右されず位置測定が可能な点である。

海上を航行する船舶が自船の位置や進行方向を得るための手段として、GPSがある。しかし、潮の影響を受けると進行方向と船首方向が一致するとは限らない。そのため、多くの船舶は船首方向を求めるための方位センサーとしてジャイロコンパスまたは、磁気コンパスを搭載している。現在、ジャイロコンパスは大型船には搭載義務があるが高価、静定時間が長い等の欠点があり、搭載義務のない小型船向きではない。そのため、多くの小型船は磁気コンパスを搭載している。しかし、磁気コンパスは指北精度が劣るという欠点がある。これらの欠点を解決するために GPS コンパスが開発された。この GPS コンパスは GPS 衛星の信号を利用した全く新しい方式のコンパスである。本研究では、GPS コンパスの性能評価を行う。

本研究は、東京海洋大学情報通信工学研究室で行い、同大学が所有する練習船汐路丸及び、やよいで行なった。

第1段階として、係留・停泊時における方位精度及び、静定時間の測定を行う。同時に、船舶よりジャイロコンパスのデータを連続的に取得し、GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位を比較する。

第2段階としては、直進、回頭時における方位精度の測定を行う。同時に船舶よりジャイロコンパスのデータを連続的に取得し、GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位を比較する。

第3段階として、蛇行時における方位精度の測定を行う。同時に船舶よりジャイロコンパスのデータを連続的に取得し、GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位を比較する。

これらの測定の結果として、GPS コンパスとジャイロコンパスを比較すると誤差が約 $\pm 1^\circ$ なので、GPS コンパスの示す方位を採用できる。しかし、静定時間は同じ場所にもかかわらず、ばらつきが出ている。

今後は、GPS 信号の受信状況の改善、処理器の GPS 信号受信時のアルゴリズムを解析し、方位精度の向上を図る。

目次

第1章 序論	1
第2章 原理	
2.1 GPS	2
2.1.1 GPS 概要	2
2.1.2 GPS 信号形式	3
2.1.3 単独測位	9
2.1.4 受信機における測位計算	11
2.1.5 測位精度	13
2.2 ジャイロコンパス	14
2.2.1 ジャイロコンパスの利点	14
2.2.2 方向保持力	14
2.2.3 プレセッション	15
2.2.4 地球自転	17
1) 線速度	17
2) 地盤の傾斜	17
3) 地盤の方位旋回	18
2.2.5 指北原理	19
2.4 GPS コンパス	21
2.4.1 GPS コンパス概要	21
2.4.2 方位計算原理	22
第3章 実験方法	
3.1 システム構成	24
3.2 静的精度・静定時間測定	27
3.3 動的精度測定	27
3.4 方位追従精度測定	27
3.5 蛇行時の動的精度測定	28
第4章 実験結果及び検討	
4.1 静的精度・静定時間測定結果	29
4.1.1 やよいの測定結果	29
4.1.2 汐路丸の測定結果	32
4.1.3 実験の検討	37

第 1 章

序論

GPS (Global Positioning System)は、地球上で場所・時間にかかわらず実時間の連続測位が可能な測位システムを目指し、1973 年に米国国防総省(DOD：Department Of Defense)によって開発された、高精度衛星測位システムである。このシステムの利点は地球上のほぼ全地域にて天候などに左右されず位置測定が可能な点である。また、もともとの主目的が軍用である為に、測位劣化操作(SA：Selective Availability)が近年まで試行されていた。そのため 100mほどだった単独即位の精度を向上させる為、様々なディファレンシャルシステムが運用、開発された[1]。

一方、モバイル通信の普及、技術の進歩による GPS 受信機の小型化、高性能化とともに利用分野は急速に広がり、車、船舶、航空機等の移動体の位置測位のみならず、地殻変動や地形の測量、また今後はモバイル環境下における人、自転車、オートバイ、ペットなどにも利用され、利用はますます増加すると考えられる。また、2000 年 5 月 2 日にそのSAも解除されたが現在はAS(Anti Spoofing)を発動しているが、単独測位精度は 100mから 30m程度まで大幅に改善されたことも利用増加につながると考えられる[2]。

今や GPS の存在無くして、陸、海、空にわたる交通輸送機関は安全で効率的な運行が危ぶまれるとって過言では無い状況である。更には地震予知などの為の地殻変動監視システムは GPS に全面的に頼っている。

海上を航行する船舶が自船の位置や進行方向を得るための手段として、GPS がある。しかし、潮の影響を受けると進行方向と船首方向が一致するとは限らない。そのため、多くの船舶は船首方向を求めるための方位センサーとしてジャイロコンパスまたは、磁気コンパスを搭載している。現在、ジャイロコンパスは大型船には搭載義務があるが高価、静定時間が長い等の欠点があり、搭載義務のない小型船向きではない。そのため、多くの小型船は磁気コンパスを搭載している。しかし、磁気コンパスは指北精度が劣るという欠点がある[3]。これらの欠点を解決するために GPS コンパスを開発した。この GPS コンパスは GPS 衛星の信号を利用した全く新しい方式のコンパスである。レーダに本コンパスを接続することにより、レーダおよびARPA(Automatic Rader Plotting Aid：自動レーダプロットング援助装置)性能を最大限発揮することができる。本研究では、GPS コンパスの性能評価を行う。

第 2 章

原理

2.1 GPS

2.1.1 GPS 概要

GPS は地上の管制システム(制御部)と衛星(宇宙部)と利用者の受信機で構成される。利用者は衛星が送信する疑似雑音符号で PSK 変調させたマイクロ波ビーコンを受信する事により位置を測定する。位置の測定は実時間で行える上、陸上輸送、民間航空、海事交易、測量および地図作成、建設、採鉱、農業、地球科学、電力系統、テレコミュニケーションおよび屋外のレクリエーション活動等の広範囲な分野において活用されている[1][2]。

衛星は高度約 20,000 km、傾斜角約 55° 、軌道間隔 60° の 6 軌道を周る周回衛星である。各軌道に衛星を 4 機ずつ投入し、24 衛星で運用されているが、現在は 27 衛星が作動している。衛星の周回周期は約 11 時間 56 分 4 秒毎でその 2 倍の周期で同じ衛星の配置が上空に現れる事となり、1 年後の同一場所、時刻において同じ配置に戻る事となる。実際には、軌道が随時変更されており決まっていないが、衛星を捉えるのに必要とする程度の精度であれば、1 ヶ月程度前の軌道情報で予測できる。衛星の軌道と位置は、2m以下の精度で管理されている。衛星自体かなり大きいので、電波を送信している衛星が描く軌道を管理する必要がある。今は 2 時間間隔で更新される高い精度を持った軌道情報を各衛星が 12.5 分の周期で放送している。地上には数箇所の管制システムを配置し、衛星の軌道を高い精度で管理している。図 2.1 に GPS 衛星の軌道概要図を示す。

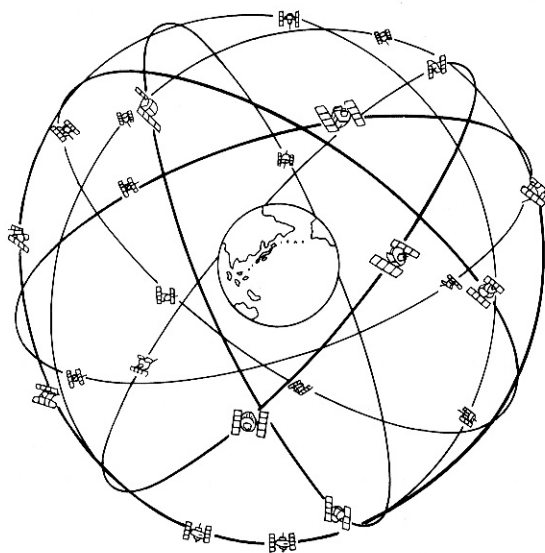


図 2.1 GPS 衛星の軌道概要図

各衛星は 10.23MHzの基準発信機を持っており、その 154 倍の $L1=1575.42\text{MHz}$ と 120 倍の $L2=1227.6\text{MHz}$ の 2 周波の右旋円偏波を全地球に向けて発信している。全衛星が同一の周波数を用い、C/A(Clear and Acquisition, Coarse and Access)コードと P(Y)(Precision, Protect)コードともに衛星ごとに互いに異なるゴールド符号と呼ばれる擬

似ランダム雑音(PRN：Pseudo Random Noise)で変調されている。民間利用者に許されているのはL1にのみ載せられたC/Aコードによる平和的な民間利用のための標準測位サービスで、SPS(Standard Positioning Service)と呼ばれている。P(Y)コードによる国防総省が認めたユーザのための精密測位サービスはPPS(Precise Positioning Service)と呼ばれるが、これは米軍関係者のみが使用可能である。衛星からコードに載せて送信される航法データは衛星軌道情報(ephemeris：エフェメリス)、衛星時計の情報、電離層補正データ、自分以外の全衛星の位置情報(almanac：アルマナック)等である。

衛星の軌道要素などにはWGS84(World Geodetic System)の測地系が用いられている。WGS84はDMA(Defense Mapping Agency)を中心とした米国の機関によって、米国と世界各国が測定した種々の測量結果を用いて1984年に決定した世界規模の測地系である。これらの測定成果は、米国のDMAにより公開されている。表2.1にGPS衛星の諸元を示す。

表 2.1 GPS 衛星の諸元

衛星個数	4個×6軌道面
衛星設計寿命	7.5年
軌道半径	26.561km
周回周期	12恒星時間(約11時間58秒)
軌道傾斜角	55°
送信電力	L1：C/A code：約26W，P code：約13W L2：P code：約4W
搬送波周波数	L1=1,575.42MHz(10.23MHz×154) L2=1,227.6MHz(10.23MHz×120)
測距信号	C/A code：L1波で送信，民間用に開放 P code：L1,L2で送信，非公開
地上受信電力 (仰角5°以上)	L1：C/A code>-160dBW，P code>-163dBW L2：P code>-166dBW
単独測位精度	C/A code：約100m(2drms：SA on) (SPS)：約15m(2drms：SA off)
時刻同期	C/A code：約340ns(SA on) (SPS)：約20ns (SA off)

2.1.2 GPS 信号形式

GPS衛星は測位のためのいろいろな信号と情報を電波に乗せて、常時、連続的に送信している。電波はそれ自体では情報を持っているものではなく、この上に所要のデータ、メッセージ等を乗せる(変調(modulation)ということによって、はじめて情報の伝達ができるようになる。電波そのものは情報を運ぶための単なる運搬手段であるというので、搬送波(carrier)と呼ばれている。現在のGPSでは測位用の搬送波は二つあって、それぞれをL1帯(L1 band)とL2帯(L2 band)という。24個以上もの全GPS衛星が全く同じ周波数で送信する。同一周波数で送信して、なお且つ、混信しないのは、擬似雑音符号による拡散スペクトラム(spread spectrum, SS)通信方式という技術によるのである[2]。

これらの搬送波に乗せられる測位用の信号にも 2 種類あり、それぞれを C/A コード、P コードという。L1 帯には C/A コードと航法メッセージ、それに P コード、L2 帯には P コードのみが乗っている。P コードは原則として軍専用である。これらのコード(符号)は擬似雑音符号(PN 符号(pseudo random noise code)図 2.2 参照)と呼ばれ、0 と 1 が、一見、不規則に交代するデジタル符号である。この符号の配列(パターン)を 24 個(以上)の衛星それぞれに違う形のものを割り当てることにより、衛星を識別し分離受信するのである。GPS 測量以外の利用ではこれらのコードを頼りに所要のデータを得る。測量では搬送波そのものを使うが、補助的なデータとしてコードも利用するのが普通である。これが測量用と単独測位用の受信機の構造が違う理由である。

2003 年ころから打ち上げられる新型衛星ブロック II R-M では GPS 近代化の一環として、L2 帯に民生用測位符号(CL, CM コード)が増設され、一般利用が可能になるであろう。また、それ以後のブロック II F では新たに L5 帯が増設され、これも一般利用に供される。L5 帯には高ビット率の CM コードが搭載される予定である。L2, L5 とも、現在の受信機そのままでは対応できない。

すべての GPS 利用形態において、測位計算等に必要な衛星の軌道情報をはじめとするデータを航法メッセージという。航法メッセージは C/A, P コードにくらべるとはるかにビット率の低い(50 bps)デジタルデータであって、図 2.3 に構造を示すように、30 ビットからなる語が 10 語でサブフレーム(sub frame)を作る。この各語に所要のデータを乗せる。サブフレームの冒頭の 2 語は同期(頭を示す目印)とテレメーター(telemetry)情報になっているが、この中に HOW(hand over word)と Z カウントというものが入っている。Z カウントは時刻符号(何時何分何秒)に相当するデータ、HOW は P コードへの乗り移りのためのデータであって、この両者を手がかりにして P コードを捕捉するのである。これが C/A コードの原語の coarse/access(粗測定と捕捉)の由来である。つまり、P コードを捕捉するには、必ず C/A コードを経由しなければならない。そして、これが L2 帯だけの受信機というものが有り得ない理由でもある。Z カウントは、また、これを解読、計算して GPS 時を知ることができる。

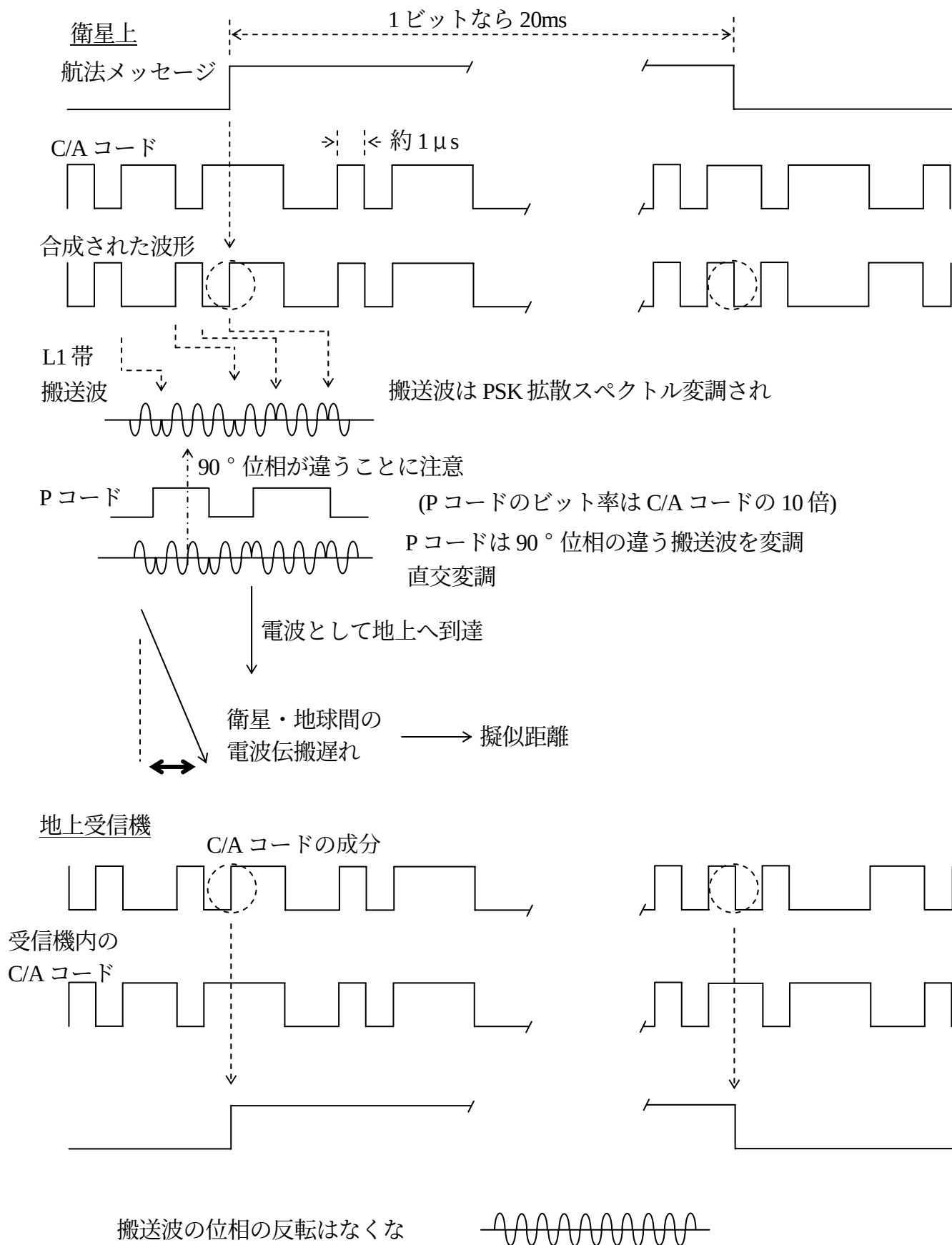


図 2.2 コード，航法メッセージ，および搬送波の関係

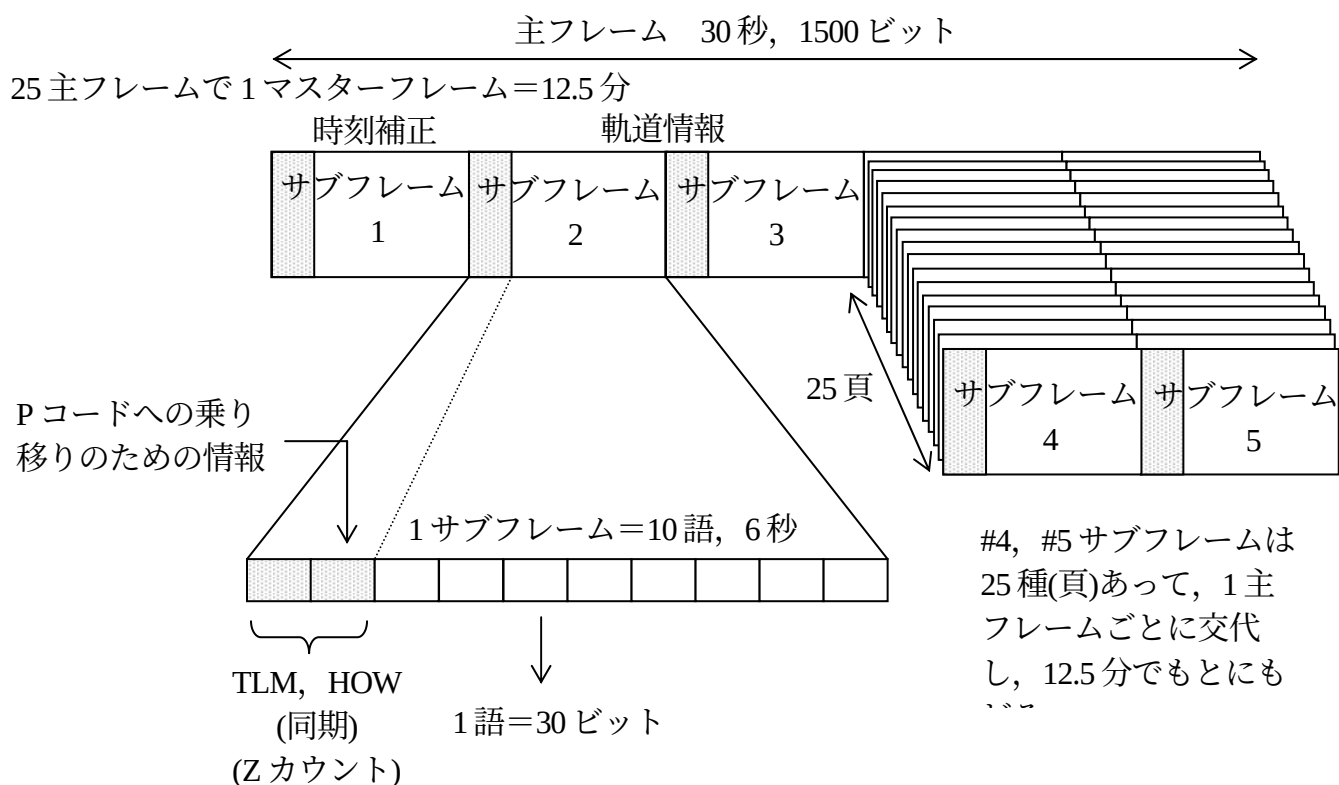


図 2.3 航法メッセージの形式

300 ビットからなるサブフレーム(sub frame)が 5 個まとまったメインフレーム(main frame)を基本構成とする。メインフレームごと(30 秒ごと)に軌道情報(ephemeris)、放送暦が送られてくる。メインフレームの中の #4 と #5 のサブフレームは、順次、内容が交代して、25 回でもとに戻る。交代する内容をページといい、25 ページからなる。この全体をマスターフレーム(master frame)と呼ぶ。自分以外の全衛星の概略の軌道情報(アルマナック(almanac))などがこの交代するサブフレームで送られてくる。エフェメリスとアルマナックは天文学ではともに暦の意味であるが、前者は「短命な」という意味もある。エフェメリスは地上の管制局によって頻繁に更新される精度の高い暦であって、アルマナックは概略値であるから長期にわたって変わらない。高い精度では細かい変化が目立つということである。

航法メッセージには、軌道関係の情報の他に電離層の補正のためのパラメータ、衛星搭載の時計の補正值、衛星自身の動作状態を示すヘルス(health)情報などが入っている。ヘルス情報には 2 種類あり、その衛星の動作状態や航法メッセージの状態を示す 8 ビットのものと、アルマナックデータと一緒に全衛星の動作状態を示す 6 ビットのものがある。どのビットが立つかによって多種多様の不具合の状況を示すようになっているが、それらの中には L2 帯の C/A コードの状態を示すものもある。これは、普段はビットが立ったまま(不動作)のはずである。これらの信号の規格を表 2.2 にまとめる。

表 2.2 GPS 衛星から送られてくる測位用電波信号

搬送波(全衛星同一)	乗っているコード	メッセージ	備考
L1 帯 1,575.42MHz =154×10.23MHz	C/A コード P コード (Y コード)	航法メッセージ	一般用に解放
L2 帯 1,227.6MHz =120×10.23MHz	P コード (Y コード)		原則として軍用 GPS 測量では使用

	ビット率	コードの長さ	備考
C/A コード	1.023Mbps	1,023=1ms	一般用
P コード	10.23Mbps	約 6×10^{12} bit=7day	軍用，現在秘匿操作中 Y コードに変換
航法メッセージ	50bps	サブフレーム=300bit=6s メインフレーム=1500bit=30s 5 サブフレーム=1 メインフレーム 25 メインフレーム=1 マスターフレーム	自分自身の軌道情報 全衛星の概略軌道情報 電離層補正係数 衛星時計の補正係数等

基準周波数	10.23MHz – 0.00455MHz (軌道上の重力に対応した相対論補正)
-------	--

GPS 衛星からの測位用の信号形式は，これまでのラジオやテレビのそれらとは非常に違った，全く新しい通信方式を採っている．24 個(以上)の全 GPS 衛星が全く同じ周波数で送信して，なお且つ，混信しないのは，拡散スペクトラム通信方式という技術による．

GPS における C/A コードと航法メッセージ，そして L1 帯搬送波変調の関係を図 2.2 に示す．デジタル符号の立ち上がりとしち下りのときに，マイクロ波の搬送波の位相が逆転するように変調される．このような変調を 0, π PSK という．PSK 変調はいつでも 0, π ，すなわち 0° ， 180° とは限らず，任意の位相シフト量をとることができる．

このような急峻なマイクロ波の位相の反転の結果として，電波のスペクトル幅は極度に広がるのである．もともとの搬送波のスペクトル幅は，純粹のサイン波であるから，理屈の上では 0 である．それが PSK 変調によって，概ね，コードのビット率を周波数に直した値の倍に広がる．図 2.4 に示すものがそれであって，C/A コードによって 2MHz 強，P コードによって 20MHz 強のスペクトル幅になるのである．

図 2.4 で，L1 帯の C/A コードの分が上に突き出しているのは，測位用電波の L1 帯の C/A コードと P コードの送信電力が違ふことによるものである．同一の L1 帯の送信電力が二つあるというのは，直交変調という技術の結果である． 0° ， 180° の PSK 変調は，また，直交変調が可能となるための必要条件でもある．

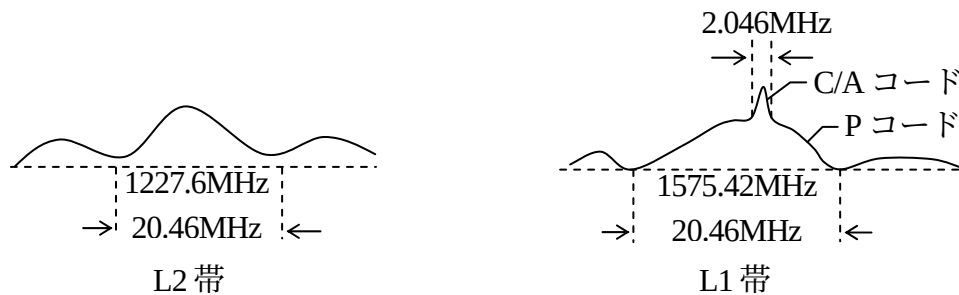


図 2.4 L1 帯および L2 帯の電波スペクトル

スペクトルが極度に広がることによって、送信機の電力、つまりエネルギーはこのスペクトル幅の中にばらまかれ、薄められてしまうのである。単位周波数あたりの電力はきわめて僅かになることによって、多数の GPS 衛星からの電波が混在していても相互に干渉しない。このような電波を受信するときには、広いスペクトル幅にばらまかれたエネルギーを集中させる操作を行って、普通の通信と同じような良質な情報の伝達を行う。このようなエネルギーの集中操作は、コード同期によって行う。

利用者の受信機内部では、図 2.2 のように受信しようとしている衛星の C/A コードパターンを発生してそのタイミングを調整(コード同期)する。受信機内部で発生するコードパターンのことを、レプリカ(replica)と呼ぶ。レプリカとは、貴重な美術品などの複製のことを指すのが普通であるが、それに倣った呼び名であろう。このレプリカと衛星から送られてきた本物が重なって同期したとき、位相が頻繁に反転していた入射電波は、一様なサイン波となり、航法メッセージを復調(demodulate)できる。このときの受信機内部で発生している C/A コードのタイミングが、まさにこの受信機によって測定された衛星電波(C/A コード)の到達時刻となるのである。図 2.5 では、この点を「選択した衛星それぞれのコードパターン」と簡単に示している。C/A コードのタイミングを受信電波に同期させる回路を Delay Lock Loop(DLL)と言う。これは、衛星からの電波が受信機に達するまでの伝搬遅延時間(delay time)に合わせ込むための制御回路、という意味である。

これから明かなように、受信には C/A コードパターンが分かっていることが大切で、P コード、または Y コードのような秘密のパターンのときには受信不能である。

このような 0° 180° の PSK 波を受信するときには、ちょっとした注意が必要である。それは GPS 衛星と受信地点の距離の僅かの違い(位相角で 90° 、つまり約 5cm)によって、受信した電波の位相が 90° だけずれると、まったく、受信不能となる。そこで受信機内部には 90° の位相差をもった二つのチャンネルを用意し、双方の出力の和を取るようになっている。

非常に広いスペクトル幅をもつ通信は、実は GPS だけではない。たとえば、大量の通信を中継するマイクロ中継機や静止衛星では、20MHz 以上のスペクトル幅をもつものが沢山ある。このような通信回線は、しかしながら、「拡散スペクトル」通信とは呼ばれない。普通の大容量通信でスペクトル幅が広がるときには、単位周波数あたりの電力が小さくならないように送信機からのエネルギー供給を大きくする、つまり、送信電力を大きくするのである。

L1 帯の搬送波には C/A コードとともに P コードでも変調されるが、そのとき、単に両方のコードを重ねて搬送波を変調するのではない。もとの搬送波を二つに分けて、一

方は他に対し 90° の位相差を与えておく。つまり，一方がサイン波ならば他はコサイン波とするのである。

このサイン波の方を C/A コード，航法メッセージで PSK 変調し，コサイン波の方は P コードで変調するのである。これを直交変調(quadrature)という。こうすることにより，両者は干渉することなく，衛星の送信アンテナから放射されるのである。L2 帯の方は P コードだけしか乗らないので，直交変調は行わない。

GPS 衛星

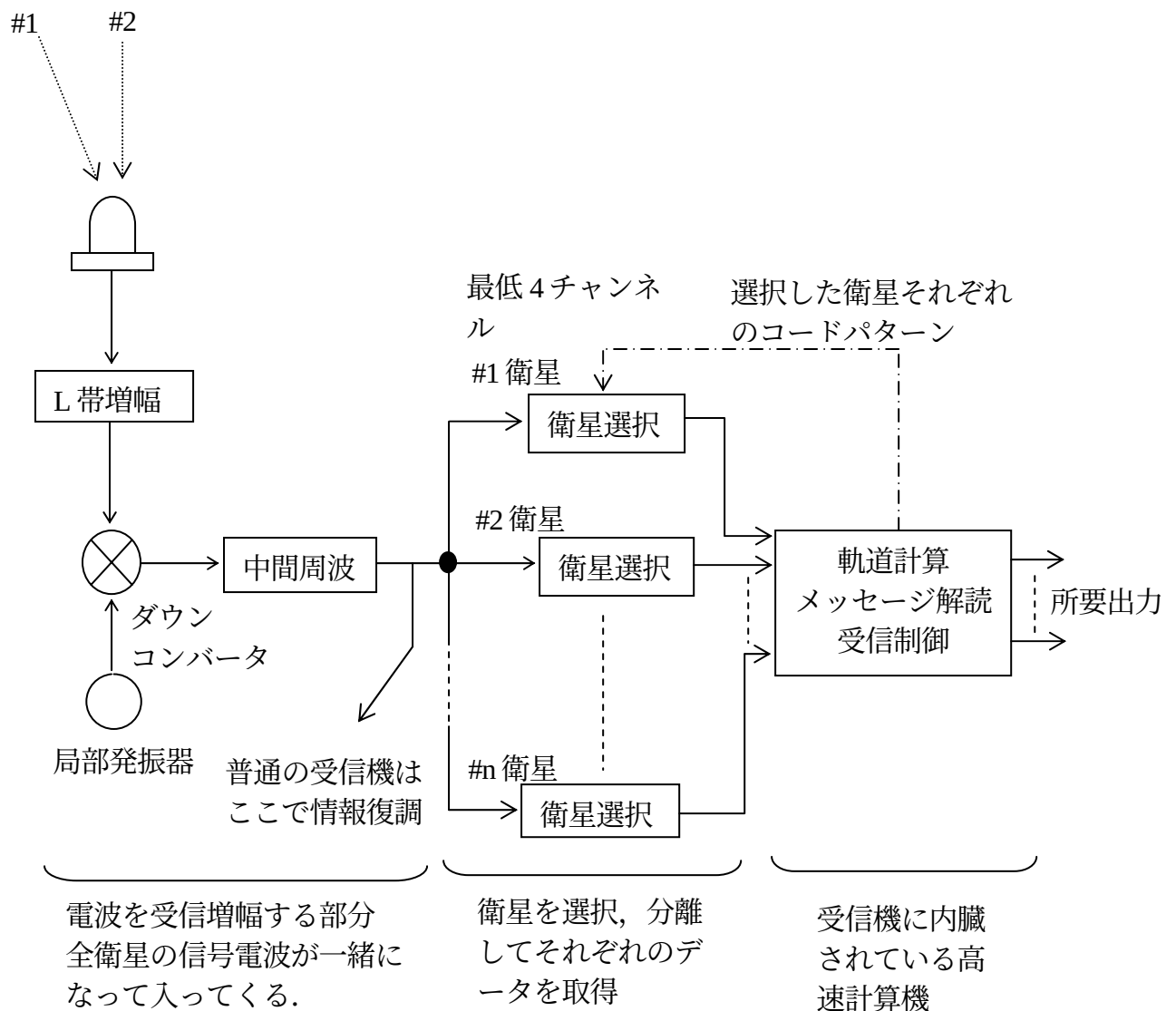


図 2.5 利用者の受信機の基本的構造

2.1.3 単独測位

GPS による測位は利用者と衛星の距離を測定することによって行う。宇宙空間で位置の分かっている人工衛星 3 個のそれぞれの距離が分かれば測位できる[4]。距離は衛星上の原子時計によって正確なタイミングで発信されている測位用の符号 C/A コードまたは P コードが受信機に到達するまでにどれだけ時間がかかったかを測定して求める。

もしも、受信機の時計が衛星の時計と完全に同期していれば、その所要時間(伝搬遅延時間)が分かる。受信機と衛星の時間を完全に同期させることは、ほとんど不可能である。そこでもう一つの衛星が必要となる。受信機の時計によってコードの到着時刻を測定して、形式的に伝搬遅延時間を計算して距離を求める。これによって得られた距離は真の距離と時間誤差の分との代数和となり、この距離のことを疑似距離という。

測位のために使用するそれぞれの疑似距離にはすべて同一の受信機の時計誤差が含まれている。地味の中心を原点とした3次元座標(x,y,z)と受信機の時計誤差 Δt の4個の未知数を解くので、4個以上の衛星を同時か、同時と見なせるだけの短時間に測定することが大切である。また、GPSで求められる高さは、WGS-84測地系であるのに対して、測位演算で出てくるものは3次元直交座標である。

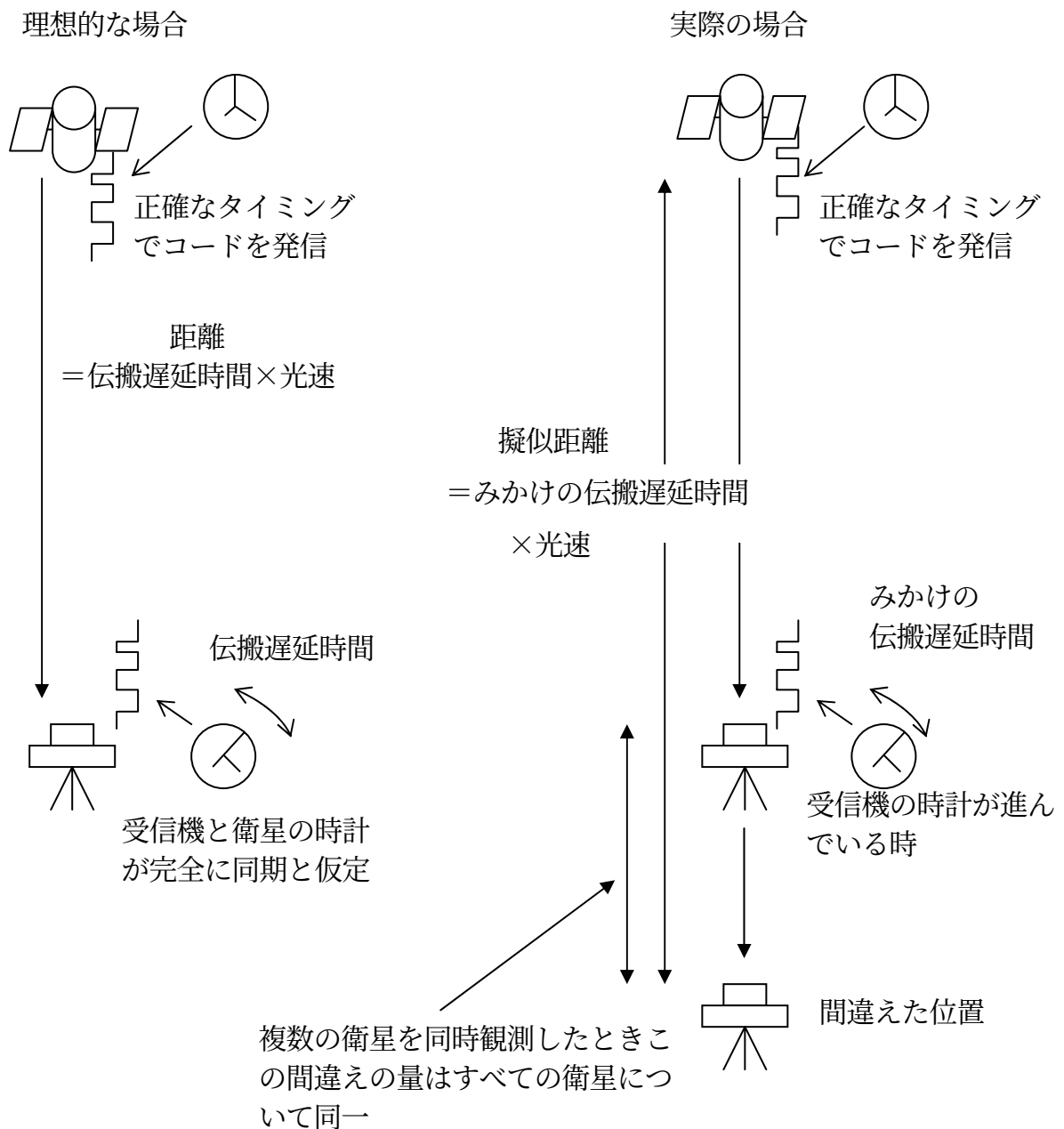


図 2.6 コードによる距離測定

2.1.4 受信機における測位計算

単独測位の測位計算は受信機で計測された各衛星との疑似距離をもとにして行う[4]. 4個のGPS衛星の位置は、軌道情報から計算される. ここで用いる3次元直行座標系は、地球の中心を原点、地球自転軸に沿って北方向を正方向とするZ軸、グリニッジ子午面と赤銅面との交点方向にX軸、これら2軸と右手系をなすようにY軸を選ぶものとする. この座標系で、アンテナ位置の座標を、 (x_0, y_0, z_0) とする. i 番の衛星の位置を (x_i, y_i, z_i) とする. 観測点と i 番目の衛星との距離は、ピタゴラスの定理によって、

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = c \times (\tau_i + \partial\tau) \quad (2.1)$$

ここで τ_i は測定で得られた i 番目の衛星の電波伝搬時間であり、 $\partial\tau$ は受信機の時計のずれ(正しい時刻を送れている時を正とする)で c は光の速度であり、この式(2.1)の関係が観測している全ての衛星について成り立つ. また、観測点・衛星からの真の距離を r_{0i} とおく.

幾何学的には、 (x_i, y_i, z_i) を中心とした半径が $c \times (\tau_i + \partial\tau)$ の3球面の交点として観測点が求められる. 実際上の(2.1)式を解くことは二乗や平方根があり、うまく解くことができない. そこで未知数を近似値と補正量の和であらわし、最小二乗法を使用して解く方法がとられる.

i 番衛星とアンテナ位置との距離(疑似距離) r_i は、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (2.2)$$

と表すことが出来る. また、未知数をその近似値と補正量の和で表すと、

$$\begin{aligned} x_n &= x_{n-1} + \Delta x \\ y_n &= y_{n-1} + \Delta y \\ z_n &= z_{n-1} + \Delta z \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表すことができ、これを式(2.1)に代入すると、

$$r_i = r_{n,i} + \frac{\partial r_i}{\partial x_i} \times \Delta x + \frac{\partial r_i}{\partial y_i} \times \Delta y + \frac{\partial r_i}{\partial z_i} \times \Delta z + s \quad (2.4)$$

ここで出てくる $\partial r / \partial x$, $\partial r / \partial y$, $\partial r / \partial z$ は、次式のようになり、それぞれ衛星方向のベクトルの x , y , z 方向への射影(方向余弦)となっていることが分かる.

$$\begin{aligned}
\partial r / \partial x &= \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\
\partial r / \partial y &= \frac{y - y_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\
\partial r / \partial z &= \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

ここで出てくる $\alpha = \partial r / \partial x$, $\beta = \partial r / \partial y$, $\gamma = \partial r / \partial z$ とおき, $\Delta r = r_n - r_{n-1}$ とおくと, i 番目の衛星からの疑似距離の補正量 Δr は

$$\Delta r_i = \alpha \Delta x + \beta \Delta y + \gamma \Delta z + s \tag{2.6}$$

となり, 4 衛星分の 4 個の方程式ができる.

$$\begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \Delta r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

具体的な計算の求め方は, 最初に x_0, y_0, z_0 を式(2.2)に代入し近似距離 r_i を求める. 実測された 4 衛星に対する疑似距離の差を Δr_i として, 式(2.7)に代入して Δx , Δy , Δz と s を求める. これらの値から初期値である x_0, y_0, z_0 にそれぞれ加え新しい初期値 x_0, y_0, z_0 を作成する. 作成した初期値を式(2.2)に代入し新しい近似距離 r_i を求め, 新しい疑似距離との差 Δr_i を用いて新しい Δx , Δy , Δz と s を求めるという作業の繰り返すことにより, Δx , Δy , Δz , は 0 に収束し, これらが充分小さな値になった時点で計算を打ち切る. この時の初期値 x_0, y_0, z_0 を求められたアンテナ位置とする. また s は一定値に収束する. また, 実際の計算では, 衛星が 4 個ではなく 4 個以上見えているので, (2.7)の式の両辺に天地行列をかければよい. 仮に n 個の衛星が見えているとすると,

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{bmatrix} \quad \delta R = \begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \dots \\ \Delta r_n \end{bmatrix} \quad \delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{bmatrix}$$

$$\delta R = A \cdot \delta X$$

となる．両辺に A の転置行列を掛けると，

$$A^T \cdot \delta R = A^T \cdot A \cdot \delta X \quad (2.8)$$

となる．次に両辺に A と A の転置行列をかけた行列の逆行列をかけると，

$$\delta X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A \cdot \delta R \quad (2.9)$$

となり補正量 Δx ， Δy ， Δz ， s を求めることができる．

2.1.5 測位精度

単独測位の精度を決める要因は衛星信号の精度，衛星の配置，電波伝搬路，C/Aコード位相の測位精度，測位演算の精度などがある[3]．特に衛星信号の精度，衛星の配置，電波伝搬路の影響が大きい．衛星信号の精度はUTC2000年5月2日4時まで，米国国防総省によるSAという利用制限措置により抑制されていた．SA (Selective Availability：選択利用性)の略で，一般に開放されてL1帯，C/Aコードによる測位の精度を作為的に劣化させる操作であり，これにより空が開けた場所であっても時間帯によっては65～100メートル程度の測位精度であった．しかし，2000年5月1日の大統領声明の後にはその精度は6～10メートルまでに改善された．ただし，電波伝搬を遮断するような障害物によって受信できない衛星があると，見かけ上衛星の配置が悪くなり，市街地などではこれ以上の数値となることがある．電波伝搬路による誤差は，大気，電離層，反射信号のよるものがある．水平線に近い低仰角衛星の電波は，地球の大気(対流圏，電離層)の中を長い距離通過してくるために，伝搬誤差(遅延量)が大きくなる傾向である．大気による遅延量は時間変動が少ないが，特に仰角5度付近から急激に増加し，遅延量は50メートルを超える事もある．受信機でこれを補正するが，それなりの誤差を見込まなくてはならないのでマスク角を調整する必要がある．電離層は，概括的にいえば地上100km位から500kmにまでおよぶ層であり，GPSの電波に影響するのは地上200m位から上のF2層と呼ばれる部分である．電離層では，希薄な大気分子が太陽からの紫外線によって電子とイオンに解離している．質量が小さくて外界の電界によって振り回されやすい電子が，電波の伝搬に影響を与える．これによる遅延は，衛星から送られてくる情報で補正するが，L2が受けられる2周波型受信機では，L1とL2の比較によって遅延量を求めることができるので，より高い精度が得られる．電離層は仰角による変化は穏やかであり，遅延も通常は10メートル程度であるが，太陽の活動によっては激しく変化する場合がある．

2.2 ジャイロコンパス

2.2.1 ジャイロコンパスの利点

船舶用のジャイロコンパスは船の方位を示す計器であり、目標物のない海上の航海では重要な役割を果たしている。ジャイロコンパスは転輪ら針儀とも呼ばれ回転する「こま」を利用し真北を支持するために用いられる[5][6]。これは、磁気に左右されないため、以下のような特徴がある。

- ① 磁気コンパスにある偏差や自差のような不定誤差がない。
- ② 指力が強いため激烈な震動に対しても指示が乱れない。
- ③ 指北力が安定しており、耐震性が高く、緯度が高くなっても相当の指北力を保っているため、極地近辺の航海においても利用できる。
- ④ マスターコンパスの指示を遠隔指示装置によって、必要数のレピータコンパスに伝えることができる。レピータは用途によって水平、垂直または傾斜状態のいずれにも自由に備えられる。
- ⑤ コースレコーダ、オートパイロット、レーダ、無線方位測定機、航跡自画器その他必要なものに指示を利用することができる。

ジャイロコンパスに用いられるのは、ディレクショナルジャイロであり、ジャイロのスピン軸を常に水平に保ち真北を示すものである。

2.2.2 方向保持力

「2軸の自由を持つ Gyro を高速度に回転すれば、他から Torque(トルクー回転軸の方向を変えようとする偶力)の作用を受けないかぎり、その Gyro axis は地球の自転に関係なく空間における一定方向に保持される。」この性質を回転慣性(Gyroscopic inertia)という[7]。

これは、「すべて物体は静止あるいは速度を現状に保とうとする性質(慣性)を有する」という Newton の運動の第 1 法則が、回転体に適用されたものであると考えれば理解できる。

このことは、地球上においては、地球の自転のために Gyro axis の方向が変わっていくような形に見えることになる。これは真運動としては軸は静止しているにもかかわらず、視運動において変化しているわけである。例えば、朝、太陽が東方に出たときに Gyro axis をこの方向に向ければ、Gyro axis は 1 日中太陽を追って、昼には南天高く(北半球の場合)指し、夕方には日没の方向を指し、翌朝東を指すことになる。厳密には太陽の方向は絶対方向不変ではないので、恒星をこれに置きかえれば正確である。

この方向保持力、すなわち回転慣性の大小は、角運動量によって表わされる。

ここで角運動量 H は、

$$H = I\omega \quad (2.10)$$

で表わされる。ここには I は Gyro 軸の周りの慣性 Moment、 ω は回転の角速度である。また、慣性 Moment I は、

$$I = \sum mr^2 \quad (2.11)$$

で表わされる．ここに m は半径 r の点の質量であり， I は各部分の mr^2 の総和である． M をGyroの全質量とし， $I = Mk^2$ とおけば， k はこの全質量 M を軸から k なる距離の1点に，集中させたと考えて取り扱う場合の回転半径である．

2.2.3 プレセッション

高速度で回転しているGyroに，その軸と一致しないTorqueが作用すれば(すなわち軸の方向を変えようとする力がはたらけば)Gyro axisはその方向に向きを変えることはしないで，新たに加えられたTorqueのVectorの方向にGyroのVectorが一致するように，近道を経て軸の向きを変える．この運動をPrecession(歳差運動)という[7]．

Precessionというものは，一見不可思議な現象であるが，これは次の説明によって直感的に理解できよう．

いま，Gyroの中心における横断面を示したのが図2.7であるが，このGyroは矢印の方向に回転しているとする．したがって XX' は水平軸， YY' は垂直軸であり，Gyro軸は O を通る紙と垂直な線になる．

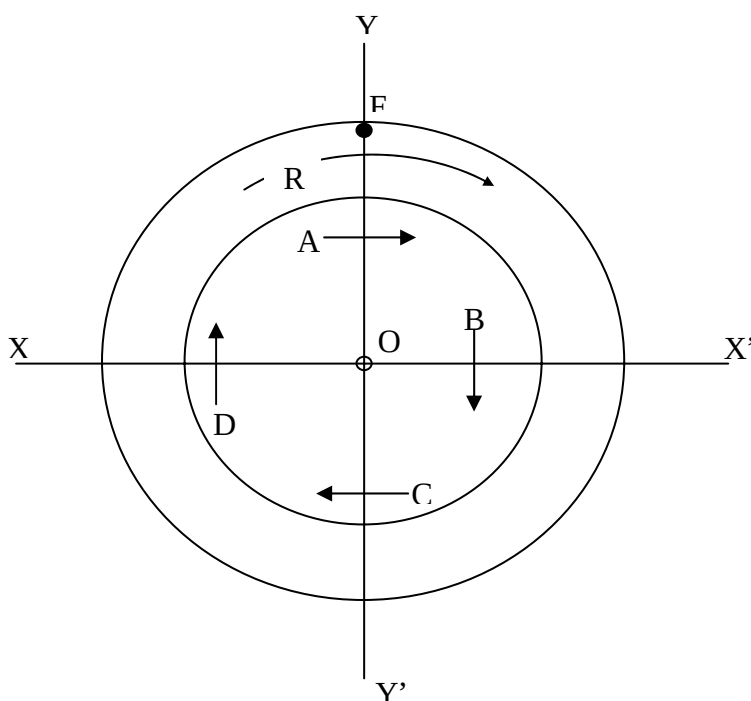


図 2.7 Precession の説明図

考えを簡単にするためにGyroの全質量が，水平，垂直両軸上の4点A，B，CおよびDに集中したと仮定すると，それらはある瞬間においていずれも矢符によって示した方向に運動をしていることになる．このときに，図2.7の上端F点を紙表から押した場合，どんな結果になるのかを考えてみる．

当然のことながら，これは XX' 軸の周りに回転力を与える力として働くわけであるから，A点を紙背にC点を紙表に押す力となるが，B，D点は軸上であるため作用力は零

である．(もちろん，B，D点から僅かでも離れれば，A，C点と同様な力を僅かながら受けることになる)したがって，F点に加えた力の影響はA，C点について考えればよいことになる．

Newton の運動の第 1 法則によって，A 点は矢印の方向に運動を続けようとすると同時に，新たな力によって，A は紙背に押されるので，A の動く方向は，今まで紙面に平行に矢印の方向に動いていたのを，斜奥の方向に変えることになる．同様にして，C 点は斜紙表に運動方向を変えることになる．このことは Gyro 軸 O の方向を変えることを意味し，それは，YY' を軸として X' を紙背に，X を紙表に向かわせる旋回運動を起こさせる結果となる．これが Precession である．Precession は軸性 Vector を使って説明すれば簡単である．

すなわち，図 2.8 において Gyro が矢印の方向に回転しているとき Gyro の軸性 Vector は $\vec{OG}$ で表わされる．このとき Torque T が Gyro axis の端に矢印のように加えられた場合の Torque の Vector は $\vec{OT}$ で表わされるが，これによって生ずる Precession は $\vec{OG}$ と $\vec{OT}$ の合成 Vector である $\vec{OP}$ の方向へ Gyro axis が移動することになる．

Precession の角速度(P)は Torque(T)に比例し，Gyro の角運動量(H)に逆比例する関係にある．すなわち，

$$P = T/H = T/(I\omega) = T/(Mk^2\omega) \quad (2.12)$$

$$\text{あるいは } H \cdot P = T \quad (2.13)$$

以上により，垂直軸の周りに Torque を与えれば水平軸の周り Precession を起こし，水平軸の周りに Torque を与えれば垂直軸の周りに Precession を起こし，Torque が大きければ Precession も大きくなるということが理解できる．

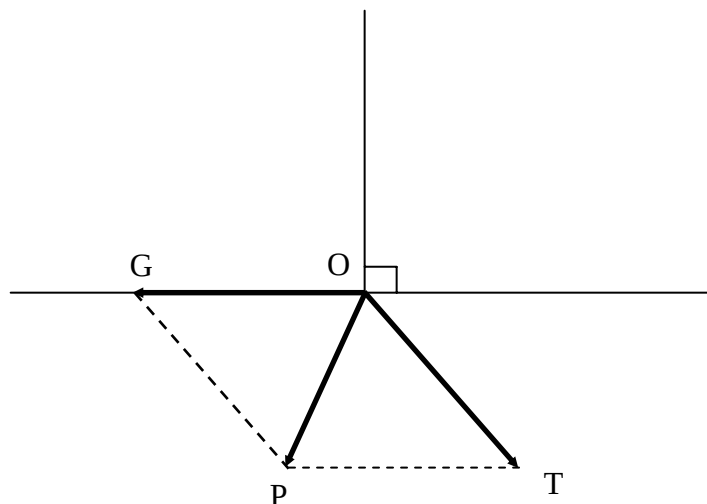


図 2.8 軸性 Vector の合成

2.2.4 地球自轉

ジャイロコンパスは、ジャイロの特性と地球の自転を利用して指北作用をもつものであるため、地球の自転について考えておく必要がある[7][8].

地球の自転は、24 時間に 1 回転の速さで西から東へ向かっているの、その回転ベクトルは北向きである。この地球の自転は、線速度と地盤の傾斜および地盤の旋回に分けて考えることができる。

1) 線速度

地球の自転による西から東への線速度は、赤道において 900 ノットである(1 時間に経度 15 度の自転であるから、赤道における経度 1 度の長さ 60 海里に 15 を掛けて出る数値). すなわち、地球の自転の角速度を $\Omega (=15^\circ/\text{時})$ とし、地球半径を $R (=637 \times 10^6 \text{cm})$ とすれば、 $C \Omega R = 900$ ノットである. ただし、 C は換算定数の 924×10^{-10} である.

緯度 L° における線速度は、 $C \Omega R \cos L = 900 \cos L^\circ$ ノットである。たとえば、 60°N (北緯) における線速度は $900 * \cos 60^\circ = 450$ ノットである。

2) 地盤の傾斜

赤道において、地盤は絶えず西方が上に東方が下になるような傾斜を続けている。ここでは、地球の自転の角速度 Ω そのままの角速度である。したがって、赤道において真東を向けて水平に起動したジャイロは、絶対方位を一定に保っているために、見かけ上は地盤の東西傾斜のためにジャイロ軸が毎時 15 度の角速度で上昇し続け図 2.9 に示すように 24 時間で 360° 回ることになる。

地盤の東方傾斜は、赤道において最大値 Ω 、極において最小値0であり、中間緯度においては、 $\Omega \cos L^\circ$ ($15 * \cos L^\circ$ /時)である。

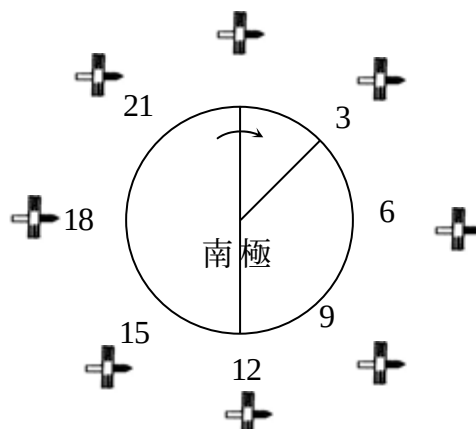


図 2.9 赤道における地盤の東方傾斜とジャイロの俯仰運動

3) 地盤の方位旋回

北極においては、地盤は上から見て左回りに旋回し続けている。ここでは、地球の自転の角速度 Ω そのままの速度である。したがって、北極において一定方向を向けて水平に起動したジャイロは絶対方向を一定に保っているため、見かけ上は地盤の傾斜のために毎時 15° の角速度で上から見て右旋回を続け、24時間で 360° 回ることになる。

地盤の旋回は極において最大値 Ω 、赤道において最小値0であり、中間緯度においては $\Omega \sin L^\circ$ ($15 \times \sin L^\circ$ /時)である。

南極においては地盤は上から見て右回りに旋回しているので、ジャイロ軸は見かけ上、左旋回をすることになる。

図 2.10 において、Oは地球の中心、Aは北極 ϕ (red)の地点とする。

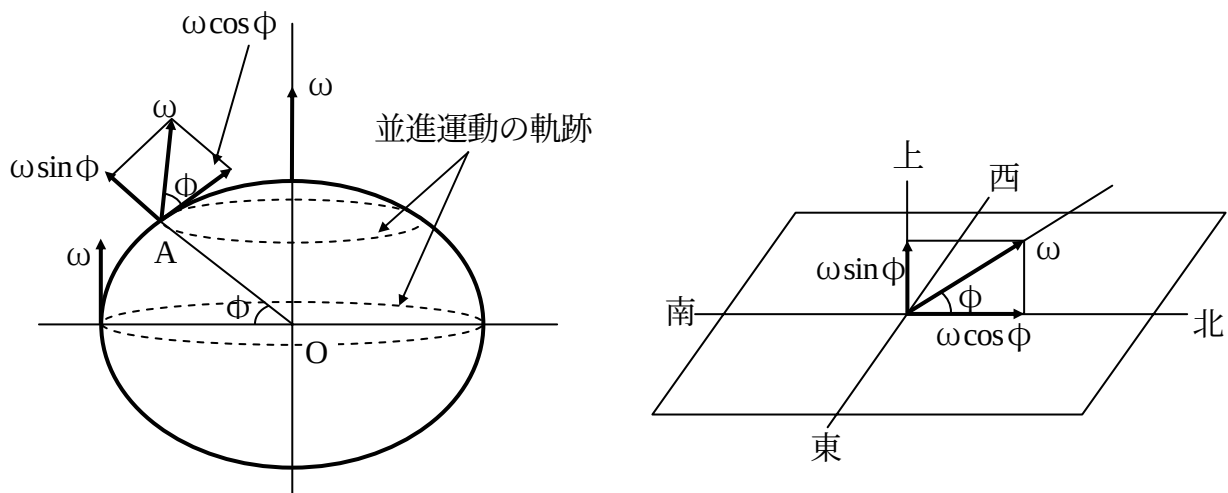
地球自転の角速度 ω (red/s)は、極においてもA点においてもまた赤道上においても同じ大きさであるが、極以外の地点では ω の他に並進運動が加わっている。ジャイロの運動を考える場合には並進運動は直接は関係しないため、角速度のみを考えることにする。A点の角速度 ω を南北水平軸の周りの俯仰の角速度と、A点鉛直軸の周りの方位旋回の角速度との分割すると、南北水平軸の周りの俯仰角速度は $\omega \cos \phi$ 、鉛直軸まわりの方位旋回角速度は $\omega \sin \phi$ となる。

つまり、赤道においては俯仰の角速度 ω のみであり、南北両極においては方位旋回の角速度 ω のみとなり、中間緯度の地点ではその両方の成分をもっている。

図 2.11 に示したのは、北緯の中間緯度においてジャイロ軸を水平にして北を向けて起動した場合の視運動と、地球との関係を示したものである、これによって、地球に対する俯仰運動と旋回運動とが同時に起きることが理解できる。

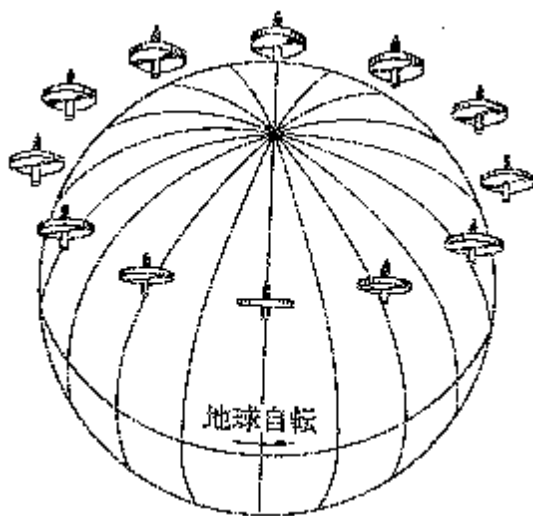
各緯度においてジャイロは北向きに、その地の緯度と同じ角だけ北半球において仰角を、南半球においては俯角をもった場合のみジャイロ軸は視運動においても静止し見える。

以上のことより、ジャイロコンパスとしてジャイロを使用するには、単に2軸の自由を有するのみでは不都合であり、何らかの方法によって軸が水平の状態で地盤の旋回を追うような指北性を有する必要があることがわかる。



赤道においては俯仰の角速度 ω のみであり南北両極においては方位旋回の角速度 ω のみであり，中間緯度の地点では，その両方の成分を持っている．

図 2.10 俯仰と方位旋回の角速度



地球上，中緯度において水平に置いたジャイロが一定の絶対方向を指しているにもかかわらず，視運動を生ずる状態を示

図 2.11 視運動と地球の関係

2.2.5 指北原理

2軸の自由を有するジャイロを、赤道において水平に南北方向に向けて起動すれば、これは一応北を示したままその方向を保持するであろう。ところが、何らかの理由によってその軸方向が変えられたときは、今度はそれを北に戻す力がないので、その絶対方向は保たれるが、視方向は刻々変化することになる。また中緯度においてはジャイロを水平に保って南北線中に安定させることは、このままの状態ではできない[7][8]。船舶

にこれを積んだ場合は、船の動揺、偏心による軸受の摩擦などにより、このままではジャイロをジャイロコンパスとして用いることはできない。

そこで地球上において見かけ上その軸端が北を向いて、そこに静止するような指北性のあるジャイロでなければならない。このために考えられたのが、重りを下げたジャイロである。

その構造は図 2.12 に示すようなものであって、2 軸の自由のうち水平軸の周りの自由を重力によって仰止している。

このジャイロを赤道においてジャイロのベクトルの方向(指北軸)が東を向くようにして起動した場合、これは図 2.13 の①の状態であるが、地盤の南北水平軸の周りの傾斜運動のため、ジャイロの指北端は上昇する。そのため、重りは指北端を水平に戻そうとする力(トルク)を与える。これが②の状態である。そのトルクのベクトルの向きは北向きであるため、ジャイロの指北端は北の方へプリセッションを起こす。これが③の状態である。

つまり、地盤の傾斜運動のために、ジャイロ軸の地盤に対する見かけ上の運動は指北端が東に偏して向いているときは上昇運動となり、指北端が西へ偏して向いているときには指北端は降下運動となる。指北端が上がったときと下がったときとでは、重りによる復元トルクの向きが逆になるから、プリセッションの向きも逆となる。そしてそのプリセッションの向きは指北端を北に向かせる方向であるため、指北性を保つことになる。

以上の運動における指北端の動きを図 2.14 に示す。ここで、水平面からの傾斜は地盤の傾斜のための相対運動であり、ジャイロコンパスはこの指北原理を利用したものである。

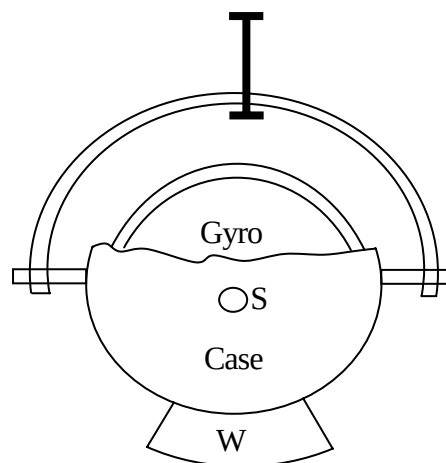


図 2.12 重鐘を下げたジャイロコンパス

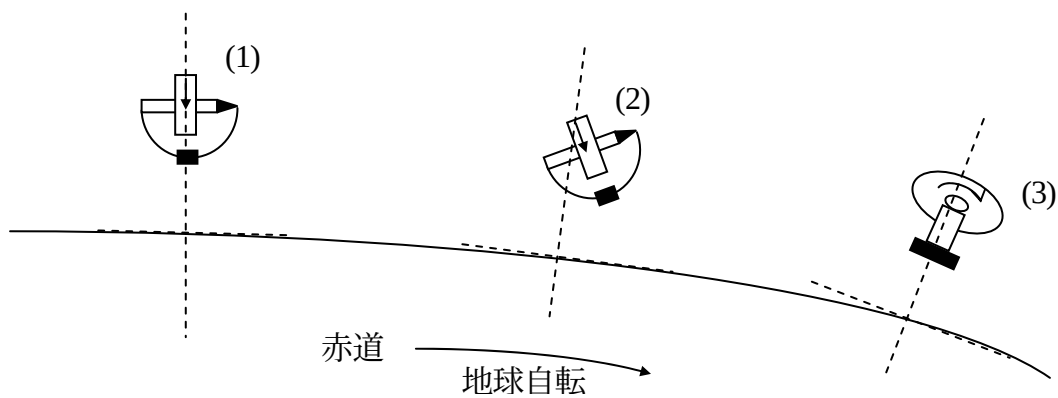


図 2.13 指北原理

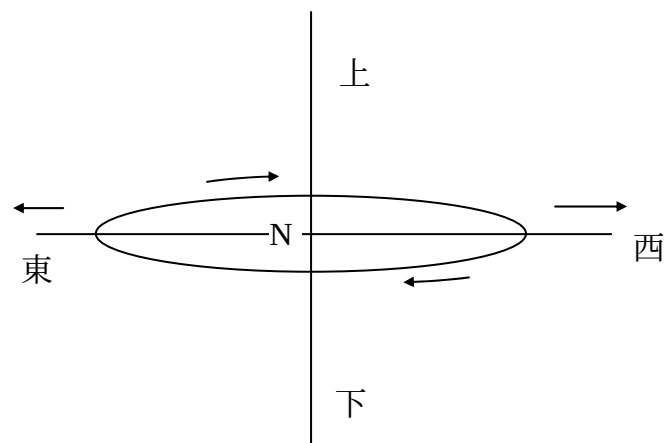


図 2.14 指北端の動き

2.3 GPS コンパス

2.3.1 GPS コンパス概要

GPS コンパスとは、2つの GPS 受信機を用いて、それらのアンテナの相対的な位置関係から方位を求める方位センサーである。図 2.15 に示すように、船舶においてその船主方位上に2つのアンテナを配置することにより、リアルタイムでの船主方位を求めることができる。補助センサーとして振動ジャイロを内蔵しているので、高速でのデータ出力が可能であり、レーダに接続することにより、レーダ性能をフルに発揮させることができる[9]。

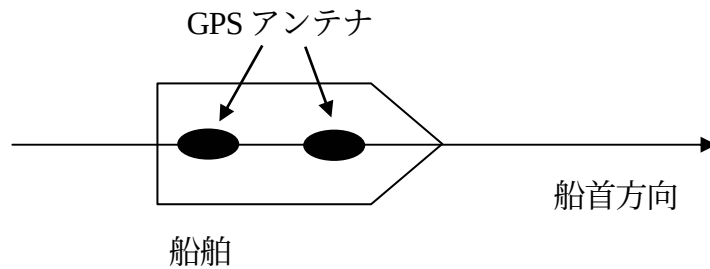


図 2.15 GPS アンテナ取り付け位置

2.3.2 方位計算原理

方位計算原理概略図を図 2.16 に示す。2つの GPS アンテナの相対的位置関係(ベクトル)を GPS の搬送波により求める。したがって、アンテナが3個の場合は1つのアンテナを基準として2個の独立したベクトル(基線ベクトル)が得られる。GPS アンテナが2個、3個及びそれ以上複数個の方式があるが、3個以上のものは2本以上の独立したベクトルが測定できるため、船体の姿勢(roll, pitch, yaw)も計測することができる。2個の方式はベクトルが1本であるため、装備方法により原理的に roll と pitch のどちらかが計測できない。計測精度は基線ベクトルの幾何学的配置(特にアンテナ間距離)に依存する。通常、基線長が 50~100cm で、約 1° ~ 0.5° の精度が得られる[10]。

基線ベクトルを3次元で決定するためには X, Y, Z の3個の未知数を求めなければならないが、そのためには3つのキャリア位相差に関する連立方程式を解くことになり、衛星は3個必要になる。キャリア位相差には一般に、同じ衛星の電波を異なるアンテナで受信し、差をとる1重位相差方式と、異なる衛星で1重位相差どうしの差をとる2重位相差方式がある。

1重位相差をとることにより、衛星のクロック誤差や電波の伝播誤差が相殺されるが、受信機のクロック誤差やアンテナケーブル長の違いによる誤差は残る、この誤差は2重位相差をとることによって相殺することができる。したがって、一般的に2重位相差は、ある基準衛星の1重位相差に対する差をとるため、結果として観測値の数が衛星数に対して1個少なくなる。ゆえに2重位相差方式でこのベクトルを求めるためには、最低4個の衛星を捕捉追尾する必要がある。

通常、基線長が 50~100cm に対し GPS 電波の1波長は約 19cm である。したがって観測される2重位相差は、小数点以下の成分と整数部分にわかれ、受信機では原理的に小数点以下しか観測できないため、電源起動時等に電波を受信し始めた時はこの整数部分を決定する必要がある。これを初期化といいこれに要する時間を初期化時間という。一

般に基線長が長くなるほど、精度は向上するが整数バイアスの候補点の数が増大するため、初期化時間も長くなる。

以上のような原理により船首方位を計測することが可能であるが、通常 GPS はデータ更新周期が 1 秒程度のものが多く、GPS 単独では高速旋回時又は船体の動揺等により追従遅れが発生する。また、橋の下を通過する時などアンテナが遮蔽される場合には、その間は方位計測は中断する。そこで、これらの問題を解決し、数十 Hz 以上の更新周期を実現するために、船舶用の GPS コンパスは角速度センサー(ターンレートジャイロ)や加速度センサー(振動ジャイロ)等の慣性センサーを内蔵しており、高速旋回時や船体が動揺している時でも安定した追従ができるように作られている。実際に GPS コンパスは高速旋回時又は船体の動揺等に対し、ジャイロコンパスや磁気コンパスに比して優れている。100Hz まで動作が可能であり、外的要因により電波が受信できなくなった時には慣性センサーが一定の時間バックアップして動作するようになっている。

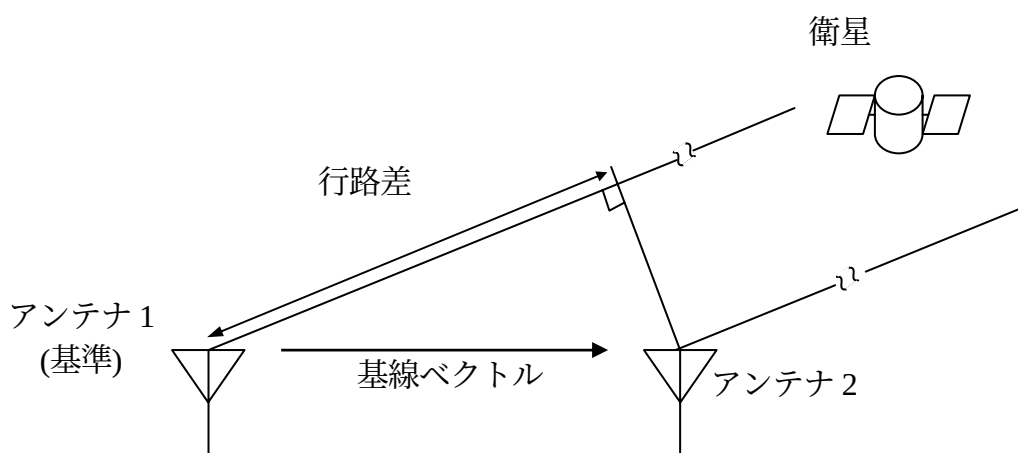


図 2.16 方位計算原理

第 3 章

実験方法

海上を航行するため、ジャイロコンパス又は磁気コンパスを搭載している。ジャイロコンパスは高価・静定時間が長い等の欠点があるため、多くの小型船は磁気コンパスを搭載しているが指北精度が劣る欠点がある。これらの欠点を解決するために、GPS 衛星を利用した GPS コンパス JLT-10T が開発された。本研究では、この GPS コンパスの性能評価を行った。

3.1 システム構成

本研究で使用する、実験装置の構成を図 3.1 に示す。2つのアンテナで受信したデータを基に処理機で方位計算を行い、方位データを表示する表示機や方位データが必要なレーダなどに接続する構成になっている[9]。

GPS コンパス JLR-10T の諸性能を表 3.1 に、GPS アンテナ設置箇所を図 3.2 に示す。

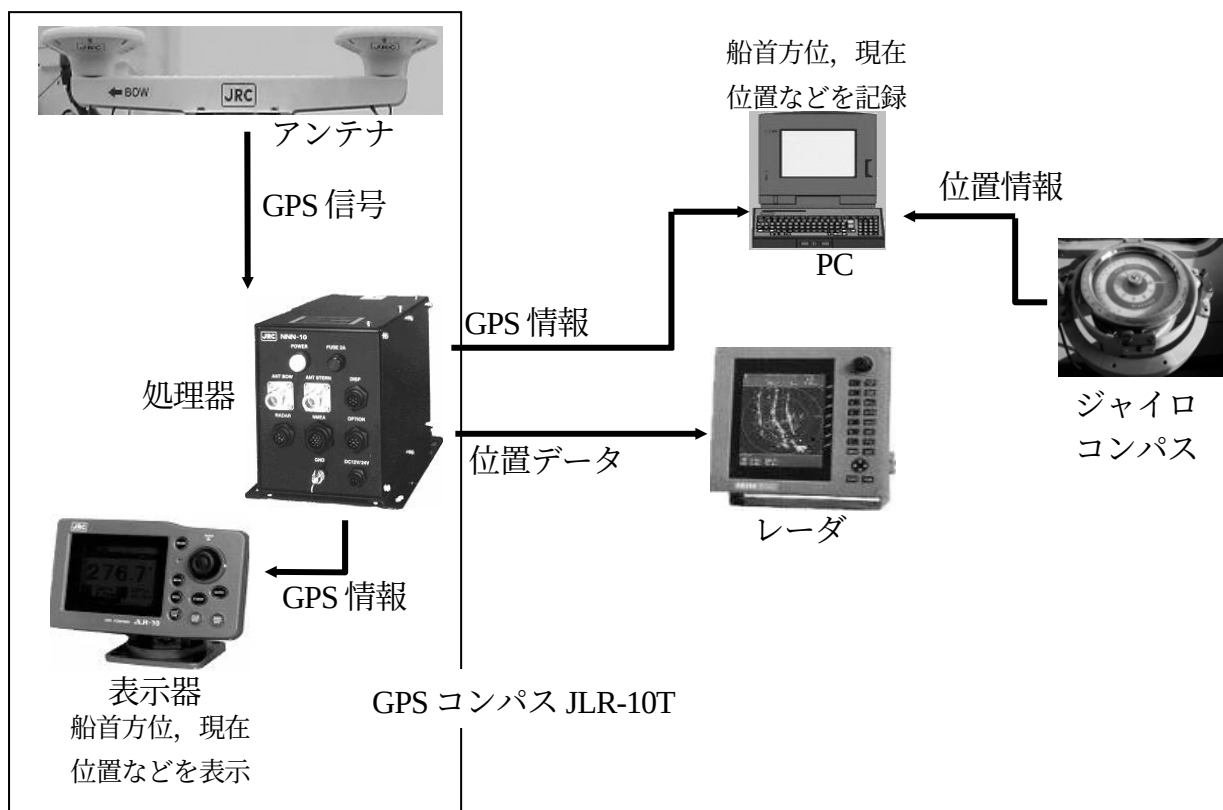


図 3.1 実験装置の構成

- ・アンテナ(NAY-1000)

方位を求めるのに最低限必要な 2 アンテナタイプとし、アンテナ間隔を 50cm にすることにより、小型、軽量で装備性に優れている。アンテナはプリアンプ内蔵で、正確に GPS のキャリアを測定できるように設計されている。

- ・処理器(NNN-10T)

処理器は 2 個の GPS 受信機、補助センサー、方位計算部(CPU)で構成されている。

- ・ GPS 受信機

GPS コンパスは2アンテナタイプなので GPS コンパス受信機も2つ必要になる。通常、GPS 受信機はGPS 衛星から送られてくる航法データを用いて位置、速度等を計算し、外部へ出力している。しかし、GPS コンパスでは、より正確に方位を計算するために、GPS のキャリア(搬送波)位相データを用いている。そのため、キャリア位相データも外部へ出力できるソフトウェアを作成した。

- ・ 補助センサー

補助センサーは振動ジャイロと傾斜計で構成されている。振動ジャイロは1軸の角速度を検出することができ、得られる角速度を積算することにより角度が得られる。方位角、ピッチ角、ロール角を求めるために、3つの振動ジャイロを持っている。GPS コンパスはGPS からの信号が途切れるような物陰などでは方位を計算することができない。その場合でも振動ジャイロがバックアップセンサーとして働き、方位を出力することが可能である。2アンテナタイプではGPS により方位角は求めることができるが、ロール角やピッチ角を求めることはできない。そのため傾斜計を用いてロール角とピッチ角を求める。傾斜計で得られたロール角、ピッチ角と振動ジャイロでえられたロール角、ピッチ角を組み合わせることにより、より良い精度のロール角とピッチ角を出力できる。

- ・ 表示機(NWZ-4551G)

表示機は処理器と利用者のインターフェースであり、処理器が計算した方位やGPS 衛星情報、自船位置、速度などの情報を表示すると共に、処理器に対して様々な設定を行う。

表 3.1. 諸性能表

受信方式	マルチチャンネル(12-CH)オールインビュー方式
受信周波数	1575.42MHz $\pm$ 1MHz(C/A code)
方位精度	0.5 度 RMS(C/A code, HDOP<4)
最大回頭速度	25 度/秒
最大追従加速度	1G
最大ロール/ピッチ角	30 度
測位精度	GPS : 15m(2dRMS) DGPS : 4m(2dRMS)
DGPS 入力	RTCM SC-104 ver 2.0 type 1.2.7.9
測地系	WGS84, 日本測地系等 46 種選択可能
データ出力	3 ポート (1) 標準器用 NMEA0183 : 船首方位, 位置, 速度他 4800bps, 1 秒周期 (HDT, GGA, GLL, RMC, VTG, GSA, GSV, DTM) (2) レーダ用 NSK : 船首方位 NSK=9600bps, 20ms 周期(ログ出力あり) (3) レーダ用 NMEA0183 : 船首方位 NMEA=4800bps, 50ms 周期(HDT)

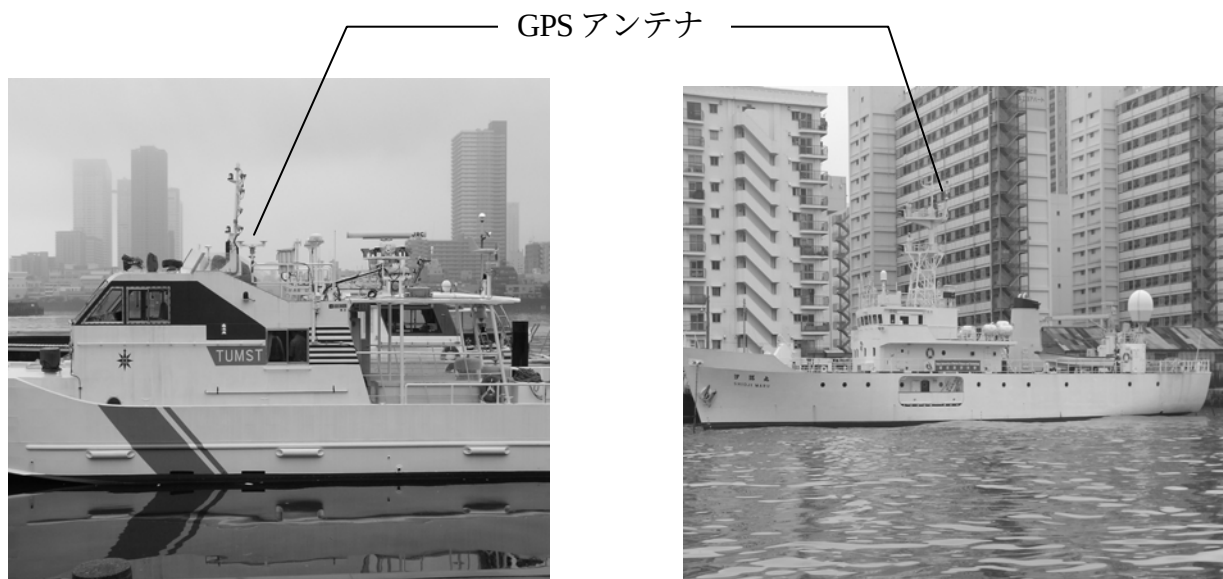


図 3.2 やよい・汐路丸のアンテナ設置箇所

3.2 静的精度・静定時間測定

測定は、やよい、汐路丸ともに行なう。静定時間測定は電源投入から方位出力までの時間を測定する。静的精度は係留時の方位精度の測定であり、その時の衛星の状態を見る。測定は、以下のように行なう。

出航前の測定：岸壁に停泊している状態で投入し方位が出力されるまでの時間を測定する。電源を落してから2分後に電源を投入し、表示器に示されるまでの時間測定(ストップウォッチでの測定)を10回測定する。同時に、GPS衛星の受信状態をみる。

巡航中の測定：船舶が動いている状態で投入し方位が出力されるまでの時間を測定する。電源を落してから2分後に電源を投入し、表示器に示されるまでの時間測定(ストップウォッチでの測定)を10回測定。同時に、GPS衛星の受信状態をみる。

仮泊中の測定：海上で仮泊中の状態で投入し方位が出力されるまでの時間を測定。電源を落してから2分後に電源を投入し、表示器に示されるまでの時間測定(ストップウォッチでの測定)を10回測定。同時に、GPS衛星の受信状態をみる。

入港後の測定：岸壁に停泊している状態で投入し方位が出力されるまでの時間を測定する。電源を落してから2分後に電源を投入し、表示器に示されるまでの時間測定(ストップウォッチでの測定)を10回測定する。同時に、GPS衛星の受信状態をみる。

3.3 動的精度測定

測定は、やよい、汐路丸ともに行なう。動的精度は直進で速力を変化させて動いた場合の方位精度を測定し、その時の衛星の状態を見る。コースは 000, 045, 090, 135, 180, 225, 270, 315, 度のいずれかの方位で速力は各速力 5, 8, 10, 12 ノットで3分間航走。

3.4 方位追従精度測定

測定は、やよい、汐路丸ともに行なう。追従精度は舵角の角度を決め回頭時の方位追従精度を測定し、その時の衛星の状態を見る。測定は以下のように行なう。

- ・ 舵角右5度、舵角左5度、速力10ノットで旋回し、原針路に戻り針路10度オーバーした後、測定を終える。

- ・ 舵角右 10 度，舵角左 10 度，速力 12 ノットで旋回し，原針路に戻り針路 10 度オーバーした後，測定を終える．

3.5 蛇行時の動的精度測定

測定は，やよい，汐路丸ともに行なう．蛇行航行は，速力，舵角を決め，スターボード，ポート交互に蛇行し，その時の衛星の状態を見る．測定は以下のように行なう．

- ・ 速力 12 ノット，舵角 10 でスターボード 10(右 10 度)，ポート 10(左 10 度)交互に蛇行する(原進路より 20 度に来た時点で，反舵角を取る)．
- ・ 速力 12 ノット，舵角 5 でスターボード 5(右 5 度)，ポート 5(左 5 度)交互に蛇行する(原進路より 20 度に来た時点で，反舵角を取る)．
- ・ 速力 5 ノット，舵角 10 でスターボード 10(右 10 度)，ポート 10(左 10 度)交互に蛇行する(原進路より 10 度に来た時点で，反舵角を取る)．
- ・ 速力 5 ノット，舵角 5 でスターボード 5(右 5 度)，ポート 5(左 5 度)交互に蛇行する(原進路より 10 度に来た時点で，反舵角を取る)．

第 4 章

実験結果及び検討

4.1 静的精度・静定時間測定結果

電源投入から方位出力までの静定時間測定，及び静的・動的方位精度の測定，ジャイロコンパスに対する GPS コンパスの静的・動的方位精度差の結果を示す。

4.1.1 やよいでの測定結果

表 4.1 出航前(係留中)の静定時間・静的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	48	136.4	135.4	1
2	73	135.6	135.3	0.3
3	53	136.9	135.1	1.8
4	53	135.7	134.4	1.3
5	61	136.7	134.4	2.3
6	60	137.3	135.3	2
7	346	135.5	135.1	0.4
8	54	136.4	135.3	1.1
9	53	136.1	135.7	0.4
10	60	134.5	134.2	0.3
平均	86	136.11	135.02	1.09
標準偏差	91.57929169	0.813019	0.505085	0.748999

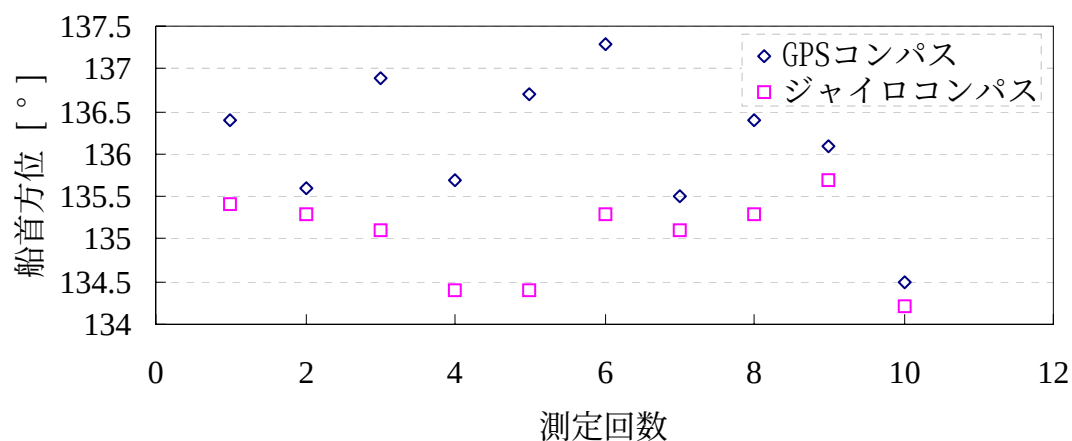


図 4.1 出航前(係留中)の静的精度

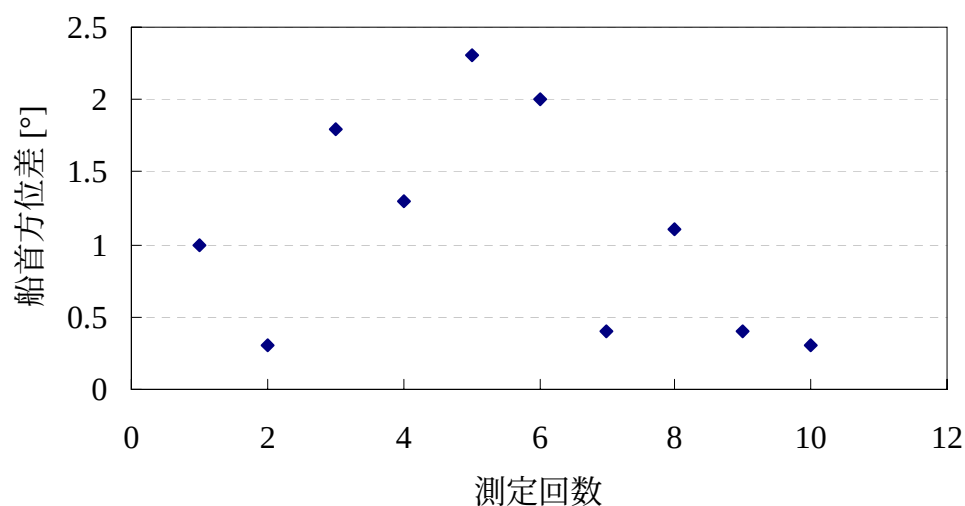


図 4.2 出航前(係留中)の静的方位精度差

表 4.2 巡航中の静定時間・動的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	動的精度 (船首方位差) [°]
1	68	20.5	22.1	-1.6
2	229	26.6	27.8	-1.2
3	55	-35.2	-37.2	2
4	343	-23.2	-21.8	-1.4
5	93	-35.4	-33.6	-1.8
6	149	-15.9	-15.4	-0.5
7	55	-1.9	-0.6	-1.3
8	65	44.9	44.8	0.1
9	60	46.2	46.8	-0.6
10	57	21.1	20.8	0.3
平均	117.40	4.77	5.37	-0.6
標準偏差	97.10269	31.23887	31.31979	1.154701

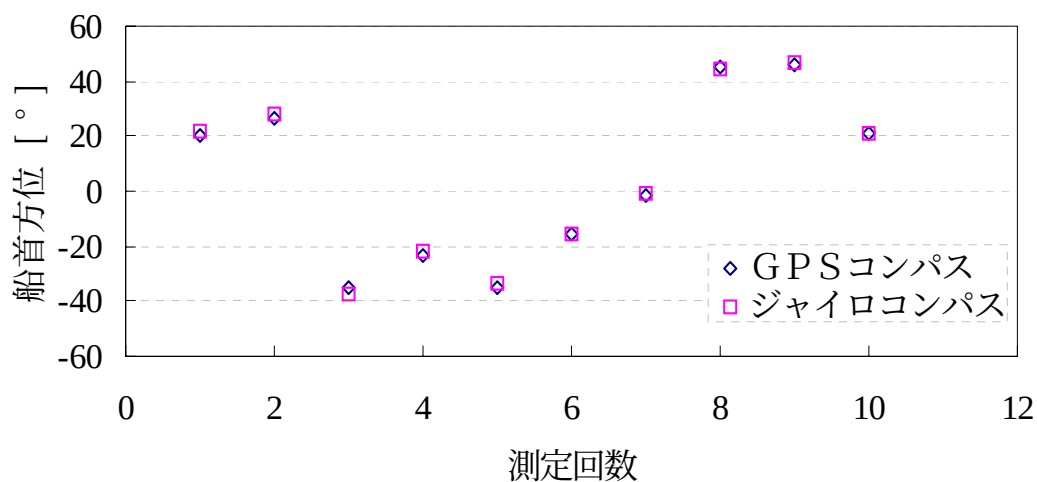


図 4.3 巡航中の静的精度

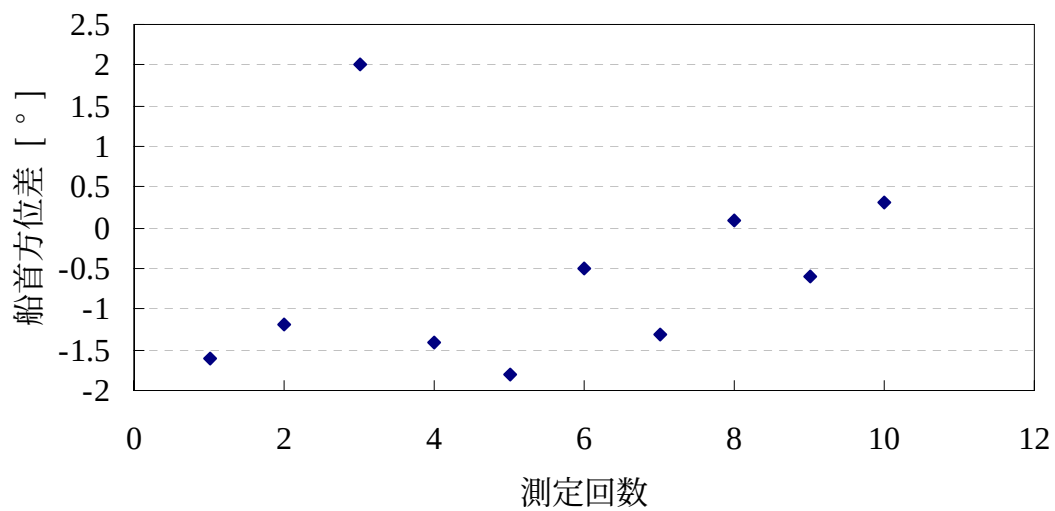


図 4.4 巡航中の動的方位精度差

表 4.3 入港後(係留中)の静定時間・静的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間)[sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	71	136.2	136.2	0
2	63	137.2	136.2	1
3	57	136.6	136.2	0.4
4	59	136.5	136.1	0.4
5	56	135.6	136.1	-0.5
6	56	136.4	135.9	0.5
平均	60.33	136.42	136.12	0.30
標準偏差	5.853773712	0.523132	0.116905	0.505964

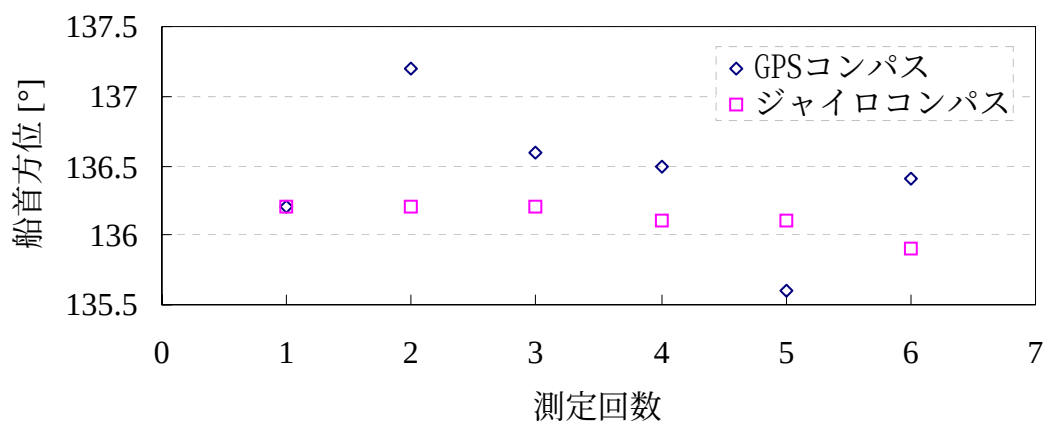


図 4.5 入港後(係留中)の静的精度

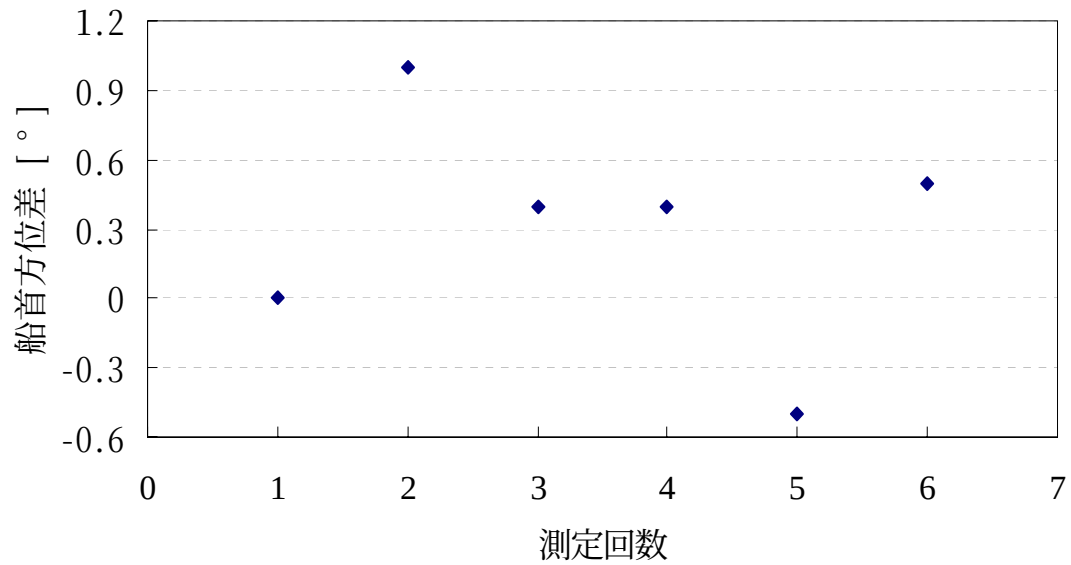


図 4.6 入港後(係留中)の静的方位精度差

4.1.2 汐路丸の測定結果

表 4.4 出航前(係留中)の静定時間・静的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	54	52.1	53.3	-1.2
2	53	46.9	47.7	-0.8
3	59	46.1	48.2	-2.1
4	74	-139.6	-141.1	1.5
5	94	156.5	155.8	0.7
6	54	26.0	25.8	0.2
7	326	0.8	2.6	-1.8
8	75	2.3	1.5	0.8
9	63	-8.3	-7.5	-0.8
10	79	1.1	1.7	-0.6
平均	93.10	18.39	18.80	-0.41
標準偏差	82.91153	73.32557	73.65208	1.177049

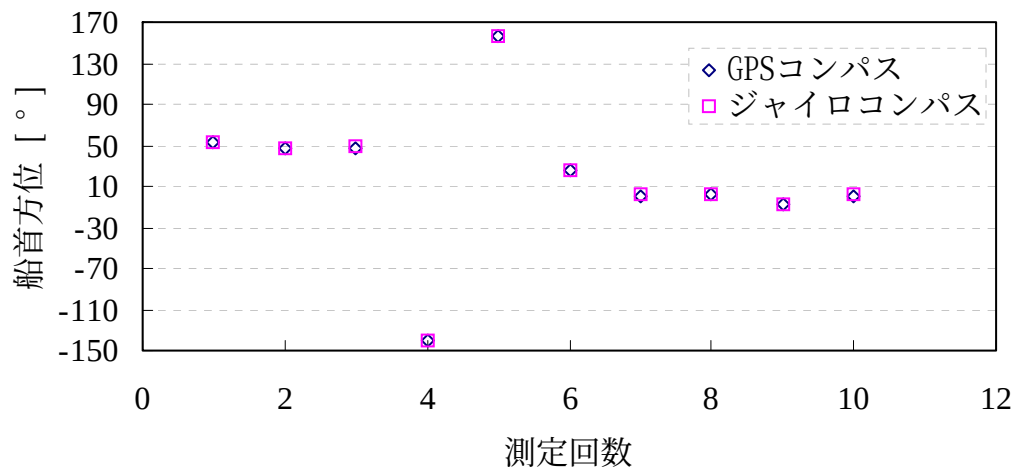


図 4.7 出航前(係留中)の静的精度

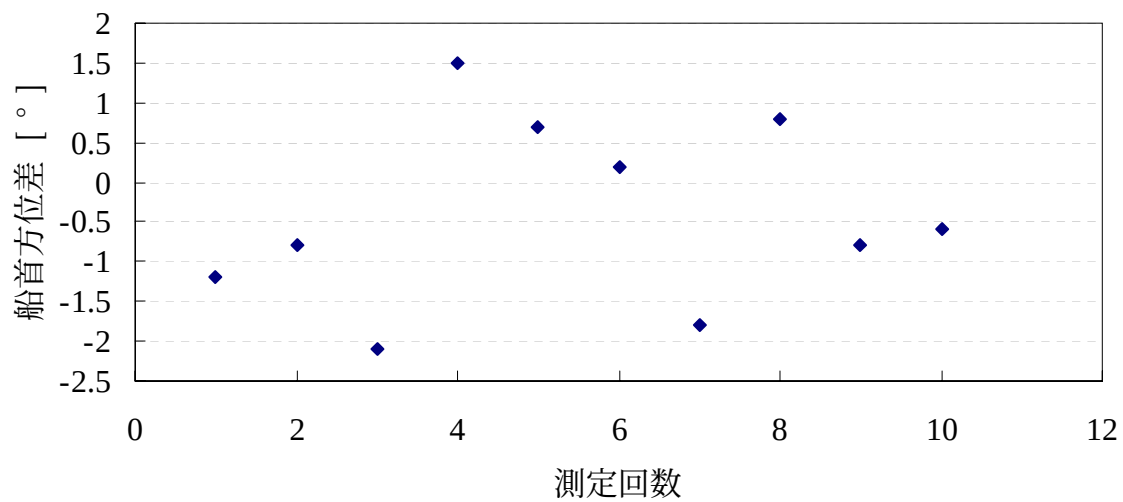


図 4.8 出航前(係留中)の静的方位精度差

表 4.5 巡航中の静定時間・動的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	279	-138.3	-139.5	1.2
2	51	-71.1	-71.0	-0.1
3	51	-103.6	-102.5	-1.1
4	49	-70.7	-71.9	1.2
5	222	-44.7	-43.5	-1.2
6	150	59.3	59.8	-0.5
7	48	64.8	63.5	1.3
8	52	61.3	60.3	1
9	45	59.5	60.1	-0.6
10	48	62.9	61.3	1.6
平均	99.50	-12.06	-12.34	0.28
標準偏差	86.64262	81.2589	81.07656	1.0860735

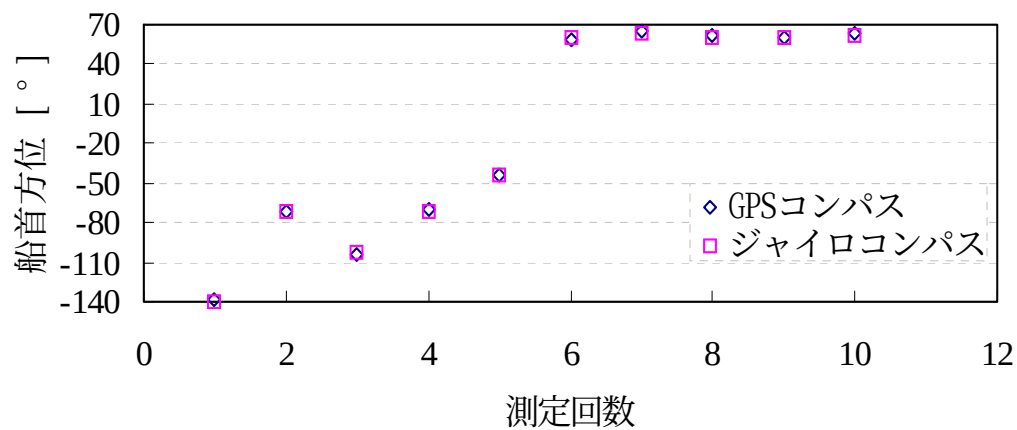


図 4.9 巡航中の静的精度

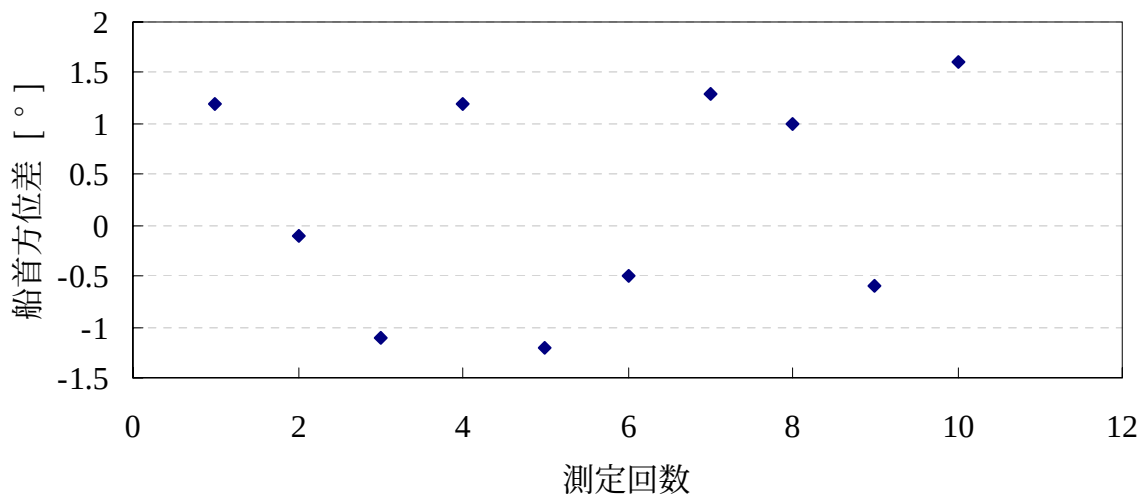


図 4.10 巡航中の静的方位精度差

表 4.6 仮泊中の静定時間・静的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	50	-12.2	-13.0	0.8
2	94	9.4	10.9	-1.5
3	53	8.1	7.5	0.6
4	55	-0.2	0.0	-0.2
5	86	-23.4	-24.4	1
6	99	17.5	18.9	-1.4
7	77	-11.0	-12.0	1
8	77	7.8	7.0	0.8
9	60	-19.0	-20.0	1
10	61	0.8	0.5	0.3
平均	71.20	-2.22	-2.46	0.24
標準偏差	17.80012	13.54358	14.25702	0.9663218

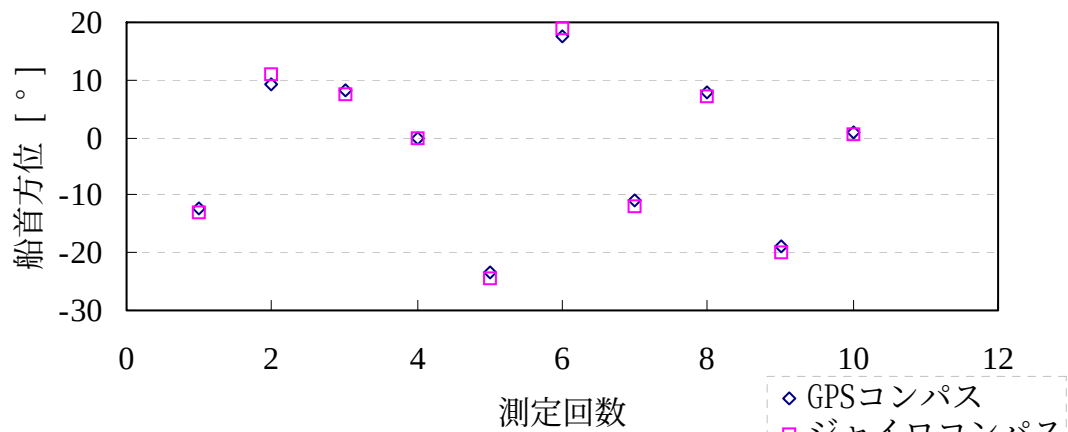


図 4.11 仮泊中の静的精度

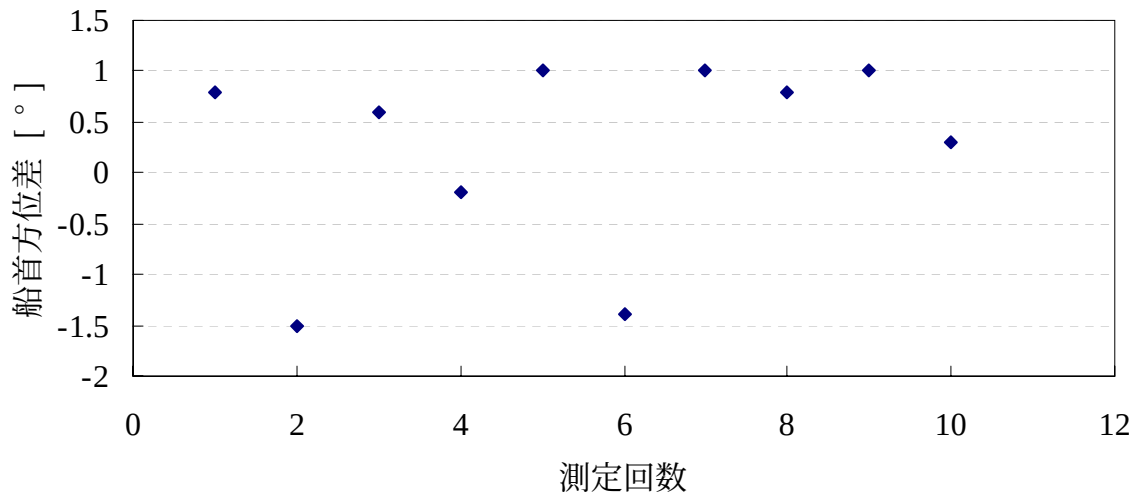


図 4.12 仮泊中の静的方位精度差

表 4.7 入港後(係留中)の静定時間・静的精度測定結果表

測定回数	静定時間 (表示時間) [sec]	船首方位 (GPS コンパス) [°]	船首方位 (ジャイロコンパス) [°]	静的精度 (船首方位差) [°]
1	182	-5.8	-6.0	0.2
2	73	49.5	50.2	-0.7
3	304	58.5	57.9	0.6
4	69	52.5	51.5	1
5	164	52.4	53.0	-0.6
6	103	53.8	52.5	1.3
7	55	52.4	51.5	0.9
8	58	51.4	50.9	0.5
9	53	49.3	50.2	-0.9
10	54	50.4	50.5	-0.1
平均	111.50	46.44	46.22	0.22
標準偏差	82.27765	18.54192	18.48848	0.7699928

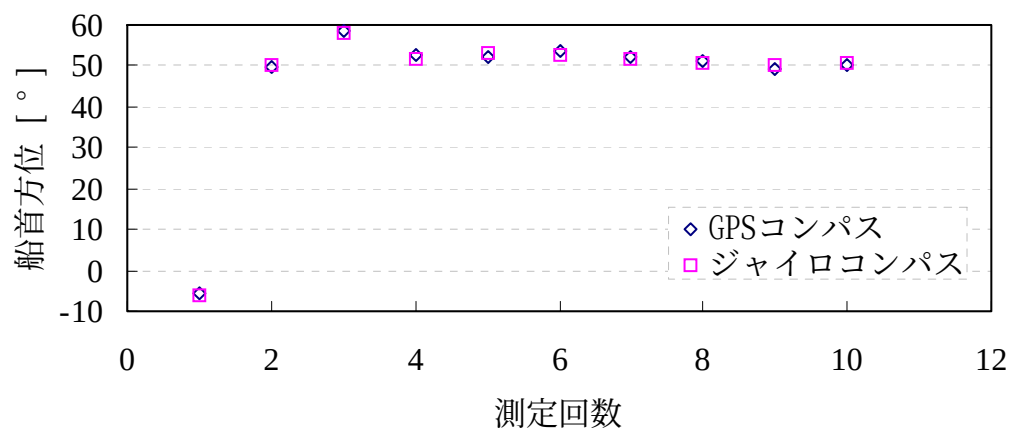


図 4.13 入港後(係留中)の静的精度

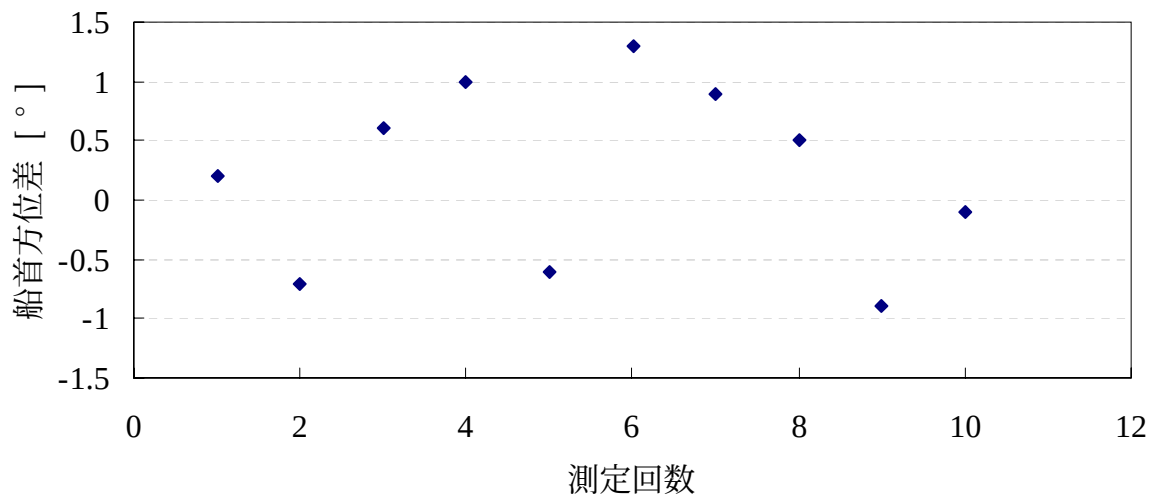


図 4.14 入港後(係留中)の静的方位精度差

4.1.3 実験の検討

- ・ 静定時間は、100 秒以内で表示することができ標準値の 3 分以内での表示であるが、まれに 3 分を超える場合があるが、概ね 3 分以内での表示が確認された。
- ・ 船首方向差は、静定直後はばらつきがあるので処理器の仕様である方位精度 0.5 度を上回ってしまうが、4・5 分でジャイロコンパスの船首方位と一致する。
- ・ 電源投入後、表示時間が一定でない理由は、GPS 電波が建物などにより反射・遮断され、信号を受信するのに時間が掛かるためと思われる。また、表示までの時間が短い時の理由として、処理機の中に前に受信をした GPS 衛星を記録しているために、表示時間が短くなるとと思われる。

4.2 動的精度測定結果

直進航行時の動的方位精度を測定、及びジャイロコンパスに対する GPS コンパスの動的方位精度差を以下に示す。

4.2.1 やよいの測定結果

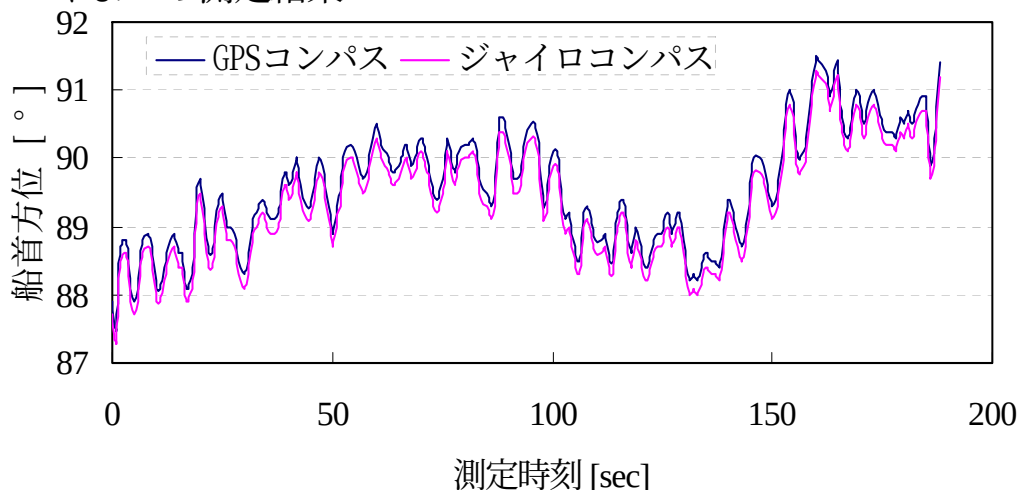


図 4.15 速力 5 ノットの動的精度

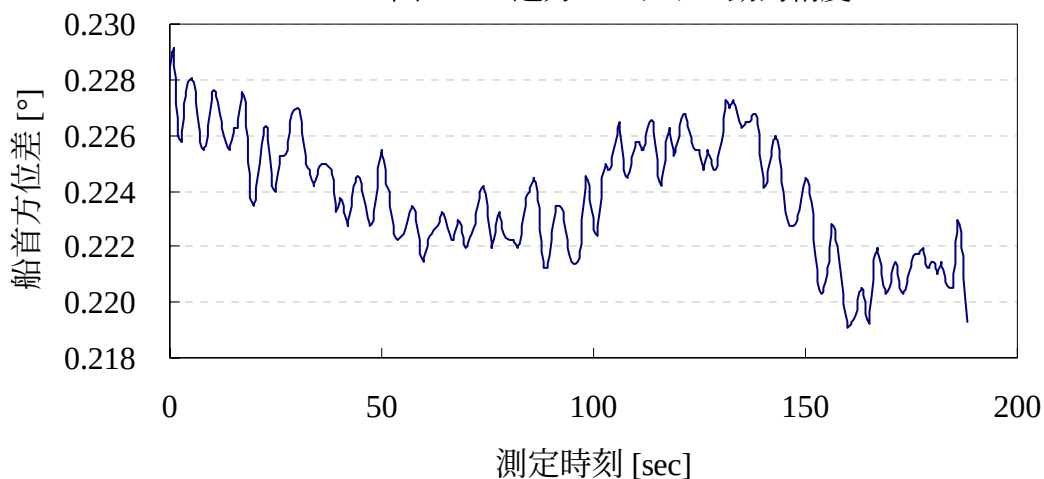


図 4.16 速力 5 ノットの動的方位精度差

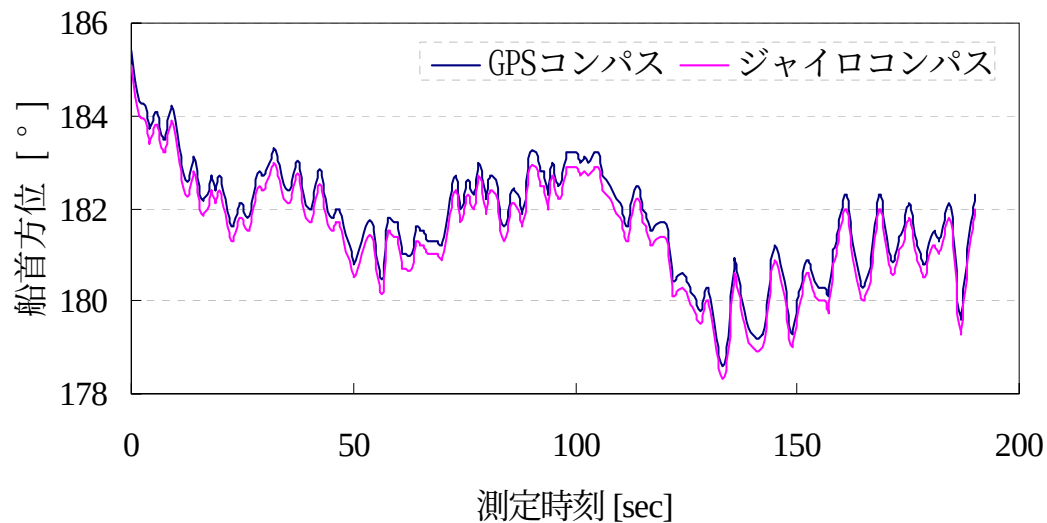


図 4.17 速力 7 ノットの動的精度

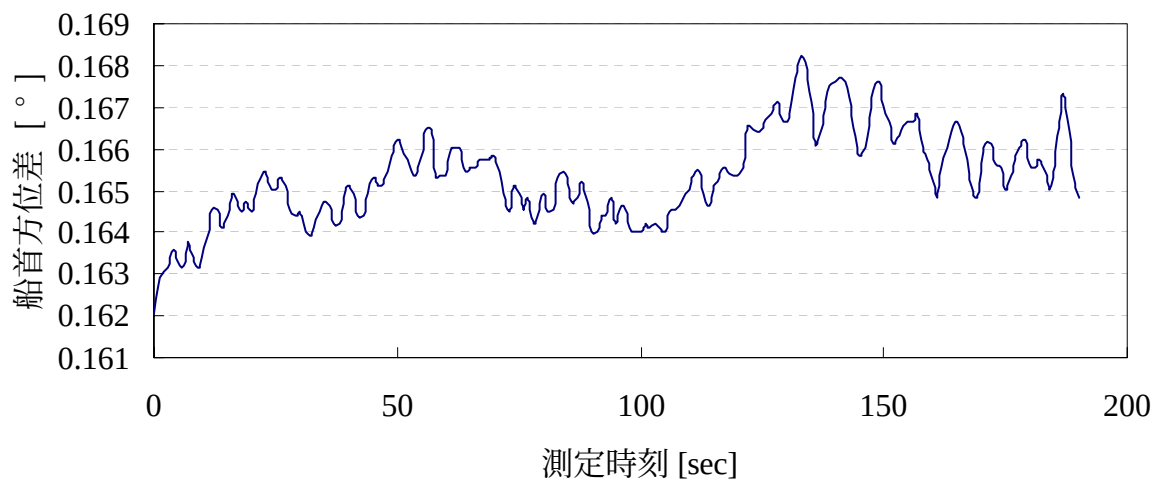


図 4.18 速力 7 ノットの動的方位精度差

4.2.2 汐路丸の測定結果

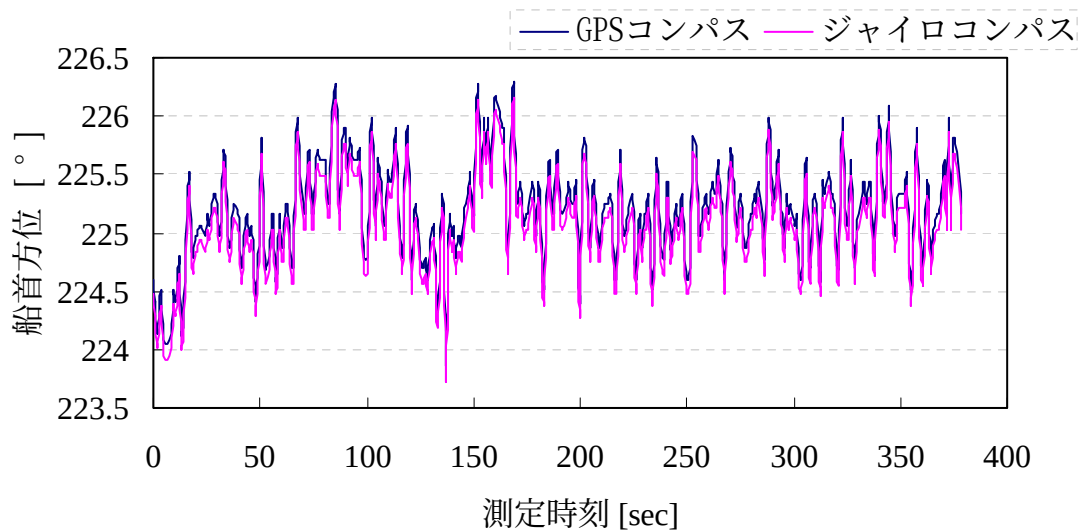


図 4.19 速力 12 ノットの動的精度

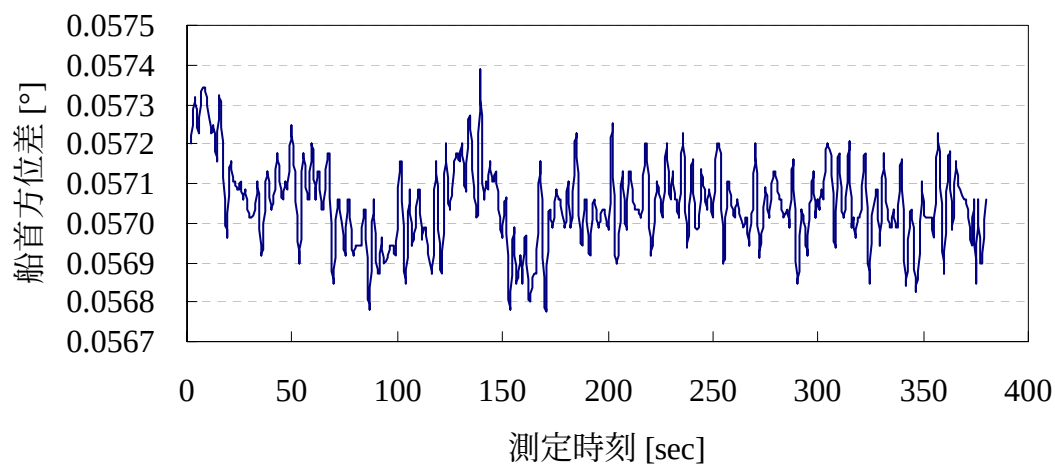


図 4.20 速力 12 ノットの動的方位精度差

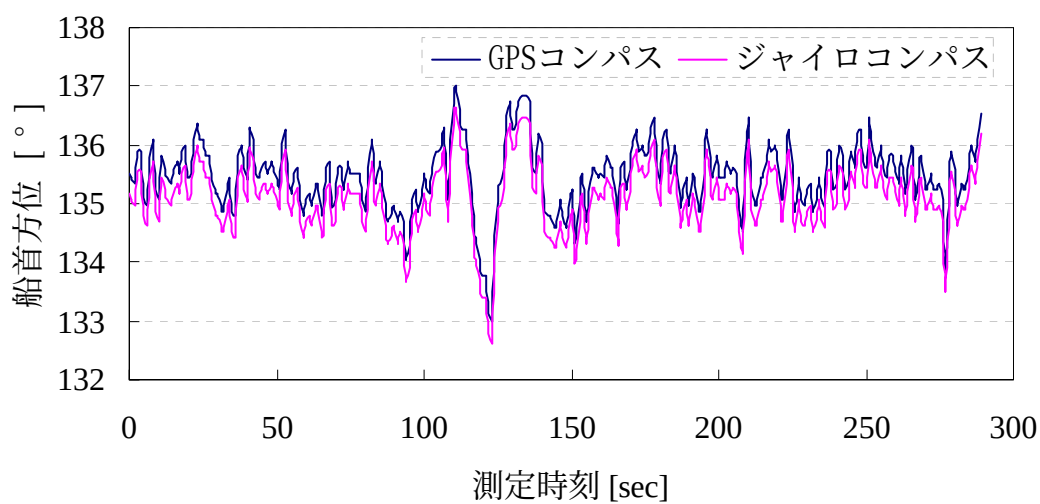


図 4.21 速力 10 ノットの動的精

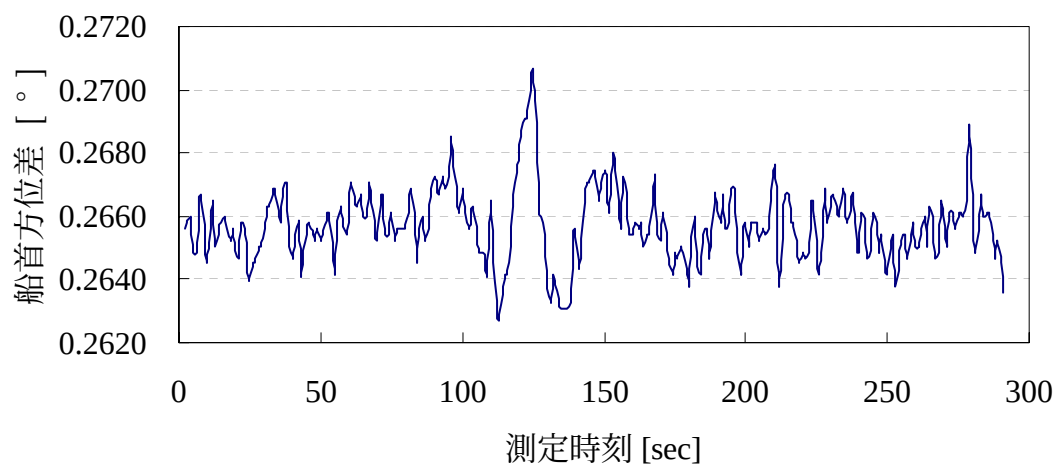


図 4.22 速力 10 ノットの動的方位精度差

4.2.3 実験の検討

・GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位差が大きくなる原因は、GPS コンパスを船首方向に向けて設置するときはずれないように設置しても多少ずれが生じてしまうと思われます。計測中の海域の状況により、船舶が横揺れした時などの衛星信号受信状況の変化によって差が出てくるのではないかと思います。

4.3 方位追従精度測定結果

回頭時の方位追従精度を測定、及びジャイロコンパスに対する GPS コンパスの動的方位差を以下に示す。

4.3.1 やよいの測定結果

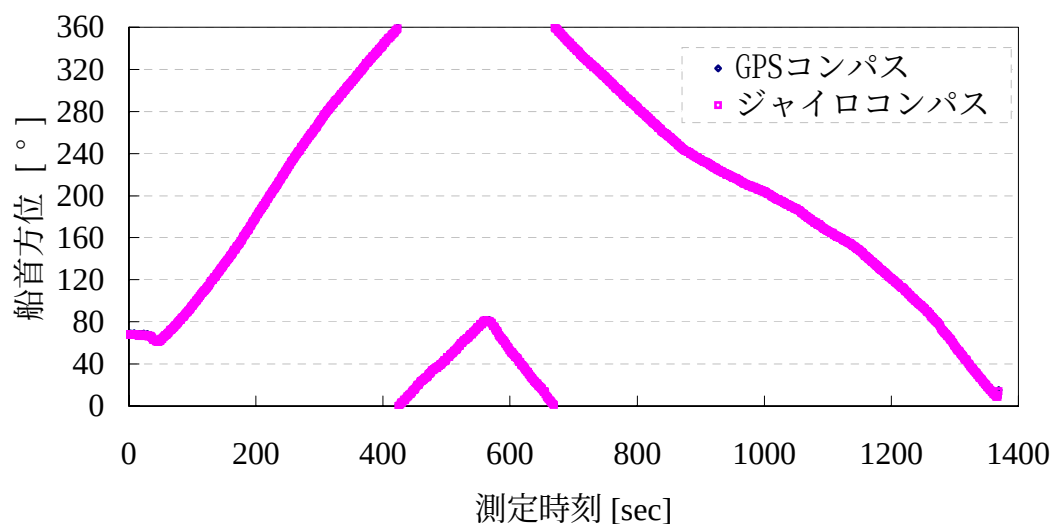


図 4.23 速力 10, 舵角 5 度で回頭時の方位追従精度

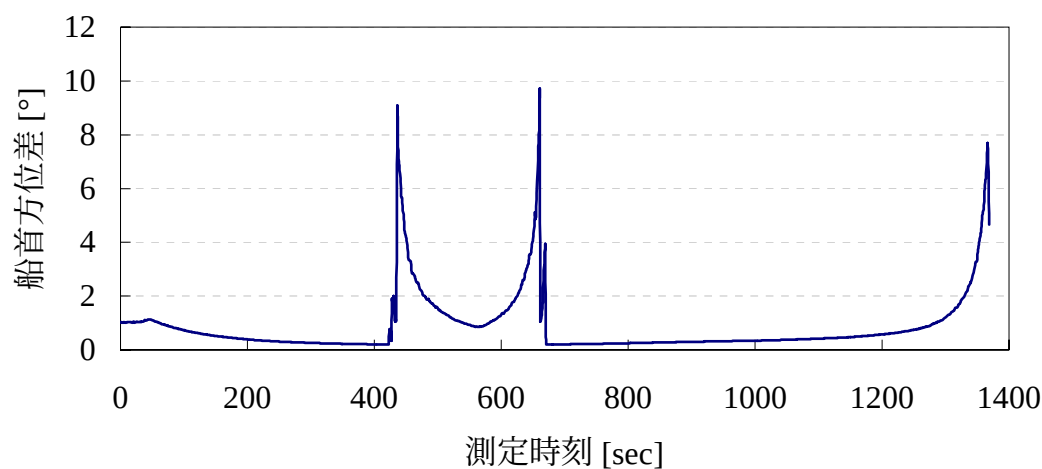


図 4.24 速力 10, 舵角 5 度で回頭時の方位追従精度差

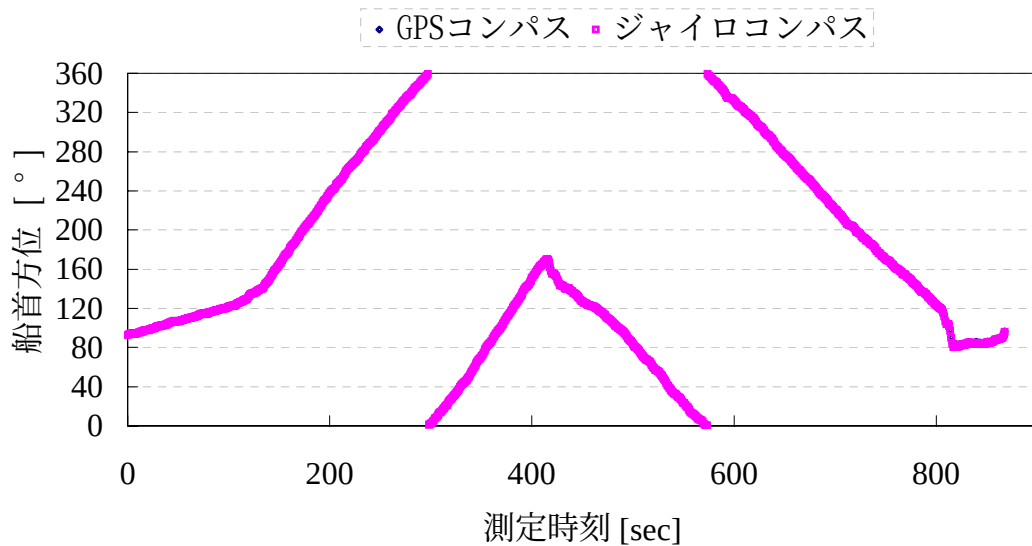


図 4.25 速力 12, 舵角 10 度で回頭時の方位追従精度

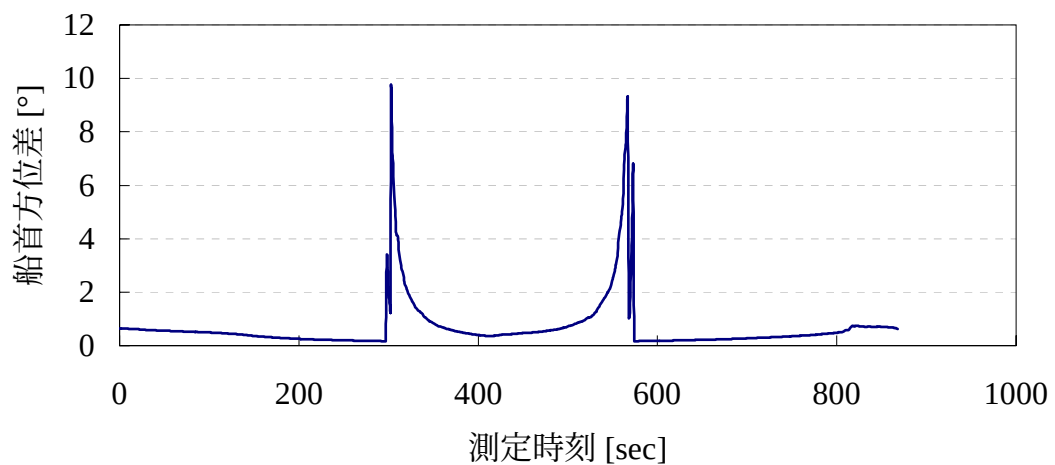


図 4.26 速力 12, 舵角 10 度で回頭時の方位追従精度差

4.3.2 汐路丸の測定結果

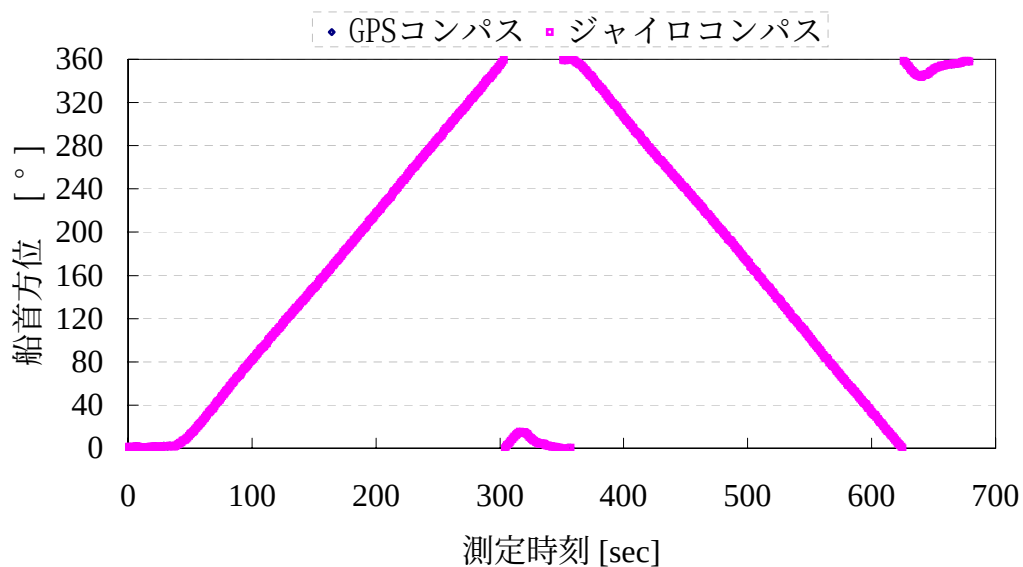


図 4.27 速力 12, 舵角 10 度で回頭時の方位追従精度

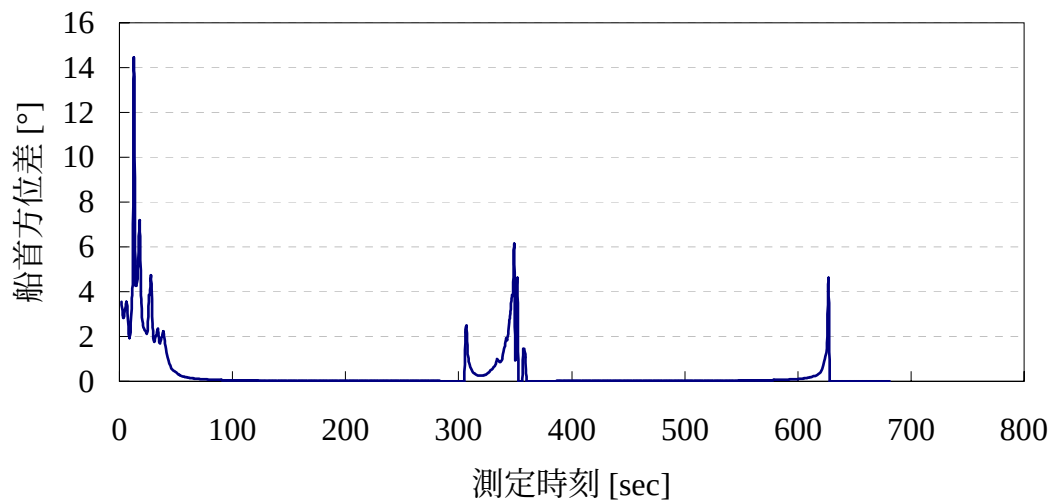


図 4.28 速力 12、舵角 10 度で回頭時の方位追従精度差

4.3.3 実験の検討

・GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位差が大きくなる原因は、GPS コンパスを船首方向に向けて設置するときにはずれないように設置しても多少ずれが生じてしまうと思われます。計測中の海域の状況により、船舶が横揺れした時などの衛星信号受信状況の変化によって差が出てくるのではないかと思います。

4.4 蛇行時の動的精度測定結果

スターボード、ポート交互に蛇行を行い動的精度を測定、及びジャイロコンパスに対する GPS コンパスの動的方位差を以下に示す。

4.4.1 やよいの測定結果

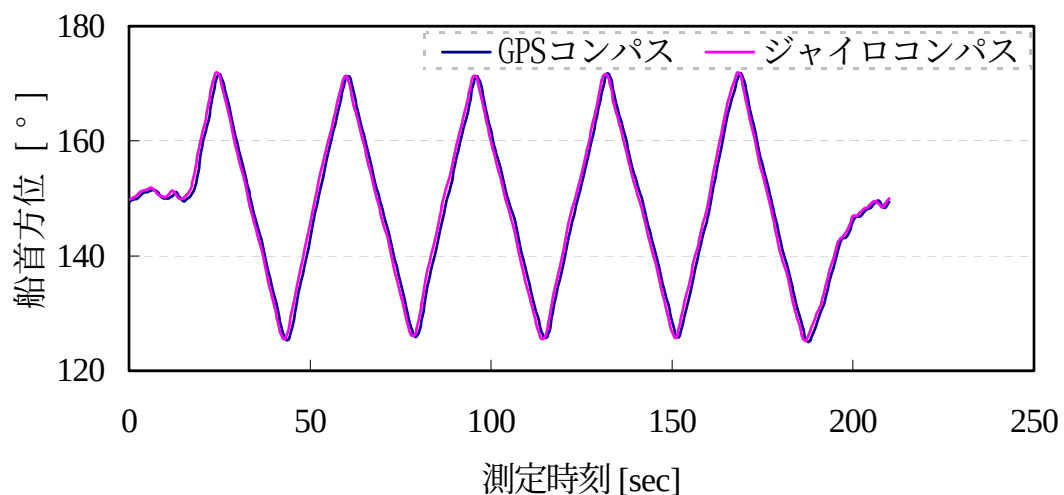


図 4.29 速力 12、舵角 10 度の蛇行時の動的精

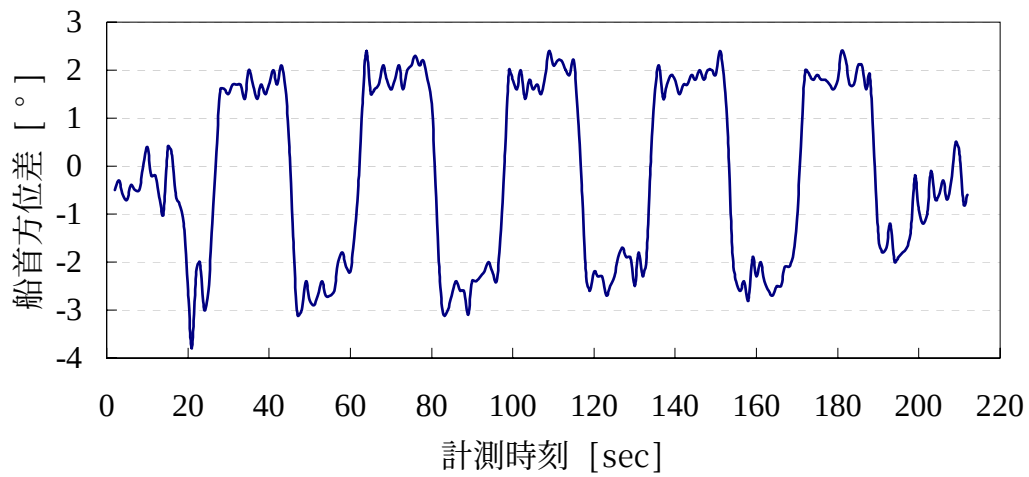


図 4.30 速力 12, 舵角 10 度で蛇行時のジャイロに対する動的精度差

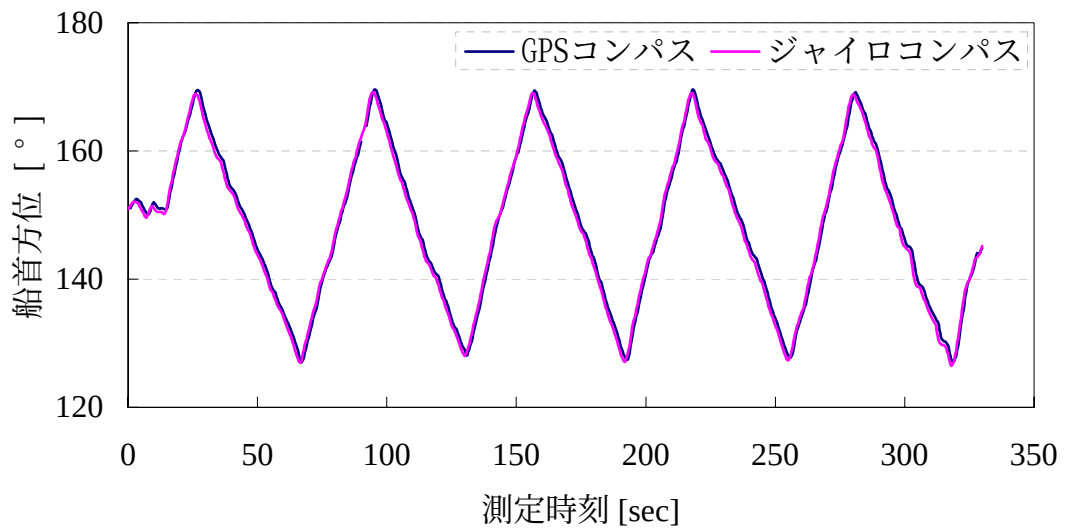


図 4.31 速力 12, 舵角 5 度の蛇行時の動的精度

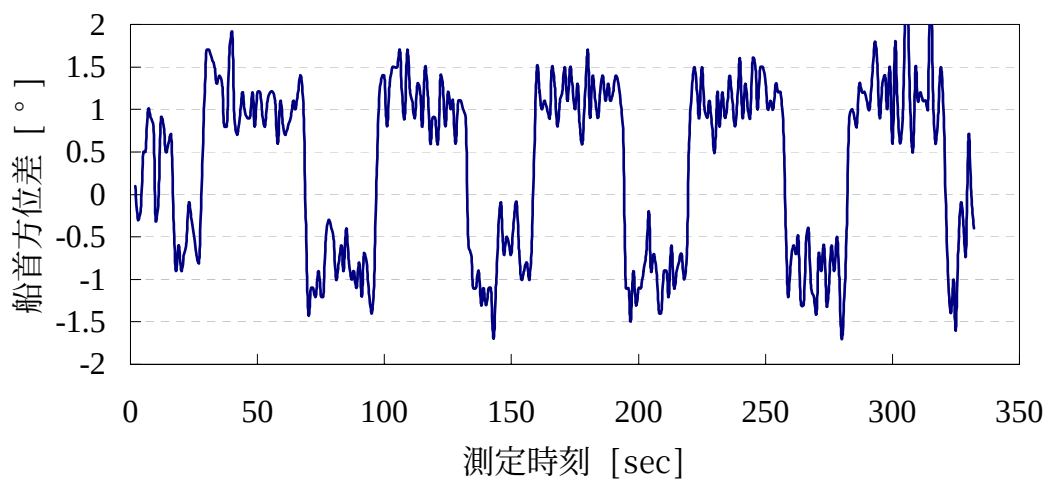


図 4.32 速力 12, 舵角 5 度の蛇行時のジャイロに対する動的精度差

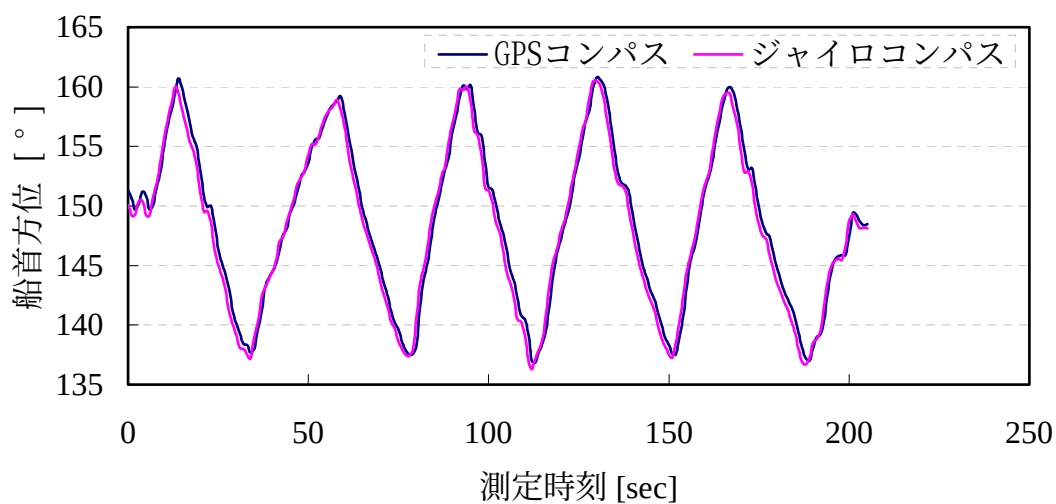


図 4.33 速力 5, 舵角 10 度の蛇行時の動的精度

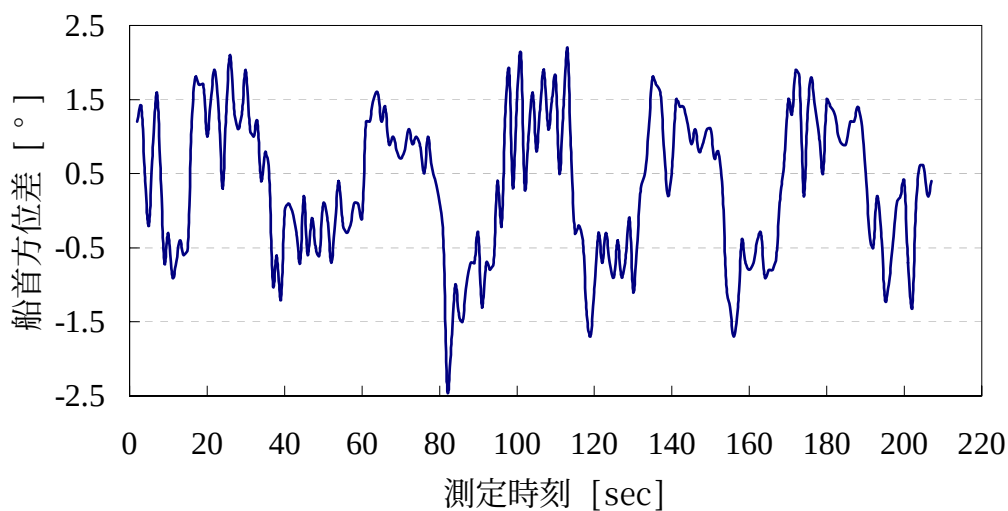


図 4.34 速力 5, 舵角 10 度の蛇行時のジャイロに対する動的精度差

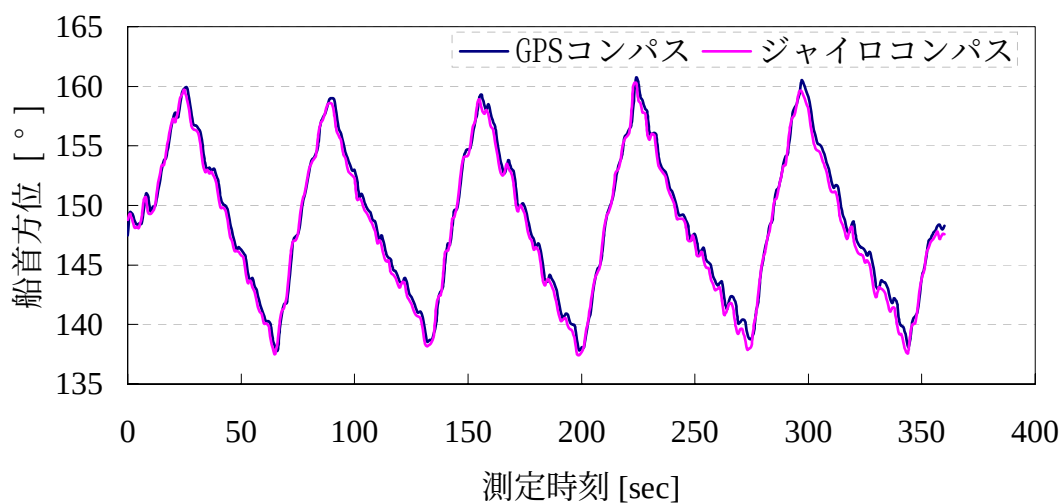


図 4.35 速力 5, 舵角 5 度の蛇行時の動的精度

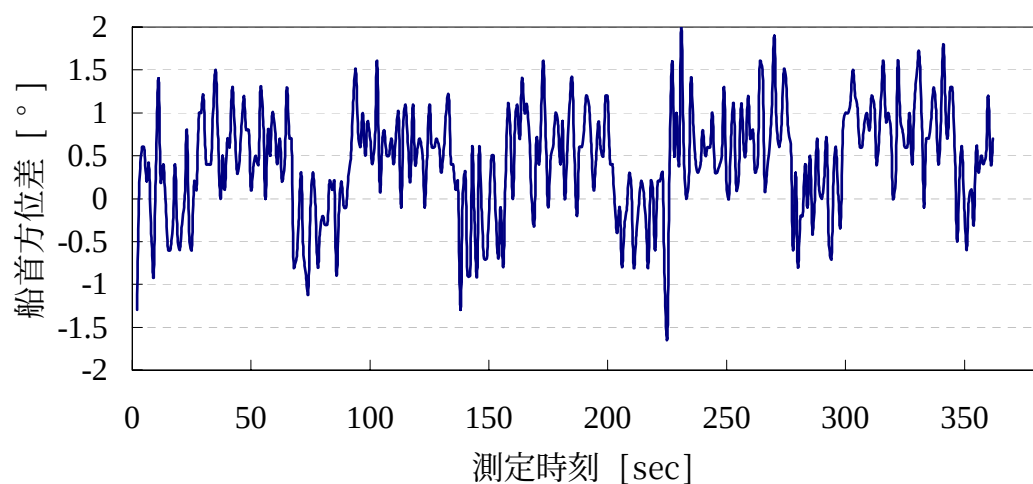


図 4.36 速力 5, 舵角 5 度の蛇行時のジャイロに対する動的精度差

4.4.2 汐路丸の測定結果

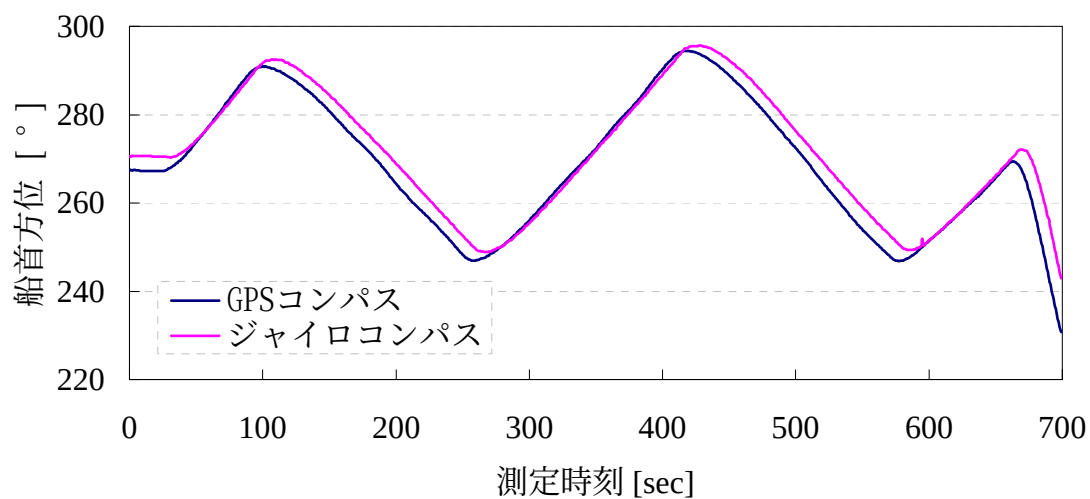


図 4.37 速力 5, 舵角 5 度の蛇行時の動的精度

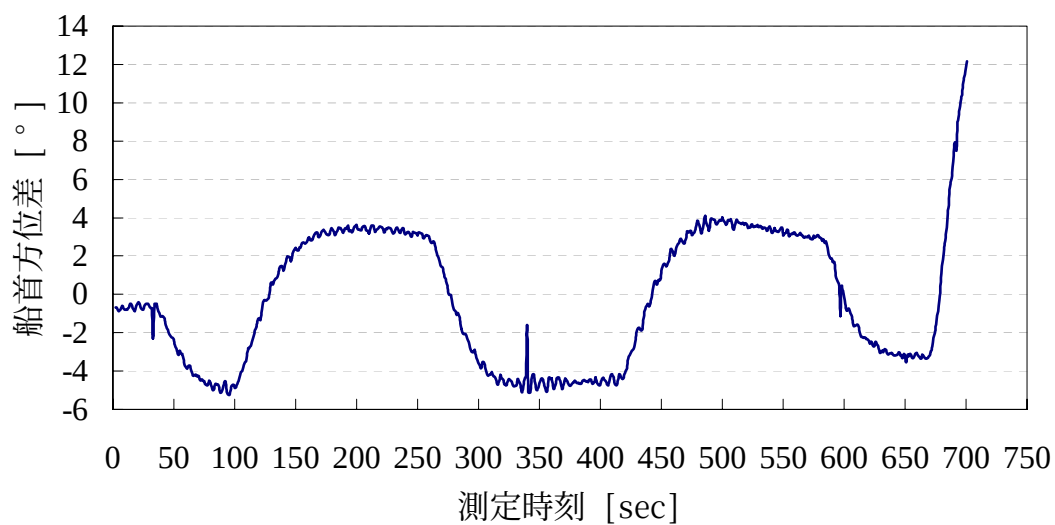


図 4.38 速力 5, 舵角 5 度の蛇行時のジャイロに対する動的精度差

4.4.3 実験の検討

・GPS コンパスとジャイロコンパスの船首方位差が大きくなる原因は、GPS コンパスを船首方向に向けて設置するときにずれないように設置しても多少ずれが生じてしまうと思われます。計測中の海域の状況により、船舶が横揺れした時などの衛星信号受信状況の変化によって差が出てくるのではないかと考えられます。GPS コンパスの方位が遅れて出力されるのは、ジャイロコンパスとの同期が取れていないために出力が遅れています。

第 5 章

結論

- ・ 静定時間の平均時間は係留中 86 秒，巡航中 117 秒となり，概ね 3 分以内で表示されることを確認した.

- ・ GPS コンパスの静定後，ジャイロコンパスとの方位差を計測したところ，平均で係留時 1.1° ，巡航時 -0.6° 程度の差があることを確認した.

- ・ 蛇行航行時の動的精度測定では方位の出力が遅れ，蛇行航行に合わせて，やよいでは方位差が $-1.5 \sim 2^{\circ}$ で，汐路丸では方位差が $-5 \sim 3^{\circ}$ の範囲で変化することを確認した.

- ・ 今後の展開としては，連続稼働時の方位差の静的，動的精度の測定，蛇行航行測定時に GPS コンパスの方位出力が遅れる原因の検討.

謝辭

本研究を行なうにあたり，日本工業大学電気電子工学科 渡辺康夫教授には，研究に対してご指導を賜りましたことを厚く御礼申し上げます．また，本研究の機会を与えて下さり，ご指導頂いた安田明生教授，久保信明助手，梅野智恵氏ならびに東京海洋大学情報通信工学研究室の皆様には実験のサポート及びアドバイスをいただき深く感謝します．

また，JRC 日本無線株式会社の関係者の方々には本研究で用いた GPS コンパス JTR-10T の提供及び，資料提供，実験のサポート，アドバイスなど多くのご指導をいただき深く感謝いたします．

参考文献

- [1] 安田 明生他 著, 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, pp.25-44, 正陽文庫, 2004 年 12 月.
- [2] 土屋 淳, 辻 宏道 著, 新・GPS 測量の基礎, pp.11-22, pp.35-39, pp.75-96, 日本測量協会, 2002 年 10 月.
- [3] 木村 小一 著, GPS 全集, pp.307- 366, 測位衛星技術株式会社, 2003 年 2 月.
- [4] 館田 良文, GPS シンポジウム 2000 “GPS 受信機の測位原理”, pp.187-190, 日本航海学会, 2000 年 11 月.
- [5] 前畑 幸弥 著, ジャイロコンパスとオートパイロット, pp.7-24, 成山堂書店, 1993 年 8 月.
- [6] 庄司 和民 著, ジャイロコンパス及オートパイロット, pp.12-30, 海文堂出版, 1980 年 6 月.
- [7] 茂在 寅男, 小林 實 著, コンパスとジャイロの理論と実際, pp.73-77, pp.84-89, 海文堂出版株式会社, 1971 年 10 月.
- [8] 多摩川精機(株) 編, ジャイロ活用技術入門 その原理・機能・応用のポイントを詳述, pp.150-155, 株式会社工業調査会, 2002 年 1 月.
- [9] 高良 裕二他, 技術レポート GPS コンパス, pp.40-43, 日本無線技報, 2005 年 3 月.
- [10] Y.Koura, H.Suzuki, K.Ogawa, Y.Kamei and M.nakamura, GPS COMPASS : A Low Cost GPS Direction Sensor of Two Antenna Type, ION GPS 2001 Session F5 Multi-Sensor Integrated Navigation System 1.