刊行のことば

工業高等専門学校（高専）や大学の土木工学科が名称を変更しはじめたのは1980年代半ばです。高専では1990年ごろ，当時の福井高専校長 丹羽義次先生を中心とした「高専の土木・建築工学教育方法改善プロジェクト」が，名称変更を含めた高専土木工学教育のあり方を精力的に検討されました。その中で「環境都市工学科」という名称が第一候補となり，多くの高専土木工学科がこの名称に変更しました。その他の学科名として，都市工学科，建設工学科，都市システム工学科，建設システム工学科などを採用した高専もあります。

名称変更に伴い，カリキュラムも大幅に改変されました。環境工学分野の充実，CADを中心としたコンピュータ教育の拡充，防災や景観あるいは計画分野の改編・導入が実施された反面，設計製図や実習の一部が削除されました。

また，ほぼ時期を同じくして専攻科が設置されてきました。高専〜専攻科という7年連続教育のなかで，日本技術者教育認定制度（JABEE）への対応も含めて，専門教育のあり方が模索されています。

土木工学教育のこのような変動に対応して教育方法や教育内容も確実に変化してきており，これらの変化に適応した新しい教科書シリーズを統一した思想のもとに編集するため，このたびの「環境・都市システム系教科書シリーズ」が誕生しました。このシリーズでは，以下の編集方針のもと，新しい土木系工学教育に適合した教科書をつくることに主眼を置いています。

（1） 図表や例題を多く使い基礎的事項を中心に解説するとともに，それらの応用分野も含めてわかりやすく記述する。すなわち，ごく初歩的事項から始め，高度な専門技術を体系的に理解させる。

（2） シリーズを通じて内容の重複を避け，効率的な編集を行う。

（3） 高専の第一線の教育現場で活躍されている中堅の教官を執筆者とす

る。

本シリーズは，高専学生はもとより多様な学生が在籍する大学・短大・専門学校にも有用と確信しており，土木系の専門教育を志す方々に広く活用していただければ幸いです。

最後に執筆を快く引き受けていただきました執筆者各位と本シリーズの企画・編集・出版に献身的なお世話をいただいた編集委員各位ならびにコロナ社に衷心よりお礼申し上げます。

2001年1月

編集委員長　澤　　孝　平

改訂版にあたって

本書『改訂 測量学II』は，環境・都市システム系教科書シリーズ『改訂 測量学Ⅰ』で測量学の基本を学んだ読者が，実務で行われている測量の技術を学ぶことを目的に執筆したものである。

1 章で扱った三角測量，***2*** 章で扱った多角測量，***3*** 章で扱った路線測量では，読者の理解を助けるため，多くの数値計算例，例題，演習問題を取り上げた。***4*** 章では，海岸，河川などの調査および河川の維持管理などに用いられる河川測量を扱った。***5*** 章で扱った地形測量，***6*** 章で扱った写真測量，***7*** 章で扱ったGNSS測量は，測量士補の試験でよく出題されるところでもあり，***7*** 章では最近の測量士補の試験問題を演習問題で取り上げた。***8*** 章で扱ったリモートセンシングは，今後，環境・都市システム系，土木系，建設・建築系での利用がいっそう期待される分野であり，実例を示して概要を解説した。

改訂にあたり，以下の章の内容に追加修正・削除を行った。

2 章の多角測量では，地上測量が旧来の三角測量方式から距離測定と角観測による多角測量方式に変わってきたことや，コンピュータの普及により観測方程式による平均法が主流となってきたことから，この平均法を詳しく説明し，計算例も多く取り上げた。

7 章のGNSS測量では，公共測量作業規程準則の改定により，GPSの項目がGPSおよびGLONASSなどの他の衛星も含めた総称として使われているGNSSに変更され，公共測量において，GPS衛星だけでなくGLONASS衛星も併わせた作業が可能になったことから，GPSをGNSSと改めた。

なお，誤差論は『改訂 測量学Ⅰ』で述べることとし，本書から削除した。

本書は『改訂 測量学Ⅰ』と同様，高専および大学の授業で扱われる内容に絞り，それらについてできるだけ平易に解説を行うという方針のもとに，***1***，

3，***4*** 章を岡林が，***2*** 章を田中が，***5***，***6***，***7*** 章を堤が，***8*** 章を山田が執筆した。したがって，本書においても多くの重要な事項を紙面の都合上，割愛せざるを得なかった。さらに進んだ理解を望む読者には本書で一通りの基礎を身につけ，内容の豊富なほかの書物を参考にしていただきたい。本書が読者の方々に測量学を理解するうえでお役に立つことができるならば幸いとするところである。

最後に，本書を執筆するにあたって測量学に関して示唆に富む助言をいただいた澤 孝平 明石高専名誉教授，星　仰 茨城大学名誉教授，平嶋健一 山梨大学名誉教授，徳山高専 上 俊二 教授，鹿児島測量専門学校 南 正義 教授，鹿児島高専 山内正仁 教授，同高専 山田真義 准教授，高知工科大学 新井 広 准教授，福島高専 田村綾子 助教，大分工業高等学校 佐藤啓治 指導教諭，貴重な資料を使用させていただいた国土地理院，日本測量協会，測量器械に関する資料を提供していただいた 株式会社 大進 小林清文 次長，出版に関して多大な尽力をいただいたコロナ社の各位に感謝申し上げます。

2014 年 2 月

著　　者

目　　次

1.　三　角　測　量

1.1　三角点の配置と配列 …… 1
1.2　三角点の選点と造標 …… 2
1.3　角の偏心補正 …… 3
1.3.1　三角点に測量器械が据え付けられない場合の偏心補正 …… 4
1.3.2　三角点を視準できない場合の偏心補正 …… 5
1.4　四辺形の調整 …… 7
1.4.1　四辺形の角条件に対する調整 …… 7
1.4.2　四辺形の辺条件に対する調整 …… 10
演　習　問　題 …… 13

2.　多　角　測　量

2.1　多角測量方式の種類 …… 15
2.1.1　単路線方式 …… 16
2.1.2　結合多角方式 …… 16
2.1.3　閉合多角方式 …… 16
2.2　作　業　順　序 …… 16
2.2.1　計画・準備 …… 16
2.2.2　踏査・選点 …… 17
2.2.3　測量標の設置 …… 17
2.2.4　観　　測 …… 17
2.2.5　平　均　計　算 …… 17
2.2.6　成果品の整理 …… 18
2.3　観測方程式 …… 19
2.4　多角網厳密平均の計算式 …… 22

2.4.1　水平角の観測方程式 …… 23
2.4.2　距離の観測方程式 …… 25
2.4.3　水平角と距離の平均計算 …… 27
演　習　問　題 …… 31

3.　路　線　測　量

3.1　路線の線形 …… 34
3.2　線形の構成要素 …… 35
3.3　単　心　曲　線 …… 37
3.3.1　名称・記号 …… 37
3.3.2　単心曲線の基礎式 …… 38
3.3.3　曲線半径に関する基準 …… 39
3.3.4　単心曲線の設置法 …… 39
3.4　クロソイド曲線 …… 50
3.4.1　クロソイドの要素と性質 …… 50
3.4.2　クロソイド曲線の設置 …… 51
3.5　縦　断　曲　線 …… 60
3.5.1　縦断曲線に関する各種の基準 …… 60
3.5.2　縦断曲線の設置 …… 61
演　習　問　題 …… 65

4.　河　川　測　量

4.1　平　面　測　量 …… 68
4.1.1　距離標設置測量 …… 68
4.1.2　細　部　測　量 …… 69
4.2　高　低　測　量 …… 70
4.2.1　水準基標測量 …… 70
4.2.2　定期縦断測量 …… 71
4.2.3　定期横断測量 …… 73
4.2.4　深　浅　測　量 …… 74
4.2.5　河川の水位 …… 76
4.3　流　量　測　定 …… 78

4.3.1 流速と流量 …… 78
4.3.2 流速計測法 …… 79
4.3.3 浮き測法 …… 84
4.3.4 堰測法 …… 87
演習問題 …… 90

5. 地形測量

5.1 縮尺 …… 92
5.2 大縮尺の地形測量の手順 …… 93
5.2.1 計画 …… 93
5.2.2 踏査・選点 …… 93
5.2.3 骨組測量 …… 94
5.2.4 細部測量 …… 94
5.2.5 地形・地物の表示 …… 97
5.2.6 整飾 …… 102
5.3 小・中縮尺の地形図 …… 105
5.3.1 小・中縮尺の地形測量の方法 …… 105
5.3.2 地図の投影 …… 107
5.3.3 座標系 …… 109
5.4 地理情報システム（GIS） …… 112
5.4.1 地理情報システムの概要 …… 112
5.4.2 地理情報システムの機能 …… 112
5.4.3 地理情報システムのデータ …… 113
5.5 トータルステーションによる地形測量 …… 114
5.5.1 トータルステーション …… 114
5.5.2 トータルステーションによる細部測量 …… 114
演習問題 …… 115

6. 写真測量

6.1 写真測量の手順 …… 119
6.2 写真画面のひずみ …… 124
6.3 実体視 …… 128

6.3.1 写真測量における実体視 …… 128
6.3.2 実体視の原理 …… 128
6.3.3 実体視の方法 …… 129
6.3.4 視差による高低測量 …… 131
6.3.5 視差差による高低測量 …… 133
6.3.6 視差差の測定 …… 135
演習問題 …… 137

7. GNSS 測量

7.1 GNSS の構成 …… 138
7.1.1 GNSS 衛星 …… 138
7.1.2 コントロール局 …… 139
7.1.3 受信・解析装置 …… 140
7.2 GNSS による測位方法 …… 140
7.2.1 単独測位 …… 141
7.2.2 相対測位 …… 142
7.3 GNSS 測量で得られる地盤高 …… 146
7.4 誤差を与える要因 …… 146
7.5 基準点測量における GNSS 測量 …… 147
7.5.1 測位方法の適用 …… 147
7.5.2 新点の選定要件 …… 148
7.5.3 観測作業における注意事項 …… 148
7.6 地形測量における GNSS 測量 …… 149
7.6.1 測量の方法 …… 149
7.6.2 TS 点の設置方法 …… 150
7.6.3 細部測量の方法 …… 150
演習問題 …… 151

8. リモートセンシング

8.1 リモートセンシングとは …… 153
8.1.1 リモートセンシングの定義と特徴 …… 153
8.1.2 リモートセンシングの歴史 …… 154

8.2　観測方式とリモートセンサ …… 155
8.2.1　リモートセンシングの観測方式 …… 155
8.2.2　プラットフォームの種類と用途 …… 156
8.3　電磁波の特性とリモートセンシングの関係 …… 157
8.3.1　電磁波の種類とリモートセンサの対応 …… 157
8.3.2　分光反射特性 …… 159
8.3.3　電磁波の放射特性 …… 160
8.4　衛星画像のデータ形式 …… 161
8.4.1　CEOS　形　式 …… 161
8.4.2　TIFF　形　式 …… 162
8.4.3　GeoTIFF 形式 …… 162
8.4.4　エンディアン形式 …… 162
8.5　衛星画像の特徴 …… 162
8.5.1　可視・近赤外センサ画像 …… 162
8.5.2　SAR　画　像 …… 165
8.6　リモートセンシングの応用 …… 165
8.6.1　植生域への応用 …… 166
8.6.2　水域への応用 …… 166
8.6.3　地質学への応用 …… 167
8.6.4　標高計測への応用 …… 167
8.6.5　地上距離計測への応用 …… 168
演　習　問　題 …… 170

引用・参考文献 …… 171
演習問題解答 …… 175
索　　引 …… 191

改訂 測量学Ⅰ・主要目次

1. 測量学概説	5. 平板測量
2. 距離測量	6. トラバース測量
3. 水準測量	7. 誤差論
4. 角測量	8. 面積と体積の計算方法

1

三　角　測　量

測量区域が広範囲に及ぶ基準点の設置は，トラバース測量では所定の精度を確保できない。こういった場合の基準点の設置に**三角測量**（triangulation）は用いられる。三角測量は，測量区域を覆うように**三角点**（triangulation point）を配置後それぞれの三角点を結んだ三角形の集合体である**三角網**（triangulation net）を組み，各三角形の内角と**基線**（base line）の組合せ計算によりすべての三角点の座標を定める測量である。

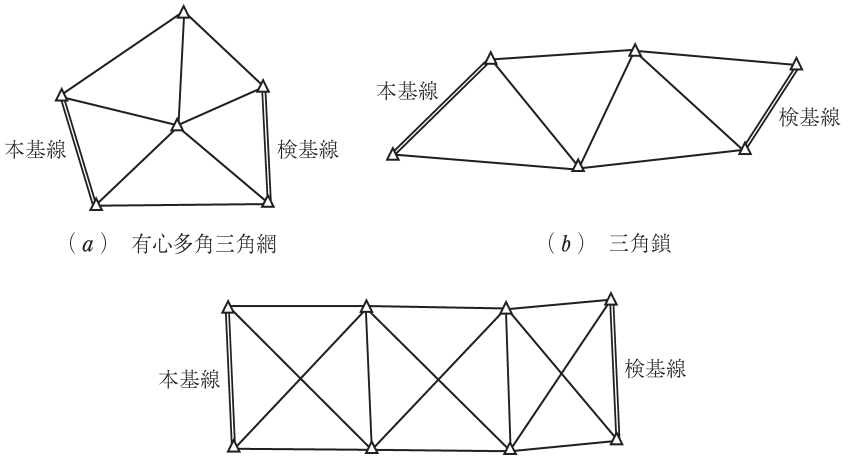
1.1　三角点の配置と配列

三角点の配置は，それぞれの目的に応じた精度を選び，効率良く測量作業を行うことが大切である。国土交通省国土地理院の行う**基本測量**（fundamental survey）の三角点設置は，配点密度 1/1 600（1 点/km^2）の一等三角本点を基準に，その間に配点密度 1/800（1 点/km^2）の一等三角補点，ついで二等三角点，三等三角点，四等三角点の順に配点密度を変えて実施されている。また，三角点の総数は，現在全国に約 10 万点設置されている。**表 *1.1*** にわが国の三角点配置の概要を示す。

三角点の配列は，測量する地域の形状，面積や三角点の配置密度により変わるが，測量区域を覆うように三角点を配置したものの総称を三角網という。**図 *1.1***（*a*）のように三角形を連結した三角網を有心多角三角網と呼び，**地形測量**（topographic survey）に適している。また，図（*b*）のような三角網を三角鎖，図（*c*）を四辺形鎖と呼び，2 点間距離がかなり離れた路線測量，トンネル測量，河川測量などに適している。図に示すように，三角網には実測辺

表 1.1　三角点配置の概要

区分＼等級	一等三角点		二等三角点	三等三角点	四等三角点
	本　点	補　点			
平均辺長〔km〕	45	25	8	4	1.5
配点密度〔1 点/km²〕	1/1 600	1/800	1/8		1/2
三角形閉合差の制限〔″〕	1	2	5	10	20
辺長計算単位	対数 8 位	対数 7 位	対数 7 位	対数 6 位	対数 6 位



（*a*）　有心多角三角網　　（*b*）　三角鎖

（*c*）　四辺形鎖

図 1.1　各種の三角網

である**本基線**（base line）を設ける。これによりほかの辺は計算によって求められる。また，誤差の検討をするために最終辺長を**検基線**（check base line）として実測する。

1.2　三角点の選点と造標

三角点の**選点**（selecting station）は，測量目的を達成できる精度の確保，原位置での測量作業効率や経費に直接関係するので重要である。以下に三角点

の選点の注意事項を示す。

① 三角点数は極力少なくするとともに，三角網全体の配点密度を均等にする。

② 三角形の形は，一つの内角が 30° 以上の正三角形に近い形とする。

③ 三角点相互の見通しが良好である。

④ 三角点は，空中写真から判読可能である。

⑤ 地形，地盤が安定し三角点の標識の長期保存が確実である。

⑥ 基本測量で設置されている三角点に連結できる。

⑦ 交通量が多い場所や不安定な崖縁は避ける。

三角点の選点作業が終了すると，三角点を現地に標示するために標識を設置する。この標識を**測量標**（station marker）という。**標石**（stone monument）は，三角点の測量標の中でも永久保存を目的としたもので，地中に水平に設置した盤石の上に柱石を鉛直に立てた状態で埋設し，地上部の柱石頭部の四隅に 4 個の保護石を設置する。また，地盤が岩盤である場合は，直接岩盤を平らにして十字を刻み，中央に銅鋲（びょう）を打つ。一方，恒久的使用の必要がない場合の測量標は，木杭で代用する場合もある。

測量標の設置が終われば**視準標**（target，signal）を設置する。視準標は測標ともいい，目標とする現地の測量標が直接視準できない場合に設置する。測標の種類として仮設測標と一時測標がある。仮設測標は，短期の視準に使用するものでポール先に旗を付けたものが多い。一時測標には，普通測標，高測標，簡易測標および樹上測標がある。これらの測標のうち，特に観測台付きの高測標は特別な場合を除いてあまり使用されず，一般的には普通測標を使用する。こういった一連の測量作業を**造標**（construction of target）という。

1.3 角の偏心補正

三角点における水平角の観測は，視準標（測標）の中心，測量器械（観測点）の中心および測量標（三角点）の中心の 3 中心が同一鉛直線上で一致して

いることが原則である。しかし，現地の観測条件によっては，これら3中心を必ずしも一致させられない場合が生じることもある。このように3中心が同一鉛直線上で一致しない状態を偏心しているという。こういった場合は，**偏心距離**（distance of eccentricity）と**偏心角**（eccentric angle）を計測し，3中心が同一鉛直線上で一致した条件での三角点における水平角に**偏心補正計算**（reduction to center）を行うことができる。この偏心補正の計算に必要な偏心距離と偏心角を**偏心要素**（elements of eccentric reduction）という。

1.3.1　三角点に測量器械が据え付けられない場合の偏心補正

図 *1.2* は，三角点 P_0 に測量器械を据え付けることができずに偏心距離 e だけ離れた点 P_0' に据え付け，三角点 P_2，P_1 を視準して本来の観測角 T に代わって T' を観測した状態を示している。また，距離 S_1，S_2 は，既知点から前方交会法などで測定した値を用いる。

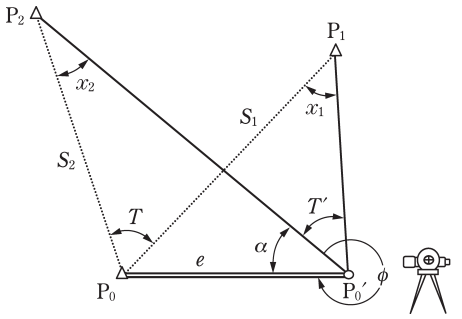


図 *1.2*　角の偏心補正（観測点の偏心）

図より本来求めようとする方向 P_0P_2 は，観測した方向 $P_0'P_2$ に角 x_2 だけ補正すればよいことがわかる。ここで，$\triangle P_0P_0'P_2$ において正弦定理を適用すると式（*1.1*）を得る。

$$\frac{e}{\sin x_2}=\frac{S_2}{\sin \alpha}$$

$$\therefore\ \sin x_2=\frac{e \sin \alpha}{S_2} \qquad (1.1)$$

ここで，偏心距離 e は S_2 に比較して微小であり，e と S_2 によって作られる角 x_2 は微小角となるので $\sin x_2 \fallingdotseq x_2$ とみなすことができ，同時にラジアン表示を角度で表すと式（*1.2*）のようになる。

$$x_2 = \rho'' \frac{e}{S_2} \sin \alpha$$

$$= 206\,265'' \times \frac{e}{S_2} \sin \alpha \qquad (1.2)$$

ここに，$\rho'' = \dfrac{180^\circ}{\pi} \times 60 \times 60 = 206\,265''$ である。

x_1 に関しても同様に求めると式（*1.3*）を得る。

$$x_1 = 206\,265'' \times \frac{e}{S_1} \sin(\alpha + T') \qquad (1.3)$$

また，**図 *1.2*** からわかるように以下の関係式が成り立ち，式（*1.4*）の偏心補正角 T を得る。

$$x_2 + T = x_1 + T'$$

$$\therefore \quad T = T' + (x_1 - x_2) \qquad (1.4)$$

1.3.2 三角点を視準できない場合の偏心補正

図 *1.3* に示すように，$\angle P_0P_1P_2$ を観測するために三角点 P_1 に測量器械を据え付け，三角点 P_0 を視準したところ障害物があり視準できなかったので P_0 から偏心距離 e だけ偏心させ点 P_0' を設けた。このように測量標である三角点が視準できない場合の偏心補正を以下に述べる。

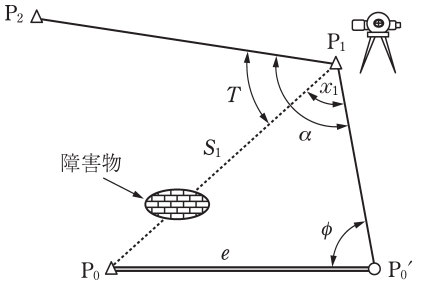


図 *1.3* 角の偏心補正
（測量標の偏心）

現地で得られた測量結果を偏心距離 e，偏心角 ϕ，観測角 α，距離 S_1 とする。

$\triangle P_0P_1P_0'$ において，正弦定理を適用すると式（*1.5*）を得る。

$$\frac{e}{\sin x_1}=\frac{S_1}{\sin\phi}$$

$$\therefore\ x_1=\rho''\frac{e}{S_1}\sin\phi=206\,265''\times\frac{e}{S_1}\sin\phi \qquad (1.5)$$

したがって，水平角 $\angle P_0P_1P_2$ は，式（*1.6*）のように求められる。

$$T=\angle P_0P_1P_2=\alpha-x_1 \qquad (1.6)$$

このように，角の偏心補正は，三角測量に限らず障害物などにより本来の視準点が視準できない場合の偏心補正に $e/S\leqq 1/41$ をほぼ限度として応用できる。

例題 *1.1*　**図 *1.2*** において，三角点 P_0 に測量器械を据え付けられないために，偏心点 P_0' に据え付け，三角点 P_1，P_2 を視準して以下の結果を得た。本来求めるべき $\angle P_1P_0P_2=T$ を求めよ。ただし，測定結果：$T'=35°12'20''$，$e=2.00\,\mathrm{m}$，$\phi=285°10'00''$，$S_1=2.5\,\mathrm{km}$，$S_2=1.6\,\mathrm{km}$ とする。

【解答】　**図 *1.2*** において角 x_2，x_1 は，式（*1.2*），（*1.3*）より以下のように求められる。

$$x_2=206\,265''\times\frac{e}{S_2}\sin(360°-\phi)$$

$$=206\,265''\times\frac{2.00}{1\,600}\times\sin(360°-285°10'00'')$$

$$=0°04'09''$$

$$x_1=206\,265''\times\frac{e}{S_1}\sin(360°-\phi+T')$$

$$=206\,265''\times\frac{2.00}{2\,500}\times\sin(360°-285°10'00''+35°12'20'')$$

$$=0°02'35''$$

したがって，偏心補正角 T は式（*1.4*）より以下のように求められる。

$$T=T'+(x_1-x_2)=35°12'20''+(0°02'35''-0°04'09'')$$

$$=35°10'46''$$ ◇

1.4 四辺形の調整

三角測量の基線を補強するために四辺形を付帯することが行われる。ここでは，**図 1.4** に示す四辺形の調整法について述べる。

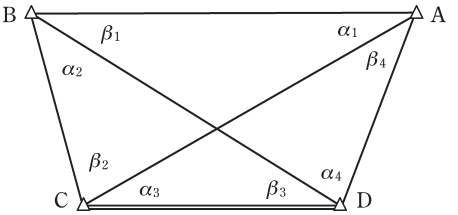


図 1.4　四辺形の調整

1.4.1 四辺形の角条件に対する調整

角条件式は，四辺形の内角の合計が 360° であることと，四辺形が作る四つの三角形の内角の和がそれぞれ 180° であることの二つの角条件を満たす必要がある。後者は，4 式を必要とするが，相対する三角形の対頂角が等しいので式（1.8），（1.9）の 2 式で十分である。

$$\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\alpha_4+\beta_1+\beta_2+\beta_3+\beta_4=360^\circ \qquad (1.7)$$

$$\alpha_1+\beta_1=\alpha_3+\beta_3 \qquad (1.8)$$

$$\alpha_2+\beta_2=\alpha_4+\beta_4 \qquad (1.9)$$

四辺形の角条件による調整は，角条件第 1 調整，角条件第 2 調整および角条件第 3 調整がある。

〔1〕 角条件第 1 調整

$$\left.\begin{aligned} v_1&=(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\alpha_4+\beta_1+\beta_2+\beta_3+\beta_4)-360^\circ \\ \varepsilon_1&=\frac{v_1}{8} \end{aligned}\right\} \qquad (1.10)$$

ここに，v_1 は角誤差，ε_1 は角調整量である。

式（1.10）において，$v_1>0$ の場合は α_1，α_2，α_3，α_4，β_1，β_2，β_3，β_4 に

$-\varepsilon_1$ を，$v_1<0$ の場合は $+\varepsilon_1$ をそれぞれ配分する。

〔*2*〕 **角条件第 2 調整**

$$\left.\begin{aligned} v_2&=(\alpha_1+\beta_1)-(\alpha_3+\beta_3)\\ \varepsilon_2&=\frac{v_2}{4}\end{aligned}\right\} \qquad (1.11)$$

ここに，v_2 は角誤差，ε_2 は角調整量である。

式（*1.11*）において，$v_2>0$ の場合は，$(\alpha_1+\beta_1)>(\alpha_3+\beta_3)$ であるので α_1，β_1 に $-\varepsilon_2$ を，α_3，β_3 に $+\varepsilon_2$ をそれぞれ配分する。また，$v_2<0$ の場合は，異符号の ε_2 をそれぞれ配分する。

〔*3*〕 **角条件第 3 調整**

$$\left.\begin{aligned} v_3&=(\alpha_2+\beta_2)-(\alpha_4+\beta_4)\\ \varepsilon_3&=\frac{v_3}{4}\end{aligned}\right\} \qquad (1.12)$$

ここに，v_3 は角誤差，ε_3 は角調整量である。

式（*1.12*）において，$v_3>0$ の場合は，$(\alpha_2+\beta_2)>(\alpha_4+\beta_4)$ であるので α_2，β_2 に $-\varepsilon_3$ を，α_4，β_4 に $+\varepsilon_3$ をそれぞれ配分する。また，$v_3<0$ の場合は，異符号の ε_3 をそれぞれ配分する。

例題 *1.2*　**図 *1.4*** において**表 *1.2*** の角観測結果を得た。四辺形の角条件の調整計算を行え。

表 *1.2*　角観測結果

角	観測角	角	観測角
α_1	40°01′49″	α_3	51°20′21″
β_1	56°18′36″	β_3	44°59′56″
α_2	30°57′48″	α_4	56°18′32″
β_2	52°41′41″	β_4	27°21′01″

【解答】

①　角条件第 1 調整

式（*1.10*）より

$$v_1=(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3+\alpha_4+\beta_1+\beta_2+\beta_3+\beta_4)-360°=-16″$$

よって，四辺形の内角の総和より 16″ 不足しているので，以下に示すように調整量 ε_1 は，符号を＋として 8 等分調整する。

$$\varepsilon_1=\frac{v_1}{8}=\frac{16''}{8}=2''$$

② 角条件第 2 調整

式（*1.11*）より

$$v_2=(\alpha_1+\beta_1)-(\alpha_3+\beta_3)=(96°20'25'')-(96°20'17'')=+8''$$

$(\alpha_1+\beta_1)$ が $(\alpha_3+\beta_3)$ に比べて 8″ 多い。したがって，この差は関係角数が 4 角で生じているので調整量 ε_2 は，以下のように 4 等分調整する。

$$\varepsilon_2=\frac{v_2}{4}=\frac{8''}{4}=2''$$

ε_2 の符号は，$(\alpha_1+\beta_1)>(\alpha_3+\beta_3)$ であるので α_1，β_1 から 2″ 減らし，α_3，β_3 には 2″ 加える。

③ 角条件第 3 調整

式（*1.12*）より

$$v_3=(\alpha_2+\beta_2)-(\alpha_4+\beta_4)=(83°39'29'')-(83°39'33'')=-4''$$

$(\alpha_2+\beta_2)$ が $(\alpha_4+\beta_4)$ に比べて 4″ 少ない。この差も関係角数 4 角で生じているので，調整量 ε_3 は以下に示すように 4 等分調整する。

$$\varepsilon_3=\frac{v_3}{4}=\frac{4''}{4}=1''$$

ε_3 の符号は，$(\alpha_2+\beta_2)<(\alpha_4+\beta_4)$ であるので α_2，β_2 にそれぞれ 1″ 加え，α_4，β_4 には 1″ 減らす。

ここで，全角条件調整を通じて，関係角数で等分調整する際に秒数で少数点以下のけた数を有する場合の角調整量は，四捨五入して 0.1″ 単位まで求める。内角の和

表 *1.3* 四辺形の角条件に対する調整結果

観測角		角調整量				角条件調整角
角	角　度	ε_1	ε_2	ε_3	計	角　度
α_1	40°01′49″	＋2″	−2″		0″	40°01′49″
β_1	56°18′36″	＋2″	−2″		0″	56°18′36″
α_2	30°57′48″	＋2″		＋1″	＋3″	30°57′51″
β_2	52°41′41″	＋2″		＋1″	＋3″	52°41′44″
α_3	51°20′21″	＋2″	＋2″		＋4″	51°20′25″
β_3	44°59′56″	＋2″	＋2″		＋4″	45°00′00″
α_4	56°18′32″	＋2″		−1″	＋1″	56°18′33″
β_4	27°21′01″	＋2″		−1″	＋1″	27°21′02″
計	359°59′44″	＋16″	0″	0″	＋16″	360°00′00″

に端数が生じた場合は，辺条件に対する調整時に割り当てる。四辺形の角条件に対する調整結果を**表 1.3** に示す。　◇

1.4.2　四辺形の辺条件に対する調整

四辺形の角条件調整角に対して辺条件の調整を行う。先に示した**図 1.4** の四辺形について正弦定理を適用して式（1.13），（1.14）を得る。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\mathrm{BC}}{\sin\alpha_1}=\frac{\mathrm{AB}}{\sin\beta_2},\quad \frac{\mathrm{DC}}{\sin\alpha_2}=\frac{\mathrm{BC}}{\sin\beta_3}\\&\frac{\mathrm{AD}}{\sin\alpha_3}=\frac{\mathrm{DC}}{\sin\beta_4},\quad \frac{\mathrm{AB}}{\sin\alpha_4}=\frac{\mathrm{AD}}{\sin\beta_1}\end{aligned}\right\}\tag{1.13}$$

$$\left.\begin{aligned}&\therefore\ \mathrm{BC}=\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_2}\cdot\mathrm{AB},\quad \mathrm{AB}=\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_1}\cdot\mathrm{AD}\\&\mathrm{AD}=\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_4}\cdot\mathrm{DC},\quad \mathrm{DC}=\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_3}\cdot\mathrm{BC}\end{aligned}\right\}\tag{1.14}$$

式（1.14）をそれぞれ代入変形したものが式（1.15），（1.16）である。

$$\therefore\ \mathrm{BC}=\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_4}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_3}\cdot\mathrm{BC}\tag{1.15}$$

$$\therefore\ \frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_3}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_4}=1\tag{1.16}$$

四辺形の角観測誤差 ω を式（1.17）のように定義する。

$$\omega=\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_3}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_4}-1\tag{1.17}$$

$$\therefore\ 1+\omega=\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_3}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_4}\tag{1.18}$$

両辺の対数をとると

$$\log(1+\omega)=\log\left(\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_3}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_4}\right)\tag{1.19}$$

式（1.19）の左辺にテイラーの近似解を適用したものが式（1.20）である。

$$\begin{aligned}\omega&\fallingdotseq\log\left(\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1}\cdot\frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2}\cdot\frac{\sin\alpha_3}{\sin\beta_3}\cdot\frac{\sin\alpha_4}{\sin\beta_4}\right)\\&=\sum_{i=1}^{4}\log\sin\alpha_i-\sum_{i=1}^{4}\log\sin\beta_i\end{aligned}\tag{1.20}$$

一方，誤差の調整量を ε としたものが式（1.21）である。

$$\frac{\sin(\alpha_1-\varepsilon)}{\sin(\beta_1+\varepsilon)}\cdot\frac{\sin(\alpha_2-\varepsilon)}{\sin(\beta_2+\varepsilon)}\cdot\frac{\sin(\alpha_3-\varepsilon)}{\sin(\beta_3+\varepsilon)}\cdot\frac{\sin(\alpha_4-\varepsilon)}{\sin(\beta_4+\varepsilon)}=1 \tag{1.21}$$

両辺の対数をとると

$$\begin{aligned}&\log\sin(\alpha_1-\varepsilon)+\log\sin(\alpha_2-\varepsilon)+\log\sin(\alpha_3-\varepsilon)+\log\sin(\alpha_4-\varepsilon)\\&\quad-\{\log\sin(\beta_1+\varepsilon)+\log\sin(\beta_2+\varepsilon)+\log\sin(\beta_3+\varepsilon)+\log\sin(\beta_4+\varepsilon)\}\\&\quad=0\end{aligned} \tag{1.22}$$

$$\therefore\ \sum_{i=1}^{4}\log\sin(\alpha_i-\varepsilon)-\sum_{i=1}^{4}\log\sin(\beta_i+\varepsilon)=0 \tag{1.23}$$

ここで，a_i 項について加法定理を適用し，かつ ε が微小量であることからテイラーの近似解を用いると

$$\begin{aligned}\log\sin(\alpha_i-\varepsilon)&=\log(\sin\alpha_i\cos\varepsilon-\cos\alpha_i\sin\varepsilon)\\&\fallingdotseq\log(\sin\alpha_i-\varepsilon\cos\alpha_i)\\&\fallingdotseq\log\sin\alpha_i-\varepsilon\cot\alpha_i\end{aligned} \tag{1.24}$$

β_i 項についても同様にして式（1.25）を得る。

$$\log\sin(\beta_i+\varepsilon)\fallingdotseq\log\sin\beta_i+\varepsilon\cot\beta_i \tag{1.25}$$

これらの関係を用いて式（1.23）を整理すると

$$\sum_{i=1}^{4}(\log\sin\alpha_i-\varepsilon\cot\alpha_i)-\sum_{i=1}^{4}(\log\sin\beta_i+\varepsilon\cot\beta_i)=0 \tag{1.26}$$

$$\therefore\ \sum_{i=1}^{4}\log\sin\alpha_i-\sum_{i=1}^{4}\log\sin\beta_i=\varepsilon\sum_{i=1}^{4}(\cot\alpha_i+\cot\beta_i) \tag{1.27}$$

式（1.27）の左辺は式（1.20）に示す角観測誤差 ω であるので

$$\omega=\varepsilon\sum_{i=1}^{4}(\cot\alpha_i+\cot\beta_i) \tag{1.28}$$

$$\therefore\ \varepsilon=\frac{\omega}{\sum_{i=1}^{4}(\cot\alpha_i+\cot\beta_i)} \tag{1.29}$$

よって，四角形の辺条件調整量 ε は式（1.29）により求められる。ただし，ω はラジアン表示であるので角度に直すためには式（1.30）の ρ'' を掛ける必要がある。

索　　引

【い】

1級GNSS測量機 *140*
1点法 *80*
インターフェロメトリー *168*

【う】

浮き測法 *84*

【え】

円曲線 *35*
鉛直写真 *120*
鉛直点 *125*

【お】

横断曲線 *35*
横断線形 *34*
オーバーラップ *122*
音響測探機 *74*

【か】

外射投影法 *108*
ガウス-クリューゲル図法 *109*
河川測量 *68*
画　素 *113*
渇水位 *78*
間曲線 *99*
観　測 *17*
観測方程式法 *19*
緩和曲線 *35,36*

【き】

基準点測量 *15*
基　線 *1*
基線ベクトル *143*
キネマティック法 *143*
基本水準面 *71*
基本測量 *1*
極心法 *108*
距離画像 *170*
距離標設置測量 *68*

【く】

空中三角測量 *124*
クロソイド曲線 *36,50*
クロソイド曲線始点 *50*
クロソイド曲線終点 *50*
クロソイドの基本式 *51*
クロソイドのパラメータ *51*

【け】

計曲線 *99*
形状情報 *113*
結合多角方式 *16*
け　ば *101*
検基線 *2*

【こ】

高水位 *78*
合成開口レーダ *155*
高低骨組測量 *94*
黒　体 *160*

【さ】

サイクルスリップ *147*
最高水位 *76*
最多水位 *78*
最大渇水位 *78*
最低水位 *76*
サイドラップ *122*
細部測量 *69,94*
撮影基線長 *131*
三角測量 *1*
三角測量方式 *15*
三角点 *1*
三角網 *1*
3次放物線 *36*
3点法 *81*

【し】

四角堰 *87*
視　距 *60*
視　差 *128*
視差差 *134*
視差測定桿 *135*
刺　針 *123*
視準標 *3*
写真基線 *130*
写真測量 *119*
収束角 *129*
主曲線 *99*
縮　尺 *92*
主　点 *125*
主点基線 *130*
植生指数 *166*
自記水位計 *76*
実測図 *105*
実体視 *128*
縦断曲線 *35,60*
縦断線形 *34*
受信中断 *147*
受動式センサ *155*
条件方程式法 *19*
助曲線 *99*
深浅測量 *74*

【す】

水準基標測量 70
垂直写真 120
水平骨組測量 94
スタティック法 142
図　化 124
図化素図 124
図根点 94
図　式 102

【せ】

正規化植生指数 166
正規方程式 21
正射投影法 108
整　飾 102
堰測法 87
赤道法 108
接線オフセット法 45
線　形 34
選　点 2,17,93
絶対評定 123

【そ】

双曲線 35
相対測位 140
測量標 3
　――の設置 17
造　標 3
属性情報 113

【た】

多角測量方式 15
多角網簡易平均 15
多角網厳密平均 15
多重反射 147
単位クロソイド 51
短縮スタティック法 143
単心曲線 35
単独測位 140
単路線方式 16
楕円体高 146

【ち】

地形図 92
地形測量 1
地性線 100
地平法 108
地ぼう 97
中央縦距法 43
中心投影法 108
直角三角堰 88
地理情報システム 112

【て】

定期横断測量 73
定期縦断測量 71
低水位 78
点高法 102
点の記 71

【と】

トータルステーション 114
トゥルーカラー画像 164
投影図法 107
等角点 125
等角投影 108
等高線 95
踏　査 17,93
動的干渉測位 140

【な】

ナチュラルカラー画像 165
斜め写真 120

【に】

2級GNSS測量機 140
2点法 81
肉眼実体視 129
2次放物線 35
二重浮き 84

【ね】

ネットワーク型RTK法 146

【の】

能動式センサ 155

【は】

背向曲線 36
反向曲線 36
反射式実体鏡 129
パスポイント 124

【ひ】

標準方程式 21
標　石 3
評定基準点 119
表面浮き 84
ビッグエンディアン 162

【ふ】

フォールスカラー画像 165
複心曲線 35
普通水位標 76
分光反射特性 159
分光放射率 161
プラットフォーム 156
プランクの法則 160

【へ】

平均計算 17
平均高水位 77
平均最高水位 77
平均最低水位 77
平均水位 77
平均低水位 77
平均流速 78
閉合多角方式 16
平射投影法 108
平水位 78
平面曲線 35
平面線形 34
偏角弦長法 40
編集図 105
偏心角 4
偏心距離 4

偏心補正計算 4
偏心要素 4
ベクタデータ 113
【ほ】
方向角 111
放射率 161
豊水位 78
放物線 35
補助曲線 99
本基線 2
棒浮き 84
ポイント 113
ポラメトリックSAR 165
ポリゴン 113
【ま】
真北方向角 111
マルチパス 147
【ゆ】
ユニバーサル横メルカトル図法 111
【よ】
横メルカトル図法 109
【ら】
ライン 113
ラスタデータ 113
【り】
リトルエンディアン 162
リモートセンシング 153
流　速 78
流速計 79
流速測線 86
流速分布曲線 79
流　量 78
流量計算 81,86
【れ】
レイヤ 112
レーダ 155
レッド 75
レンズ式実体鏡 129
【ろ】
路線測量 34
ロッド 75

【C】
CEOS 161
CEOS-BIL 161
CEOS-BSQ 161
【D】
DGPS 140
DGPS法 142
【F】
FKP方式 149
【G】
GIS 112
GNSS測量 15,138
GPS 138
GeoTIFF 162
【N】
NDVI 166
【P】
PDOP 146
【R】
RTK法 144
【S】
SAR 155
【T】
TIFF 162
【U】
UTM図法 111
【V】
VRS方式 149

―― 著 者 略 歴 ――

岡林　巧（おかばやし　たくみ）
1974 年　九州工業大学大学院工学研究科修士課程修了
　　（開発土木工学専攻）
1974 年　鹿児島工業高等専門学校助手
1978 年　鹿児島工業高等専門学校講師
1982 年　鹿児島工業高等専門学校助教授
1999 年　博士（工学）（山口大学）
1999 年　鹿児島工業高等専門学校教授
2003 年　測量士登録
2013 年　鹿児島工業高等専門学校名誉教授
2013 年　第一工業大学教授
　　現在に至る

堤　　隆（つつみ　たかし）
1988 年　熊本大学大学院工学研究科修士課程修了
　　（土木工学専攻）
1988 年　福岡県立浮羽工業高等学校教諭
1992 年　福島工業高等専門学校助手
2001 年　博士（工学）（長岡技術科学大学）
2001 年　測量士登録
2002 年　福島工業高等専門学校助教授
2002 年　鹿児島工業高等専門学校助教授
2007 年　鹿児島工業高等専門学校准教授
2012 年　鹿児島工業高等専門学校教授
2013 年　鹿児島工業高等専門学校校長補佐（寮務主事）併任
　　現在に至る

山田　貴浩（やまだ　たかひろ）
1998 年　茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程修了
　　（情報工学専攻）
1998 年　福島工業高等専門学校助手
2003 年　茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程修了
　　（情報・システム科学専攻）
　　博士（工学）
2006 年　福島工業高等専門学校助教授
2007 年　福島工業高等専門学校准教授
　　現在に至る

田中　龍児（たなか　りょうじ）
1978 年　鹿児島大学工学部化学工学科卒業
1979 年　鹿児島測量専門学校測量科卒業
1979 年　鹿児島測量専門学校助手
1979 年　測量士登録
1984 年　国土地理院部外研究員
1994 年　鹿児島測量専門学校教授
2008 年　鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程修了
　　（システム情報工学専攻）
　　博士（工学）
2009 年　財団法人 測量専門教育センター評議員
2012 年　第一工業大学准教授
　　現在に至る

改訂 測量学 II
Surveying II, Second Edition
© Okabayashi, Tsutsumi, Yamada, Tanaka 2006, 2014

2006年12月 8日 初 版第1刷発行
2013年 3月 5日 初 版第5刷発行
2014年 4月30日 改訂版第1刷発行

検印省略

著 者 岡林 巧
堤 隆
山田貴浩
田中龍児
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-05525-2 (安達) (製本：愛千製本所)
Printed in Japan

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めておりません。
落丁・乱丁本はお取替えいたします