

定量的リスク管理のためのモデリング

— エコノミック・キャピタル&ストレス・テスト —

主席研究員 吉澤 容一

目 次

1. はじめに
2. 定量的リスク管理の概要
 - (1) 定量的リスク管理の視点
 - (2) エコノミック・キャピタル
 - (3) ストレス・テスト
 - (4) 内部モデル
3. スイス・ソルベンシー・テストとモデリング
 - (1) スイス・ソルベンシー・テストの概要
 - (2) 標準モデルとシナリオの概要
 - (3) 標準モデルとシナリオの詳細
4. 内部モデルの活用事例
 - (1) 内部モデルの活用
 - (2) 内部モデルの詳細機能
5. 定量的リスク管理の活用
 - (1) 定量的リスク管理の状況と整理
 - (2) 定量的リスク管理と内部モデルの在り方
6. おわりに

1. はじめに

統合的リスク管理（Enterprise Risk Management：以下「ERM」）¹と呼ばれる統合的に保険会社のリスクを管理する先進的なリスク管理方法が広まりつつある。ERMの定量的側面である定量的リスク管理において、エコノミック・キャピタル（Economic Capital）とこれを補完するストレス・テストが重要な役割を担っている。

本稿では、エコノミック・キャピタルおよびストレス・テストを中心に、両者の特徴、活用方法などを整理して紹介する。ストレス・テストは、この実施にあたりシナリオ設定がポイントとなる。そこで、シナリオの概要を整理するとともに、資本要件の算出方法にシナリオが組み込まれているスイス・ソルベンシー・テスト（Swiss Solvency Test：以下「SST」）を紹介する。エコノミック・キャピタルの計量およびストレス・テストは、IT システムのサポートなしには実行できない。多くの先進的な保険会社では、内部モデル（Internal Model）によって個社のリスク構造をモデリングし、これによって多様なリスク量を管理し経営に反映している。そこで、比較的情報開示しているスコル社の内部モデルの概要を紹介する。

2. 定量的リスク管理の概要

(1) 定量的リスク管理の視点

a. 確率分布とシナリオ

保険が取り扱う将来の不確定な事象にかかるリスクの定量化にあたり、確率論的（stochastic）方法と決定論的（deterministic）方法がある。確率論的方法では確率分布（distribution）、決定論的方法ではシナリオ（scenario）に基づく手法が採用されている。これらの概念について、図表1の簡単なモデルを例に説明する。

このモデルでは、現時点（ $t=0$ ）からスタートする。現時点から1年後（ $t=1$ ）に推移するにあたり、パス1、パス2、パス3の3つの可能性が考えられるとする。各パスの発生確率が与えられ、パス1が20%、パス2が30%、パス3が50%とする。このとき、各パスによって推移する1年後の3つの状態の確率は、各パスの発生確率によって決まる。（図表1では、2年後（ $t=2$ ）に3つ状態がそれぞれ2つに分岐する場合を掲載しているので、必要に応じて参照願う）。

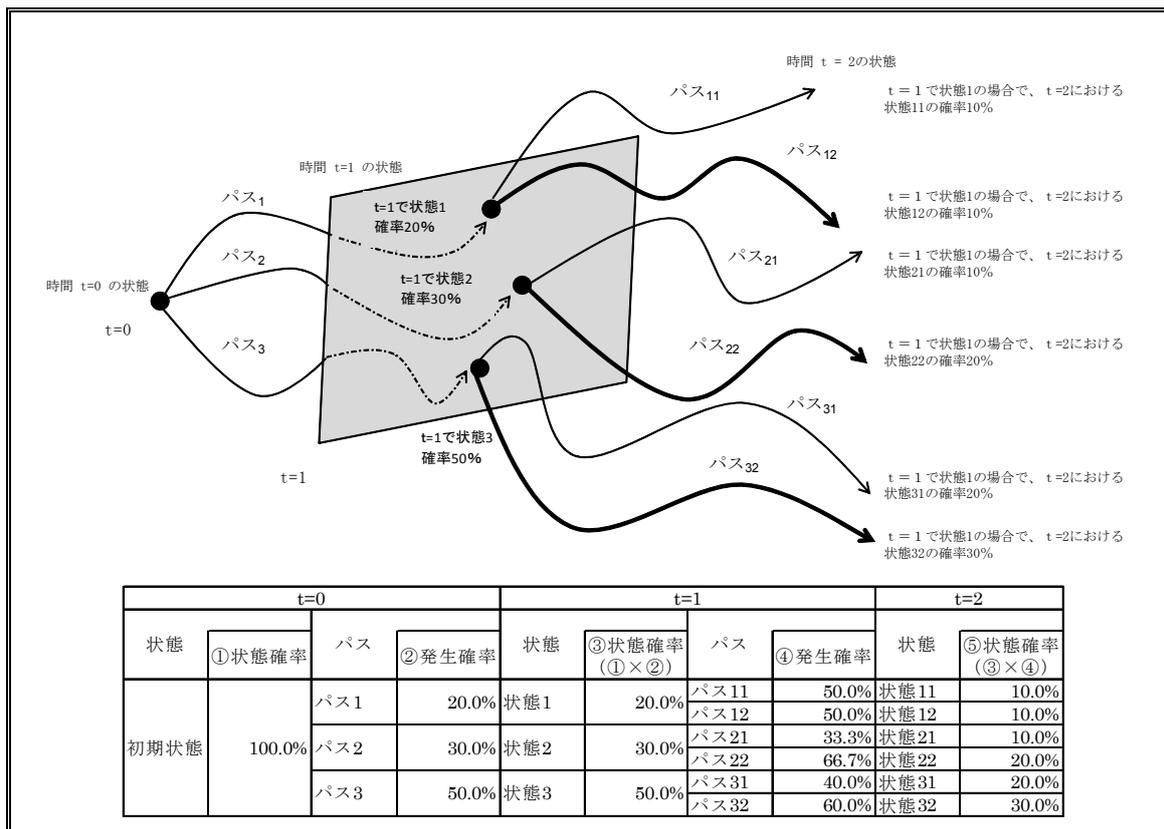
このモデルを確率分布として捉えると「1年後には、確率20%で状態1、確率30%で状態2、確率50%で状態3に推移する確率分布である。」と認識する。次に、シナリオとして捉えると、例えば、「発生確率の高いパス3をシナリオとして想定し、この場合には1年後に状態3となる。この発生確率は50%である。」と認識する。

事象のリスクを定量化にあたり、想定する事象の特性や入手できる情報などによっ

¹ ERMの特徴は、統合的アプローチ、ダウンサイドとアップサイドの両方のリスクを認識、リスクの計量を推進、計量不能リスクの認識と管理、リスク対応のためのマネジメントなどである。

て、確率分布とシナリオから実態に適合する方法を選択している。過去の統計データが十分にあり将来の推移が過去の実態を踏襲する性質のものは、比較的分布を作成しやすく、確率分布に基づくリスク評価は有効である。また、過去の統計データの入手が難しいもの、或いは、極值的であるため過去のデータが参考にならないものに対しては、シナリオによるリスク評価の方が現実的である。

図表 1 パスの分岐による将来の状態推移（確率分布とシナリオ）



b. エコノミック・キャピタルとストレス・テスト

代表的な定量的リスク管理（Quantitative risk management）の手法に、エコノミック・キャピタル²とストレス・テスト³がある（図表 2 参照）。エコノミック・キャピタルは保険者の抱えるリスクの総量を計量することによって、リスク管理等に役立つものである。一方、ストレス・テストは、一般に特定の事象を想定してその影響を計量して評価するものである。両者は補完し合う関係にあると考えられている。

エコノミック・キャピタルは、一般に確率論的方法が採用され確率分布に基づきリスク量を計量することが多く（極值的な事象はシナリオによって補完することもある）、一方、ストレス・テストはシナリオに基づく決定論的な方法が採用されることが多い。

² エコノミック・キャピタルの詳細は後記 2.(2)エコノミック・キャピタルを参照願う。

³ ストレス・テストの詳細は後記 2.(3)ストレス・テストを参照願う。

図表 2 エコノミック・キャピタルとストレス・テストの目的、計量方法

	エコノミック・キャピタル	ストレス・テスト
目的	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保険者の総リスク量を計量する。 ・ 保険者の通常の状態を想定している。 ・ ERM 全般に活用されており、リスクマネジメントのみならずキャピタル・マネジメントにも利用されている。 ・ 監督目的の法定資本要件にも、同様な考え方が採用されつつある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保険者の特定のリスクの影響を計量する。 ・ 保険者の極値事象を想定することが多い。 ・ 主に、ERM やエコノミック・キャピタルの補完として使用されている。 ・ 監督者も、全保険者の監督に適用、問題のある特定保険者にも使用している。
計量方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 確率論的方法が一般的であり、確率分布をベースに計量している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 決定論的方法が一般的であり、シナリオをベースに各種手法によって計量している。

(2) エコノミック・キャピタル

a. エコノミック・キャピタルの概要

保険会社が事業を行ううえで必要と考えられる資本をエコノミック・キャピタル (Economic Capital) という。これと保険会社が実際に保有する利用可能資本 (Available Capital) と比較することによって保険会社の資本十分性を検証できる。

エコノミック・キャピタルは、保険者の総合的なリスクを吸収するために必要な資本であり、保険会社の抱えるリスクの総量を評価したものである。保険会社の自己資本が喪失することを総合的なリスクと考えると、エコノミック・キャピタルは資本の変動リスクと等しくなる⁴。資産と負債は市場整合価値で評価され、資本は資産から負債を控除したものとするトータル・バランスシート (Total Balance Sheet) 方式が採用されている。これらのイメージは図表 3 に記述したとおりである。

エコノミック・キャピタルは、予め保有期間 (time horizon) と信頼水準 (confident level) を設定したうえで、評価指標であるバリュー・アット・リスク (Value at Risk : 以下「VaR」)⁵あるいはテイル・バリュー・アット・リスク (Tail Value at Risk : 以下「Tail VaR」)⁶を適用して計量されている。

⁴ この考え方は、SST の法定資本要件の算出にも採用されている。詳細は後記 3.(1)b.を参照願う。

⁵ 例えば、支払保険金の信頼水準 99%VaR とは、99%の確率で発生する損害額の最大値である。99%の確率で発生する損害額の最大値が 1 億円とすると、資本金 1 億円を保有していれば 99%の確率で保険金支払に困窮することはない。逆に 1%の確率で保険金支払が難しくなる。概念を簡潔化して言い替えると、100 回のうち 1 回が保険金支払不能に陥る可能性があり、保有期間 1 年とすると 100 年に 1 回発生する水準といえる。記号で記述すると、次のとおりである。

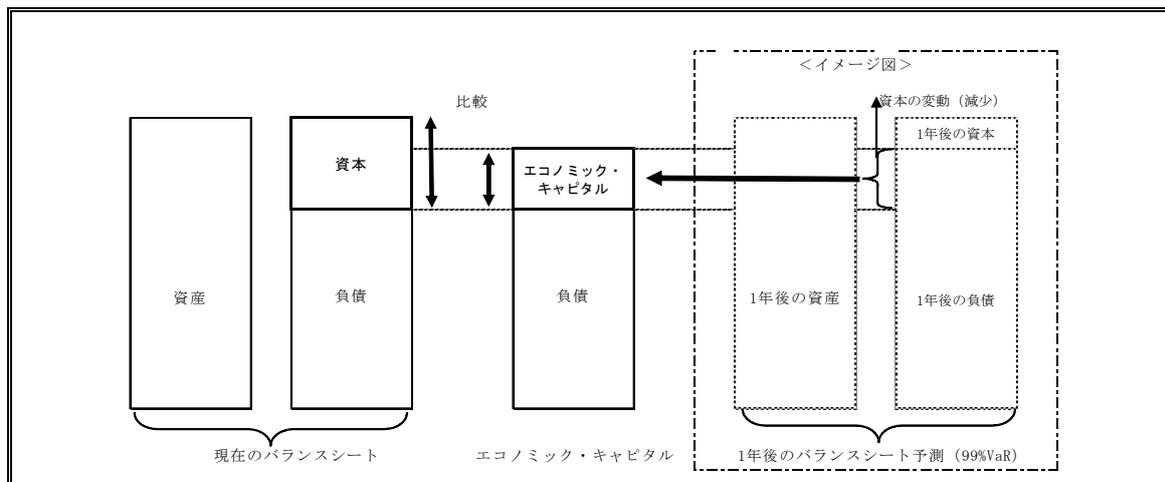
$$\text{VaR}_{99\%}(\text{保険金}) = 1 \text{ 億円}$$

⁶ 例えば、支払保険金の信頼水準 99%Tail VaR とは、信頼水準 99%VaR を超える保険金の平均値であり、1%の確率で発生する大規模損害の平均値とも言える。定義から Tail VaR は VaR を上回る (99%VaR は 1%以内の確率で発生する大規模事故の損害額の最小値であるとも解釈できる)。損害保険のように大規模損害の発生がファット・テイル (fat tail) な場合には、Tail VaR の方が実態に適合しているとの意見がある。記号で記述すると、次のとおりである。

$$\text{Tail VaR}_{99\%}(\text{保険金}) = E(\text{保険金} \mid \text{保険金} > \text{VaR}_{99\%}) = E(\text{保険金} \mid \text{保険金} > 1 \text{ 億円})$$

E(A|B)とはBの条件のもとでのAの平均値

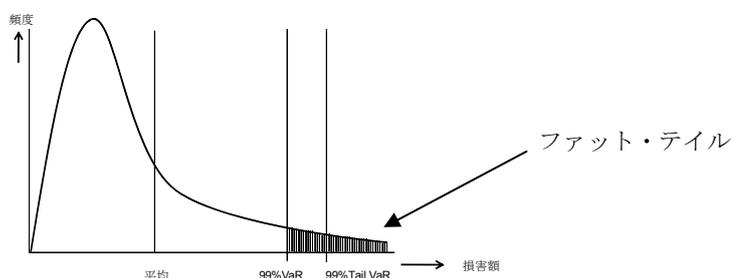
図表3 エコノミック・キャピタル（イメージ図）



b. エコノミック・キャピタルの活用

エコノミック・キャピタルは、保険会社のERMにきわめて広範囲に活用されている。例えば、リスク選好・リスク許容度・限度額の設定などのリスクマネジメントのフレームワーク、経営戦略の立案、保険料の設定・商品の設計、再保険政策、キャピタル・マネジメント、ボーナスや報酬の決定、M&A、社内外のコミュニケーションに使用されている。CROフォーラム⁷が、メンバー会社のエコノミック・キャピタル利用業務等とその利用度合を、図表4のとおり調査したので参照願う。

エコノミック・キャピタルをベースとする各種指標は社内指標としても利用されている。例えば、実際の資本ではなくリスク量を反映した必要な資本であるエコノミック・キャピタルをベースに収益を評価する収益管理指標⁸が多くの保険会社で利用されている。また、保険会社が保有する総リスク量であるエコノミック・キャピタルを子会社や種目などの事業部門ごとに区分し、これをベースに各事業部門に配賦資本(Allocated Capital)⁹を割当てることがある。



⁷ CROフォーラム (Chief Risk Officer Forum : CRO Forum) は、2004年に設立され、リスク管理に関する業界のベスト・プラクティスの策定および推進に資する各種の取組を行っている団体である
⁸ 典型的な収益管理指標は、RORAC (Return on risk-adjusted capital)、RAROC (Risk-adjusted return on capital) などがある。当期純利益をNI、エコノミック・キャピタルをEC、資本コスト率をkとすると、 $RORAC = NI / EC$ 、 $RAROC = (NI - k \cdot EC) / EC$ となる。
⁹ 配賦資本は、エコノミック・キャピタルにバッファー等を加算した金額とすることが多い。配賦資本には資本コストが伴い、これは各事業部門に賦課される。

図表4 エコノミック・キャピタルの利用

利用目的	利用度合（利用社数/参加18社）			
	主要判断要素	判断要素	検討要素	利用せず
戦略の立案	22%	67%	6%	6%
キャピタル・マネジメント	22%	78%	0%	0%
リスクの選好	33%	67%	0%	0%
限度額の設定	22%	67%	6%	0%
戦略的資産配分	22%	78%	0%	0%
ヘッジ	22%	61%	6%	11%
ボーナスの査定	0%	39%	22%	39%
保険料の設定・商品の設計	11%	67%	17%	6%
再保険の出再	28%	56%	11%	6%
M&Aの検討	0%	72%	22%	6%
目標の設定	22%	61%	11%	6%
報酬の決定	0%	39%	28%	33%
社外とのコミュニケーション手段	11%	83%	6%	0%

（出典：CRO Forum, “Internal models benchmarking study Summary results” (2009.1)

をもとに作成：メンバーのうち18社参加)

c. エコノミック・キャピタルと監督

監督者が行うソルベンシー規制においても、エコノミック・キャピタルと同様な考え方にに基づき法定資本要件を算出する先進的な規制が導入あるいは導入の方向にある（以下これらを総称的に「先進的ソルベンシー規制」という）¹⁰。先進的ソルベンシー規制においては、資産と負債を経済価値である市場整合価値で評価し、資本は資産と負債の差額という概念に基づき、法定資本要件などを設定することになる。

d. エコノミック・キャピタルの情報開示

会社の方針にもよるが、経営の健全性を市場に開示するため、エコノミック・キャピタルの評価金額などをアニュアル・レポートやウェブサイトなどで公開している保険会社がある。特に、先進的なERMを実践している保険会社にはこの傾向が強いと感じる。この情報開示にあたり、保険会社間で標準化すべき事項について、CROフォーラムがアンケートを実施しており、図表5のとおり分散効果、キャリブレーション（calibration）のパラメータ、開示する事業単位、情報開示頻度などの標準化が必要と考えられている。

図表5 情報開示項目の標準化

	重要	有効	重要でない
分散効果	83%	6%	11%
キャリブレーションのパラメータ	56%	28%	17%
エコノミック・キャピタルを開示する事業単位	56%	39%	6%
情報開示頻度	39%	39%	22%

¹⁰ 具体例として2005年にイギリスで導入されたICAS (Individual Capital Adequacy Standards)、2008年にスイスで導入されたSST (Swiss Solvency Test)、EUで2012年に導入予定のソルベンシーII等。

(出典：CRO Forum, “Internal models benchmarking study Summary results” (2009.1)：

メンバーのうち 18 社参加)

(3) ストレス・テスト

a. ストレス・テストの概要

ストレス・テストでは、特定目的のために特定事象の影響につき、悪影響を中心に定量的に評価する。ストレス・テストでは、シナリオに基づく決定論的な方法が用いられている¹¹。この理由として、シナリオ方式は、特定の事象に特化して影響をテストしやすいこと、テストの前提条件を必要に応じて自由に設定しやすいこと、過去の統計数値の活用が難しい事象に対処できること、期間が長期にわたり複雑に変遷する事象にも対応できることなどがあげられる。なお、専門家でなくとも直観的にシナリオを理解できることから、経営層を始めとする社内のコミュニケーションを円滑化する副次的効果も期待できる。

現在のところ、ストレス・テストは、エコノミック・キャピタルやソルベンシー規制の補完的色彩が強い。今後は、不確定で計量不能な事象には中心的な役割を担うことも期待されている。ストレス・テストが、保険会社のリスクマネジメントに十分組み込まれて、活用されれば力強いツールとなるであろうと言われている。

b. ストレス・テストの種類

ストレス・テストは、目的等により図表 6 のとおり、感応度テスト、ストレス・テスト（狭義）、シナリオ・テストの 3 種類に大別できる。

感応度テストは、金利変動の影響など、特定のリスク要素あるいは関連の深い少数のリスク要素に、小幅に変動が生じたことによる影響をテストする。一般に、同一リスク要素が異なる程度の変化した場合などの幾つかのシナリオのもとで計量される。

ストレス・テスト（狭義）は、株価の暴落など、特定のリスク要素あるいは関連の深い少数のリスク要素が、大幅に変動したことによる影響をテストする。

シナリオ・テストは、特定のリスク要素の変動ではなく、将来の状態全体の推移をテストするものである。したがって、リスク要素の数も多く、リスク要素間の相関関係も複雑となる。また、初期事象の影響だけでなく、むしろ数カ月、数年にわたり事象がカスケード的¹²に変遷しながら複雑に影響が続けて生じるケースもありうる。シナリオ・テストは、金融危機などのシステムミック・リスク¹³、大規模自然災害に対しても有効である。

¹¹ ストレス・テストについては、決定論的なストレス・テストだけでなく、確率論的なストレス・テストも存在するが、本稿では、参考とした IAA, “Paper on Stress Testing- First Draft” に沿って、一般に多く使用されている決定論的なストレス・テストに限定して紹介する。

¹² カスケード (cascade) とは連なった小さな滝であり、これから派生して「連続的な事象」を意味する。

¹³ システムミック・リスクとは、個別金融機関の支払不能等や特定の市場または決済システム等の機能不全が、他の金融機関、他の市場または金融システム全体に波及するリスクのことである。

図表 6 ストレス・テストの分類

分 類	概 要
感応度テスト	特定のリスク要素等の小幅な変動による影響をテスト
ストレス・テスト（狭義）	特定のリスク要素等の大幅な変動による影響をテスト
シナリオ・テスト	多数のリスク要素による将来の状態全体の推移をテスト 推計期間が長期間にわたることもある

c. ストレス・テストの活用

ストレス・テストは、次のとおり、リスクマネジメント、計量不能リスクの分析、経営層とのコミュニケーション、ソルベンシー規制などに利用されている。テスト目的に応じて、感応度テスト、ストレス・テスト（狭義）、シナリオ・テストのいずれかを実行する。

なお、複雑なシナリオによる事象の全ての可能性のある分岐を検討することは困難である。テストの目的は、将来の全ての予想するのではなく、シナリオと同様な事象が生じた場合に事前に対処することにある。したがって、初期の破壊的事象による主要な影響把握のためにシナリオを作成すれば十分であると考えられている。

① リスクマネジメント

リスク・エクスポージャーを説明する適正なシナリオを作成し、シナリオの影響を評価する。この結果が会社のリスク選好と如何に関係づけることができるかを議論して、シナリオの影響を軽減する方法を検討する。最終的に、アクション計画を経営層に提言する。

② 計量不能リスクの分析

頻度は不明であるが、現実化した場合にリスクの影響度が大きい事象を分析する。具体例として、風評リスクがあげられる。風評による損害は、企業の戦略、営層の行動、オペレーショナル・リスクなどにに基づき発生する発生確率の近似値を合理的に算出することは不可能に近いが、一旦、風評損害が生じると定量的に損害額を把握できる。これは、消費者行動、新規事業、従業員の離職などに影響を及ぼす。

③ 経営層とのコミュニケーション

一般的に統計や確率的手法を用いていないので、数学的素養のない経営層の理解が得られやすい。リスクマネジメントの結果を理解してもらいたい経営層とリスク管理部門との有効なコミュニケーション・ツールとなる。このため、ストレス・テストのシナリオは、文書化され、専門知識のない者でも理解できるように記述する必要がある。

④ ソルベンシー規制

ソルベンシー規制においても、感応度テストや極端な事象のストレス・テストは有効である。発生頻度は低い巨大損害は、通常確率論的なソルベンシー規

制の法定資本要件では捉えにくい。また、今まで発生したことの無い仮想的な事象の影響も捉えにくい。ストレス・テストにより、このような事象に対して補完することができる。

d. シナリオ

ストレス・テストは、シナリオに基づき実行される。過去の事象をベースに作成するヒストリカル・シナリオ (historical scenario) と一定の仮定のもとで作成する仮想シナリオ (hypothetical scenario) の2つのタイプがあるが、実際にはこれらを単独あるいは複合してシナリオを作成している。具体的には次のようなシナリオがある。

① リバース・シナリオ

特定の金融損失を起こす事象から逆に設定するシナリオである。例えば、生命保険会社が支払不能となる死亡率のシナリオなどである。

② ヒストリカル・シナリオ

2000年～2001年の株式市場のクラッシュ、1918年～1919年のスペイン風邪など歴史的な事象をもとに作成したシナリオである。この長所は、過去の事実に基づいているので理解を得られやすいこと、短期・中期・長期の影響がわかることである。なお、過去の事象は、現在とは状況が異なるので調整が必要である。例えば、スペイン風邪の場合には、人口規模、グローバルな人間の移動、医療の進歩などにおいて過去とは大きく状況が異なっている。

③ 合成シナリオ

未発生事象の仮想シナリオである。シナリオ作成のためには、社内外の関係者と十分にコミュニケーションを取り、理解を得ることが重要になる。この例として、事故が発生する可能性はあるが事故例のないナノ・テクノロジーなどが上げられる。

④ 単独事業と複合事業シナリオ

単独事象シナリオは、一事象によるシナリオである。複合事象シナリオは、複数の事象から構成されるシナリオであり、グローバル金融危機、大規模自然災害などが該当する。

⑤ グローバル・シナリオ

世界的規模で保険者や金融機関に影響を与える事象のシナリオである。1929年の恐慌、1918年のスペイン風邪、2007年の信用危機など、異なった地域、異なった地域の市場、銀行・保険・年金・その他金融機関などの相互関係の評価できる点が優れている。

シナリオは、ストレス・テストだけではなく、経営戦略や方針の構築、商品開発、

財務計画の策定・見直し・検証にも有効である。この際には、キャリブレーションのう え、シナリオに基づき内部モデル¹⁴を使用することになる。

e. ストレス・テストの監督

IAIS¹⁵が公表している「保険者によるストレス・テスト指針」の中で監督者について触れているので、これを参考に次のとおり説明する（図表 7 参照）。

監督者からの要請によって、保険会社がストレス・テストを実施することは有効であると考えられている。監督者が特定リスクに関するシナリオを作成し、全保険会社がこれに基づきストレス・テストを実施することにより、特定のストレスに対する全保険会社の状況、特定保険会社の状況を監督者は把握できる。特に、システミック・リスクについては、全保険会社が同一シナリオでテストを実行、同一フォームで報告することにより、総合的な影響把握に極めて有効である。

図表 7 IAIS のストレス・テスト指針（抜粋）

監督者による結果の利用（89～93）の抜粋

監督者にとってストレス・テストの過程と結果は有効な情報であり、このことにより、監督者は保険者が多様なリスクを管理するために使用する内部統制と具体的なリスクマネジメント実務を一層詳しく把握できる。

全ての保険者が、監督者が定めた統一的な条件でストレス・テストを行うことにより、各保険者のベンチマーキング比較分析を行いやすくなる。さらに、大規模自然災害や主要再保険者の倒産など大規模リスクによって影響を受けやすい保険者を直ちに認識することができる。

ストレス・テスト結果の対応状況に満足できない場合には、監督者は必要に応じて資本増強、制度と統制の強化および事業計画と戦略の修正を保険者に要請すべきである。監督者と保険者の一層完全な状況理解のため、監督者は保険者に追加ストレス・テストを要請することもあり得る。

保険者のリスクを認識し管理するため、監督者は過去において如何なるモデルが適正であったかを認識できるべきである。しかしながら、監督者は一般に、特定の保険者にモデルを指定すべきでない。保険者がモデルの選択と適正な使用に責任を持つべきである。

保険者の慎重なリスクマネジメント目的のために、監督者がストレス・テストの性質や頻度などの要件を制定することは妥当である。さらに、ストレス・テスト要件にはテストすべき最少範囲を規定してもよい。

（出典：IAIS, “Stress testing by insurers : Guidance paper” (2003.10)）

f. ストレス・テストの情報開示

ストレス・テストの概要と結果の活用方法を情報公開することにより、保険者のリスクマネジメント、ガバナンス、方針、実務および制度などに関して関係者の理解を得られ、悪環境下での対処能力を評価されることが期待できる。

一方で、ストレス・テストは悪条件下での影響を把握するものであるため、この結果が公開された場合、必要以上にネガティブに受け止められる可能性が高い。公開する情報の露出度が高いほど、競合他社、取引相手、市場での競争力を失う恐れがある。保険者がテスト結果の公開を監督者から要請された場合には、保険者は真の悪条件シ

¹⁴ 内部モデルの詳細は、2.(4)内部モデルを参照願う。

¹⁵ IAIS は、保険監督者間の協調の促進、国際保険監督基準の策定、加盟国（特に新興市場国）における監督基準に則った保険制度設立の支援、他の金融分野の監督機関との連携などのため、1994年に発足した保険監督者をメンバーとする国際機関である。

ナリオを適用すること自体を躊躇する可能性が極めて濃厚である。

従って、ストレス・テストの情報公開レベルと様式の決定にあたり、監督者はストレス・テスト本来の目的を達成できるように十分な配慮が必要となる¹⁶。

(4) 内部モデル

a. 内部モデルの概要

エコノミック・キャピタルの計量やストレス・テストは、先進的な保険会社においては、内部モデルによって実行されている。CEA¹⁷によると、内部モデルは「保険者のためのリスクマネジメント・システムであり、引き受けた保険の全てのリスク状況を分析し、会社の特定なリスクプロファイルを基礎にリスクを計量化し必要な資本を決定する。」と定義されている。

内部モデルは、保険債務の評価、財務状況の分析、エコノミック・キャピタルの計量、シナリオ・テストを含むストレス・テスト、資産と債務のミスマッチの分析と資産運用政策、特定の投資商品の市場リスクの分析（満期保証商品、変額年金など）、保険商品の価格設定、再保険プログラムの評価、各種マネジメントやボーナス戦略の評価などに使用されている。

内部モデルには様々な形態があり、単純なものから極端に複雑なものまである。開発にあたり、保険者が自ら構築する場合、パッケージ・ソフトウェアを購入する場合、これらの併用ケースなどがある。内部モデルの使用にあたり、社内のガバナンス体制を構築して、使用テスト、十分性テスト、変更テスト、専門性、統制、文書化および内外のレビューなどを行う必要がある。

b. ソルベンシー規制への使用

先進的なソルベンシー規制では、法定資本要件の算出にあたり、監督者の事前承認を前提に内部モデルを使用することが認められている¹⁸。この事前承認にあたり、監督者は一定の要件を定めている。IAIS は、「資本監督のための内部モデルの使用に関する指針（“Guidance paper on the use of internal models for regulatory capital purposes”）」を 2008 年 10 月に公表し、法定資本要件の算出などに内部モデルを使用する場合に必要な 17 の要件¹⁹を掲げている。

この要件の概要は、法定資本要件に算出に内部モデルの使用を認める場合には適正な基準を設けるべきであること、この基準は異なったレベルの資本要件ごとに定める

¹⁶ ストレス・テストの情報開示については、IAIS, “Stress testing by insurers : Guidance paper”, (2003.10)を参考にした。

¹⁷ 欧州保険委員会 (Comité Européen des Assurances : 以下「CEA」) は、1953 年にフランスのパリ (現在はベルギーのブリュッセルに移転) に設立された欧州各国の保険協会を会員とする連合組織であり、保険会社および再保険会社等を代表する。

¹⁸ ただし、イギリスの ICAS は全て内部モデルで対応することになっており、事前承認を必要ない。

¹⁹ IAIS 指針に定められた内部モデルに関する 17 要件の詳細は、添付資料 A.を参照願う。

べきであること、使用にあたり事前承認とすべきこと、少なくとも「統計品質テスト、キャリブレーション・テスト、使用テスト」の3つのテストによって内部モデルを検証すべきであること、データの正確性を立証すべきであること、経営層が適正な水準の内部モデル開発と使用に責任を持ってアウトプットを理解すること、内部モデルに関するガバナンスの制定・内部モデルの文書化・内部モデルのパフォーマンスの検証を実施すること、監督者への報告と情報開示を行うことなどである。

3. スイス・ソルベンシー・テストとモデリング

(1) スイス・ソルベンシー・テストの概要

a. スイス・ソルベンシー・テストの概念

スイス・ソルベンシー・テスト (Swiss Solvency Test : 以下「SST」) は 2008 年から導入された 14 のプリンシプルに基づくスイスのソルベンシー規制である。

SST では、資産、負債、資本および必要な資本を統一的に評価しており、資本は資産から負債を控除したもの、必要な資本は資本の変動リスクである。資産も負債も経済価値である市場整合価値によって評価している。評価にあたり確率論分布に基づくモデルと決定論的なシナリオを併用しているなど定量的に最先端のソルベンシー規制と言われている。必要な資本である目標資本 (Target Capital) を利用可能資本であるリスク耐久資本 (Risk Bearing Capital) が上回ることが法定資本要件である。

法定資本要件の計量にあたり、監督者が定めた標準モデルとシナリオに加えて、監督者の事前承認を前提に内部モデル (あるいは部分内部モデル²⁰) の使用が認められている。SST では、標準モデルを使用することが適正でない場合には内部モデルを使用することとされている (再保険者は全て内部モデルを使用)。内部モデルの承認までのプロセスの概要は、①内部モデル使用の申請、②監督者からの必要資料の要請と提出、③監督者による監査、④監督者からの監査報告書、⑤認可である。

保険者は SST に基づく評価結果を年 1 回 SST レポートとして監督者に報告することになっている。SST レポートには、資産、負債、リスクマージン、利用可能資本、標準モデルあるいは内部モデルの概要、シナリオの内容およびリスク軽減策などを記述することになっている。

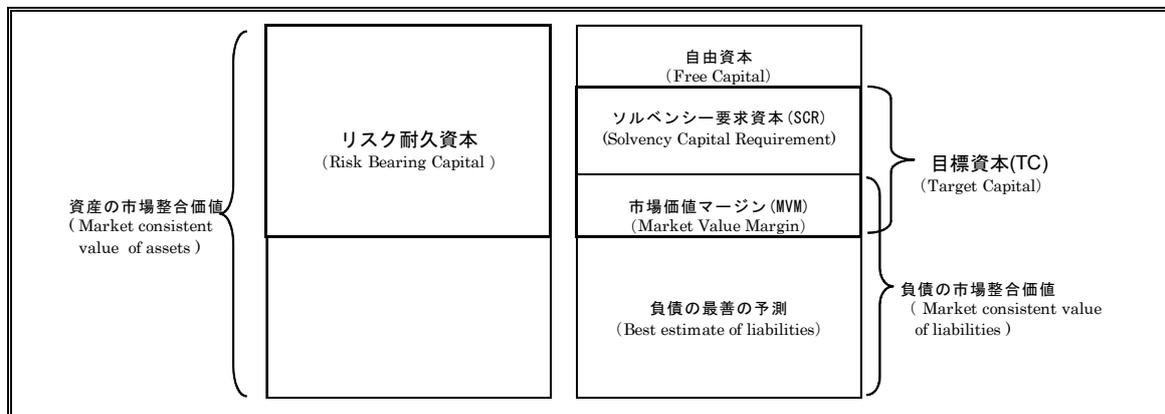
b. スイス・ソルベンシー・テストの法定資本要件

SST では、図表 8 のとおり、ソルベンシー資本要件、市場価値マージン、目標資本、負債の市場整合価値、負債の最善の予測、リスク耐久資本、自由資本の 7 項目を算出し、目標資本 (Target Capital) に対するリスク耐久資本 (Risk Bearing Capital) の

²⁰ 部分内部モデルとは、標準モデルと内部モデルを併用したモデルである。部分内部モデルの使用にも監督者の承認が必要となる。

割合が 100%を超えることによって、ソルベンシー確保を確認する²¹。これら 7 項目の詳細は次のとおりである。

図表 8 SST のバランスシート



(出典：Philipp Keller, Thomas Luder, René Schnieper (FOPI), “SST: Overview” (2006.7) および FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11)をもとに作成)

① リスク耐久資本 (Risk Bearing Capital)

リスク耐久資本は、資産の市場整合価値と負債の市場整合価値の差額に市場価値マージンを加算して評価する。これは、資産市場整合価値と負債の最善の予測との差額にも等しい。

② ソルベンシー資本要件(Solvency Capital Requirement : SCR)²²

ソルベンシー資本要件(SCR)は、金融リスク、保険リスクなどのリスクを、保有期間 1 年、信頼水準 99% Tail VaR と同様な条件で評価したリスク量である。

③ 市場価値マージン (Market Value Margin : MVM) ²³

市場価値マージン(MVM)は、負債の市場整合価値と負債の最善の予測との差額と定義されている。具体的算出方法に関しては、ランオフの場合に必要なソルベンシー資本要件 (Solvency Capital Requirement) の将来の全キャッシュフローに係る資本コストの現在価値の総和として計算する。現在適用している資本コストは 6%であり、割引率はリスクフリー利率²⁴を適用している。

④ 目標資本 (Target Capital : TC) ²⁵

目標資本 (TC) は、必要とする資本である。ソルベンシー資本要件 (SCR) に

²¹ 法定資本要件の充足度合により、100%以上がグリーン、100%~80%がイエロー、80%~33%がオレンジ、33%以下がレッドと 4 段階に分かれており、このレベルによって監督者の対応が異なる。

²² ソルベンシー資本要件 (SCR) の定義は「1 年後のリスク耐久資本の現在価値と現時点のリスク耐久資本の差額に対するショートフォール期待値」である。この詳細は補足資料 E.を参照願う。

²³ 市場価値マージン (MVM) の 理論的な詳細は、補足資料 E.を参照願う。

²⁴ リスクフリー利率とは、リスクが無いと考えられている金利であり、一般に国債の利回りが該当する。

²⁵ 目標資本 (TC) の詳細は、補足資料 E.を参照願う。

市場価値マージン (MVM) を加算した値が目標資本である。

⑤ 負債の市場整合価値 (Market Consistent Value of Liabilities)

負債の市場整合価値とは、流動性市場が存在すればこの市場で負債を評価したであろう金額である。しかしながら、一般には保険の負債を評価できるような流動性市場は存在しない。そこで、SST では負債の最善の予測に市場価値マージン(MVM)を加算した金額を負債の市場整合価値としている。

⑥ 負債の最善の予測 (Best Estimate)

プリンシプルには負債を市場整合的に評価する具体的方法までは規定されていない。一般に認められている方法は、将来のキャッシュフローを予測してリスクフリー利率で現在価値に割り引く方法である。予測に使用する死亡率と事故率などの基礎率は、明示的または暗示的なマージンを含まない最善の予測によって決定する。複製ポートフォリオによって評価する方法も有効である。

⑦ 自由資本 (Free Capital)

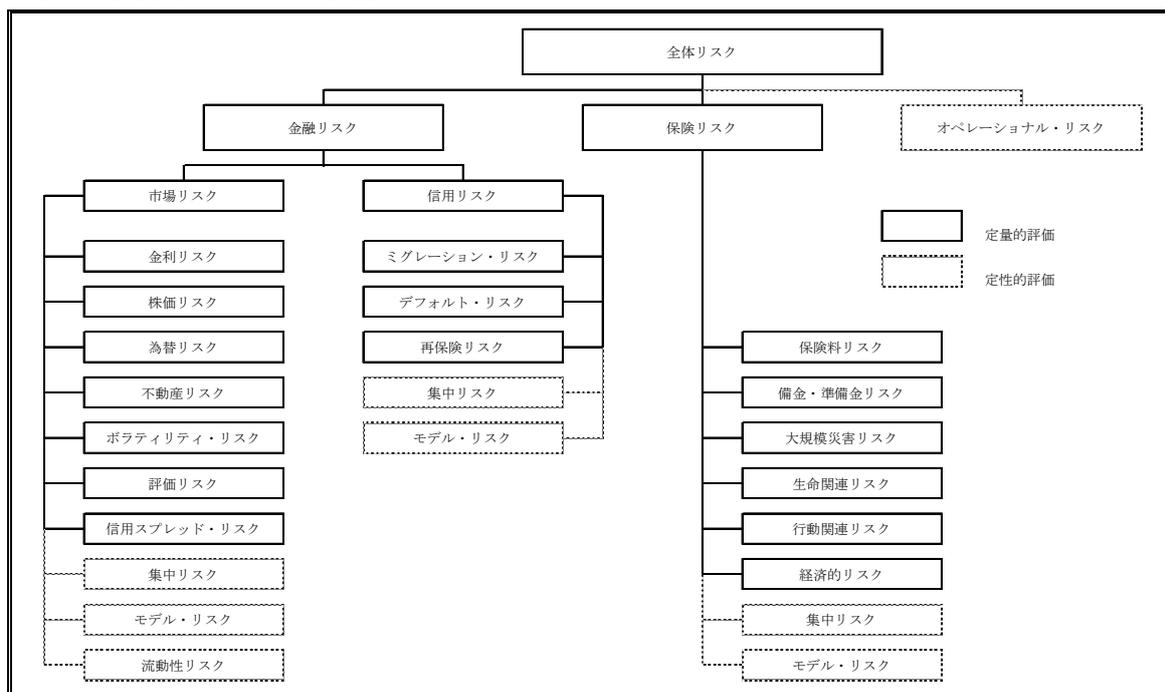
自由資本は、目標資本を上回る部分のリスク耐久資本である。

(2) 標準モデルとシナリオの概要

a. 認識するリスク

SST の標準モデルで認識するリスクの全体像は図表 9 のとおりであるが、定量化して認識するリスクは、市場リスクと信用リスクからなる金融リスクおよび保険リスクである。オペレーショナル・リスクについては、定性的評価のみを行っている。

図表 9 認識するリスク全体像



(注) 市場リスクについては、金利リスク、株価リスク、為替リスク、不動産リスク、ボラティリティ・リスク、評価リスクおよび信用スプレッド・リスクは定量的に評価し、集中リスク、モデルリスクおよび流動性リスクは定性的に評価する。信用リスクについては、マイグレーション・リスク、デフォルト・リスクおよび再保険リスクについては定量的に評価し、集中リスクおよびモデルリスクは定性的に評価する。保険リスクについては、保険料リスク、備金・準備金リスク、大規模災害リスク、死亡率などの生命関連リスク、行動関連（Behavioral）リスクおよび経済的リスクは定量的に評価し、集中リスクおよびモデルリスクは定性的に評価する。

(出典：FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11))

b. 標準モデルとシナリオ

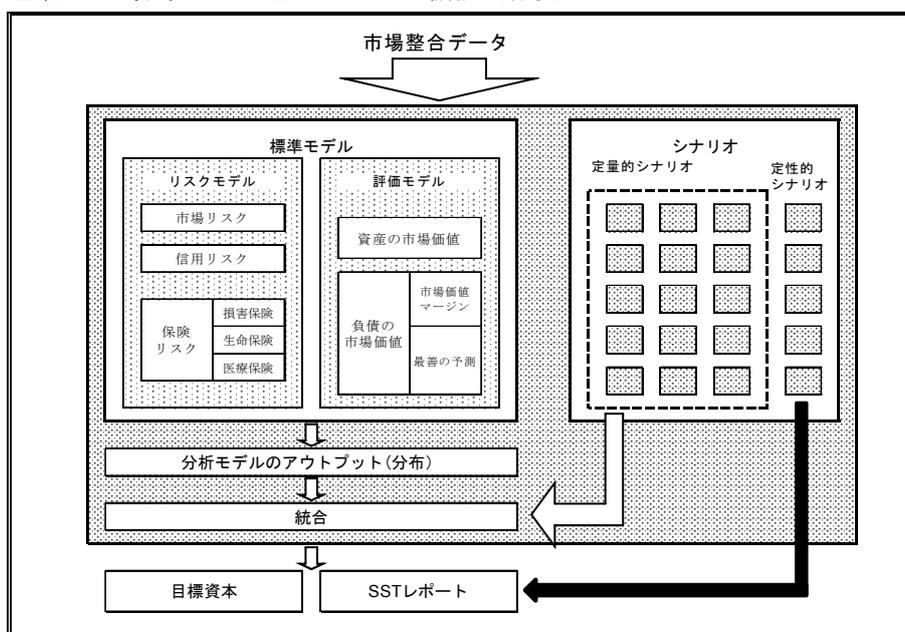
(a) 標準モデル

SSTの標準モデルは、図表10のとおりリスクモデルと評価モデルから構成される。

リスクモデルは、市場リスク、信用リスクおよび保険リスクの3つのリスクを対象とする。市場整合データをベースに各リスクを分析し、各分布を作成したうえで統合して全体の確率分布を作成する。保険リスクは、損害保険リスク、生命保険リスクおよび医療保険リスクからなり、各保険事業の特性に応じた分析と評価を行っている。

評価モデルは、市場整合データとリスクモデル等で作成した確率分布をベースに資産の市場整合価値と負債の市場整合価値を評価している。負債の市場整合価値の内訳となる負債の最善の予測と市場価値マージンは、それぞれ評価している。

図表10 標準モデルとシナリオの機能（概要）



(出典：Philipp Keller, “Swiss Solvency Test” (2007.3) および FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11)をもとに作成)

(b) シナリオ

シナリオは、図表 10 のとおり定量的シナリオと定性的シナリオに分かれている。定量的シナリオは、標準モデルでは十分反映することが難しい極値事象（確率分布のテイル部分）のリスクを評価するために導入されている。例えば、標準資産モデルではリスク要素は標準正規分布に従うとしているが、市場が逼迫した場合には、これは機能しないことが多い。予め定めたシナリオと発生確率に基づき、シナリオに定めた事故発生を想定して損害額を見積もり、これに想定発生確率を乗じることによりリスク量を算出する。定量的シナリオの結果は、標準モデルで推定した確率分布と統合する。

定性的シナリオの実施目的は、確率論的な標準モデルを補完、目標資本以外の幅広い情報を提供、特異なリスクも評価対象、システミック・リスクも評価可能、拡張が容易、経営層との円滑なコミュニケーションおよび監督者や社内の円滑なコミュニケーションなどである。

シナリオの作成にあたり、指名アクチュアリー（Appointed Actuary）が、市場整合価値ベースで所定のシナリオを評価し、会社独自のシナリオを決める。定量的シナリオで適用する確率分布は、監督者または指名アクチュアリーが決定する。

(3) 標準モデルとシナリオの詳細

a. 保険リスク（損害保険リスク）

保険リスクの標準モデルは確率分布を使用したモデルである。ポイントは、保険契約準備金の変動に起因するリスク耐久資本の1年間の変動の確率分布を決定することにある。保険契約準備金の変動は、備金・準備金および保険料などの変動によって決まる。将来のクレーム損害は、大損害と通常の普通損害に分けて取扱う。幾つかの大規模損害（catastrophic loss）にはシナリオを適用する。リスクに関連する損害プール（原子力、航空など）は明示的にモデル化する。

(a) 備金・準備金

備金・準備金リスクは、保有契約の既発生事故に関する備金・準備金の積立水準リスクである。備金・準備金の増減の確率分布を求めるためには、各種目の備金・準備金のボラティリティ（volatility）²⁶の履歴を使用する。種目間の独立性を仮定すると、統合後の分散は各保険種目の分散の合計である。備金・準備金の確率分布は、平均ゼロおよび統合後の分散によって決まる対数正規分布とする。推定した確率分布に基づき将来の支払保険金を推計し、このキャッシュフローをリスクフリー利率で割り引くことにより、将来の支払保険金の現在価値を計量する。

²⁶ ボラティリティとは、資産価格等の変動の激しさを表す変数である。

(b) 保険料リスク

保険料リスクは、新規契約（保有契約の未経過分を含む）の保険料水準に関するリスクである。頻度は高いが損害額が小さい普通損害と、頻度は低いが損害額が大きい大損害に分けて取り扱う。

普通損害モデルは、損害率の変動と将来の収入保険料からなる。全普通損害データから、平均、分散および保険種目間の相関係数を求めて、これらをガンマ分布²⁷に適用する。

大損害モデルは、保険種目ごとに、複合ポワソン分布²⁸を使用する。この確率分布は、クレーム頻度はポワソン分布²⁹を採用し、クレームの損害度合は予め決定したパラメータに基づきパレート分布³⁰を採用して統合したものである。

将来の支払保険金の分布が推定されると、将来の保険金支払を推計し、このキャッシュフローをリスクフリー利率で割り引くことにより、割引後の将来の保険金を推計できる。

b. 市場リスク

市場モデルは、市場のリスク要素に起因する資産と負債に生じる変動を計量化するモデルである。市場モデルでは資産と負債を同時に取り扱う。市場モデルのリスク要素が変化するとリスク耐久資本も変化する。市場モデルでは、監督用モデルとして単純化のため、23の主要な市場リスク³¹に限定しており、国や産業などの特定リスク、集中リスクおよび流動性リスクなどは対象としていない。

c. 信用リスク

再保険者のデフォルトと信用スプレッドを除いたリスクを対象とする信用リスクの計量は、銀行部門の方法を踏襲している。標準モデルでは、オペレーショナル・リスクを除外したバーゼルⅡの標準的方法を採用している。

d. シナリオ

シナリオは、発生可能性のある事象を総合的に記述したものであり、多数のリスク要素を反映し、財政に悪影響のある場合を想定している。シナリオには、定性的シナリオと定量的シナリオがあるが、標準モデルの評価結果に統合できるのは定量的シナリオのみである。具体的な所定のシナリオは図表 11 のとおりである。これらの所定

²⁷ ガンマ分布は、補足資料 B.を参照願う。

²⁸ 複合ポワソン分布は、補足資料 B.を参照願う。

²⁹ ポワソン分布は、補足資料 B.を参照願う。

³⁰ パレート分布は、補足資料 B.を参照願う。

³¹ 金利、金利のボラティリティ、為替、為替のボラティリティ、株価インデックス、プライベート・エクイティ（ある世界的インデックを採用）、ヘッジファンド（ある世界的インデックを採用）、他の株式、株価インデックスのボラティリティ、不動産および信用スプレッドなど。

のシナリオに加えて、会社独自のシナリオを作成することができる。保険会社が独自に作成したシナリオは SST レポートで報告することになっている。

図表 11 シナリオ（定量的シナリオ）

	発生確率	適用する保険事業		
		生命保険	損害保険	医療保険
工場爆発等	0.5%		○	
パンデミック	1.0%	○	○	○
事故（会社からの外出）	0.5%		○	○
事故（サッカー場でのパニック）	—（参考値であり統合せず）		○	○
雹の嵐	—（参考値であり統合せず）		○	
障害率の増加	0.5%	○		
日当の上昇	0.5%			○
再保険者の倒産	再保険者のポートフォリオに依存	○	○	○
金融危機シナリオ	0.5%	○	○	○
デフレ	0.1%	○	○	○
クレームの過小引当	0.5%		○	○
医療保険の逆選択	0.5%			○
市場の歴史的推移シナリオ	それぞれ 0.1%	○	○	○
テロリズム	0.5%	○	○	○
長寿	0.5%	○		

（出典：FOPI, “Technical document on the Swiss Solvency Test” (2006.10)）

e. 統合

各リスクの統合にあたり、図表 12 のとおり、①保険リスク内の統合、②保険と他リスクの統合、③シナリオとの統合の 3 つのステップによって、最終統合後の確率分布を作成する。

① 保険リスク内の統合

普通損害リスクの分布と備金・準備金リスクの分布を、相関係数³²を用いて統合し対数正規分布³³を作成する。次に、この統合後の分布に、大損害リスクの複合ポワソン分布をコンボリューション（convolution）³⁴により統合して保険リスクの確率分布を作成する。（大規模損害は別途シナリオで対応する。）

② 保険リスクと他リスクの統合

保険リスクの分布に、市場リスクの正規分布をコンボリューションにより統合して分布を作成する。さらに、保険リスクと市場リスクを統合した分布に信用リスクを統合して、標準モデルの確率分布を作成する。

③ シナリオとの統合

シナリオのリスクが、標準モデルの確率分布に影響を与えない場合には、シナリオによって推計した損害額に発生確率を乗じてリスク量を算出する。標準モデル

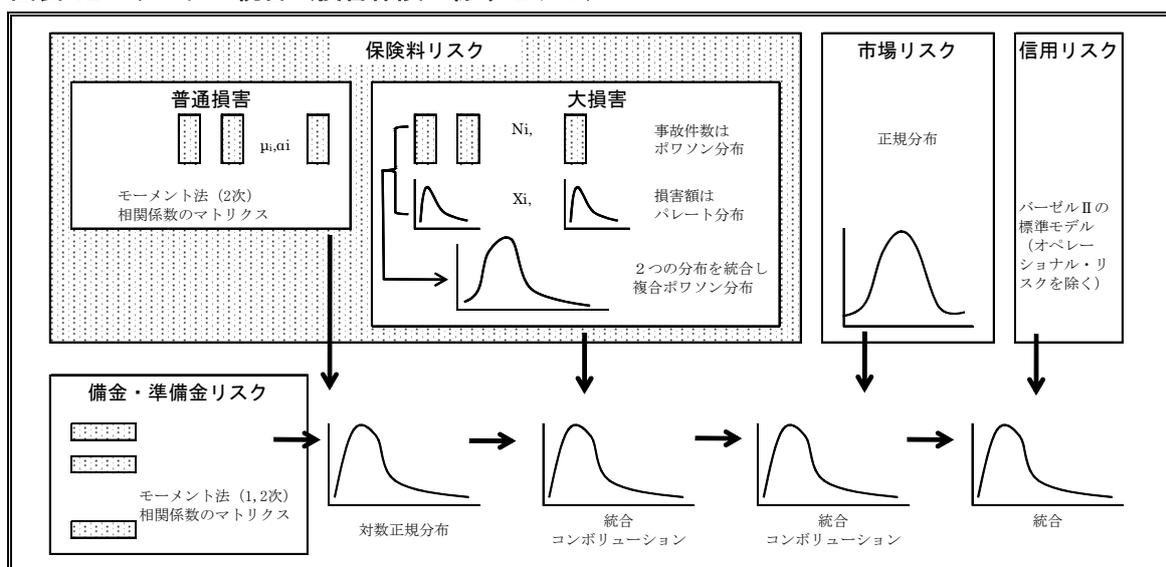
³² 相関係数は変数間の相関関係を表す係数であり、この詳細は補足資料 D.を参照願う。

³³ 対数正規分布は、補足資料 B.を参照願う。

³⁴ コンボリューションの詳細は、補足資料 B.を参照願う。

の確率分布をこのリスク量分だけシフトして確率分布を求める。
標準モデルと相関関係があるシナリオの場合は、シナリオの影響を受けた確率分布と標準モデルの確率分布を確率的に加重平均して、統合後の確率分布を作成する。

図表 12 リスクの統合（損害保険の標準モデル）



(出典：FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11)および Thomas Luder, “Swiss Solvency Test”(2005.9)などをもとに作成)

4. 内部モデルの活用事例

内部モデルに関して比較的情報開示しているスコール社³⁵の内部モデルの活用事例を紹介する。同社は、スイスに本社があったコンベリアム (Converium) 社とドイツに本社があったレビオス (Revios) 社の買収を経て ERM の取組みに注力しており、2009年9月には、スタンダード・アンド・プアーズ (S&P) の実施する ERM 評価が上から2番目の厳格 (Strong) へ格上げされた。

(1) 内部モデルの活用

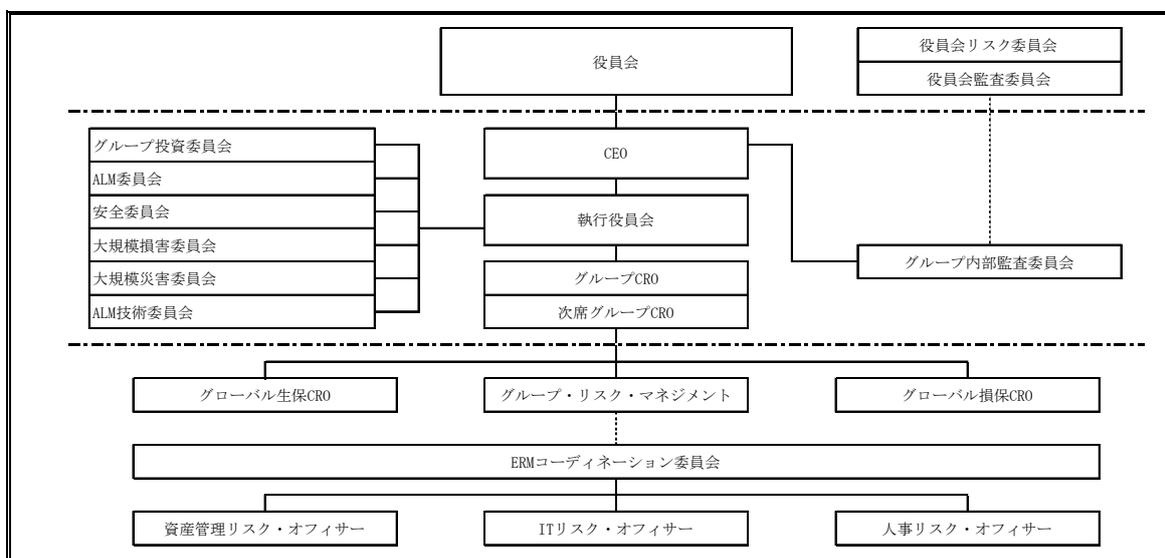
a. リスク管理組織

スコール社のリスク管理を担う ERM 組織は、2009年10月時点では、図表 13 のとおり3層構造からなる。第1層は、役員会、そして役員会の傘下の役員会リスク委員会と役員会監査委員会である。第2層は、CEO、執行役員会、グループ CRO、次

³⁵ スコール社はフランス本社の再保険会社である。本稿執筆にあたり、同社の“Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”, Focus (2009.10)および“From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008)を参考にした。

席グループ CRO を始めとする経営層である。執行役員会の傘下には、グループ投資委員会、ALM 委員会、ALM 技術委員会、安全委員会、大規模損害委員会、大規模災害委員会などがある。また、CEO 直属のグループ内部監査委員会を設置している。第 3 層は、全世界の生命保険地域子会社を管轄するグローバル生保 CRO、全世界の損害保険地域子会社を管轄するグローバル損保 CRO、グループ全体のリスクマネジメントを所管して管理するグループ・リスク・マネジメントである。ERM コーディネーション委員会を設立しており、この委員会には資産管理リスク・オフィサー、IT リスク・オフィサーおよび人事リスク・オフィサーが属している。

図表 13 ERM の関連組織



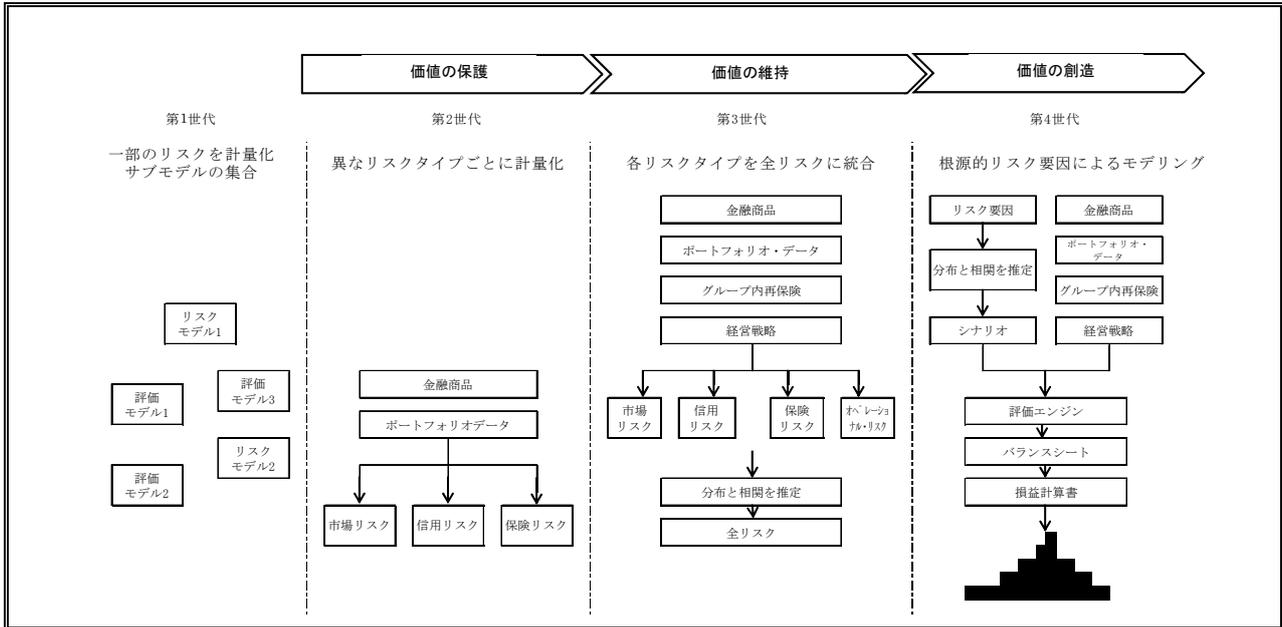
(出典 : SCOR, “Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”, Focus (2009.10))

b. 内部モデルの概念

スコール社の内部モデルは、2003年にコンベリアム社が開発した内部モデルをベースに SST にも対応できるように改善したものである³⁶。内部モデルは、図表 14 のとおり、第 1 世代から第 4 世代に分類できるが、同社の内部モデルは第 4 世代に対応している。第 4 世代の内部モデルは、リスクを認識するだけでなくリスクのポートフォリオ全体を管理することを目的としており、分布の中央付近だけではなく極値事象の分布もモデル化している³⁷。

³⁶ スコール社のスイス現地法人は、スイス所在の保険会社であるため SST を遵守しなければならない。
³⁷ 第 4 世代以前の内部モデルは次のとおりである。第 1 世代は、特定のリスクを計量化しようとするもので、サブモデルの集合であった。19 世紀に生命保険アクチュアリーが死亡表を作成して、リスクすなわち確率を計算したものである。第 2 世代は、マーコビッツのポートフォリオ理論の影響を受けて、リスクをグループ化して取り扱おうとしたもので、1960 年代から 1980 年代まで続いた。第 3 世代は、JP モルガンが 1993 年に公表した VaR によるリスクマネジメント手法である。ポートフォリオ内の所

図表 14 リスクモデルの進化



(出典：SCOR, “Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”, Focus (2009.10))

c. 内部モデルの設計・開発

(a) 目的と要件

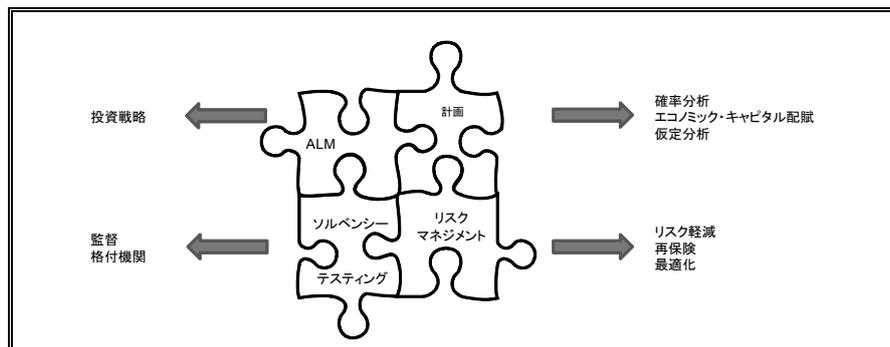
スコール社が、内部モデルを設計・開発する目的は2つある。1つは必要な資本を計量し、保険会社をリスクから守るためである。2つ目は、保険会社内のリスクに関する統一的なコミュニケーション手段を構築するためである。

内部モデルの使用目的は図表 15 のとおり、ソルベンシー規制に従い法定資本を算出、ポートフォリオの中のピークリスクを認識・管理・保護、基本的な計画ツール（例えば、新商品を開発する場合に、成果と必要な資本を計量）および ALM 戦略に活用などである。

なお、スコール社の内部モデルの設計・開発の要件は3つある。第1に、内部モデルでは全てのリスクを考慮しなければならない。損害保険リスク、生命保険リスク、医療保険リスク、市場リスク、信用リスクおよびオペレーショナル・リスクなどを内部モデルの対象とする。第2に、これらのリスク間の全ての相関性を内部モデルに反映しなければならない。具体的には、損害保険リスク内の各リスク要素の相関関係、生命保険リスクと医療保険リスク内の各リスク要素の相関関係、資産内の各リスク要素の相関関係および資産と負債の間の存在する相関関係などである。第3に、分散効果によって得られるメリットを、内部モデルに反映しなければならない。

定のリスクの分布と相関関係から全リスクの分布に統合しリスクを評価する。

図表 15 内部モデルの使用目的



(出典：SCOR, “Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”, Focus (2009.10))

(b) 内部モデルのタイプ

スコール社の内部モデルは、次のとおり①確定値モデル、②確率論的モデル、③シナリオ・モデルの3つのタイプからなる。

実務では、対象とする事象の特性に応じて、これらの3つモデルを併用している。確定値モデルは効率的で結論がすぐ出るが、リスク・エクスポージャーの変化に合わせてリスク要素を常時アップデートしなければならない。確率論的モデルのみを使用する方が効率的と思えるかもしれないが、柔軟で直観的なシナリオ・モデルも利用することにより、確率論的モデルを補完できる。特に極値事象のデータ不足のため、検証が難しいと言われている確率論的モデルの品質を、シナリオ・モデルを併用することによって補える。

① 確定値モデル

リスク要素を推定して確定したうえで、保険料、資産価値および資本要件などに適用するものである。ソルベンシー I³⁸がこのタイプである。

② 確率論的モデル

多様なリスク要素の確率分布を統合したモデルである。通常は、モンテカルロ・シミュレーション (Monte-Carlo Simulation)³⁹が利用される。

③ シナリオ・モデル

保険会社に関わる世界中の多様な状況をシミュレーションするために作成したシナリオによるモデルである。

³⁸ ソルベンシー I では、①過去3年間の損害額の平均値の一定割合か、②前年保険料の一定割合のうち、いずれか大きい金額をソルベンシー・マージンとすると規定されている。

³⁹ 乱数を用いるシミュレーションである。カジノの都市国家モナコ公国のモンテカルロに由来する。

(c) 内部モデルの運用

内部モデルによる定量的リスク管理の推進には、熟練した社員、基礎となる理論、これを実現する IT 技術、結果の分析などがポイントである。この中で特に重要なのが熟練した社員である。熟練した社員とは、定量的リスク管理に関する理論と実践の経験を十分擁しているのみならず、経営層との信頼関係のもとで円滑なコミュニケーションを取れる者を言うとのことである。

(d) 内部モデルの検証

内部モデルの結果と、感応度テスト、予測テストおよびシナリオ・テスト（狭義）の結果を照合することにより、内部モデルを検証できる。例えば、予測テストでは、内部モデルの推計結果と予測を照合する。シナリオ・テストでは、内部モデルと独立なシナリオを作成しこの計算結果を照合する。逆に、内部モデルの結果をシナリオ・テストと比較することによりシナリオ・テストの品質も検証できる。

d. エコノミック・キャピタル

(a) エコノミック・キャピタル評価の指標

スコールが、社内的に必要な資本として採用しているエコノミック・キャピタルの計量に使用するリスク指標は Tail VaR であり、信頼水準は 99%、保有期間は 1 年である。これは、スイスのソルベンシー規制である SST の定める法定資本要件と同水準である。これと同時に、格付機関の定める資本要件なども充足するように対応している。SST の対象は変動リスクの計量であるが、保険会社経営の観点から各ビジネスが機能しているかを検証する必要があるため、並行して保険金支払責任の終了までの期間のリスクも評価している。

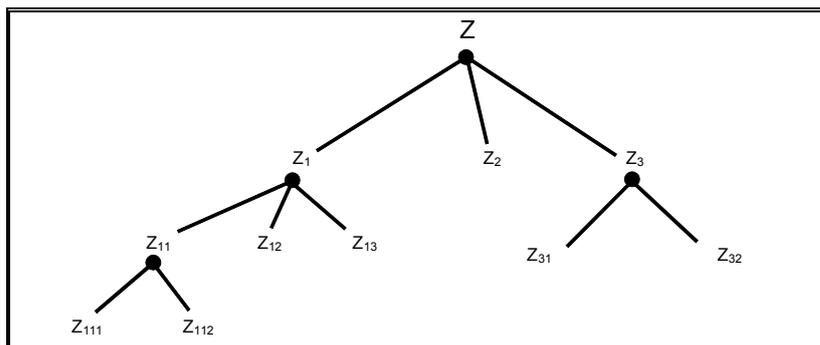
(b) 相関関係

リスク要素間の相関関係を反映してエコノミック・キャピタル計量している。相関関係は、様々なリスク要素の間に存在する。例えば、経済と保険負債の間にも相関関係がある。多くのモデルでは地震は経済と相関性はないと考えられているが、極值的状況では経済に影響を与える。スコール社が採用しているリスク要素 500 が全て独立あるいは反対方向の相関関係にあれば分散効果は大きいですが、実際にはこれらの間の同方向の相関関係によって、分散効果は軽減されている。スコール社は、種目間、子会社間、同一種目の契約間などの相関に注目して、ヒエラルキー構造の相関ツリー⁴⁰を作成したうえで、相関関係を反映している。例えば、3 段階のヒエラルキーの場合には図表 16 のような相関ツリーを作成できる（実務では 7 段階までである相関ツリーを採用しているとのことである）。

⁴⁰ 相関ツリーについては、補足資料 F を参照願う。

また、相関関係の反映方法によって分散効果も異なってくる。例えば、順位相関⁴¹を使用すると分散効果が 30%であったものが、クレイトン・コピュラ (Clayton copula)⁴²を使用すると分散効果が 8%に減少した。スコール社では、相関関係を反映して確率分布を接合する手法であるクレイトン・コピュラまたはグンベル・コピュラ (Gumbel copula)⁴³などを採用している。

図表 16 相関ツリー



(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements”, 2nd edition (2008))

(c) エコノミック・キャピタルの金額

内部モデルにより計量したスコールの 2008 年エコノミック・キャピタルは、図表 17 のとおりである。相関関係による分散効果を反映した分散後の総エコノミック・キャピタルは 3,325 百万ユーロである。分散効果反映しない分散前の総エコノミック・キャピタルは 6,170 百万ユーロであったので、分散効果によりエコノミック・キャピタルが 46%減少したことになる。

図表 17 エコノミック・キャピタルの金額等 (2008 年)

(単位：百万ユーロ)

	分散後エコノミック・キャピタル	比率 (除くオペレーショナル・リスク)
損害保険の新規 (2008 年引受)	800	26%
損害保険の備金・準備金 (含む 2007 年)	1,200	38%
生命保険	700	22%
市場リスク	400	13%
信用リスク	15	1%
オペレーショナル・リスク	210	—
分散後の総エコノミック・キャピタル	3,325	100%
分散前の総エコノミック・キャピタル	6,170	
分散効果	46%	

(注) 生命保険には生命保険の信用リスクと市場価値マージンを含む。信用リスクからは生命保険の信用リ

⁴¹ 順位相関には、ケンドールのタウ (Kendall’s tau) やスピアマンのロー (Spearman’s rho) がある。

これらの詳細は補足資料 D.を参照願う。

⁴² クレイトン・コピュラの詳細は、補足資料 D.を参照願う。

⁴³ グンベル・コピュラの詳細は、補足資料 D.を参照願う。

スクを除く。

(出典：SCOR, “Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”, Focus (2009.10))

e. 極値事象とストレス・テスト

ストレス・テストは、テロリズム、パンデミックおよび電磁場などに活用されている。テロリズムに関しては、例えば、爆弾による火災損害、4箇所への大規模同時爆撃および広島型原爆 10K トンによる攻撃などのシナリオに対する影響をフィールド調査により見積もり、種目ごとの影響を調査している。最も損害額が大きい場合を統合して最大損害額を求め、これらの値がリスク許容度を超えないことを確認している。

パンデミックに関しては、SIR モデルという標準的な免疫学のモデルを使用しており、このモデルは①感染しやすい、②感染、③回復の3つの状態から構成される。パラメータは、人口、感染者数、接触率、感染力、死亡率および回復率などである。死亡率にはパレート分布を使用している。パンデミックに対する統合的な極値事象のシナリオを設定しており、これによって再保険や事業継続プラン等のリスク軽減対策を講じている。

病気を引き起こすと恐れられている電磁場 (Electro Magnetic Fields) リスクに関しては、現実的シナリオと最悪のシナリオの2つのシナリオを作成して、財務的影響を定量的に評価している。

(2) 内部モデルの詳細機能

スコール社の内部モデルは、2003年にALM管理のために導入され、このモデルをベースにSSTへ対応する機能を追加したものである。この内部モデルの機能をドキュメント化したものをALMプロセスと呼んでいる。ALMプロセスに基づき、ITシステム化したものが内部モデルである。ALMでは保険金支払リスクが終了するまでの期間にわたり評価し、SSTでは保有期間 (time horizon) 1年でエコノミック・キャピタルなどを評価している。ALMプロセスは両者に対応している。

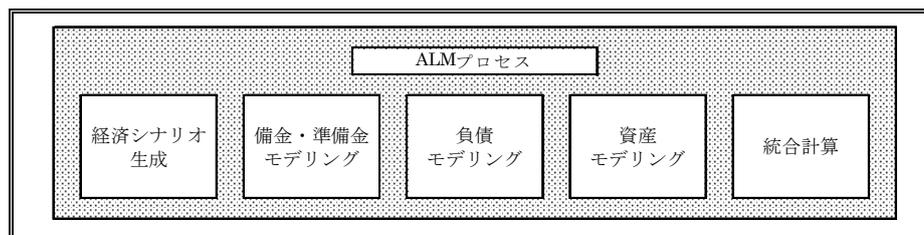
a. ALM プロセスの全体像

ALM プロセスは、各種の基礎的なデータに加えて、リスク許容度、財務計画および資産運用戦略などをインプットとして、ALM レポートとSST レポートを作成する機能を有している。これらのレポートには、主要リスク・クラスにかかるグループのエクスポージャー、所定の計画や資産運用戦略によって必要となる全資本、資産運用成果の予測、戦略的資産配分の提案および目標資本と市場価値マージンの算出などの情報が含まれている。

ALM プロセスはスコール社の金融モデリング・チームが所管し、ALM レポートや

SST レポートは ALM 委員会の承認事項である。プロセス全体はグループ内部監査の監査対象である。ALM プロセスは、次の①経済シナリオ生成、②備金・準備金モデリング、③負債モデリング、④資産モデリング、⑤統合計算の5つのプロセスから構成される（図表 18 参照）。

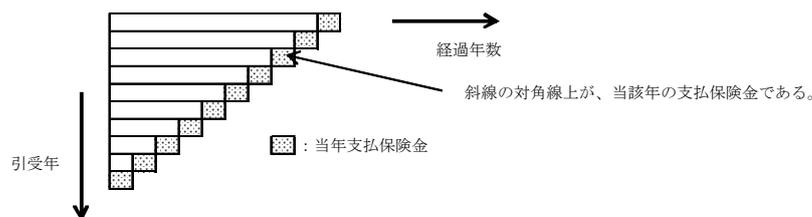
図表 18 ALM プロセス



（出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements”, 2nd edition (2008)）

- ① 経済シナリオ生成
世界経済情勢を予測し多様な経済シナリオを生成する。
- ② 備金・準備金モデリング、
バランスシートをもとに備金・準備金トライアングル⁴⁴（クレーム発生、クレーム支払、保険料受領）から、備金・準備金のランオフの分析やデュレーション⁴⁵の分析だけでなく、負債モデリングで負債キャッシュフロー計算に必要なパターン⁴⁶を推定する。
- ③ 負債モデリング
全体や保険種目ごとの保険金支払モデルを統合する。相関関係もモデルに組み込まれている。保険金支払モデルでは、子会社、種目ごとに毎年の負債キャッシュフロー（グロス）が計算している。さらに、内外の再々保険を差し引き負債キャッシュフロー（ネット）を計算する。
- ④ 資産モデリング
計算の複雑性を回避するために同様な資産は同一クラスに統合する。資産運

⁴⁴ トライアングルとは、次のとおり、引受年に対する経過年数毎の保険金支払額を表したものである。



⁴⁵ デュレーションとは、債券のキャッシュフローおよび債券にリンクしたキャッシュフローの加重平均した残存期間である。金利変化に対する感応度の指標として有効である。

⁴⁶ パターンとは、保険金や保険料などの引受年と経過年の毎年の推移を記述したものである。

用のパフォーマンス、エコノミック・キャピタル、投資資産の感応度および効率的フロンティア⁴⁷による分析などの資産管理を行う。特に、効率的フロンティアに基づき最適な資産配分を求め、実際の資産構成と比較する。

⑤ 統合計算

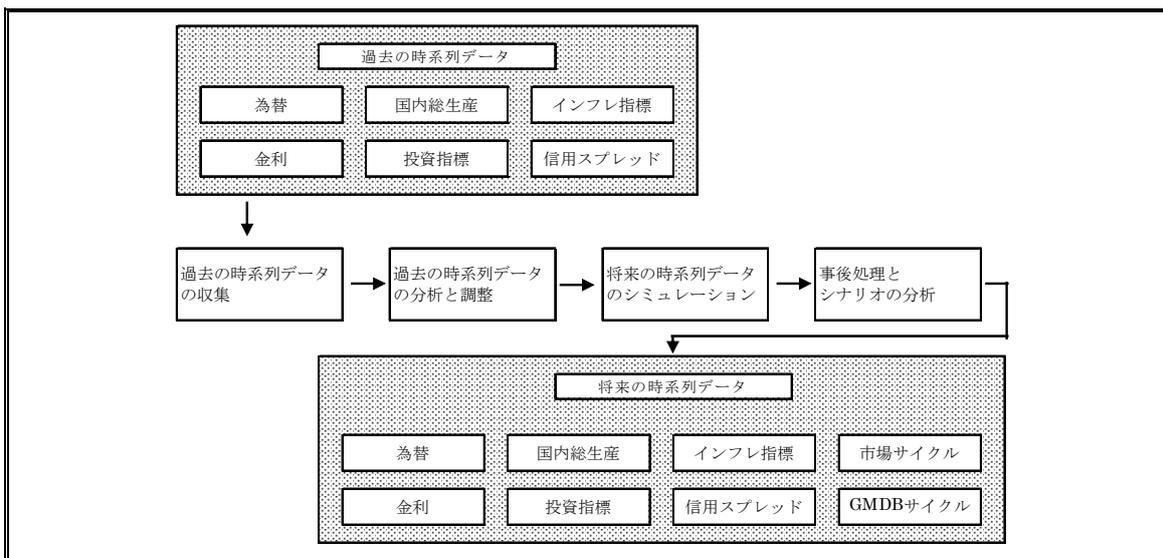
各モデリングの結果を統合する。

b. プロセスの詳細

(a) 経済シナリオ生成

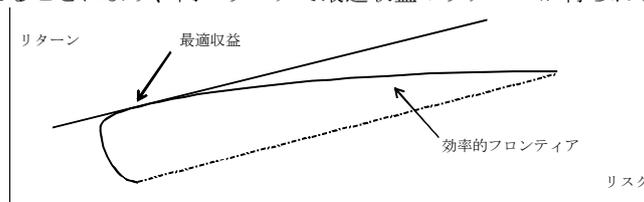
経済シナリオ生成プロセスで、図表 19 のとおり、①過去の時系列データの収集、②過去の時系列データの分析と調整、③将来の時系列データのシミュレーション、④事後処理とシナリオの分析の 4 つの過程から構成される。経済シナリオについては、パッケージ・ソフトウェアを利用する保険会社も多いが、スコール社はブートストラップ法（Bootstrapping method）⁴⁸などを用いて自社開発している。

図表 19 経済シナリオ生成



(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008))

⁴⁷ 効率的フロンティアとは、株式等のポートフォリオにおいて、所与のリスクに対して最大のリターンを得られるポートフォリオをプロットした曲線である。この株式等のポートフォリオとリスクフリー利率の債券を組み合わせることにより、同一リスクで最適収益のリターンが得られる。



⁴⁸ ブートストラップ法とは、母集団のデータから重複を許してランダムにサンプルを抽出し、新たなデータを作成する方式である。この操作を繰り返すことにより、多数のデータを作成でき統計的な処理を行う。単純であるため、母集団の複雑なパラメータ等の情報が不要であることがメリットである。

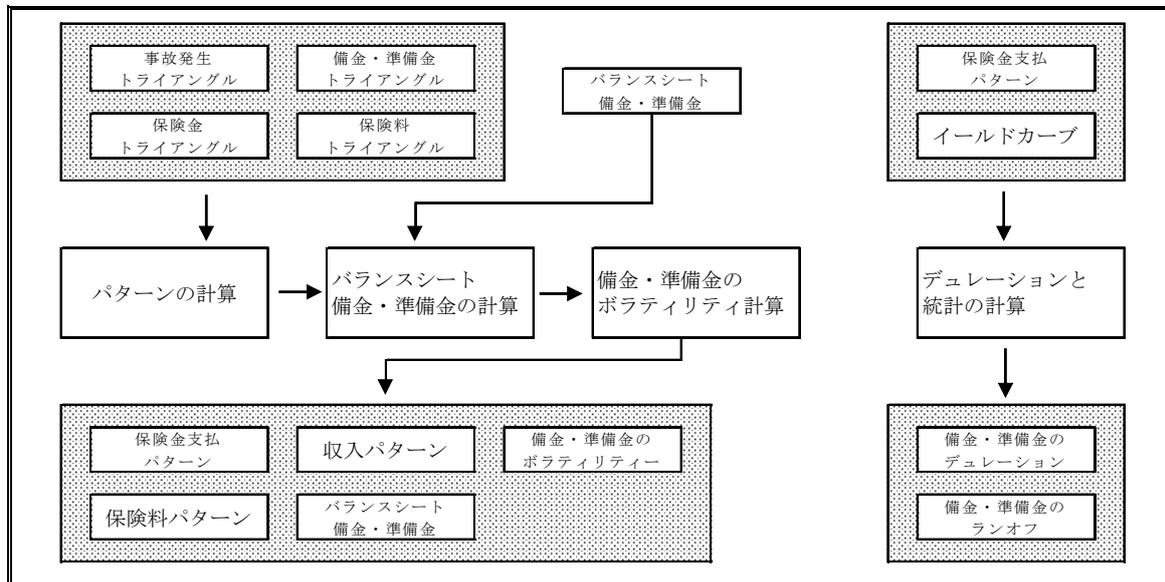
過去の為替、金利、国内総生産（GDP）、投資指標、インフレ指標、信用スプレッドなどの時系列データをもとに上記4プロセスにより推計し、将来の為替、金利、国内総生産、投資指標、インフレ指標、信用スプレッド、市場サイクルおよび変額年金等の最低保証付死亡関連商品⁴⁹サイクルなどの時系列データを生成する。

(b) 備金・準備金モデリング

備金・準備金モデリングでは、図表 20 のとおり、大別すると 2 種類のアウトプットを生成している。

1 つは、発生トライアングル、保険金トライアングル、備金・準備金トライアングル、保険料トライアングルおよびバランスシート備金・準備金をもとに、①パターンの計算、②バランスシート備金・準備金の計算、③備金・準備金ボラティリティの計算の過程によって、保険金支払パターン、保険料パターン、収入パターン、バランスシート備金・準備金、備金・準備金のボラティリティを計算する。2 つ目は、保険金支払パターンとイールド・カーブ（yield curve）⁵⁰をもとに、④デュレーションと統計の計算によって、備金・準備金のデュレーションと備金・準備金のランオフを計算する。これらの機能は、次のとおりである。

図表 20 備金・準備金モデリング



(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008))

① パターン計算

備金・準備金システムから得られる備金・準備金トライアングルをベースと

⁴⁹ 最低保証付死亡関連商品の英文表記は、Guaranteed Minimum Death Benefit（GMDB）である。

⁵⁰ イールド・カーブは、償還期間と利率の関係をグラフ化したものである。

して、チェーン・ラダー方式⁵¹に使用するパターンを計算する。

② バランスシート備金・準備金の計算

チェーン・ラダー方式により、保険種目や子会社ごとの最終的な備金・準備金を計算する。

③ 備金・準備金ボラティリティの計算

備金・準備金トライアングルとパターンをベースとして、備金・準備金ボラティリティを計算する。

④ デュレーションと統計の計算

保険金支払パターンを備金・準備金システムから入手し、過去のイールド・カーブをもとに割り引く。これらのデータをもとに、備金・準備金のランオフと備金・準備金のデュレーションを計算する。

(c) 負債モデリング

負債モデリングでは、図表 21 のとおり、①モデル・バスケット⁵²と相関関係、②保有契約の統合、③計画規模に調整、④再保険⁵³の保険金（グロス）の計算、⑤再々保険回収の計算、⑥備金・準備金の予測計算、⑦キャッシュフローと統計数字の計算の 7 つの過程から構成される。これらの機能は次のとおりである。

① モデル・バスケットと相関関係

全ての保険業務をモデル化する。このモデルは階層構造を持ち、同一階層内のモデル・バスケットの確率分布の統合には、相関関係を反映できるコピュラ⁵⁴を使用する。

② 保有契約の統合

新規契約を推計するために保有契約からの情報を整理する。価格システムから保有契約の個別支払保険金を入手することが多く、モデル・バスケットごとに集計する。

③ 規模の調整

推計モデルの規模を適合するように、保有契約から得られた分布の規模を調整する。この際に、子会社や保険種目ごとに、比例的に取扱えるもの、比例的に取扱えないものに分類する。

④ 再保険の保険金（グロス）計算

統合後の分布と相関関係等によって新規契約の保険金支払モデルを構築する。

⁵¹ チェイン・ラダー方式 (Chain ladder method) は、備金・準備金などを見積もる方式であり詳細は補足資料 C.を参照願う。

⁵² モデル・バスケット (model baskets) とは、モデル化するために特性に基づき分類して集めた保険契約の集合である。

⁵³ スコール社は再保険会社であるため再保険契約を対象とするが、保険会社の場合は保険契約となる。

⁵⁴ コピュラの詳細は、補足資料 D.を参照願う。

保険金支払モデルによって保険金支払額を推計する。過年度に引受けた保有契約の未経過部分にも同様な計算を適用する。保険金支払パターンは備金・準備金モデルから入手し、毎年の保険金支払キャッシュフローの計算に使用する。インフレ指標と市場サイクルは、経済シナリオとともに再保険金の相関関係などに反映している。信用サイクルは再保険契約の信用リスクの計算に使用している。

⑤ 再々保険回収の計算

内外の再々保険からの回収を計算する。これによって、キャッシュフロー（グロス）からキャッシュフロー（ネット）を算出する。

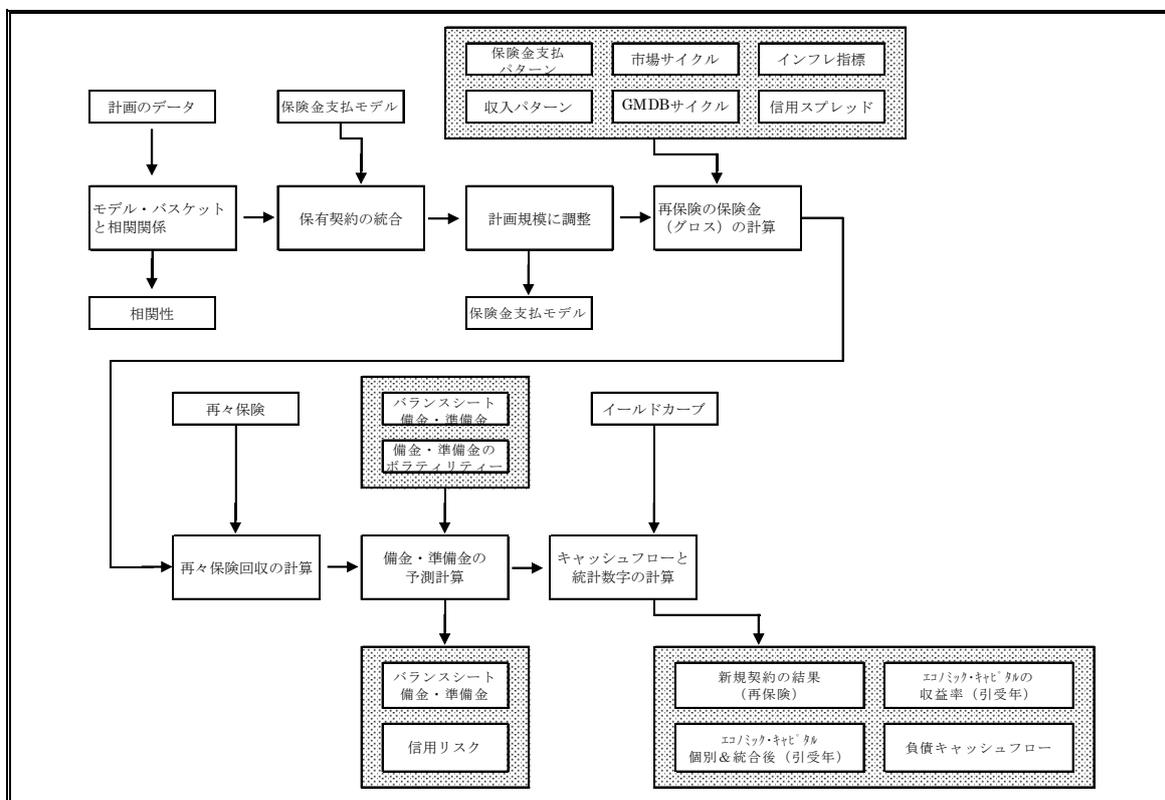
⑥ 備金・準備金の予測計算

初期バランスシートから備金・準備金の情報を入手する。備金・準備金の対数正規分布に備金・準備金のボラティリティを適用し、毎年の備金・準備金の推移を推計する。この推計結果をもとに将来のバランスシートを作成する。

⑦ キャッシュフローと統計数字の計算

新規契約、再々保険の回収、備金・準備金などの将来推移から負債のキャッシュフローを計算する。さらに、各種のデータと合わせて保険種目や子会社ごとの各種統計数値を計算する。

図表 21 負債モデリング

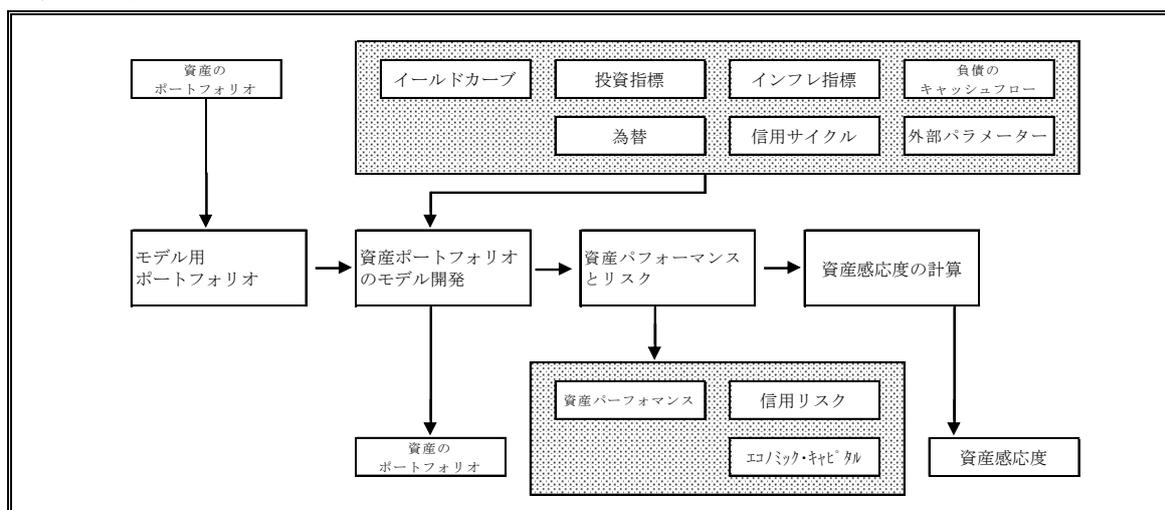


(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008))

(d) 資産モデリング

資産モデリングの主要目的は、資産運用のパフォーマンスとリスクを計算することである。資産のポートフォリオは、負債のキャッシュフローを考慮したうえで評価する。資産モデリングでは、図表 22 のとおり、①モデル用ポートフォリオ、②資産ポートフォリオのモデル開発、③資産パフォーマンスとリスク、④資産感応度の計算の 4 過程から構成される。これらの機能は次のとおりである。

図表 22 資産モデリング



(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008))

① モデル用ポートフォリオ

計算を簡素化するために、資産モデリングの最初の過程で資産ポートフォリオをクラスに区分する。この際に、全資産クラスに区分するのではなく、主要特性によってグループ化したうえで資産クラスを形成する。

② 資産ポートフォリオのモデル開発

クラスに区分した資産から構成されるポートフォリオの推移を計算する。このために、全資産を評価し、資産のキャッシュフローを推計し、これから負債のキャッシュフローを控除する。この控除後のキャッシュフローに基づき、戦略的資産配分を達成できるように資産構成を変更する。

③ 資産パフォーマンスとリスク

期初と期末の資産ポートフォリオから、資産のパフォーマンスを計算する。資産に関するエコノミック・キャピタル（単独）を計算する。更に、社債の信用リスクを計算する。

④ 資産感応度の計算

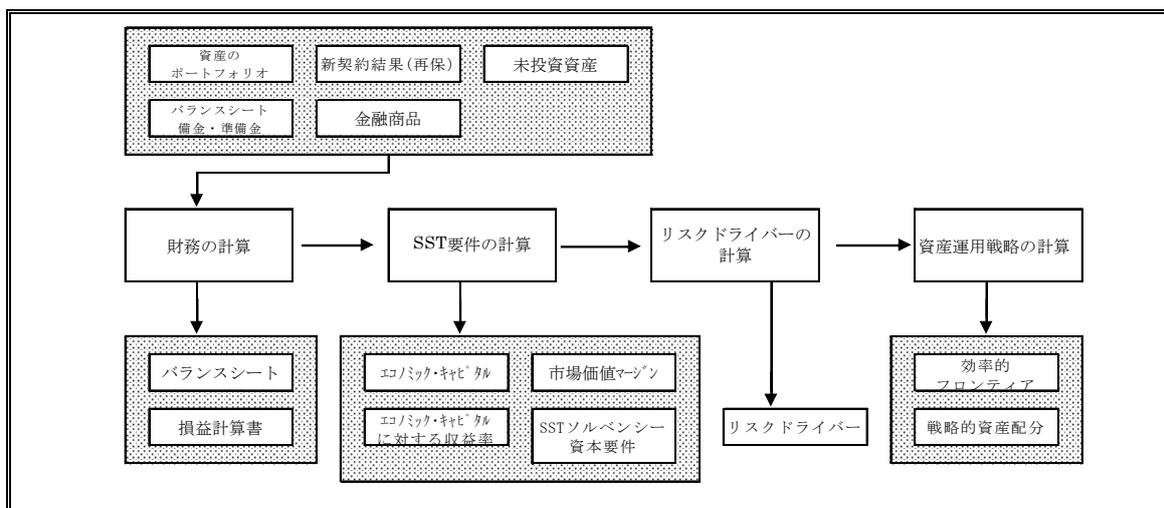
金利変動や株式市場の危機などの経済シナリオが資産ポートフォリオに与える影響である資産感応度を求める。これは戦略的資産配分にとって重要なス

トップである。

(e) 統合計算

統合計算は ALM プロセスの最終過程であり、キャピタル・マネジメントや SST に必要な結果を計算する。統合計算は、図表 23 のとおり、①財務の計算、②SST要件の計算、③リスクドライバー⁵⁵の計算、④資産運用戦略の計算の 4 過程から構成される。これらの機能は次のとおりである。

図表 23 統合計算



(出典：SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements” 2nd edition (2008))

① 財務の計算

最終的な資産ポートフォリオ、損害統計およびバランスシート備金・準備金などから、会計基準と市場価値ベースの2つの基準に基づき、バランスシートと損益計算書を計算する。

② SST要件の計算

エコノミック・キャピタル、エコノミック・キャピタルに対する収益率、SSTの法定資本と市場価値マージンを計算する。エコノミック・キャピタルは、分散効果の反映前後の両方を計算する。

③ リスクドライバーの計算

資産と負債のリスクドライバーを計算する。

④ 資産運用戦略の計算

様々な資産ポートフォリオの配分を試み、その推移を推計する。この結果を効率的フロンティア上にプロットし、戦略的資産配分を決定する。

⁵⁵ リスクドライバー (risk driver) とは、リスクの要因のことである。

5. 定量的リスク管理の活用

(1) 定量的リスク管理の状況と整理

定量的リスク管理の活用に関して、エコノミック・キャピタル等とストレス・テストを、モデリング、ガバナンスおよび監督と情報開示の観点から、以下のとおり整理する⁵⁶。

a. モデリングの視点

エコノミック・キャピタル等とストレス・テストについて、図表 24 のとおり、確定値モデル、確率分布モデルおよびシナリオ・モデルの視点から考察する。確定値モデルはリスク要素を決定論的に評価するモデルである。確率論的モデルは、確率分布によって評価するモデルである。シナリオ・モデルは多様なリスク要素からなるシナリオによって評価するモデルである。これは決定論的モデルの一種であるが複数の選択肢とこれらの発生確率も勘案することがある。なお、シナリオには定量的シナリオと定性的シナリオがある。定量的シナリオはエコノミック・キャピタル等の計量に使用されることがあり、定性的シナリオはストレス・テストに用いられる。

図表 24 定量的リスク管理の目的とモデリング

目的		モデリング		
		確定値モデル	確率論的モデル	シナリオ・モデル
エコノミック・キャピタル等	エコノミック・キャピタル	・確率論的モデルとの併用も可能	・主要モデルである	・確率論的モデルとの併用も可能
	法定資本要件	・確定値モデルを採用する制度あり（ソルベンシー等）	・確率論的モデルを採用する制度あり（ICAS, SST, ソルベンシー II 等）	・シナリオ・モデルを採用する制度あり（SST 等）
ストレス・テスト	感応度テスト	—	—	・主要モデルである
	ストレス・テスト（狭義）	—	・確率論的モデルも使用可能である	同上
	シナリオ・テスト	—	同上	同上

(a) エコノミック・キャピタル等

エコノミック・キャピタルの評価にあたり、中心となるのは確率分布モデルである。確率分布モデルでは、一般的に解析解の導出が難しいので、モンテカルロ・シミュレーションを適用することが多い。なお、確率分布では極値事象を反映することが難しいので定量的シナリオによるシナリオ・モデルを併用することがある。また、リスクによっては確定値モデルを併用する場合もある。

法定資本要件の評価は、規制によって異なる。例えば、ソルベンシー I のように

⁵⁶ エコノミック・キャピタル等とは保険者が任意に採用しているエコノミック・キャピタルと監督目的のための法定資本要件をいい、ストレス・テストは感応度テスト、ストレス・テスト（狭義）およびシナリオ・テストを総称することとする。

過去の保険料や損害額に所定の係数を乗ずる規制の場合には、確定値モデルで十分対応できる。SSTの標準モデルの場合には、確率分布モデルである標準モデルに加えて、極値事象を評価する定量的シナリオを統合して法定資本要件を評価する。

(b) ストレス・テスト

感応度テストは、シナリオ・モデルによって評価される。金利変動リスクの場合に幾つかの変動幅でテストするように、複数のシナリオを採用することが多い。

ストレス・テスト（狭義）は、シナリオ・モデルによって評価されることが一般的である。ストレスを負荷するリスク要素の変動幅を変えるなど、複数のシナリオを採用することが多い。

シナリオ・テストは、多様なリスク要素を用いて複雑なシナリオによって評価される。楽観的シナリオ、通常のシナリオおよび悲観的シナリオなど複数のシナリオを使用することができる。初期事象だけではなく、長期間にわたりカスケード的に生じる後発事象をシナリオに組込むこともある。

b. ガバナンスの視点

エコノミック・キャピタル等とリスクの影響度であるストレス・テストについて、図表 25 のとおり、経営の意思決定に反映、社内業務への組込および理解の容易度合の観点から整理する。

図表 25 定量的リスク管理の目的とガバナンス

ガバナンス		経営の意思決定に反映	社内業務への組込	理解の難易度
目的				
エコノミック・キャピタル等	エコノミック・キャピタル	・重要な指標として経営判断に活用	・各種社内指標、業務に組込む	・計量方法の理解は困難 ・計量結果の理解は困難
	法定資本要件	・重要な指標	—	・一般的には同上 (制度によって異なる)
ストレス・テスト	感応度テスト	・経営の参考数字	・業務の参考数字	・計量方法の理解は容易 ・計量結果の理解は容易
	ストレス・テスト（狭義）	・極値事象に対処するための経営の判断数字 ・テスト結果の対処には高度な判断が必要	・緊急事態発生に対処するためのアクション計画を策定	同上
	シナリオ・テスト	・複雑な極値事象に対処するための経営の判断数字 ・テスト結果の対処には高度な判断が必要	同上	・計量方法の理解は比較的容易 ・計量結果の理解は比較的容易

(a) エコノミック・キャピタル等

ERM が浸透している保険会社では、エコノミック・キャピタルが社内の多くの業務に組込まれ、共通の指標として、意思決定や評価に活用されている。さらに、経営層レベルの重要な判断にも重要な指標となっている。なお、エコノミック・キ

CAPITALは確率分布に基づく複雑な計算を経て計量されるリスク量であるため、専門家でないと計量方法や計量結果を理解することは難しい。

法定資本要件は、監督者が規定する重要な要件であるため、経営層は重要な指標と認識し、これを割込まないように最大の注意を払っている。なお、ソルベンシー規制の制度内容にもよるが、ソルベンシー I のような単純な制度でない場合には、計量方法や計量結果を理解することは一般的に難しい。

(b) ストレス・テスト

感応度テストで評価した感応度は参考数字として取り扱われることが多いので、経営判断における重要度は比較的低い。特定リスク要素の小幅な変動の影響を評価するため、計量方法および計量結果は理解され易い。

ストレス・テスト（狭義）は、極値事象に対する経営判断のためのテストであり、テスト結果の対処方法の判断は難しい。発生確率が不明あるいは低いが、悪影響の度合いが大きいことが判明した場合に、行動は起こさない、モニタリングに留める、一定の予防行動を発動するなどの対応には、高度な判断が必要となる。一定の予防行動を発動する場合には、重要度のレベルに応じて、緊急事態発生に対処するためのアクション計画を定めて社内業務に組み込むことは極めて有効である。なお、特定リスク要素の大幅な変動の影響を評価するため、計量方法および計量結果の理解は容易である。

シナリオ・テストは、ストレス・テスト（狭義）と同様に、経営にとって重要なテストであり、対処方法についても高度な判断が必要となる。緊急事態発生に対処するためのアクション計画を定めて社内業務に組み込むことは極めて有効である。なお、ストレス・テスト（狭義）等と比べるとシナリオが複雑になるため、計量方法や計量結果の理解は比較的容易な水準へ難易度が上がる。

c. 監督と情報開示の視点

エコノミック・キャピタル等とストレス・テストについて、図表 26 のとおり監督と情報開示の視点から整理する。

(a) エコノミック・キャピタル等

エコノミック・キャピタルを主要な指標として行う ERM などのリスクマネジメントに関して、監督者が保険者のガバナンス等の定性的側面を監督する動きがある⁵⁷。さらに、エコノミック・キャピタルを情報開示することにより、市場等からの信頼を得られるメリットがある。

⁵⁷ EU で 2012 年に導入が予定されているソルベンシー II は 3 つの柱から構成され、定量要件（第 1 の柱）に加えて、定性要件とこの監督（第 2 の柱）、さらに情報開示（第 3 の柱）が規定されている。

法定資本要件は、ソルベンシー規制の柱である。この情報開示は規制の定めによるが、一般的に公開されている。情報公開により市場規律による効果が期待できる。

(b) ストレス・テスト

感応度テストは、監督者が全ての保険会社にこのテストを課すことにより、保険業界全体の状況や個社の相対的状況を把握することができる。保険会社の実施した感応度テストの結果はアニュアル・レポートなどに公開していることもある。

ストレス・テスト（狭義）においては、監督者が、極値事象によるストレス下で保険業界全体が受ける影響と個社の相対的な影響度合を把握できる効果がある。

シナリオ・テストについては、監督者が、複雑で極端なシナリオ下で保険業界全体が受ける影響と個社の相対的な影響度合を把握できる。例えば、システミック・リスクなどの影響の把握に有効であると考えられている。

なお、ストレス・テスト（狭義）およびシナリオ・テスト結果の情報開示には、慎重な配慮が必要である。極値事象による悪環境下での対処能力を公開することには一定の効果が期待できるが、悪影響下での情報公開を推進すればするほど競争力を失う可能性が高い。特に、監督者からテスト結果の情報公開を強制された場合には、結果を公開したくないため、本当は必要な悪条件のシナリオを採用しないことが懸念される。情報公開のために本来必要なテストを実施しないことは、本末転倒である。

図表 26 定量的リスク管理の目的と監督・情報開示

監督・情報開示		監督	情報開示
目的			
エコノミック・ キャピタル等	エコノミック・ キャピタル	・リスク管理に関する定性的要件を監督する 制度がある	・会社方針により情報公開する ・公開情報の細分度も会社方針による ・公開することにより市場の信頼を獲得できる
	法定資本要件	・法定資本要件は監督のための要件である	・情報公開は規制に従うが一般的に公開する ・情報公開により市場規律の効果が期待できる
ストレス・ テスト	感応度テスト	・全保険者に課し業界全体の状況を把握する ・全保険者に課し個社の相対状況を把握する	・会社方針により情報公開する
	ストレス・ テスト（狭義）	・全保険者に課すことにより、極値事象による 全社的な影響を把握する ・全保険者に課すことにより、極値事象による 個社の相対的影響度合を把握する	・悪環境下での対処能力を示すことにより、ス テークホルダーの信頼と理解を得られる ・一方、悪影響下の情報公開の露出度が高いほ ど、競合他社や市場での競争力を喪失する ・情報公開を強制された場合には、悪条件シナ リオの適用を躊躇する恐れがある
	シナリオ・ テスト	・全保険者に課すことにより、複雑な極値事象 による全社的な影響を把握する ・全保険者に課すことにより、複雑な極値事象 による個社の相対的な影響度合を把握する	同上

(2) 定量的リスク管理と内部モデルの在り方

定量的リスク管理とこれを実現するツールである内部モデルの在り方について、以下のとおり整理する。

a. 定量的リスク管理の在り方

定量的リスク管理において、エコノミック・キャピタル等とストレス・テストは相互補完する存在である。エコノミック・キャピタルは平常時の業務に適しており、保有するリスク量の指標として、社内外のコミュニケーション手段として活躍する。一方、ストレス・テストは緊急事態の対処に適している。両者を併用することが必須であると考えられる。これらを計量するためには、エコノミック・キャピタルは過去の情報を活用できる確率分布を採用すること、ストレス・テストは将来動向を想定するためシナリオを中心に実行することが適切である。

定量的にリスクを計量することは、リスク管理の第一歩である。重要なことは、計量結果を分析すること、分析に基づき対応計画を策定し、必要に応じて計画を実行に移すことである。このためには、経営層の深い理解と社内の関連部門との連携が必要である。さらに、社内だけではなく、監督者との円滑な関係、必要に応じた情報開示によって市場の信頼を獲得することも重要である。

b. 内部モデルの在り方

内部モデルを使用せずに、整合性を取りながらエコノミック・キャピタル等とストレス・テストを実行することは困難である。内部モデルでは、確率分布モデルやシナリオ・モデルの両方を運用できるので、両者を統一的に計量できる。内部モデルを用いなくとも、既存のシステムとデータをパッチワーク的に繋ぎあわせることにより、法定資本要件の算出やストレス・テスト（狭義）などの対処は可能かもしれないが、計量条件の柔軟性や計量結果の統一性に欠ける。内部モデルの利用によって初めて、柔軟で統一性のあるリスクの定量化が実現でき、この成果物を保険会社の経営に真に活用できると考える。

さらに、内部モデルに確率分布を適用して推計した結果と、シナリオを適用して予測した結果を照合することにより、確率論的モデルの検証とシナリオ・モデルの検証、さらに内部モデル自体の機能チェックにも利用できる。このため、内部モデルの使用によって、信頼性の高い計量結果とこれに基づく計画を立案できると考える。

なお、内部モデルの開発・運用のコアとなるのは人材である。保険数理理論や IT 技術に造詣が深く、経営層と相互信頼に基づく円滑なコミュニケーションを取れる熟練した社員が内部モデルを担当することが理想であると考えられる。

6. おわりに

ERM を始めとするリスク管理は、定量的リスク管理、ガバナンスなどの定性的リスク管理、ソルベンシー規制等の監督者との関係および情報開示等の市場規律など様々なものから成り立っている。本稿では、定量的リスク管理に関して、特に定量的リスク管理の主要課題であるエコノミック・キャピタルおよびストレス・テスト、さらに、これらの実現に不可欠なツールである内部モデルを中心に整理してきた。

日本における定量的リスク管理の歴史は深いとは言えない。リスク管理の基礎となる定量的リスク管理に関して、経営層がこの効用と必要性を理解し、担当する社員が理論と実践の経験を十分積み、会社全体に理念が浸透し、保険会社経営に生かすことが鍵になると考える。保険会社が、定量的リスク管理をベースにERMを推進することにより、契約者、資本提供者、監督者、市場などのステークホルダーの信頼を得て、保険業界が一層健全に発展することを祈念する。

補足資料

補足資料 A. 監督者のための内部モデルの使用に関する指針 (IAIS)

補足資料 B. 確率分布

- B1. 各種確率分布
- B2. コンボリューション

補足資料 C. 数理的分析法

- C1. チェイン・ラダー法
- C2. マック法

補足資料 D. 相関関係

- D1. 相関係数
- D2. コピュラの定義
- D3. スクラーの定理
- D4. コピュラの特徴
- D5. 各種コピュラ
- D6. 順位相関

補足資料 E. スイス・ソルベンシー・テスト (SST) の数理

補足資料 F. 内部モデルにおける相関ツリー

- F1. 相関ツリー
- F2. 相関ツリーとコピュラ

A. 監督のための内部モデルの使用に関する指針 (IAIS)

IASA が公開している「監督者のための内部モデル使用に関する指針」の要件部分について、次のとおり紹介する

監督者のための内部モデルの使用に関する指針 (要件の要約)

	要件の内容
要件 1	ソルベンシー制度において、リスクマネジメントとキャピタル・マネジメントの連携促進のために、法定資本要件決定に内部モデルの使用を承認する場合は、共通のモデリング基準を制定すべきである。
要件 2	内部モデル使用を承認する場合、監督者は異なる水準の法定資本要件（規定資本要件および最低資本要件を含む）ごとに承認条件を設定すべきである。最低資本要件に内部モデルの使用を承認する場合、これを下回ったときには強権発動もあり得るので、特別な注意が必要である。例えば、内部モデルの適否が法廷で論争されることもある。
要件 3	保険者が法定資本要件の計算に内部モデルを使用するときは、事前に承認を得るべきである。
要件 4	法定資本要件のために内部モデルを構築する際は、保険者は、リスク戦略や事業目的におけるリスクの性質、規模および複雑度合に適合したリスクモデリング技術と方法を採用すべきである。
要件 5	法定資本要件に使用する内部モデルの検証にあたり、監督者は少なくとも「統計品質テスト」、「キャリブレーション・テスト」、「使用テスト」の3種類のテストを保険者に要請すべきである。
要件 6	法定資本要件に内部モデルを使用する適正性の挙証責任は保険者が負うべきである。
要件 7	保険者は、内部モデルの基本的な定量的方法を評価する「統計品質テスト」を実施すべきである。このテスト過程において、保険者は、モデルの基礎となるインプットやパラメータの選定を含む方法の適正性を立証すべきである。さらに、内部モデルに用いる前提の正当性も主張すべきである。
要件 8	保険者は、内部モデルによる法定資本要件を決定にあたり、全リスクを対象とし、正確で完全な使用データを確保しなければならない。
要件 9	保険者は、内部モデルによる法定資本要件がモデリング基準を充足していることを立証するために「キャリブレーション・テスト」を実施すべきである。
要件 10	保険者は、内部モデル（方式と結果）をリスク戦略やオペレーションに確実に組込むべきである。（使用テスト）
要件 11	保険者の役員および執行役員は、リスクマネジメント目的の内部モデルの開発と使用に関して全面的コントロールと責任を負うべきであり、組織に適合した水準の内部モデルを開発すべきである。特に、保険者の役員および執行役員は、リスクマネジメントとキャピタル・マネジメントに関する内部モデルの出力情報とその限界から導かれた結論を理解すべきである。
要件 12	保険者は、内部モデルに関して十分なガバナンスと内部統制を実行しなければならない。
要件 13	保険者は、理論的根拠や前提を含む内部モデルの設計と開発を文書にすべきである。これによって、上記3種類のテストを含む内部モデルの要件に準拠していること立証できなければならない。
要件 14	監督者は、内部モデルの性能をモニターし仕様の適正性を継続的に検証して認証することを、保険者に要請すべきである。環境が変更した場合、保険者は上記3種類のテストに関して内部モデルが法定資本要件目的に適合していることを確認し、実証できるべきである。
要件 15	内部モデルに重大な変更が生じた場合、法定資本要件目的に内部モデルを使用することの検証と継続的承認を得るために、保険者は監督者に報告しなければならない。
要件 16	保険者は、内部モデルの変更事項を適切に文書化すべきである。
要件 17	保険者は内部モデルに関する情報につき、監督者への報告と情報公開の両方を行うべきである。 a. 監督者は、必要に応じて、レビューや内部モデルの継続承認に必要な情報を保険者に要請できる。この情報には、内部モデルによるリスク評価およびこの運用によって導かれた資本評価と同様に、内部モデルをガバナンス、オペレーションおよびリスク戦略に組込む詳細な方式も含むべきである。 b. 監督者は、情報の独自性と守秘性を十分考慮した上で、適正な水準で情報公開することを検討しなければならない。

(出典：IAIS, “Guidance paper on the use of internal models for regulatory capital purposes” (2008.10))

B. 確率分布

B.1 各種確率分布

主要な確率分布について次のとおり紹介する。

(1) 正規分布

$$\text{正規分布の分布関数： } \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

(注) 平均 μ 、分散 σ

(2) 対数正規分布

$$\text{対数正規分布の分布関数： } \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

(注) 平均 μ 、分散 σ

(3) ポワソン分布

$$\text{ポワソン分布の分布関数： } \sum_{k=0}^n \exp(-\lambda) \frac{\lambda^k}{k!}$$

(注) k 回発生、平均 λ 、分散 λ

(4) 複合ポワソン分布

$$\text{複合ポワソン分布の分布関数： } \sum_{k=0}^n \exp(-\lambda) \frac{\lambda^k}{k!} F^{k*}(x)$$

(注) $F^{k*}(x)$ は、 $F(x)$ を k 回コンボリューションした関数

(5) パレート分布

$$\text{パレート分布の分布関数： } 1 - (\kappa/x)^\alpha$$

(注) $x < \kappa$ では 0

(6) ガンマ分布

$$\text{ガンマ分布の分布関数： } \int_{-\infty}^x \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\beta x) dx$$

(注) $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} \exp(-x) dx$ 、 $\alpha, \beta > 0, x > 0$

B.2 コンボリューション

確率変数の和の分布を求める方法としてコンボリューション (convolution: 畳み込み) が知られている。 x_1, x_2 は独立変数、 $w = x_1 + x_2$ 、密度関数 $f_1(x_1), f_2(x_2)$

$$\text{コンボリューション： } h(w) = \int_{-\infty}^\infty f_2(w - x_1) f_1(x_1) dx_1$$

C. 数理的分析法

事故から保険金支払まで一定の期間を要する。事故年度 i 、経過年度 k の累積保険金 $D_{i,k}$ を推定する方法を、以下のとおり 2 種類紹介する。

(注 1) $D_{i,k}$: 事故年度 i 、経過年数 k の累積発生保険金 (累計保険金 + 未払保険金)
保険事故は N 年で完了

(注 2) 本項目の執筆にあたり、社団法人 日本アクチュアリー会『確率論的アプローチによる保険負債の時価評価』(2005.7) および Thomas Mark, “Distribution-free calculation of the standard error of chain ladder reserve estimates” (1993) を参考にした。

C.1 チェイン・ラダー法

1 年から k 年目までの保険金データがあるときの次年度の保険金を定義する。

$$E(D_{i,k+1} | D_{i,1} \cdots D_{i,k}) = f_k D_{i,k}, \text{ ただし } f_k \text{ は経過年数要素である。}$$

過去のトレンドに変化がないと仮定して、

$$\text{経過年数要素 } f_k \text{ を、 } \hat{f}_k = \sum_{j=1}^{N-k} D_{j,k+1} / \sum_{j=1}^{N-k} D_{j,k} \text{ と推定する。}$$

すると、 $D_{i,k}$ の推定値 $\hat{D}_{i,N}$ は次のように推定される。

$$\hat{D}_{i,N} = D_{i,N+1-i} \hat{f}_{N+1-i} \cdots \hat{f}_{N-1}$$

C.2 マック法

チェイン・ラダー法に、保険金の変動要素を加味して区間推定する方法である。保険金の分散要素が加わる (確率分布までは必要ない)。

次年度保険金 $D_{i,k+1}$ の分散 Var は、次のとおり、前年度発生保険金の分散 σ_k^2 に比例することとする。

$$\text{Var}(D_{i,k+1} | D_{i,1} \cdots D_{i,k}) = \sigma_k^2 D_{i,k}$$

事故年度が異なる保険金は独立とする。

$$\{D_{i,1}, \cdots, D_{i,N}\} \text{ と } \{D_{j,1}, \cdots, D_{j,N}\} \text{ は独立 (} i \neq j \text{)}$$

すると、分散の不偏推定量は次のとおりとなる。

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N-k-1} \sum_{i=1}^{N-k} D_{i,k} \left(\frac{D_{i,k+1}}{D_{i,k}} - \hat{f}_k \right)^2$$

最終発生保険金の標準誤差は次のとおりとなる。

$$\text{Se}(\hat{D}_{i,N} | D) = \hat{D}_{j,N}^2 \sum_{k=N-i+1}^{N-1} \frac{\hat{\sigma}_k^2}{\hat{f}_k^2 \hat{D}_{i,k}} + \hat{D}_{j,N}^2 \sum_{k=N-i+1}^{N-1} \frac{\hat{\sigma}_k^2}{\hat{f}_k^2 \sum_{i=1}^{N-k} D_{i,k}}$$

従って、最終保険金を区間推定すると次の解が得られる。

$$\hat{D}_{i,N} \pm \alpha \sqrt{\text{Se}(\hat{D}_{i,N} | D)}$$

D. 相関関係

相関関係に関連する事項として、相関係数、コピュラおよび順位相関を以下のとおり紹介する。

(注) 本項目の執筆にあたり、SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements, 2nd edition “(2008)、Roger B. Nelsen, “An Introduction to Copulas, Second Edition” (2006)、アレクサンダー・J・マクニール、リューディガー・フライ、ポール・エンブレヒツ『定量的リスク管理』(2008.7)を参考にした。

D.1 相関係数

確率変数 x と y の相関係数は次のとおり定義される。相関係数は-1 から 1 の範囲の値を取り、 x と y が独立の場合には相関係数は 0 となる。

$$\rho(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}}, \quad -1 < \rho(x, y) < 1$$

ただし、分散 : $\text{var}(x) = \text{cov}(x, x) = E[(x - E[x])^2]$

共分散 : $\text{cov}(x, y) = E[(x - E[x])(y - E[y])]$

D.2 コピュラの定義

コピュラ (Copula : 接合関数とも翻訳される) とは、次の 3 つの条件を満たす周辺分布が標準一様分布となる $[0, 1]^d$ 上の分布関数である。D3. スクラーの定理で説明するとおり、この関数が分布関数の接合において重要な役割を担う。

① $C(u_1, \dots, u_d)$ は、各成分 u_i について単調増加である。

② $C(1, \dots, 1, u_i, 1, \dots, 1) = u_i$

③ $\sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_d=1}^2 (-1)^{i_1 + \dots + i_d} C(u_{1i_1}, \dots, u_{di_d}) \geq 0$

ただし、 $u_{j1} = a_j, u_{j2} = b_j \quad j \in \{1, \dots, d\}$

D.3 スクラーの定理

スクラーの定理によると、コピュラを活用することにより、一定の条件を充足する複数の分布関数を 1 つの多変数分布関数に接合できる。

<スクラー (Sklar) の定理>

F は周辺分布 F_1, \dots, F_d を持つ分布関数とする。

この時、コピュラ $C: [0, 1]^d \rightarrow [0, 1]$ が存在し、 $F(x_1, \dots, x_d) = C(F_1(x_1), \dots, F_d(x_d))$
 $-\infty \leq x_d \leq \infty$

周辺分布 $F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)$ が連続であれば、コピュラ C は一意的に定まる。

逆に、 $F(x_1, \dots, x_d) = C(F_1(x_1), \dots, F_d(x_d))$ によって、 $F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)$ が 1 変数の分布関数で、 C がコピュラであれば、 $F(x_1, \dots, x_d)$ を定義できる。
 $-\infty \leq x_d \leq \infty$

更に、コピュラは、 $C(u_1, \dots, u_d) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_d^{-1}(u_d))$ となる。

$F_1^{-1}(u_1)$ は逆関数を表す。

(注) 周辺分布が連続でない場合には、コピュラは一意的でない。

D.4 コピュラの特徴

(1) フレッシュ・ホエフディング不等式

フレッシュ・ホエフディング不等式 (Fréchet-Hoeffding bounds) が次のとおり成り立つ。

$$\max\{\sum_{k=1}^d u_k + 1 - d, 0\} \leq C(u_1, \dots, u_d) \leq \min\{u_1, \dots, u_d\}$$

(注) 左辺を反単調コピュラ (counter-monotonicity copula) W という。

右辺を共単調コピュラ (co-monotonicity copula) M という。

この記号で上記不等式を記述すると、 $W < C < M$ となる。

(2) その他の性質

コピュラの代表的な性質の定義を次のとおり整理する。

① 独立

$$\Pi(u_1, \dots, u_d) = \prod_{k=1}^d u_k$$

② 順位

$$C_1 < C_2,$$

即ち、 $0 \leq u_d \leq 1$ に対して、 $C_1(u_1, \dots, u_d) \leq C_2(u_1, \dots, u_d)$

③ 交換可能 (exchangeable)

ベクトル $\mathbb{X} \equiv (X_1, \dots, X_d)$ が $(X_{\pi(1)}, \dots, X_{\pi(d)})$ に π で置換した時

$$C(u_1, \dots, u_d) = C(u_{\pi(1)}, \dots, u_{\pi(d)})$$

④ 結合的 (associative)

$$C(u_1, C(u_2, u_3)) = C(C(u_1, u_2), u_3)$$

D.5 各種コピュラ

(1) アルキメデス型コピュラ

アルキメデス型コピュラは次のとおり定義される。

$$C^d(u_1, \dots, u_d) = \phi^{[-1]}(\sum_{k=1}^d \phi(u_k))$$

$\phi^{[-1]}$ は生成関数 (generator)、 $0 \leq t \leq \phi(0)$ に対して $\phi^{[-1]} = \phi^{-1}$ 、それ以外は $\phi^{[-1]} = 0$

この特徴は次のとおりである。

$$C(u_1, u_2) = C(u_2, u_1)$$

$$C(u_1, C(u_2, u_3)) = C(C(u_1, u_2), u_3)$$

$$C(u, u) < u$$

(2) LTアルキメデス型コピュラ

アルキメデス型コピュラで生成関数が次の形式で定義されるものを、LT アルキメデス型コピュラ (LT とは Laplace Transform) といい、モンテカルロ・シミュレーションなど確率分布を取扱う際に都合のよい性質を持っている。

生成関数 $\phi^{-1}(t) = \int_0^\infty e^{-tx} dG(x)$ のとき LT 型となる

G は $[0, \infty) \rightarrow [0, 1]$ の分布関数で、このラプラス・スティチュス (Laplace-Stieltjes) 変換は $\hat{G}(x) = \int_0^\infty e^{-tx} dG(x)$ (具体例)

変数 U_1, \dots, U_d 、変数 V

$\mathbb{P}[U_k \leq u | V = v] = \exp(-v\phi(u)) = (\exp(-\Phi(u)))^v$ は LT アルキメデス型コピュラとなる。

(3) クレイトン・コピュラ

クレイトン・コピュラ (Clayton copula) は LT アルキメデス型コピュラの一つであり次のとおり定義される。

$$C^{Cl}(u_1, \dots, u_d) = (u_1^{-\theta} + \dots + u_d^{-\theta} + 1 - d)^{-1/\theta}$$

生成要素: $\Phi(t) = \frac{1}{\theta}(t^{-\theta} - 1)$

この特徴は次のとおりである。

- 任意の d 次元で定義でき、多次元への拡張ができる。
- LT アルキメデス型であり、モンテカルロ・シミュレーションが行いやすい。
- 交換可能 (exchangeable) で結合的 (associative)
- 独立 ($\theta \rightarrow 0$) と共単調 ($\theta \rightarrow \infty$) の中間である。
- 正の順位関係にある。 ($\theta_1 \leq \theta_2$ ならば、 $C_{\theta_1} \leq C_{\theta_2}$)
- 下位極値相関性がある。

(4) ゲンベル・コピュラ

ゲンベル・コピュラ (Gumbel copula) も LT アルキメデス型コピュラの一つであり次のとおり定義される。

$$C^{Gu}(u_1, \dots, u_d) = \exp\{-[(-\ln(u_1))^\theta + \dots + (-\ln(u_d))^\theta]^{\frac{1}{\theta}}\}$$

$$\text{生成要素} : \Phi(t) = (-\ln(t))^\theta$$

D.6 順位相関

順位相関は、2 変量分布のコピュラのみに依存する相関性の尺度である。次のとおり紹介するケンドールのタウとスピアマンのローは多くの共通な性質を持ち、例えば、独立な確率変数に対しては 0、共単調な変数に対しては 1、反単調な変数に対しては -1 となる。実務上は、コピュラのキャリブレーションなどに利用されているとのことである。

(1) ケンドールのタウ

順位相関の 1 つであるケンドールのタウ (Kendall's tau) は次のとおり定義される。

$$\begin{aligned}\rho_\tau(X, Y) &= \mathbb{E}[\text{sign}((X - \tilde{X})(Y - \tilde{Y}))] \\ &= 2\mathbb{P}[(X - \tilde{X})(Y - \tilde{Y}) > 0] - 1 \\ &= 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u, v) dC(u, v) - 1 \in [-1, 1]\end{aligned}$$

(2) スピアマンのロー

順位相関の 1 つであるスピアマンのロー (Spearman's rho) は次のとおり定義される。

$$\begin{aligned}\rho_s(X, Y) &= \rho(F_X(X), F_Y(Y)) \\ &= 12 \int_0^1 \int_0^1 (C(u, v) - uv) du dv \in [-1, 1]\end{aligned}$$

E. スイス・ソルベンシー・テスト (SST) の数理

スイス・ソルベンシー・テストのソルベンシー資本要件 (SCR)、市場価値マージン (MVM) および目標資本 (TC) の数理について、以下のとおり説明する。

(注) 本項目の執筆にあたり、FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11) および“Technical document on the Swiss Solvency Test” (2006.10)を参考にした。

(1) ソルベンシー資本要件 (SCR)

ソルベンシー要求資本は、次のとおり、1年後のリスク耐久資本 (RBC(t₁)) : 確率変数をリスクフリー利率 (1 + r₁⁽⁰⁾) で現在価値に割引いた金額が、現在のリスク耐久資本 (RBC(t₀)) を1%の確率でショートフォールする期待値である。(このショートフォール期待値は不足額となるので符号はマイナスとなる。ソルベンシー要求資本はこのショートフォール期待値をカバーする必要な資本であるため、ショートフォール期待値の符号を反転した値となる。)

$$SCR = - ES_{\alpha} \left[\frac{RBC(t_1)}{1+r_1^{(0)}} - RBC(t_0) \right]$$

ただし、期待ショートフォールは、 $ES_{\alpha}(X) = E[X|X \leq VaR_{\alpha}(X)]$ と定義する。

なお、 $VaR_{\alpha}(X) = \sup\{x: P(X \leq x) \leq \alpha\}$ である。

$ES_{\alpha}(X)$ は、Tail $VaR_{\beta}(X) = E[X|X > VaR_{\beta}(X)]$ と類似した概念である。

($\alpha = 100\% - \beta = 100\% - 99\% = 1\%$)

(2) 市場価値マージン (MVM)

市場価値マージンは、理論上、次のとおり現時点のリスク耐久資本 (RBC(t₀)) が目標資本 (TC) と等しい場合の1年後のリスク耐久資本 (RBC(t₁)) の期待ショートフォールである。

$$MVM = ES_{\alpha} [RBC(t_1) | RBC(t_0) = TC]$$

(3) 目標資本 (TC)

目標資本は、次のとおり、市場価値マージン (MVM) をリスクフリー利率 (1 + r₁⁽⁰⁾) によって現在価値に割引いた金額と、ソルベンシー資本要件の合計金額である。

$$TC = - ES_{\alpha} \left[\frac{RBC(t_1)}{1+r_1^{(0)}} - RBC(t_0) \right] + \frac{MVM}{1+r_1^{(0)}}$$

F.内部モデルにおける相関ツリー

スコール社が内部モデルに使用している相関ツリーとコピュラとの関係を次のとおり紹介する。なお、相関関係の取扱いについてはD.相関関係を参照願う。

(注) 本項目の執筆にあたり、SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements, 2nd edition “(2008)を参考にした。

F.1 相関ツリー

(1) ツリー構造

スコール社では、次のようなツリー構造を設けてリスクを管理している。

ポートフォリオ Z は、次の共通部分を持たない Z_i のバスケットの複合体となる。

$$Z = Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n$$

同様にポートフォリオ Z_i は、次の共通部分を持たない $Z_{i,j}$ のバスケットの複合体となる。

$$Z_i = Z_{i,1} + Z_{i,2} + \cdots + Z_{i,n} \quad \text{以下、繰り返す。}$$

X が y の部分ポートフォリオの場合に X は y の子孫といい、 $X \leq y$ と記述する。ポートフォリオ・ツリーにおける次の子孫を子供という。親は逆の関係をいう。

同じポートフォリオ・ツリー内の相関関係は、子供の間でのみ考慮する。

(2) 適合性

ツリー構造において、次の適合性 (suitability) が成り立つ。

$$\mathbb{P}[X \leq x, S \leq s | Y = y] = \mathbb{P}[X \leq x, | Y = y] \cdot \mathbb{P}[S \leq s | Y = y]$$

$$\mathbb{P}[X \leq x, | S \leq s, Y = y] = \mathbb{P}[X \leq x | Y = y]$$

ただし、 $X \leq y$ 、 S は y の子孫でない。変数 X と S は独立。

F.2 相関ツリーとコピュラ

X 、 y 、 S が次の子孫関係にあるとき、適合性の関係を用いて、 X と S のコピュラを、 y と S のコピュラおよび X と y のコピュラから決定できる。

$X \leq y \leq S$ とする。

X と S のコピュラは、 $C_{X,S}(u, w) = \mathbb{P}[X \leq F_X^{-1}(u), S \leq F_S^{-1}(w)]$ であり、

X と Y のコピュラおよび Y と S のコピュラから次のとおり導かれる。

$$C_{X,S} = C_{X,Y} \star C_{Y,S}$$

$$\text{ただし、} (C_1 \star C_2)(u, w) := \int_0^1 \partial_2 C_1(u, v) \partial_1 C_2(v, w) dv$$

<参考資料>

- ・アレクサンダー・J・マクニール、リューディガー・フライ、ポール・エンブレヒツ、
『定量的リスク管理』(2008.7)
- ・財団法人 損害保険事業総合研究所『欧米主要国における ERM（統合リスク管理）およびソ
ルベンシー規制の動向について』(2009.9)
- ・社団法人 日本アクチュアリー会『確率論的アプローチによる保険負債の時価評価』(2005.7)
- ・CEIOPS, “Stock-taking report on the use of Internal Models in Insurance” (2009.1)
- ・CRO Forum, “Internal models benchmarking study Summary results” (2009.1)
- ・FINMA, “Circular 2008/44, Swiss Solvency Test “ (2008.11)
- ・FOPI, “White Paper of the Swiss Solvency Test” (2004.11)
- ・FOPI, “Technical document on the Swiss Solvency Test” (2006.10)
- ・IAA, “Paper on Stress Testing- First Draft”(2009.11)
- ・IAA, “Note on the use of internal models for risk and capital management purposes by
insurers - Draft” (2009.11)
- ・IAIS, “Guidance paper on the use of internal models for regulatory capital purposes”
(2008.10)
- ・IAIS, “Stress testing by insurers : Guidance paper” (2003.10)
- ・Philipp Keller, Thomas Luder, René Schnieper (FOPI), “SST : Overview” (2006.7)
- ・Philipp Keller, “Swiss Solvency Test” (2007.3)
- ・Roger B. Nelsen, “An Introduction to Copulas, Second Edition” (2006)
- ・SCOR, “Enterprise Risk Management (ERM) : A driving force for the insurance industry”,
Focus (2009.10)
- ・SCOR, “From principle-based risk management to solvency requirements, 2nd edition “
(2008)
- ・Thomas Mark, “Distribution-free calculation of the standard error of chain ladder reserve
estimates” (1993)