

目次

はじめに

第1章 わが国におけるGNSSへの取り組み	1
1.1 GNSSの導入	1
1.1.1 測量における「黒船」GPS	1
1.1.2 GPSの導入当初	2
1.1.3 公共測量への導入	2
1.2 GNSSに関する法令としくみ	2
1.2.1 測量と測位	2
1) 測量法	2
2) 作業規程の準則	3
3) 地理空間情報活用推進基本法	3
4) 測量も測位も国家座標に従う	4
1.2.2 世界測地系への移行をもたらしたGNSS	5
1) 世界測地系への移行	5
2) 旧来の日本測地系の問題点	5
1.2.3 世界測地系 ITRF	7
1.2.4 わが国が採用している世界測地系	8
1) 測量法で規定される世界測地系	8
2) 測地成果2011	9
1.3 準天頂衛星システム (QZSS) の構築	9
1.3.1 測量は宇宙を基本とする一測天量地から宇宙技術へ	9
1.3.2 民間による通信衛星だったQZSS構想	10
1.3.3 政府主体による衛星測位システムへ	10
1.3.4 内閣府が開発・実施主体となる	11
1.3.5 測量からみたQZSSの課題	12
1.4 GNSSにおける国際協力	12
1.4.1 測地学とGNSS	12
1) 測地学 地球科学の最古参	12
2) IAG 測地学国際協力の元締め	12
3) GGOS 全球での測地観測を推進する	13
4) IERS GNSSに必要な地球パラメータを決める	14
5) IGS GNSS精密暦を決める	14
1.4.2 ICG GNSS運営の国際組織	14
1.4.3 GGRFと国連決議	15
1.4.4 GPSに関する日米間の協力	15

1.5 GNSSの利用—陸か海か空か？	15
1.5.1 陸におけるGNSS	15
1.5.2 海におけるGNSS	16
1.5.3 空におけるGNSS	16
第1章のまとめ	16
第2章 GNSSの全体像	19
2.1 GNSS (Global Navigation Satellite System)	19
2.1.1 GNSS衛星軌道	20
1) MEO (Medium Earth Orbit)：中高度軌道	21
2) GEO (Geostationary Orbit)：静止軌道	21
3) IGSO (Inclined Geo-synchronous Orbit)：静止軌道面を傾けた軌道	21
2.1.2 GPS以前の衛星航法システム	21
2.1.3 GPS	21
1) GPS信号近代化計画	22
2) L5信号	23
2.1.4 GLONASS	23
2.1.5 Galileo	24
2.1.6 BeiDou	25
2.1.7 準天頂衛星システム (QZSS)	26
1) L1帯信号輻輳の影響	27
2) 信号認証サービス	27
2.1.8 NavIC	27
2.2 電子基準点 ユーザー側が構築した地上インフラ	28
2.2.1 電子基準点の歴史	29
1) はじまりは地殻変動監視	29
2) 公共測量での利用開始	29
3) リアルタイム解析 (REGARD)	30
2.2.2 電子基準点の機器構成	30
1) 外観	30
2) 機器と通信	30
2.2.3 電子基準点の名前と番号	30
2.2.4 電子基準点の利用	31
1) 測量成果と測量記録	31
2) 電子基準点データの利用	32
3) 電子基準点の標高	32
4) 電子基準点の利用にあたっての参考事項	33
第2章のまとめ	33

第3章 衛星測位の方法	35
3.1 GNSS衛星測位について	35
3.1.1 3つのセグメント	35
1) スペースセグメント (衛星系)	35
2) コントロールセグメント (地上制御系)	36
3) ユーザーセグメント (ユーザー受信機)	36
3.1.2 GPSの信号構造	36
1) 信号構造	36
2) 衛星の識別方式	36
3) 航法メッセージ	37
4) 信号の変調	37
3.2 測位原理	38
3.2.1 2次元測位	38
3.2.2 3次元測位 (GPSコード測位)	39
3.3 GNSS測位手法	40
3.3.1 測位手法の分類	40
3.3.2 単独測位 (コード測位)	41
3.3.3 ディファレンシャル測位 (コード測位)	41
3.3.4 SBAS (コードディファレンシャル方式)	43
3.4 搬送波位相測位	43
3.4.1 搬送波位相測位の基本	43
3.4.2 搬送波位相相対測位方式	45
3.4.3 RTK (リアルタイムキネマティック) 測位	46
3.4.4 MBL (Moving Base Line) 方式	46
3.4.5 ネットワーク型RTK方式	47
1) VRS方式	47
2) FKP方式	48
3.4.6 PPP	49
3.4.7 PPP-RTK	50
3.4.8 GNSS+IMU ハイブリッド	50
3.5 後処理測位	52
3.5.1 搬送波位相による測位	52
1) 搬送波位相測位の原理	52
2) 搬送波位相測位のモデル式	53
3.5.2 位相観測量の差	55
1) 基線解析における基本観測式	56
2) 観測量の線形結合	57
3.5.3 位相観測による基線解析	58
1) 観測方程式	58
2) 整数値アンビギュイティの決定方法	61
(1) スタティック法における整数値アンビギュイティ決定の基本的考え方	62

(2) 最適な整数値の探索方法の例	62
第3章のまとめ	64
第4章 誤差要因と対策	65
4.1 GNSS測位の誤差要因	65
4.2 衛星軌道および衛星時計に関する誤差要因	65
4.2.1 衛星軌道	65
4.2.2 衛星時計	66
1) 衛星時計誤差 (オフセット)	66
2) 時刻に係る相対論的效果	67
4.3 電波伝播経路に関する誤差要因	67
4.3.1 大気中の電波の伝播	67
1) 大気の構造と電波の伝播	67
2) 屈折率と分散性	67
3) 位相速度と群速度	68
4.3.2 電離圏による遅延	69
1) 電離圏遅延量	69
2) モデルによる遅延量補正	71
(1) Klobucharモデル	71
(2) Galileoのモデル	72
(3) IGSのモデル	73
3) 2波長観測による電離圏遅延消去	73
4.3.3 対流圏遅延	73
4.3.4 マルチパスによる影響	76
4.4 受信機及びアンテナに関する誤差要因	78
4.4.1 受信機	78
1) 受信機時計誤差	78
2) 受信機雑音	78
4.4.2 アンテナ	78
アンテナ位相中心変動	78
4.5 その他の誤差要因	79
4.5.1 衛星配置による影響	79
1) 衛星配置と位置決定誤差	79
2) DOP	80
4.5.2 局位置の潮汐変動	83
1) 地球潮汐と地球基準座標系	83
2) 海洋潮汐荷重	84
3) 極潮汐	84
4.5.3 衛星アンテナ位相中心	84
4.5.4 位相Wind-up効果	85
4.5.5 電波伝播経路長の相対論補正	86

4.6 誤差対策のまとめと留意事項	86
第4章のまとめ	87
第5章 GNSS測量の方法	89
5.1 公共測量における測量方法	89
5.1.1 一公共測量一作業規程の準則に基づく測量方法	89
1) スタティック法	89
2) RTK法	90
3) ネットワーク型RTK法	91
5.1.2 国土地理院が定める測量マニュアル	91
5.2 GNSS測量と基線解析	93
5.2.1 GNSS測量の実施方法	93
1) スタティック法	93
(1) 電子基準点のみを既知点とする場合	93
(2) 電子基準点のみを既知点とする場合以外	94
2) RTK法	95
3) ネットワーク型RTK法	96
5.2.2 GNSS観測での留意事項	98
1) 全般的事項	98
2) ネットワーク型RTK法の留意事項	100
3) 水蒸気の影響	100
5.2.3 基線解析	101
5.3 点検計算の方法	102
5.3.1 点検計算の実施方法	102
1) スタティック法	102
(1) 電子基準点のみを既知点とする場合	102
(2) 電子基準点のみを既知点とする場合以外	103
2) RTK法	104
3) ネットワーク型RTK法	104
4) 単点観測法	104
5.4 三次元網平均計算	105
5.4.1 仮定三次元網平均計算	105
5.4.2 三次元網平均計算	106
1) 電子基準点のみを既知点とする場合	106
2) 電子基準点のみを既知点とする場合以外	107
3) 三次元網平均計算結果の評価	108
5.5 関連フォーマット	111
5.5.1 RTCMフォーマット	111
5.5.2 NMEA 0183	113
5.5.3 RINEX	114
第5章のまとめ	117

第6章 時間と高さを制する—4次元化	119
6.1 測量の敵—地殻変動を知る	119
6.1.1 プレート運動が引き起こす広域の地殻変動	119
6.1.2 地震による地殻変動	122
1) 2011年東北地方太平洋沖地震	122
2) 2016年熊本地震	123
(1) 電子基準点の変位	123
(2) 衛星合成開口レーダーによる地表変位の詳細な空間分布	124
(3) 測量成果の改定	125
6.1.3 火山活動による地殻変動	125
6.1.4 局所的に発生する地盤変動	125
1) 地盤沈下	127
(1) 浅い地下水のくみ上げに伴う地盤変動	127
(2) 地下水のくみ上げに伴う地盤変動と計測上の固定点までの距離の影響	128
2) 地すべり	129
6.1.5 地殻変動や地盤変動とは関係しない見かけ上の変位	130
6.2 地殻変動補正	130
6.2.1 地殻変動補正と座標の管理	130
1) 電子基準点の利用で地殻変動補正が不可欠に	130
2) 基準点間の相対的な位置変化は成果改定で対処	132
6.2.2 元期と今期	132
6.2.3 スタティック、ダイナミック、そしてセミ・ダイナミックな測地系	132
6.2.4 成果改定とセミ・ダイナミック補正	133
6.2.5 補正パラメータによる成果改算—PatchJGD	135
6.2.6 元期の再設定 (リセット)	135
6.2.7 セミ・ダイナミック補正の実際	135
1) 国土地理院によるセミ・ダイナミック補正用パラメータの作成・公開	135
2) セミ・ダイナミック補正の適用手順	137
6.2.8 地殻変動からみた標石基準点と電子基準点の役割分担	138
6.2.9 干渉SARによる面的な地殻変動検出	138
6.3 GNSSと標高	140
6.3.1 標高は物理量	140
6.3.2 標高をGNSS測量で決定する	142
1) 標高=楕円体高—ジオイド高	142
2) ジオイド・モデルを求める	142
3) GNSS水準測量	143
4) 航空重力測量によって得られた重力ジオイド・モデル	144
6.3.3 GNSS水準測量からGNSS標高測量へ—標高体系の転換	145
1) 全国の標高成果の改定	145
2) GNSS標高測量の登場	145
3) 標高への地殻変動補正の導入	146

4) 離島でのGNSS標高測量	147
6.3.4 基準点成果表と標高区分	147
6.4 4次元国家座標 (JGD4D)	148
第6章のまとめ	149
むすび	151
索引	153