

Overview of Stochastic Programming Applications

David Morton,
Dash Optimization
29 May 2002

[これは、皆様のご便宜のための参考翻訳です。
誤訳、不適切な訳があるかもしれませんので、
原文と併読くださるようお願い致します。]

References については、英語版をご覧ください。

Contents

1 Introduction.....	3
2 Problem Statement	3
3 A Capacity Expansion Planning Example	4
4 A Multi-Stage Asset Allocation Model	7
5 Application Areas	8
Finance:	8
Electric Power Systems:.....	9
Production Capacity Planning:.....	10
Communications Networks:.....	10
Managing Natural Resources:	10
Military and National Security Applications:.....	11
Vehicle Fleet Management and Location Problems:	11
Airlines Industry:.....	12

1 イントロダクション

この文書は、確率的計画プログラムのアプリケーションの現状を纏めたものです。最初に、キャパシティ拡張計画モデルについて述べますが、このモデルは、資源に関係する、2段階確率的計画プログラムの主要な考えのいくつかを例示し、リスクとコストのトレードオフを含む、実行可能な分析にはどのようなものがあるかについてのべます。次いで、小さな、多段階財務計画モデルと、関連する分析について考えます。これらの2つのモデルは、それに続く、さまざまなアプリケーションについての議論の理論構成の枠組み、視点を与えるものです。

2 問題の説明

資源についての2段階や多段階の確率的プログラミングでは、意思決定のタイミングをはっきりさせること、および、不確実性を明確に理解することが重要です。プロトタイプ的な2段階確率的プログラミングでは、不確実性を持つ需要や利用可能なキャパシティの下での、キャパシティの割当て問題です (Figure 1を参照)。まず、最初に、第一ステージで戦略的な意思決定を行い、資源を割当てますが、これにより、システム・デザインを特定します。そして、意思決定者は、需要と利用可能なキャパシティを観測し (observes a realization of the demands and availabilities)、そして、その時点 (current) での、決定論的な設定の中で、第2段階での作業上の意思決定を行います。第1ステージの構造は、線形計画の制約式や混合整数計画の制約式から成ることができます。ここで、第2段階の構造が、線形プログラム、ないしは、凸の二次プログラムであると仮定します。

この理論的枠組みは、多段階・セッティングに拡張され、そこでは、キャパシティ拡張についての意思決定は、連続して、順次、時間の経過とともに行われます。「2段階モデル」と同じように、第一段階のキャパシティ拡張についての意思決定を行います。次いで、第2段階での需要と利用可能性を観測します。そして、第2段階での「需要」、「設備の利用可能量」、および、「将来の需要と利用可能性についての更新された条件付き分布」を知った後に、第2段階の作業、および、キャパシティ拡張についての意思決定を行います。このような構造は、多段階資産配分モデル (multi-stage asset allocation model) にも適用可能で、そこでは、投資ポートフォリオは、定期的に「再バランス (rebalanced)」されます。セクション4で、そのような例について考えましょう。第一段階構造は、線形計画制約式、混合整数計画制約式で表現できますが、その後のステージは、線形計画、もしくは、コンベックス二次計画の構造を持つものと仮定します。

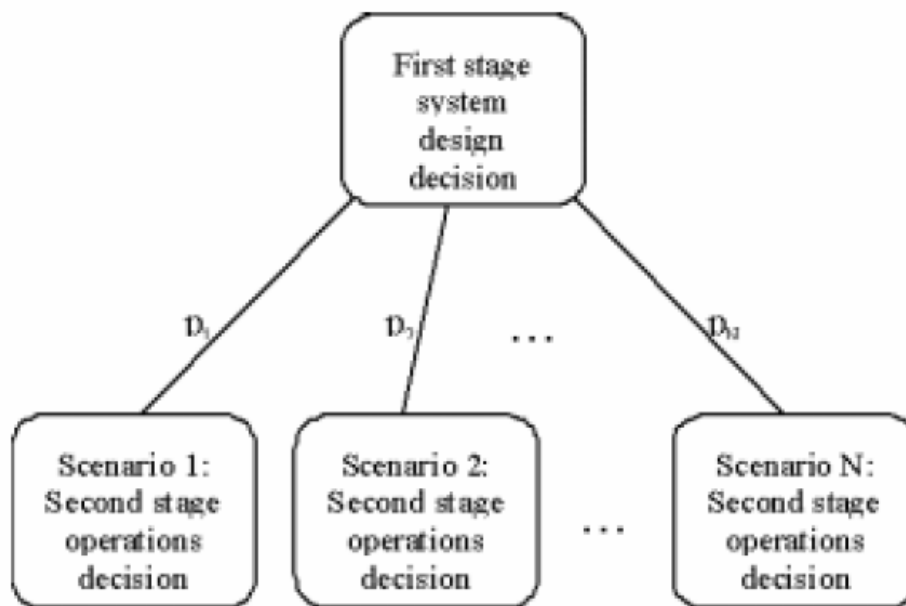


Figure 1 : 2段階確率的プログラミングの一般的な構造は、第1段階と第2段階での意思決定が質的に異なっているということです。第1段階での意思決定は、例えば、様々な資源のキャパシティを決定することによって、システムを設計します。この設計についての意思決定は、システムが操業される正確な環境を知る前に行わなければなりません。Figure 1は、そのようなN個のシナリオ、および、それらの確率のウエイトを描いたもので、それらにより、この環境(例えば、異なった需要や信頼性のシナリオ)を決定します。第2段階の操業についての意思決定は、このような不確実性が明らかにされた後に行います。目標は、可能なシナリオの範囲で、システムとしての操業が安定するという意味で、強健(robust)であるような第1段階の意思決定を見つけることです。

3 キャパシティ拡張計画作成の例

この例は、2段階の確率的線形プログラムで、発電計画作成に関するキャパシティ拡張計画モデルについてのものです。[34]を参照。このモデルは、2つのタイプの不確実性を含んでいます。すなわち、(i) エネルギー需要、および、(ii) 発電機の利用可能性についての不確実性です。第1段階での意思決定は、特定された単位コストを前提に、発電機に、発電キャパシティを割当てることについての意思決定です。第2段階で、ランダムな需要、および、利用可能な発電機のキャパシティ比率(原文: availability fractions (rates))が明らかにされます。そして、それを前提に、エネルギー需要を満たすために、最小費用のソリューションを見つけるために輸送問題を解きます。もし、需要を満たすための十分なキャパシティが利用可能でない場合は、需要を満たすために、外部のソースから、比較的高いペナルティ費用でエネルギーを購入しなければなりません(これは、満たされない需要があることのペナルティ・コストとも見なせます)。目的は、「設備投資コスト」と「予想される操業コストの合計」を最小にする、第1段階でのキャパシティ割当ての意思決定を見つけることです。

このモデルの例では、発電機が2台、そして、3つの需要地域があり、発電機#1の単位あたりのキャパシティ追加コストは400ドル、発電機#2の単位あたりのキャパシティ追加コストは350ドルであるとし、発電機から各需要地域に送られるエネルギーの単位あたりの運用コストは以下の通りです。

op. costs	1	2	3
1	4.3	2.0	0.5
2	7.7	3.0	1.0

各発電機に割り当てられるキャパシティの利用可能フラクションは、ランダム無であり、以下の周辺分布を持っています。

#1	prob.	#2	prob.
1.00	0.90	1.00	0.85
0.95	0.05	0.80	0.10
0.30	0.05	0.00	0.05

3つの需要地域それぞれの需要はランダムであり、以下の分布を持っています。

#1	prob.	#2	prob.	#3	prob.
900	0.35	900	0.35	900	0.35
1000	0.55	1000	0.55	1100	0.55
1300	0.10	1250	0.10	1400	0.10

ランダムなパラメータは独立している仮定します。(しかし、このモデルにとって、これは全体を構成する上でなくてはならない、不可欠で、欠くことのできない仮定ではありません)。サンプルスペースの濃度(cardinality)は、 $3^5 = 243$ です。結果として得られる2段階の確率的な線形プログラムは、決定変数2189、構造制約式1216を持つ、single deterministic equivalent linear programとして表現できます。

ここで、2つの発電機では充足されない需要の「単位あたりのペナルティウエイト(unit penalty weight)」にいろいろな値を与え、問題を解きます。Figure 2は、この充足されない需要のペナルティが、1,500ドルから2万6000ドルに大きくなるにつれ、より大きなキャパシティを追加して、充足されない需要が生れる確率が小さくなるのを示しています。初めは、インストールコストを、それなりに適度に大きくすると、充足されない需要の確率で、かなりな減少が見られます。

この確率的プログラムの解を、他の一般的な手段で得られる解に比較することも興味深いことです。まず、ペナルティウエイトを6000ドルにしたとき、確率的な解は、以下で与えられます。

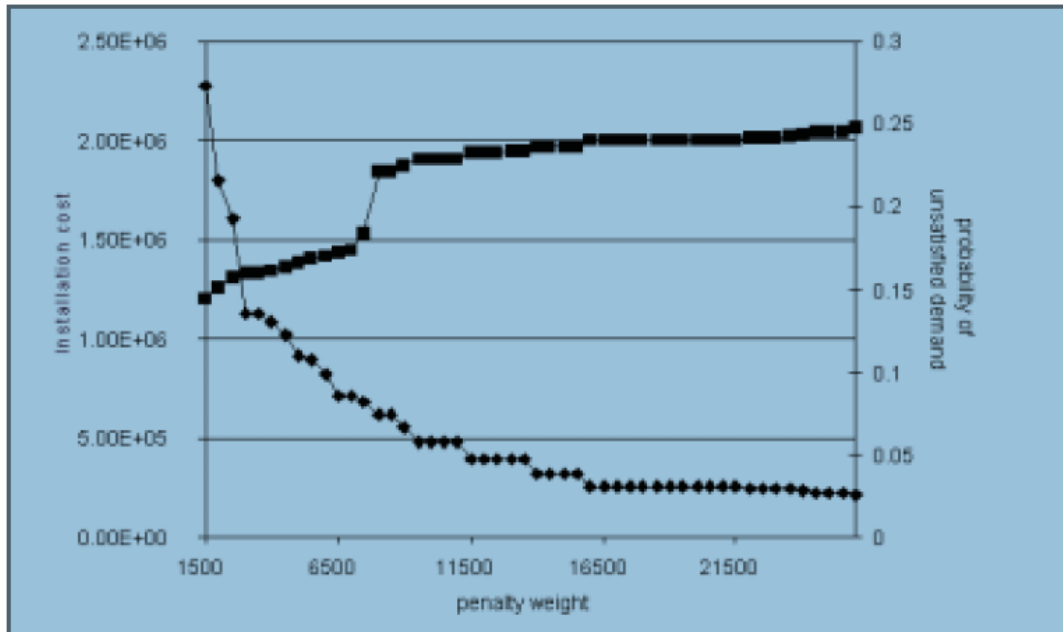


Figure 2: は、意思決定者が、キャパシティ拡張問題で直面するトレードオフを表現しています。横軸のペナルティウエイトが大きくなるにつれ、意思決定者は、充足されない需要が生れるのを、ますます嫌がるようになります。インストールの資本コストは、左側のY軸で示され、ペナルティウエイトが大きくなるにつれ、増加します。この刑罰が成長するのに応じて、右側のY軸で示される、充足されない需要を持つ確率は小さくなります。

$$x_1 = 2842.1, x_2 = 807.9, z = 1927687$$

ここで、 x_1 と x_2 は、インストールされるキャパシティを示し、 z は、インストールコストと、(まだ充足されていない需要に関連するペナルティコストを含む)予想操業コストの合計です。一つの代替的なアプローチは、ランダムパラメタを平均に替え、それに対応する1シナリオの線形プログラムを解くことです。以下は、そのソリューションです。

$$x_1 = 0, x_2 = 3274.2, z = 1157659$$

このソリューションが、どのようにして得られるかを知るのは、難しくはありません。発電機#1の有効キャパシティ1単位は、 $400/0.9625=415.58$ のコストが掛かり、発電機#2の有効キャパシティ1単位は、 $350/0.93=376.34$ のコストが掛かります。発電機#1にキャパシティをインストールするのに必要な高いコストは、その安い運用コストで相殺できません。そして、発電機#2のみを使用するのが、いつも、望まし

い、ということになります。インストールされるキャパシティの合計は、 $(995+990+1060)/0.93=3274.2$ です。このいわゆる「期待値問題 (*expected value problem*)」の目的関数の値が、(Jensen's inequalityで予想されているように)確率的モデルのそれよりも小さいことに注意してください。

確率的環境での、期待値解の期待コストは、2433952 です。そして、それは、確率的な解よりも 26%も高いです。期待値解が充足されない需要を持つ確率は 0.30 です。これは、ペナルティウエイトが、依然として、6000 であるままで、確率的な解が充足されない需要を持つ確率が 0.098 であるのと対照的です。

もう一つの一般的な戦略は、シナリオ分析と呼ばれているもので、この方法では、(各需要/利用可能性あたり 1 つある) $|\Omega| = 243$ 個の別個の線型プログラムを解くことで、一組の第 1 段階の意思決定 $\{x^\omega\}$ を得、何らかの「妥当な」方法で、これらの第 1 段階の意思決定を組み合わせ、解を得ます。ここで使う組み合わせ方式は下記のもので、

$$x = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega x^\omega$$

この方式を使うと、下の解を得ます。

$x_1 = 459.7, x_2 = 2607.3, z = 1108915$
--

目的関数の値が、確率的な方法による解よりも小さいことに注意してください。これは、シナリオ分析の値が、未来についての完全な情報の下での意思決定と対応しているので、予想通りです。確率的な環境でのシナリオ分析の解の期待コストは 2629970 で、それは、確率的な解より 36%も高い値です。シナリオ分析の解が充足されない需要を持つ確率は 0.53 ですが、これは、確率的な解が充足されない需要を持つ確率が 0.098 と比較されます。

4 多段階資産配分モデル (multi-stage asset allocation model)

今度は、資産配分の多段階リコースモデル (multi-stage recourse model) を議論します。[3] を参照。前項のキャパシティ拡張計画モデルのように、これは、小さい「おもちゃ (toy)」モデルですが、確率的プログラミングがもたらす解についての洞察が行えるので貴重です。このモデルには、2 つのタイプの投資があります。すなわち、株式と債券です。これらの投資へのリターンは、既知の分布に従う確率変数であると仮定します。投資の目的は、 y 年後に、子供の大学教育費を創り出すことです。初期の投資額を W とし、 Y 年後に、投資の運用により、必要となる授業料目標 G を超えたい、と思っています。ポートフォリオは、 y 年ごとに組み立て直せると仮定します。したがって、 $t = Y/y$ の投資期間があるとします。

市場は、各期間共に、「高い」か「低い」です。市場が「高い」なら、株式に投資するのが望ましい、そして、市場が「低い」なら、債券に投資するのが望ましい、と考えます。ここでは、15年以上を対象とするモデルを考え、ポートフォリオは、5年毎に見直せるとします。これは4段階モデルです。そして、このモデルでは、第1年目、第6年目、第11年目の初めに、投資の組み換えの意思決定を行い、第15年目の終わりに、現金に換え、ポートフォリオの値を計算して、目標に較べます。モデルは、5年間の3つの期間に対応する市場の状況、すなわち、「高い」、「高い」、「高い」、「高い」、「高い」、「低い」、...、「低い」、「低い」、「低い」という合計8つのシナリオを持っています。Figure 3が示すコンケイブなユーティリティ関数は、リスクの回避(aversion to risk)を表しています。ここでは、Figure 3のスロープの比率(ratio of the slopes)を ρ として示します。 ρ が増大するにつれ、意思決定者は、目標Gの実現の失敗を嫌い、ますます、リスクを回避したいと考えようになります。(ユーティリティ関数のリニアな部分の傾斜の一つの可能な解釈は、「借り入れのコスト」と「将来の収入の価値」の比率と関係があります。)

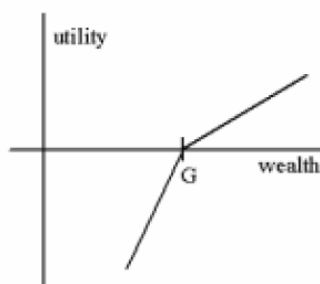


Figure 3: 目標Gの上、目標Gの下の資産価値のユーティリティ関数。左側の部分の傾斜の、右側の部分の傾斜に対する比率が増加するにつれ、意思決定者は、ますます、目標以下のリターンを持つことが嫌になる。

15年の計画期間の終わりの資産価値は、8つの可能なシナリオに対応する最大8つの値を取る確率変数です。Figure 4は、 ρ の3つの異なる値に対する資産価値の分布を示しています。 $\rho = 1$ のとき、分布は左右対称ですが、 ρ が大きくなるにつれ、分布の左側のテールを目標に引き寄せるために、上方の収益が犠牲にされます。

5 適用分野

このセクションでは、既に、確率的計画法が適用されているいろいろな分野での適用について、その概要を述べます。

財務:

財務分野でのアプリケーションには、証券の発行条件の決定(security pricing)、資産配分、資産負債管理などがあります。この分野への確率的計画法の適用は、今日、最も

ポピュラーな適用の一つです。多段階資産負債管理モデルは、クラッセル社と安田火災により、開発されました。[6, 7, 8] これにより、彼らは、前の戦略である fixed-mixed strategy によるよりも、所得税申告額で 7900 万ドル、2 年間で得た投資収益で総額 900 万ドルも良い結果を得たと報告しています。Towers Perrin-Tillinghast は、年金計画、および、保険クライアントの資産負債管理に確率的プログラミングを使用しました[50, 51]。彼らは、US ウェスト年金計画で、機会費用 (opportunity cost) を 4 億 5000 万ドル-10 億ドル節約できたと報告しています。([51] で報告された事例は、INFORMS が後援する 1999 年の Management Science Achievement の Edelman Award のための最終先行事例です。) ORTEC Consultants は、オランダの年金計画に、多段階確率的計画法を適用しました[5]。また、Fannie Mae で、確率的計画法モデルが使われています[29, 30, 31]。[11]には、最大 2688 のシナリオを持つ 10 段階の資産負債管理モデルの計算結果が報告されます。ドイツ銀行のグループは、ヘッジファンドでの資産配分に確率的最適化モデルを使っています [15, 62]。資産負債管理の概観については、[81]をご覧ください。

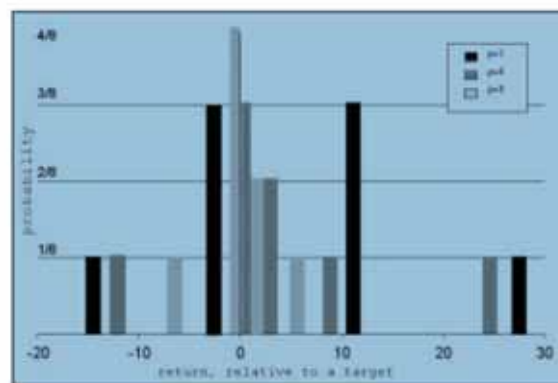


Figure 4 : この図は、1、4、8という3つの異なる危険回避レベルでの、目標に比較してのROIの分布を表したものです。マイナスのリターンは、目標に達しないことを示し、そして、プラスのリターンは目標を超えたことを示しています。 $\rho = 1$ であるとき、リターンの分布は左右対称です。 ρ が4に、そして、次いで、8に大きくなって行くとき、目標を達成しないことへの危険回避は大きくなり、そして、リターンの分布は目標の周辺に近づいたものになります。

電力供給:

Pacific Gas & Electric Company は、水力発電のスケジュール作成のために多段階確率的線型プログラムを開発しました [35]。彼らの(単一の流域についての)最も大きい問題は、約 7 万の制約式と 25 万の変数からなっていますが、(1991 年時代の)HP 9000/750 ワークステーションで約 6 分で解けました。同じような水力発電のスケジュール作成のための多段階確率的線型プログラム がブラジルで開発され、[59,60]で報告されています。unit commitment model は、典型的な難しい離散型最適化問題ですが、火力発電システムを対象に、確率的 unit commitment model が開発されています。ま

た、火力発電ほどではないですが、水力発電システムを対象としたモデルも報告されています [25, 56, 61, 70, 71]。電力発電でのキャパシティ計画作成モデルの例は、[13, 47, 54]で報告されています。財務システムと発電システムを結合するモデルへの関心が高まっていますが、これらのうち、確率的プログラミングを使ったものもあります[19]。

生産キャパシティ計画作成:

Jeppesen の行った仕事 [37]は、2000 年の Management Science Achievement の Edelman Awardを受賞しました。この仕事の一部は、ヒューリスティクスを使い、多段階確率的プログラミングにより、生産設備の持つ flexibility の利益を評価することでした。この確率的計画法を使った方法の詳細は、[36]で報告されています。彼らは、年間で 140 万ドルのセイビングを実現したと報告し、そして、また、伝統的なアプローチは、生産資源の flexibility を 26-54%過小評価していたと見積もっています。ゼネラル・モーターズの生産キャパシティ計画作成モデルは [16]で説明されています。彼らのモデルは、2段階の確率的混合整数計画で、整数変数が第一段階で使われています。著者は、このモデルは、工場閉鎖のための分析をサポートするためのもので、GM が、望ましい製品ミックスに含まれていない製品についての分析を、さらに行うことを動機づけたと報告しています。これに関連する確率的計画法モデルが、IBM により、半導体製造のキャパシティ計画作成のために使われました[32]。この他にも、[9, 18, 26, 67, 69]に、生産計画作成でのキャパシティについての意思決定に関するケースが報告されています。(キャパシティ拡大計画作成と対比されるものとして)、不確実な需要のもとでの生産レベルの決定に、2段階確率的プログラミングについてのペーパーには、[10, 33]があります。自動車産業での製造、組立、アセンブリ、および、配送のための 2 段階モデルは [17]に見られます。

コミュニケーション・ネットワーク:

高帯域私設回線ネットワークのキャパシティ拡張計画問題は [66]で見られます。Bellcore で行われたシミュレーションモデルは、特定のネットワークデザイン向けのシステム性能の見積りのケースを提供しています。2 段階確率的プログラミングは、シミュレーションを、数理計画法モデルにより置換しています。この近似は、シミュレーションモデルのネットワークデザイン候補をテストすることによって、その正当性が確認されています。テレコミュニケーション・ネットワーク分野での他のケースについては、[21, 68, 73]を見てください。

天然資源の管理:

水資源の管理の分野では、例えば、[20, 40, 44, 46, 74, 76, 77]のようなかなりの事例が見られます。[77] のモデルは、2 段階確率的プログラミングで、hydrological conductivity field に内在する不確実性を前提に、第一段階の意思決定により、揚水井

戸を場所を見つけます。第 2 段階の問題は、コンベックスな二次プログラムで、ここでは、噴水柱を抑えながら揚水レートを決め、また、環境的な制約条件の違反にペナルティを課します。第 2 段階の制約式は、地下水の流れを支配する微分方程式の有限差分近似から導出されます。確率的計画法モデルによる天然資源の管理についての他の例は、[27] の漁業管理、[22] の森林管理、[4]の地球温暖化ガス放出についての政策モデルなどがあります。

軍事、国家安全への適用:

阻止モデル(interdiction model)の研究は、当初、軍事利用 [23, 48] から始まり、敵の軍隊、および、物資のフローを混乱させるための、決定論的な数学的プログラムでした。同様な動機に基づく研究(例えば、[78])が続きます。1990 年代では、阻止モデルの研究は、違法薬物や先駆的化学品の米国への流入を阻止したいという願望によって動機づけられていました。例えば、[75, 79]。[12]では、最大のフロー・ネットワークを阻止することを目的とする研究 [79]が一般化され、random arc capacities、および、random interdiction successes を考慮するようになります。Second Line of Defense (SLD) プログラムは、ロシアの国境を越えて行われる不法な核原材料、設備、および技術の動きを防ぐ総合的な能力を強化するための、US Department of Energy と Russian Federation State Customs Committee との協力プログラムです(例えば、[2]を参照)。SLD プログラムは、確率的なネットワーク阻止の分野での最近の研究をうながしました [49, 57, 58]。また、軍事のロジスティクスのための確率的計画法モデルもあります。決定論的な空輸モデル[1, 64]は、[24]、および、[55]によって拡張され、航空機の信頼性の度合いに由来するランダムな地上時間を組み込めるようになりました。[52]、および、[53]に、空輸のための、別の確率的計画モデルが見られます。

輸送車両フリートの管理、および、配置問題:

離散的な確率的施設位置決めモデル(discrete stochastic facility location model)は、あらかじめ指定された候補リストから、施設の位置を選びます。また、場合によっては、それらのキャパシティをもモデル化し、選択されたサイトから顧客需要を満たします。調査したモデルは、(施設の位置、容量、施設への顧客の割り振り、および、配送についての)意思決定のタイミング、および、ランダムな需要の観測時期で、相互に異なります[45]。3つの異なる種類のモデルがあります。それぞれ、配送の意思決定をした後に需要の観測を行う、顧客を施設へ割り振った後に需要の観測を行う、位置、キャパシティについての意思決定をした後に需要の観測を行う、の3つです。確率的組合せルーティング問題は、古典的、決定論的な(複数の)巡回セールスマン問題と車両ルーティング問題の確率的な変形です。ここでは、コンピュータで扱い易いモデルには、頼るものはありません。それに代わりに、通常、目標とする完了時期からの upside deviation や需要を満たせないことに

たいしてペナルティを与えます。Laporte、Louveaux、および、彼らの同僚たち(その多くがモントリオールの Centre de Recherche sur les Transports にいます)は、これらの2つの領域をリードする研究者です。例えば[41, 42, 43]を見てください。車両のルーティングの、連続的決定変数を持つ確率的プログラムには、min-cost flow vehicle allocation formulation の確率的変形が含まれます。これらのモデルは、車両は、需要充足の要求を満たす機会をもつけれど、満たす義務はない、と言う意味で、組合せモデル(combinatorial model)とは異なります。[14]のモデルで動機づけられた Powell [63]、その他は、この流れにあります。これらのいくつかのモデルは、(5-6 段階の)多段階問題で、そこでは、時間の経過とともに、需要が、順次、明らかにされてゆきます。Powell の行った仕事のいくつかは、業界からサポートされ、実際に使われています (<http://www.castlelab.princeton.edu> を参照) が、ソフトウェアの一部のみが確率的計画法を使ったものです。確率的なロケーション、ルーティング、割当てのモデルについては[39]を見てください。

航空産業:

航空業の抱える問題から動機づけられた確率的計画法のアプリケーションは、今日まで、限定的です。それは、"recovery" model(例えば、[72])の分野での研究が増えているということは、頑健なスケジュール作成の必要性があることを示している、と言うことです。[65]、および、[80]は、エアライン乗組員スケジュール作成についてのもので、この分野での、確率的計画に関連する問題は、座席の在庫管理と価格付けについてのもので [28]。

References

- [1] S. F. Baker, D. P. Morton, R. E. Rosenthal, and L. M. Williams. Optimizing military airlift. *Operations Research*. To appear.
- [2] D. Y. Ball. The US Second Line of Defense: Preventing nuclear smuggling across Russia's borders. Technical report, Center for the Strategic and International Studies, Washington, DC, 1998. PONARS Memo # 50.
- [3] J. R. Birge and F. Louveaux. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer-verlag, New York, 1997.
- [4] J. R. Birge and C. H. Rosa. Incorporating investment uncertainty into greenhouse policy models. *The Energy Journal*, 17:79-90, 1996
- [5] G. C. E. Boender, P. van Aalst, and F. Heemskerk. Modelling and management of assets and liabilities of pension plans in the Netherlands. In W. T. Ziemba and J. M. Mulvey, editors, *Worldwide Asset and Liability Modeling*, pages 561 – 580. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.
- [6] D. R. Carino, T. Kent, D. H. Meyers, C. Stacy, M. Sylvanus, A. L. Turner, K. Watanabe, and W. T. Ziemba. The Russell-Yasuda Kasai model: an asset-liability model for a Japanese insurance company using multistage stochastic programming. *Interface*, 24:29-49, 1994.
- [7] D. R. Carino, D. H. Meyers, and W. T. Ziemba. Concepts, technical issues, and uses of the Russell-Yasuda Kasai financial planning model. , *Operations Research* 46: 450 - 462, 1998.
- [8] D. R. Carino and W. T. Ziemba. Formulation of the Russell-Yasuda Kasai financial planning model. *Operations Research*, 46:433-449, 1998.
- [9] Z.-L. Chen, S. Li, and D. Tirupati. A scenario based stochastic programming for technology and capacity planning. *Computers and Operations Research*, 29:781-806, 2002.
- [10] R. L. Clay and L. E. Grossmann. A disaggregation algorithm for the optimization of stochastic planning models. *Computer Chemical Engineering*, 21:751-774, 1997.
- [11] G. Consigli and M. A. H. Dempster. Dynamic stochastic programming for asset-liability management. *Annals of Operations Research*, 81:131-161, 1998.
- [12] K. Cormican, D. P. Morton, and R. K. Wood. Stochastic network interdiction. *Operations Research*, 46:184-197, 1998.
- [13] G. B. Dantzig, P. W. Glynn, M. Avriel, J. C. Stone, R. Entriken, and M. Nakayama. Decomposition techniques for multi-area generation and transmission planning under uncertainty. Technical Report EPRI 2940-1, Electric Power Research Institute, 1989.
- [14] C. Donohue. *Stochastic Network Programming and the Dynamics Vehicle Allocation Problem*. Ph.D. dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, 1996.

- [15] C. Donohue. Optimal rebalancing, 2001. INFORMS Annual Conference, Miami, Florida.
- [16] G. D. Eppen, R. K. Martin, and L. Schrage. A scenario approach to capacity planning. *Operations Research*, 37:517-527, 1989.
- [17] L. F. Escudero, E. Galindo, G. Garcia, E. Gomez, and V. Sabau, Schumann. A modeling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 119:14-34, 1999.
- [18] C. Fine and R. Freund. Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Management Science*, 36:449-466, 1990.
- [19] S.-E. Fleten, S. W. Wallace, and W. T. Ziemba. Hedging electricity Portfolios via stochastic programming. In C. Greengard and A. Ruszczynski, editors, *Decision Making under Uncertainty: Energy and Power, IMA Volumes on Mathematics and Its Applications*, page 71-94. Springer-Verlag, 2002.
- [20] R. A. Freeze and S. M. Gorelick. Convergence of stochastic optimization and decision analysis in the engineering design of aquifer remediation. *Groundwater*, 37:934-954, 1999.
- [21] A. A. Gaivoronski. Robust access planning for atm network in the presence of uncertain multi-service demand. In *Planning for a Customer Responsive Network. Proceedings of the Sixth International Network Planning Symposium, Budapest*, page 543-549. 1994.
- [22] H. J. Gassmann. Optimal harvest of a forest in the presence of uncertainty. *Canadian Journal of Forestry Research*, 19:1267-1274, 1989.
- [23] P. M. Ghare, D. C. Montgomery, and T. M. Turner. Optimal interdiction policy for a flow network. *Naval Research Logistics Quarterly*, 18:37-45, 1971.
- [24] J.D. Goggins. *Stochastic Modeling for Aircraft Mobility*. Operations Research Department, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1995. M. S. Thesis.

- [25] N. Groewe, W. Roemisch, and R. Schultz. A simple recourse model for power dispatch under uncertain demand. *Annals of Operations Research*, 59:135-164, 1995.
- [26] D. Gupta, Y. Gerchak, and J. Buzacott. The optimal mix of flexible and dedicated manufacturing capacities: Hedging against demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 1992.
- [27] T. Helgason and S. W. Wallace. Approximate scenario solutions in the progressive hedging algorithm: A numerical study with an application to fisheries management. *Annals of Operations Research*, 31:425-444, 1991.
- [28] J. L. Higle and S. Sen. A stochastic programming model for network resource utilization in the presence of multi-class demand uncertainty. Working paper, Systems and Industrial Engineering Department, University of Arizona, Tucson, AZ, 1997.
- [29] M. R. Holmer. The asset-liability management system at Fannie Mae. *Interfaces*, 24:3-21, 1994.
- [30] M. R. Holmer. Integrated asset-liability management: An implementation case study. In W. T. Ziemba and J. M. Mulvey, editors, *Worldwide Asset and Liability Modeling*, pages 581-605. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.
- [31] M. R. Holmer and S. A. Zenios. The productivity of financial intermediation and the technology of financial product management. *Operations Research*, 43:970-982, 1995.
- [32] S. Hood. Stochastic capacity planning for semiconductor manufacturing, 1999. INFORMS Annual Conference, Philadelphia, PA.
- [33] M. G. Ierapetritou and E. N. Pistikopoulos. Long range planning under uncertainty. *ICHEME Symposium Series*, 133:427-434, 1994.
- [34] G. Infanger. *Planning under Uncertainty: Solving Large Scale Stochastic Linear Programs*. The Scientific Press Series, Boyd & Fraser, Danvers, Mass., 1994.

- [35] J. Jacobs, G. Freeman, J. Grygier, D. Morton, G. Schultz, K. Staschus, and J. Stedinger. Socrates: a system for scheduling hydroelectric generation under uncertainty. *Annals of Operations Research*, 59:99-133, 1995.
- [36] E. Katok, W. Tarantino, and T. P. Harrison. Investment in production resource flexibility: An empirical investigation of methods for planning under uncertainty. *Naval research Logistics*. To appear.
- [37] E. Katok, W. Tarantino, and R. Tiedeman. Flexibility planning and technology management at Jeppesen Sanderson Inc. *Interface*, 31:7-29, 2001.
- [38] A.S. Kenyon and D. P. Morton. Stochastic vehicle routing with random travel times. *Transportation Science*. 2001. To appear.
- [39] A. S. Kenyon and D. P. Morton. A survey on stochastic location and routing problems. *Central European Journal of Operational Research*, 2002. To appear.
- [40] A. J. King, R. T. Rockafellar, L. Somlyódy, and R. J.-B. Wets. Lake eutrophication management: The Lake Balaton project. In Y. Ermoliev and R.J.-B. Wets, editors, *Numerical Techniques for Stochastic Optimization*, pages 435-444. Springer-verlag, Berlin, 1988.
- [41] G. Laporte, F. Louveaux, and H. Mercure. Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 39:71 - 78, 1989.
- [42] G. Laporte, F. Louveaux, and H. Mercure. The vehicle routing problem with stochastic travel time. *Transportation Science*, 26:161 - 170, 1992.
- [43] G. Laporte, F. V. Louveaux, and L. van Hamme. Exact solution of a location problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 28:95-103, 1994.
- [44] B. J. Lence and A. Ruszczy. Managing water quality under uncertainty: application of a new stochastic branch and bound method. In *Risk, Reliability, Uncertainty and Robustness of Water Resource Systems*. Cambridge University Press, to appear, 1996.

- [45] F. V. Louveaux. Stochastic location analysis. *Location Science*, :127-154, 1993.
- [46] S. Lucero. Implementation of a stochastic programming model for groundwater remediation. 9th International Conference on Stochastic Programming, Berlin, 2001.
- [47] S. Malcolm and G. Anandalingam. Robust optimization for power sector planning in large countries. To appear in *Operations Research*.
- [48] A. W. McMasters and T. M. Mustin. Optimal interdiction of a supply network. *Naval Research Logistics Quarterly*, 17:261-268, 1970.
- [49] D. P. Morton, W. Charlton, and F. Pan. Stochastic network interdiction of nuclear material smuggling. Network Interdiction and Stochastic Integer Programming Workshop, March 2002. University of California, Davis.
- [50] J. M. Mulvey. Generating scenarios for the Towers Perrin investment system. *Interface*, 26:1 - 15, 1996.
- [51] J. M. Mulvey, C. Gould, and C. Morgan. An asset and liability management system for Towers Perrin-Tillinghast, *Interface*, 30:96-114, 2000.
- [52] J. M. Mulvey and A. Ruszczyfiski. A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operations Research*, 43:477-490, 1995.
- [53] J. M. Mulvey and R. J. Vanderbei. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43:265-284, 1995.
- [54] F. H. Murphy, S. Sen, and A. L. Soyster. Electric utility capacity expansion with uncertain load forecasts. *IIE Transactions*, 14:52-59, 1982.
- [55] A. Niemi. Stochastic modeling for the NPS/RAND mobility optimization model. <http://ieserv3.ie.wisc.edu/robinson/Niemi.htm>, 2000.
- [56] R. Nuernberg and W. Roemisch. A two-stage planning model for power scheduling in a hydro-thermal system under uncertainty. Stochastic Planning E-Print Series, 2000. <http://dochost.rz.hu-berlin.de/speps/>.

- [57] F. Pan. *Models and Methods for Stochastic Network Interdiction*. The University of Texas at Austin, 2002. PhD Dissertation in progress.
- [58] F. Pan, X.V. Charlton, and D.P. Morton. Stochastic network interdiction of nuclear material smuggling. Institute for Operations Research and Management Science International Meeting, June 2001. Maui, Hawaii.
- [59] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto. Stochastic optimization of a multi-reservoir hydroelectric system - a decomposition approach. *Water Resources Research*, 21:779-792, 1985.
- [60] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto. Multi-stage stochastic optimization applied to energy Planning. *Mathematical Programming*, 52:359-375, 1991
- [61] A. B. Philpott, M. Craddock, and H. Waterer. Hydro-electric unit commitment subject to uncertain demand. *European Journal of Operational Research*, 125:410-424, 2000.
- [62] I. Popova. Portfolio choice under uncertainty, 2001. INFORMS Annual Conference, Miami, Florida.
- [63] W. B. Powell. A stochastic formulation for the dynamic assignment problem with an application to truck-load motor carriers. *Transportation Science*, 30:195-219, 1996.
- [64] R. E. Rosenthal, S. F. Baker, L. T. Weng, D. F. Fuller, D. Goggins, A. O. Toy, Y. Turker, D. Horton, D. Briand, and D. P. Morton. Application and extension of the throughput optimization model for airlift mobility, *Military Operations Research*, 3:55-74, 1997.
- [65] A. J. Schaefer, E. L. Johnson, A. J. Kleywegt, and G. L. Nemhauser. Airline crew scheduling under uncertainty. Working paper, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2001.
- [66] S. Sen, R. D. Doverspike, and S. Cosares. Network planning with random demand. *Telecommunications Systems*, 3:L1-30, 1994.

- [67] D. Sinha and J. Wei. Stochastic analysis of flexible process choices. *European Journal of Operational Research*, 60:183-199, 1992.
- [68] C. Smith, A. Schaefer, and J. Yen. A stochastic intra-ring synchronous optimal network design problem. Stochastic Programming E-Print Series, 2002. <http://dohost.rz.hu-berlin.de/speps/>.
- [69] J. M. Swaminathan. Tool capacity planning for semiconductor fabrication facilities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 120:545-558, 2000.
- [70] S. Takriti, J. R. Birge, and E. Long. A stochastic model for the unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11:1497-1508, 1996.
- [71] S. Takriti, B. Krasenbrink, and L.S.-Y. Wu. Incorporating fuel constraints and electricity spot prices into the stochastic unit commitment problem. *Operations Research*, 48:281-293, 2000.
- [72] B. G. Thengva11, G. Yu, and J. F. Bard. Multiple fleet aircraft schedule recovery following hub closure. *Transportation Research*, 35:289-308, 2001.
- [73] A. Tomasgard, J. A. Audestad, S. Dye, L. Stougie, M .H. van der Vlerk, and S. W. Wallace. Modelling aspects of distributed processing in telecommunication networks. *Operations Research*, 48:281-293, 2000.
- [74] J. M. Wagner, U. Shamir, and H. R. Nemati. Groundwater quality management under uncertainty: stochastic programming approaches and the value of information. *Water Resources Research*, 28:1233-1246, 1992.
- [75] A. R. Washburn and R. K. Wood. Two-person zero-sum games for network interdiction. *Resources Research*, 43:243-251, 1994.
- [76] D. W. Watkins, Jr., and D. C. McKinney. Finding robust solutions to water resources problems. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 123:49-58, 1997.

- [77] D. W. Watkins, Jr., D. C. McKinney, and D. P. Morton. Groundwater pollution control. In S. W. Wallace and W. T. Ziemba, editors, *Application of Stochastic Programming*, forthcoming.
- [78] P. S. Whiteman. Improving single strike effectiveness for network interdiction. *Military Operations Research*, 4:15-30, 1999,
- [79] R. K. Wood. Deterministic network interdiction. *Mathematical and Computer Modeling*, 17:1-18, 1993.
- [80] J. Yen and J. R. Birge. A stochastic programming approach to the airline crew scheduling problem. Working paper, Industrial Engineering Department, University of Washington, Seattle, WA, 2001.
- [81] W. T. Ziemba and J. M. Mulvey, editors. *Worldwide Asset and Liability Modeling*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.