

现代称重技术 最新質量計測技術

ADVANCED WEIGHING TECHNOLOGY

[日] 亀岡紘一

Koichi Kameoka

[中] 施昌彦

Changyan Shi

中国计量出版社

China Metrology Publishing House

最新質量計測技術

图书在版编目 (CIP) 数据

现代称重技术: 汉英日对照/(日) 龟冈紘一, 施昌彦著. —北京: 中国计量出版社, 2000. 10
ISBN 7-5026-1382-X

I. 现… II. ①龟… ②施… III. 秤-基本知识 IV. TH715.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 71084 号

中国计量出版社出版
China Metrology Publishing House

北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 (Post Code) 100013
电话 (Tel) 010-64275360

北京市迪鑫印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 17.25 字数 371 千字
2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 58.00 元

序 文

ここ数十年において、質量計測技術の重要な進展が、ロードセルとマイクロプロセッサの採用によりもたらされた。その採用により、はかりの静的・動的性能は飛躍的に向上した。はかりの技術者は、その経験を通して、以前にも増して、はかりの性能改善においてその動特性（ダイナミックス）の重要性に気付いた。本書は、はかりのダイナミックスの理論的側面を重視した質量計測技術に関するものである。筆者らは、それぞれの研究機関において 35 年以上をその技術に携わり、上述の技術革新の時代を経験してきた。その経験を通して得た知識の中で、本質的に重要と思われるものを、21 世紀において質量計測技術に携わる読者に提供したいと思う。

以下は、各章の要約である。

第 1 章では、質量測定の基本概念について述べる。はかりの機能と構造について考察し、ここからはかりの基本構造と質量測定の基本原理とを導き出している。また、機械式はかりと電気・電子式はかりの相違も明確に述べている。さらに、産業用はかりについても考察している。

第 2 章は、静特性に関する必要最小限の基礎的知識の説明に当てている。すなわち、単一てこ、連結てこ、またロバーバル型はかりや台はかりなどの典型的な機械式はかり、および 2 重ビーム形ロードセル式はかりについて述べている。

第 3 章は、本書の中心をなす部分であって、クーロン減衰のある質量－ばね－ダンパ系を動的モデルと見なして、はかりのダイナミックスを論じている。理解を明瞭にするために、ホッパースケール、コンベヤスケール、計量フィーダなどを例として示した。なお、本章は、ある程度のラプラス変換に関する予備知識を前提として記述している。

第 4 章は、デジタル信号処理、デジタルシステムおよびデジタルフィルタの初等的知識を与えるための章である。

第 5 章は、その大部分を、亀岡によって得られた研究成果を章の構成材料としている。そこには、ダイナミックスあるいは数理の観点から見て面白い現象が含まれており、読者の興味を引くことと思う。

付録の A1 と A2 には、ラプラス変換・逆変換の対応表を掲載している。

謝 辞

ダイナミックスを詳述した質量計測技術の本を、日・中・英の3ヶ国語で出版するアイデアを出されたのは、中国計量出版社の前社長・王東宝氏である。この提案およびその後の同氏のご配慮なしに、このようなユニークな本の出版は実現できなかったであろう。筆者らは、王東宝氏に最大の謝意を表します。

筆者らは、相当の時間をかけて、まず英文原稿を作成した。その後、亀岡が日本語訳を行い、中国語訳を中国計量科学研究院の蔡常青女士にお願いした。質量計測が専門の彼女のお陰で、正確かつ平易な中国語に翻訳することができた。また、日本文と英文のワープロと図面作成の作業のすべては、中谷誠氏（姫路工業大学・博士課程在学中）にお願いした。蔡女士と中谷氏の助力に感謝の意を表します。

本書は、日・中・英の3ヶ国における大学・研究機関・企業などで著者らが行った約20回の講義内容を整理し、まとめたものである。講義における質疑応答は、本文記述の上で活かされている。これに関連して、7回の講義機会を与えられた（株）イシダに厚くお礼申し上げます。

筆者らの最初の出会いは、日中質量力計測会議（ISMFM'92）である。この出会いの機縁となった会議の開催功労者である中国計量科学研究院の前副院長・王立吉教授ならびに大阪工業大学名誉教授・前田親良先生に厚くお礼申し上げます。また亀岡は、大阪府立大学名誉教授・小野敏郎先生からの絶えざるご指導とご鞭撻に対して、深甚なる謝意を表します。

最後に、新世紀の始まりに間に合わせて本書出版を遂行された中国計量出版社社長・馬純良氏、副編集長・何偉仁氏ならびに編集担当・王紅女士に深謝します。

2000年11月

亀岡紘一（姫路工業大学，日本）
施 昌彦（計量科学研究院，中国）

目 次

第1章 はかりの機能と構造

1.1 基本構造と測定原理	(Ⅲ-1)
1.2 電気・電子式はかりのシステム構成	(Ⅲ-2)
1.3 産業用はかりの機能とシステム構成	(Ⅲ-3)
1.3.1 機能的特徴と分類	(Ⅲ-3)
1.3.2 制御目的	(Ⅲ-3)
1.3.3 制御システム構成	(Ⅲ-4)

第2章 はかりの静特性

2.1 てこの静力学	(Ⅲ-7)
2.1.1 てこの分類	(Ⅲ-7)
2.1.2 単一てこ	(Ⅲ-8)
2.1.3 連結てこ	(Ⅲ-10)
2.2 ロバーバル型はかり	(Ⅲ-12)
2.3 台はかり	(Ⅲ-14)
2.4 2重ビーム形ロードセル式はかり	(Ⅲ-15)

第3章 はかりの動特性

3.1 動的モデル	(Ⅲ-19)
3.2 自由応答	(Ⅲ-19)
3.2.1 減衰がない場合	(Ⅲ-19)
3.2.2 粘性減衰がある場合	(Ⅲ-21)
3.2.3 クーロン減衰がある場合	(Ⅲ-22)
3.2.4 天秤の静止位置測定	(Ⅲ-24)
3.3 強制応答	(Ⅲ-25)
3.3.1 ステップ応答	(Ⅲ-25)
3.3.2 はかりの整定時間	(Ⅲ-26)
3.3.3 ランプ応答	(Ⅲ-28)

3.3.4	ホッパースケールの応答	(Ⅲ-29)
3.3.5	周波数応答	(Ⅲ-32)
3.3.6	基礎振動に対するてこ式はかりの応答	(Ⅲ-35)
3.3.7	伝達関数法による応答計算	(Ⅲ-38)
3.3.8	コンベヤスケールの応答	(Ⅲ-39)
3.3.9	制御系の応答	(Ⅲ-43)
3.3.10	計量フィーダの応答	(Ⅲ-45)

第4章 はかりにおける信号処理

4.1	ディジタル信号とディジタルシステム	(Ⅲ-49)
4.1.1	信号の表現	(Ⅲ-49)
4.1.2	ブロック線図表現と伝達関数	(Ⅲ-51)
4.2	ディジタルフィルタ	(Ⅲ-52)
4.2.1	FIR フィルタ	(Ⅲ-52)
4.2.2	IIR フィルタ	(Ⅲ-53)
4.2.3	周波数応答	(Ⅲ-54)
4.3	ディジタルフィルタの設計	(Ⅲ-54)
4.3.1	インパルス不変法	(Ⅲ-55)
4.3.2	双1次 z 変換法	(Ⅲ-56)
4.4	計量信号のディジタルフィルタ処理	(Ⅲ-56)
4.4.1	模擬的計量信号	(Ⅲ-56)
4.4.2	ローパスフィルタ処理	(Ⅲ-57)
4.4.3	ノッチフィルタ処理	(Ⅲ-58)

第5章 はかりの数理解析

5.1	連結てこ式はかりの及ぼす基礎振動の影響	(Ⅲ-61)
5.1.1	運動方程式	(Ⅲ-61)
5.1.2	計量さおの防振条件	(Ⅲ-62)
5.1.3	J -balance の力学的意味	(Ⅲ-64)
5.1.4	防振条件の実験的検証	(Ⅲ-65)
5.2	2重ビーム形ロードセル式はかりの振動特性	(Ⅲ-66)
5.2.1	固有モード	(Ⅲ-66)
5.2.2	周波数応答	(Ⅲ-68)
5.3	2重ビーム形ロードセル式はかりにおける基礎振動補償法	(Ⅲ-71)
5.3.1	基本概念	(Ⅲ-71)
5.3.2	運動方程式	(Ⅲ-72)
5.3.3	システムのブロック線図表現	(Ⅲ-74)
5.3.4	理論の実用性テスト	(Ⅲ-75)

5.4 組合せはかりにおける確率・統計的現象	(Ⅲ-78)
5.4.1 組合せはかりのモデル	(Ⅲ-78)
5.4.2 組合せの記述	(Ⅲ-79)
5.4.3 組合せ過程の記述	(Ⅲ-80)
5.4.4 シミュレーション結果と考察	(Ⅲ-81)
付録	
A.1 ラプラス変換表	(Ⅲ-84)
A.2 ラプラス変換の性質	(Ⅲ-85)
参考文献	(Ⅲ-86)

第1章 はかりの機能と構造

1.1 基本構造と測定原理

2 種類の代表的な機械式はかりを図 1.1 に示す。これらに共通する基本構造と測定原理についてを考えてみよう。

図 1.1 (a) の天秤（天びん）では、品物皿に載せた品物の自重と分銅皿に載せた分銅の自重を、計量さおの支点まわりのモーメントに変換して比較する。すなわち、品物の自重と分銅の自重（反力）を、計量さおを用いて比較する。同図 (b) のばね式はかりでは、コイルばねの復元力が反力となる。

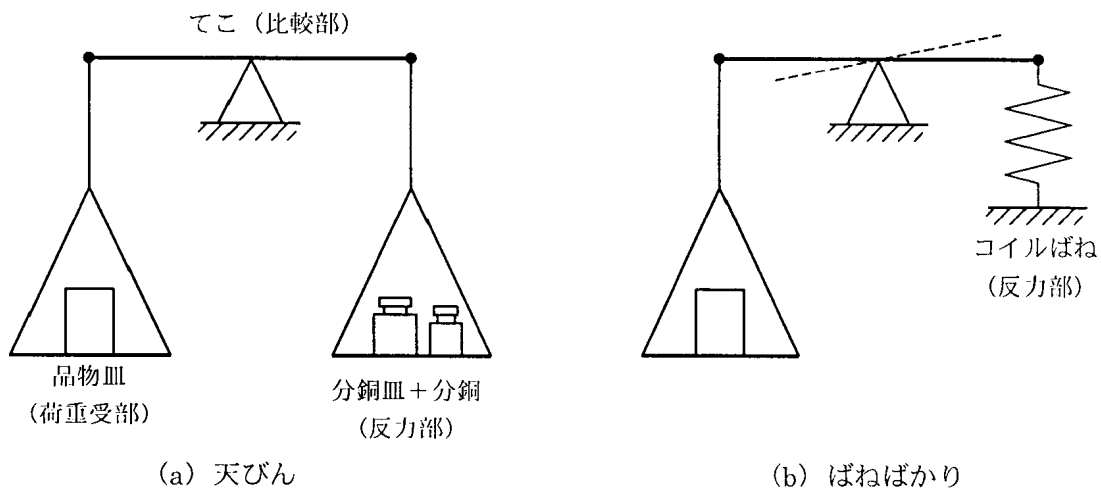


図 1.1 機械式はかり

上の考察から明らかなように、天秤とばね式はかりは、3 つの機能部分に分解できる。すなわち、荷重受部、比較部および反力部である。荷重受部とは、たとえば荷重皿のように被計量物を載せ、それによって生じた力を比較部に作用させる働きを担う部分である。反力部とは、たとえば分銅皿と分銅あるいはコイルばねのように、被計量物の質量に起因する力の向きと反対の力を発生して比較部に作用する働きを担う部分である。比較部は上記の 2 つの力が作用する部分である。

上の 2 種類のはかりに限らず一般に、はかり本体は上記の 3 つの機能部分から構成されてい

る。これがはかりの**基本構造**である。また、被計量物質に起因する力とそれに対する反力の比較が測定に利用されることから、**力の平衡の利用こそ、はかりの測定原理**といえよう。現在のはかりでは、測定に利用する力の平衡は静的平衡だけでなく、動的平衡にまで拡張されている。

一般に、てこによる荷重伝達機構は比較部に含めて考えればよい。また、計量ホoppaを直接ロードセルで支持する構造のはかりでは、比較部が省かれて荷重受部と反力部が直結された構造とみなせばよい。

天秤では、反力部に載せた分銅の質量値に基づいて測定値を得る。ばね式はかりでは、反力部のばねの伸び量に基づいて測定値を得る。このように、機械式はかりの測定値は、反力部に生じた力学量の変化を利用して得られる。

1.2 電気・電子式はかりのシステム構成

機械式はかりとは一般に、前節で述べた力の比較機能に測定値表示機能を加えて、そのすべてを機械的に実現したはかりである。**電気・電子式はかり**とは、反力部における反力発生に起因して生じた何らかの量の変化を電気信号に変換し、その信号を処理することによって測定値を得るはかりである。したがって、電気・電子式はかりは、信号の変換と処理により特徴づけられる。

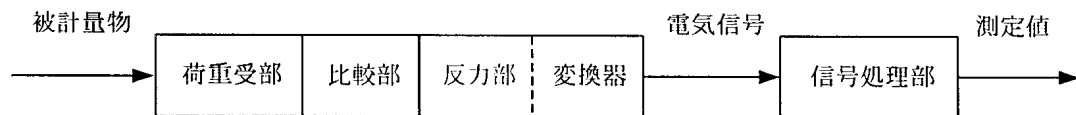


図 1.2 電気・電子式はかりの基本構成

電気・電子式はかりの基本システム構成を図 1.2 に示す。**変換器**により電気信号に変換された信号は**信号処理部**へ入力される。信号処理部は前処理回路、演算回路、出力回路で構成される。前処理回路は信号にフィルタリング、増幅、A/D 変換などをほどこして、演算回路での処理に適した信号を得るための回路である。演算回路は測定値算出に必要な信号処理を行う回路である。出力回路は演算結果を出力する回路である。

図 1.3 は、反力を負担するか否かによって変換器を分類したもので、図中には、その代表的な変換器の名称も記入している。

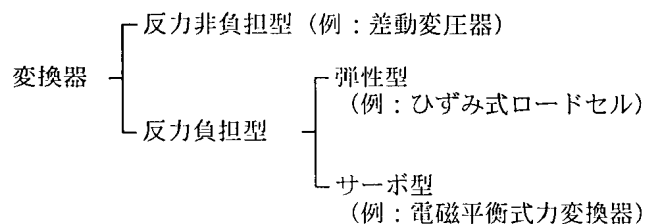


図 1.3 変換器の分類

1.3 産業用はかりの機能とシステム構成

1.3.1 機能的特徴と分類

産業用はかりは一般に、次の 2 つの機能的特徴を備えている。

- (1) 荷重受部への被計量物の搬入と搬出（あるいは投入と排出）が自動的である。
- (2) 被計量物の重量情報 W を利用してその質量 M を決定する過程が自動的である。

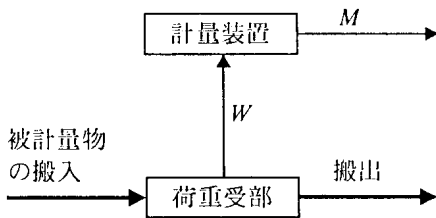


図 1.4 産業用はかりの構成

表 1.1 産業用はかりとその機能

はかりの名称	機 能
コンベヤスケール	質量測定
ホッパースケール	
ホッパースケール	質量制御
充填用はかり	
計量フィーダ	
重量選別機	
組合せはかり	

そのシステム構成は図 1.4 で表すことができる。

大部分の産業用はかりでは、上記 (1)、(2) に加えて、次の機能的特徴も備えている。

- (3) 質量の制御を行う。

つまり、質量の測定機能に加えて制御機能も備えている。表 1.1 に代表的な産業用はかりを示す。

1.3.2 制御目的

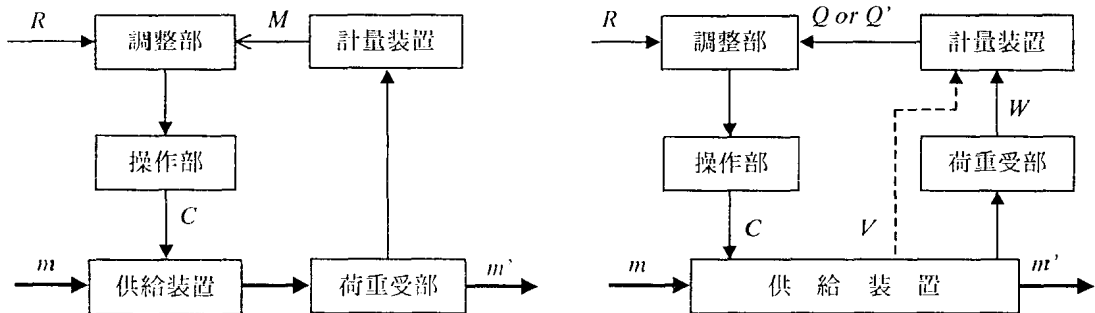
表 1.1 中の「質量制御」の内容について考察しよう。荷重受部への搬入時の被計量物の流れ状態と搬出後の被計量物流れ状態の相異に着目するならば、上記の質量制御は「質量の流れ制御 (control of mass flow)」を目的とするものといえよう。このような観点から、表 1.1 中のはかりと制御目的の関係は以下になる。

ホッパースケールや充填用はかりの制御目的は「所定質量ごとの分割化」であり、組合せはかりもこの部類に相当する。チェックウエア（重量選別機）では「所定質量範囲内の品物ごとの流れ方向の同一化」である。計量フィーダでは「質量流量の一定化」あるいは「流量積算値の一定化」である。

1.3.3 制御システム構成

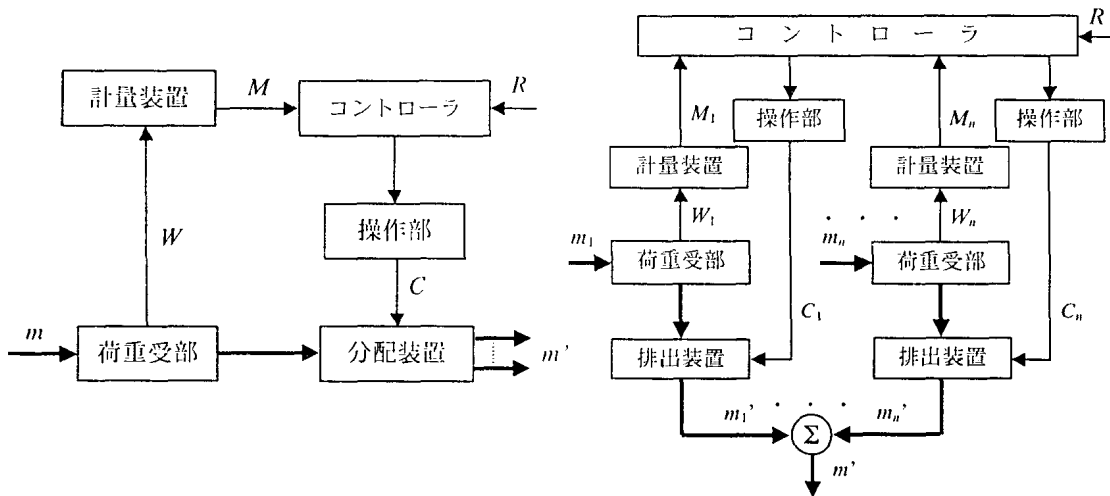
一般に制御系は大別して、制御対象、検出部、調節部あるいはコントローラおよび操作部で構成される（図 3.23）。質量制御を目的とする産業はかりでは、供給装置、分配装置、排出装置などが制御対象であり、質量が被制御量となる。図 1.4 に示すシステムは検出部となる。操作部には各種の操作機器が用いられる。

制御システム構成の観点からの産業用はかりの分類を図 1.5 に示す。同図(a)はホッパースケールや充填用はかりのシステム構成である。この場合、制御対象は供給装置で、スクリュウフィーダはその代表的なものである。操作部はフィーダの回転速度を制御する速度可変モータである。荷重受部は、ホッパースケールではホッパとなる。図中の記号 R は制御入力、 C は制御信号、記号 m は質量の流れ状態であり、これらの記号に添字あるいはダッシュ記号を付して相違を表している。



(a) ホッパースケールまたは充填用はかり

(b) 計量フィーダ



(c) 重量選別機

(d) 組合せはかり

図 1.5 質量制御機能をもつ産業用はかり

図 1.5 (b) は**計量フィーダ**のシステム構成である。制御対象は供給装置で、ベルトフィーダが代表的なものである。その場合、ベルトの一部と計量ローラが荷重受部に相当する。制御対象はベルトフィーダで、それを駆動する速度可変モータが操作部となる。記号 Q は輸送量積算値を、 Q' はその微分値を表す。 Q を制御量とする方式と Q' を制御量とする方式がある。 Q を得るためにはベルト速度 V の測定も必要である。

図 1.5 (c) は**チェックウエア（重量選別機）**のシステム構成である。通常、ベルトコンベヤが荷重受部として用いられる。分配装置が制御対象となる。

図 1.5 (d) は**組合せはかり**のシステム構成である。荷重受部からの排出質量が排出装置を操作することによって制御される。通常、荷重受部は小形ホッパーで、これに開閉ゲートが取り付けられている。その場合には、開閉ゲートが排出装置であり、制御対象となる。ゲート開閉用のアクチュエータが操作部である。

図 1.5 (a) と 1.5 (b) に示すタイプのはかりの制御は、質量の測定と制御を同時に行う**フィードバック制御方式**である。これに対して、図 1.5 (c) と 1.5 (d) に示すタイプのはかりでは、質量測定後に制御が行われる。すなわち、**シーケンス制御方式**である。

第2章 はかりの静特性

2.1 てこの静力学

2.1.1 てこの分類

支点、重点、力点を各1個有するてこを基本てこによぶことにする。支点はてこがそのまわりに回転する点、重点は荷重が作用する点、力点は反力が作用する点である。

基本てこは上記3点の配置の相違により、1～3次てこに分類される。図2.1はこの分類を、上記3点が一直線上にある場合について図示したもので、Fが支点、Aが重点、Bが力点である。

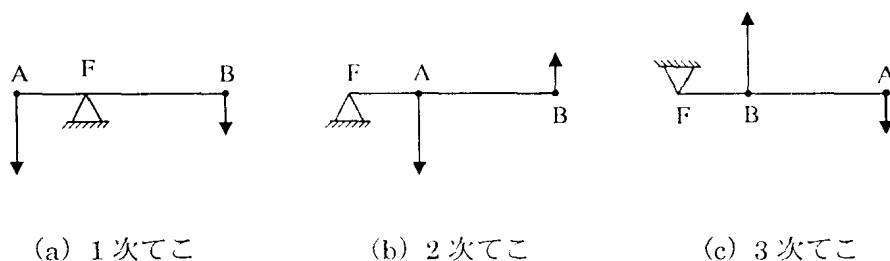


図 2.1 てこの分類

てこは、それが連結されて使用されるか否かにより、単一てこあるいは連結てこよばれる。単一てことは、単独で用いられるてこのことで、天秤や棹秤などに使用されるてこの場合である。連結てことは、2個以上のてこが連結して用いられたとき、その全体を表現する用語である。

1つのてこの支・重・力点のそれぞれは必ずしも1個であるとは限らない。例えば図2.2のように、2つの2次てこが合体したと考えられる構造のものでは、支点と重点がそれぞれ2個ある。図2.3は、このてこを含む連結てこの例である。

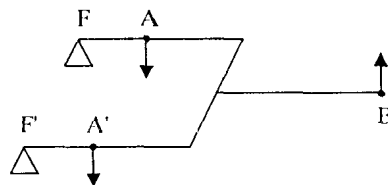


図 2.2 合体てこ

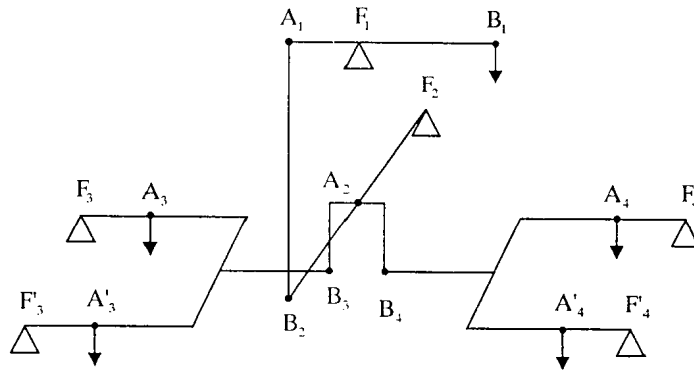


図 2.3 連結てこ

2.1.2 単一てこ

荷重測定時におけるてこの姿勢について、2つの場合が考えられる。1つは、荷重測定時において、常に空掛け（被計量物が荷重として作用していない状態）のときの姿勢を保つ状態で使用される場合である（Case I）。他の1つは、測定荷重の変化に応じて姿勢（傾斜）が変化する状態で使用される場合である（Case II）。この節では、Case IとIIについて、てこの静力学特性を説明する。ただし、てこは剛体と仮定する。

静的平衡条件 単一てこが静的平衡にあるための必要・十分条件は

$$\text{力の総和} = 0 \quad \text{モーメントの総和} = 0 \quad (2.1)$$

である。

図 2.4 のように、3 点が一直線上にないような一般的な場合について、静的平衡条件を考えてみよう。まず最初に Case I の場合、つぎに Case II の場合を考察する。

いま、空掛けのときに重点、力点、支点および重心に初期荷重 W_0 、反力 P_0 、抗力 R_0 および自重 G の力が作用して図 2.4 の姿勢で静的平衡にあったと仮定する。この状態において、さらに測定荷重 W 、反力 P が作用して、空掛け状態と同じ姿勢で静的平衡が得られた場合を仮定する。負荷前後の平衡条件は

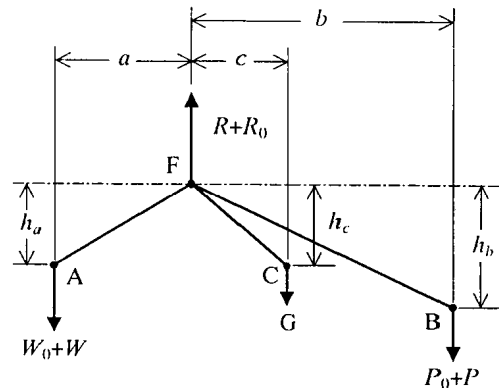


図 2.4 単一てこの平衡条件

$$\begin{aligned} W_0 + P_0 + G + R_0 &= 0 \\ W_0 a + P_0 b + G c &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

および

$$\begin{aligned}(W_0 + W) + (P_0 + P) + G + (R_0 + R) &= 0 \\ (W_0 + W)a + (P_0 + P)b + Gc &= 0\end{aligned}\quad (2.3)$$

である。ただし R は抗力の増加分とする。

図 2.4 において、力とその作用位置に関して正負の符号を考える必要がある。すなわち、力に関しては、下向きを正、上向きを負と定める。また力の作用位置に関しては、支点を原点として、重点側を正と定める。したがって、モーメントに関しては反時計方向が正、その逆が負となる。

式 (2.2) の関係を式 (2.3) に代入すると、式 (2.3) は簡単な式

$$\begin{aligned}W + P + R &= 0 \\ Wa + Pb &= 0\end{aligned}\quad (2.4)$$

となる。式 (2.2) および式 (2.4) が Case I の平衡条件式である。

つぎに、Case II の平衡条件式について考えてみよう。この場合、荷重 W に対して A, B, C 点は空掛け時の位置から移動するから、支点からそれらの点までの水平距離 a, b, c も変化する。いま、変化後の水平距離をそれぞれ a', b', c' とおくと、負荷後の平衡条件式は式 (2.3) の a, b, c を a', b', c' で置き換えた式および式 (2.2) ということになる。この場合、式 (2.4) に相当する簡単な表現式は得られない。

てこ比 てこ比は

$$\text{てこ比} = \frac{\text{支点} \cdot \text{力点間の水平距離}}{\text{支点} \cdot \text{重点間の水平距離}} \quad (>0) \quad (2.5)$$

と定義される。

Case I では

$$\text{てこ比} = |b/a| \quad (= \text{一定}) \quad (2.6)$$

となる。また式 (2.4) の第 2 式から

$$|b/a| = |W/P| \quad (2.7)$$

を得る。 $|W/P|$ はメカニカルアドバンテージとよばれる。したがって、Case I では、てこ比とメカニカルアドバンテージは等しい。

Case II では

$$\text{てこ比} = |b'/a'| \quad (2.8)$$

となり、この値は W および P の値に依存して変化する。また、Case I における式 (2.4) の第 2 式相当の式が得られないため、てこ比はメカニカルアドバンテージ $|W/P|$ と一致しない。

感度と安定度 静的平衡状態のてこに、微小荷重 ΔW を加えたとき、てこが微小角 $\Delta\theta$ 傾いて新しい平衡状態が得られた場合を仮定する。このとき、 $\Delta\theta/\Delta W$ を「感度」と定義する。図 2.4 の場合の感度 s は

$$s = \frac{\Delta\theta}{\Delta W} = \frac{a}{(W_0 + W)h_a + (P_0 + P)h_b + Gh_c} \quad (2.9)$$

となる。ただし、 $(W_0 + W)$ 、 $(P_0 + P)$ 、 G は ΔW が作用する以前に重点、力点および重心に作用している力である。また、 h_a 、 h_b 、 h_c は支点から A, B, C 点までの鉛直距離で、支点を通る水平線の下側にあれば正、上側にあれば負とする。 h_a 、 h_b 、 h_c は Case I では一定であるが、