付録 6. 定量的マネジメント技術

George（1968、p.157）は、定量的マネジメント技術をその特性と用途により、次のように記述している。

決定理論（性能的な組織、学習理論、サイバネティクス、部分最適化を含む）	客観的決定、計画、紛争解決、業務見積り
実験計画	すべての予測モデル
ゲーム理論	競争市場におけるタイミングおよび価格決定、軍事戦略
情報理論	データ処理システムの設計、組織分析、市場調査
在庫管理	経済的なロットサイズと在庫管理
線形計画法	設備と人員の配置、スケジューリング産業連関分析、輸送経路決定、製品ミックス、配分過程
確率論	すべての領域（George はベイズ確率を考えているのかもしれない）
待合せち行列理論	在庫管理、交通制御、電話中継システム、サービスのスケジューリング、無線通信など
取替理論	故障および劣化に対応した機器の取替
サンプリング理論	品質管理、簡易会計および監査、市場調査
シミュレーション理論（モンテカルロ法）	システムの信頼性評価、利益計画、ロジスティックシステム調査、在庫と人員ニーズ
統計的決定理論	確率論的手法におけるモデルパラメータの推定
記号論	回路設計、法的推計、契約の無矛盾性

George は、有意な寄与因子にも言及している。適用に重点が置かれている。このように、基本的な理論的開発とともにそこから派生する技術が検討されている。主たる目的はこれまでの直観的マネジメントを定量化することである。

付録 7. 構造物の信頼性

土木構造物の信頼性は、システム信頼性解析の特殊ケースである。Hudson ら（1997、p.240）は次のように書いている。「時間と対比させた故障率に関するデータは、一般にインフラ施設の構成部材の信頼性予測の基礎をなす... さまざまな電気および機械品目について、故障率の経年変化に 6 つの一般的傾向があることが Moubray によって報告されてい

る」。

この 6 つのパターンは、それぞれのライフサイクルの初期、中期、および最終期において異なる時間依存性を示す。初期故障は急速に減速し（たとえば「シェークダウン」期）、次に変動のない安定期が長く続き、最後に故障率が急上昇し、いわゆる「バスタブ」曲線を描く。

一般的に（主として電子システムを対象とする）、Barlow ら(1965、p.5)はアベイラビリティ、インターバルアベイラビリティ、効率、および有効性とともに確率的信頼性を次のように定式化している。「残念ながら、文献に示された定義は不明確で不正確なことがあり、研究者によって差がある...　筆者らは、適切に特定化されれば、信頼性理論の基本量のほとんどをもたらす単一の一般化量を数学的に定義することにする。」

この引用文における一般化量が期待利得 G（t）である。これは、ベクトル値確率変数 X（t）で記述される時刻 t におけるシステムの状態と関連づけられる。

時間間隔 a≦t≦b にわたる期待利得 G（t）の平均 H（a,b）は、重み関数 W（t）に関して次のようになる。

（式 A7.1）

期待利得 G（t）と平均期待利得 H（a,b）に関して、Barlow らは以下の五つの「信頼性理論に現れる基本量」を定義または参照している。

1. *信頼性＝G (t)*：装置が遭遇する運転条件下で意図する期間にわたって適切に目的を遂行する確率（修理の必要性なし）
2. *点的アベリラビリティ*：システムが所与の時点において許容誤差内で動作できる確率（修理を見込む）
3. *インターバルアベイラビリティ*：所与の時間間隔内でシステムが許容誤差内で動作できる時間の期待割合（修理を見込む）。Barlow らはこの量を効率と等しいとしている。
4. *限界インターバルアベイラビリティ*：長期運転の中でシステムが満足のゆくように運転する時間の期待割合
5. *インターバル信頼性*：指定時刻においてシステムが動作しており、間隔 x にわたって動作し続ける確率（取替の便益なし）

Thoft-Christensen and Baker（1982、第 4 章）は、ランダム事象の影響を受ける構造物の荷重係数（終局強度）設計法に用いる信頼性を詳細に説明している。

*安全係数*は、状態がその安全係数を乗じただけ悪化するまで構造物が「安全」であることを意味する。Thoft-Christensen and Baker（p.1）は次のことを根拠としてこのアプロー

チを退けている。「今では、構造物の好ましくない性能によるリスクをある程度許容しなければならないことは広く認められている。」

このリスクを推定するために、信頼性は「構造物が指定された*基準期間*にそれぞれの指定された限界状態（終局または使用）に達しない確率」と定義されている（p.8）。

信頼度関数 R_T（t）は、システムが時刻 t においてまだ運転可能である確率である。

（式 A7.2）

ここに、破壊分布 F_T（t）は破壊までのランダム時間 T の関数である。

破壊までの時間の密度関数 f_T が既知であれば、次のようになる。

（式 A7.3）

lim[tRT(t)]→0 であれば、システムの期待寿命は次のようになる。

（式 A7.4）

設計荷重（需要）と構造物の抵抗力（供給）がそれぞれ正規分布 F_S と F_R に従うと仮定すれば、構造物の信頼性＃は次式のように構造物が荷重下で存続する確率となる。

（式 A7.5）

または、

（式 A7.5a）

ここに、　P_f = 破壊確率　確率

f_S = F_S に対応する密度関数

f_R = F_R に対応する密度関数

確率

Thoft-Christensen and Baker（1982、p.73）は、式 A7.5 と式 A7.5a は数値的に同じ結果をもたらすが、それぞれが表す仮定は異なり、前者は強度の分布に関連し、後者は破壊する構造物における荷重分布と関連すると強調している。破壊確率は破壊する構造物における抵抗力 R の分布（式 A7.6）または荷重 S（または Q）の分布（式 A7.6a）でモデル化することができる。ここでは、 P_f は二つの分布が重なり合う面積と等しくない。

（式 A7.6）

（式 A7.6a）

図 7.1 は信頼性モデルを示す。最近の LRFD（荷重抵抗係数設計法）の教科書は荷重効果の需要を S ではなく Q で表している。

線形安全裕度と正規分布する独立変数については、*信頼性指標* β（Thoft-Christensen and

Baker、1982、p.89）は平均 μ_M がゼロをどの程度超過するかを標準偏差 σ_M の数で表したものである。すなわち次式で与えられる。

（式 A7.7）

ここに、μR、μS、μM＝それぞれ正規分布する R、S、M
σR、σS、σM＝それぞれ分布関数 R、S、M の標準偏差
R＝抵抗、正規分布関数 F_R をもつ確率変数
S＝荷重効果、正規分布関数 F_S をもつ確率変数
M＝破壊または限界状態関数、＝ R−S

下ツキ

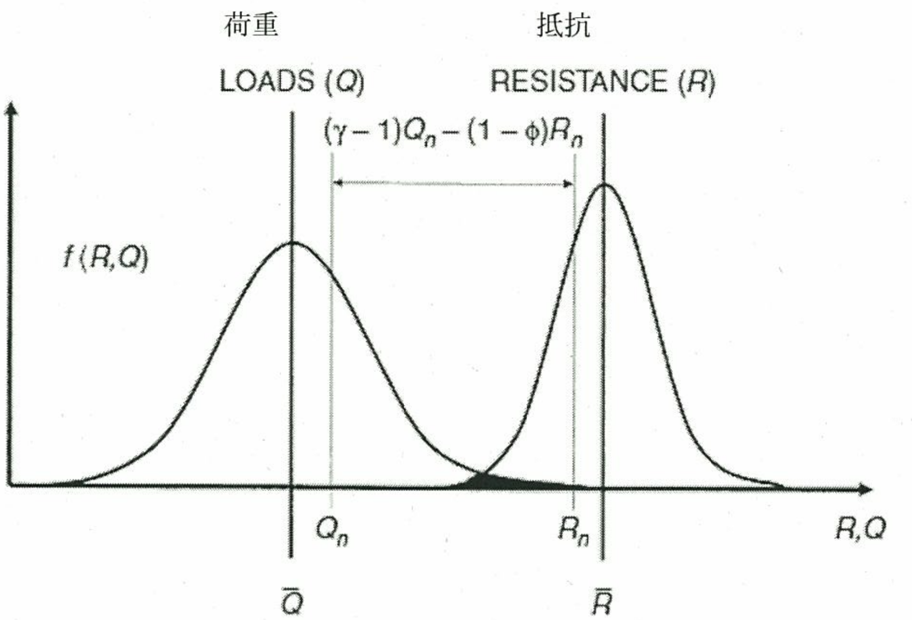

図 A7. 1　構造物の荷重係数設計法による正規分布する R（抵抗力）と Q（荷重）

（確定量）

μ_R/μ_S を*安全係数*と定義することは、R および S（または Q）が一定であることを意味しない。

Barker and Puckett（1977、第 3.46 節）は、正規分布と対数正規分布について同様の*安全指標* β を~~開発した~~。求めた

破壊関数が線形ではないときは、信頼性指標 β はモンテカルロシミュレーション（MCS）によって、あるいは Ang and Tang（1984）が記述する FORM（1 次近似信頼度法）または SORM（2 次近似信頼度法）として知られる反復線形化手順によって推定することができる。

目標信頼性指標 β＝3.5 は LRFD AASHTO を校正するために使用され（1998a）、これにより新設構造物の破壊確率は 0.0233%となる。既設構造物については、β は 2.5 に近いと