A Risk Management Method for the Operation of a Supply-Chain without Storage: — Supply Policy Optimization under Demand Risk —

Yasuhiro Kobayashi Member (Hitachi Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

Yuuji Manabe Member (Hitachi Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

Norimasa Nakata Non-member (Hitachi Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

Satoshi Kusaka Non-member (Thermal & Hydraulic Systems Division, Hitachi, Ltd.,)

Keywords : risk management, demand uncertainty, purchase optimization, power supply, supply chain

A business risk management method has been developed for a supply-chain without a storage function under demand uncertainty. Power supply players in the deregulated power market face the need to develop the best policies for power supply from self-production and reserved purchases to balance demand, which is predictable with error.

The proposed method maximizes profit from the operation of the supply-chain under probabilistic demand uncertainty on the basis of a probabilistic programming approach. Piece-wise linear functions are employed to formulate the impact of under-booked or over-booked purchases on the supply cost and the trade-off relation between purchase volume and supply cost for a case with transition dead zone. Constraints on over-demand probability are introduced to limit over-demand frequency on the basis of the demand probability distribution. Figure 1 illustrates the relation between predicted demand and supply policy, which specifies time-dependent reserved purchase volume. The linear programming technique is used to the constrained linear optimization problem.

The developed method has been experimentally applied to the supply policy of a power-supply-chain, the operation of which is based on 3-stage pricing purchase contract and on 28 time zones. Numerical results show the reserved volume larger than the value estimated from the expected demand, and sensitivity of demand

predictability and over-demand aversions on the optimum reserved volume.

Figure 2 shows the optimum volume of reserved purchases subjective to over-demand continuation probability constraints. The characteristics of the obtained optimal supply policy are successfully captured in the numerical results, which suggest the applicability of the proposed method.

Fig. 1. Predicted demand and supply policy

Fig. 2. The optimum volume of reserved purchase subject to over-demand probability constraints

在庫機能を持たないサプライチェーン運用のリスク管理手法

— 需要リスクの下での運用計画最適化 —

正員 小林 康弘* 正員 真鍋 裕司*
非会員 仲田 智将* 非会員 日下 智**

A Risk Management Method for the Operation of a Supply-Chain without Storage: — Supply Policy Optimization under Demand Risk —

Yasuhiro Kobayashi*, Member, Yuuji Manabe*, Member,
Norimasa Nakata*, Non-member, Satoshi Kusaka**, Non-member

A business risk management method has been developed for a supply-chain without a storage function under demand uncertainty. Power supply players in the deregulated power market face the need to develop the best policies for power supply from self-production and reserved purchases to balance demand, which is predictable with error. The proposed method maximizes profit from the operation of the supply-chain under probabilistic demand uncertainty on the basis of a probabilistic programming approach. Piece-wise linear functions are employed to formulate the impact of under-booked or over-booked purchases on the supply cost, and constraints on over-demand probability are introduced to limit over-demand frequency on the basis of the demand probability distribution.

The developed method has been experimentally applied to the supply policy of a power-supply-chain, the operation of which is based on a 3-stage pricing purchase contract and on 28 time zones. The characteristics of the obtained optimal supply policy are successfully captured in the numerical results, which suggest the applicability of the proposed method.

キーワード : リスク管理, 需要リスク, 調達最適化, 電力供給, サプライチェーン

Keywords : risk management, demand uncertainty, purchase optimization, power supply, supply chain

1. はじめに

サプライチェーンの運用⁽¹⁾⁽²⁾には, さまざまなリスク要因がかかわり, その事業収益がリスクに晒されるため, リスク管理が重要となる。製造プラントを中心とするサプライチェーンのリスク分析の研究は限られており, 電力供給をサプライチェーンと捉えれば, リスク管理が最も盛んに議論されているサプライチェーンということになる。日本の電力市場は, 2007 年度に向けて段階的に完全自由化され, 電力ビジネスに競争原理が導入される最中にある⁽³⁾。自由化市場において, 電気事業者は, 収益が不安定となるため, 収益変動リスクの管理が大きな課題となっている。電力ビジネスのリスク管理に関しては, 電力自由化が進み, かつ

金融技術でも先行した欧米において, 金融工学を用いたリスク管理技術の開発が行われている^{(4)~(7)}。しかし, コーポレートレベルのリスク管理が中心であり, オペレーションレベルまで踏み込んだ検討は少ない⁽⁸⁾。

電力供給の特徴は, 電力を貯蔵することが難しく, 在庫機能を持たないサプライチェーンであることである。そのため, 需要リスクが最も重要なリスク要因となる。需要リスクに関しては, 従来から需要予測の精度向上に種々の工夫がなされているが⁽⁹⁾, それを受けたシステム運用に関しては, 需要期待値に基づく最適運用を検討するアプローチに限られていた⁽¹⁰⁾。

本論文では, 電力自由化市場の新規プレーヤーである特定規模電気事業者のサプライチェーンに注目する。電力会社(一般電気事業者)が, 大規模な設備を有し, 多様な需要特性を有する顧客に大量の電力を供給するサプライチェーンを運用するのに比し, 新規プレーヤーの供給規模(自由化範囲の2%⁽¹¹⁾)は限られている。それ故に, 需要の統計的予測が難しくなる側面は否めない。したがって, ある程度の予

* (株)日立製作所日立研究所
〒319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1
Hitachi Res. Lab., Hitachi, Ltd.
7-1-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken 319-1292

** (株)日立製作所火力・水力事業部
〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1
Thermal & Hydraulic Systems Division. Hitachi, Ltd.,
3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken 317-8511

測誤差を前提として最適なシステム運用を計画する現実的なアプローチが不可欠となる。このような背景の下、需要の不確実性を確率事象として捉え、需要リスクを対象とし、線形計画法⁽¹²⁾をベースとする確率計画法に基づいてサプライチェーン運用計画の最適化を試みる^{(13)~(15)}。

本研究の目的は、需要変動のリスクの下で在庫を持たずに自社生産と予約調達を併用するサプライチェーンの運用計画を最適化する手法を開発することである。ここで、予約調達とは、供給事業者が資材・部品・製品を自社で生産して供給するだけでなく、前もって予約する形で固定量を外部事業者から調達する方式である。

2. サプライチェーンの運用計画

〈2・1〉 在庫機能を持たないサプライチェーン 変動する需要 (Demand) を満たすように資材・部品・製品を供給するビジネスには、自社で生産 (Self production) するとともに、外部の生産者から調達して供給 (Supply) する形態がある。図 1 に、生産と調達により需要-供給をバランスさせるサプライチェーンの形態を示す。このサプライチェーンには、在庫の機能が含まれない。

電力に代表されるような貯蔵できない間接材は在庫での調節が難しい。そのため、需要を予測し、自社の生産計画を立てる一方で、外部から調達できるよう契約を結び、需要に合わせて事前(計画時)に予約することがある。以下では、外部からの調達量を事前に確定することを予約調達 (Reserved purchase) と称する。予約調達は、事前に予約した以上、購入する義務があり、一種の先渡し取引である。予約調達により、需要が確定せずに時として自社生産の設備容量を超えるケースに対応もできることになるので、事業者は、需要のピークに合わせて自社設備を確保する必要がなくなり、ビジネスを効率化できる。

実際の需要(実需要)は、需要予測誤差のため、計画と相違することになるが、自社の生産計画の変更により対応できる場合、対応できない場合がある。対応できない場合、外部からの調達量を変えざるを得ない。このような変更には、通常それなりの追加コストがともない、調達を増やす場合と減らす場合で、追加コストも異なってくる。例えば、

調達を緊急に増やす場合 (On-demand purchase) の追加コストが相対的に大きい場合、実需要が計画時の想定需要を上回るリスクを抑制するため、需要誤差を見込んで計画すべきである。

一般に、外部からの調達単価は、自社の生産単価を上回る。このため、供給コストに関し、予約調達量のトレードオフが想定される。予約調達量の選択は、需要リスクの存在するサプライチェーンの事業収益を大きく左右すると言える。

需要が確定したときの予約調達量と供給コストの関係を図 2 に示す。この図は、想定需要が正確でない限り(需要予測が誤差を含む限り)調達不足 (Under-booked supply) あるいは調達過剰 (Over-booked supply) となること、調達不足も調達過剰も供給コストの上昇を招くこと、想定需要がダウンサイドあるいはアップサイドに外れた場合には事業収益を損なうことになるが、そのコストへの影響は必ずしも対称とはならないことを示している。

リスク管理という観点から、自社の生産計画の変更だけでは需要と供給のバランスが保てないケースへの対応として、二つのアプローチが考えられる。

(1) 緊急調達 緊急に追加調達でき、その量に限界がない場合、調達不足は、需要と供給のバランスを保てるのでコストの問題である。しかし、このような事態(想定需要超過)が生ずる確率を許容限界にコントロールする制約条件を導入することができる。緊急調達に限界がある場合、需要と供給のバランスを保てなくなるリスクを抑制するため、よりきびしい想定需要超過制約が必要となる。

(2) 供給停止 あらかじめ想定需要超過が生ずる可能性を想定して、供給の停止を前提とする契約を結んでいる場合、契約の条件にしたがって、供給停止により需要と供給のバランスを保つことができる。

わが国の電力市場では、電力供給力の圧倒的な違いを背景として、特定規模電気事業者は、相対契約ベースで、電力会社から予約調達、緊急調達が可能であり、また供給停止(負荷遮断)については一般的ではない状況にある。したがって、本研究では、緊急に追加調達でき、実質的にその量に限界がない場合を想定するが、同時に想定需要超過

図 1 需要と供給のバランス

Fig. 1. Balance between demand and supply

図 2 調達量と供給コストの関係

Fig. 2. Relation between purchase volume and supply cost

制約を扱うことにする。

〈2・2〉 サプライチェーンとしての電力供給

(1) サプライチェーン運用条件 電力供給のサプライチェーンの運用では、需要予測に基づいて、前日に自社の発電プラントの運転計画と予約調達の計画を立てるものとする。したがって、予約調達の意思決定は、需要リスクの制御手段として翌日の運用計画の一環として行われる。

電力供給のサプライチェーンは、需要、生産、調達の各要素に次のような特徴を有する。

(a) 需要 供給先の顧客需要には、需要予測の誤差に対応した不確実性がある。計画時に、需要を確率分布として予測できるが、予測値には誤差がともなう。需要予測については、先行して開発した手法⁽¹⁵⁾を適用し、その結果より予測誤差の確率分布を推定することにする。予約調達の最適化では、需要リスクの確率分布は、入力データとなる。

(b) 生産 自社発電設備、あるいはそれに準ずる発電設備による発電が、これに相当する。計画に際しては、設備の定格容量ではなく、起動停止計画から自社生産の上限が決まる。

(c) 調達 電力会社あるいは自家発電事業者との契約ベースでの予約調達が、これに相当する。予約調達量については、通例、上限値が設定されることになる。

(2) 需要リスク ここで注目するリスク要因は、当日にならないと顧客の電力需要が確定しないことである。結果として、当日の実需要に対して予約調達を多めに予約した場合、予約した量だけ買う義務があるので、需要が低めに振れた場合、計画を下回る出力で自社発電プラントを運用せざるをえない。予約調達の単価が自社生産の単価よりも高いとすると、供給コストが高くなる。

逆に、結果として、当日の実需要に対して予約調達を少なめに予約した場合、予約調達と自社生産だけでは需要をまかないきれず、緊急に追加調達する必要に迫られる。当然、緊急調達の単価は、自社生産や予約調達の単価よりも高いので、供給コストが高くなる。当日の実需要がどうなるかは、前もって正確に知ることはできないが、予測手段を用いて確率的に予測することができる。そのときの予測誤差は、予測性能の分析を通じて、確率分布として定量的に捉えることができる。

(3) コストと収益 電力供給のサプライチェーンは、事業収益の最大化を目的関数として運用するものとする。事業収益を売上げから供給コストを差し引いたものと定義すると、計画時の売上げは、需要の確率分布に基づく需要期待値に供給単価を乗じたものであり、計画時の供給コストは、自社生産、予約調達、緊急調達を合わせた供給コスト期待値である。需要期待値や供給単価は既知であり、計画時の売上げは定数となるので、この場合、事業収益の最大化は、供給コストの最小化に他ならない。

ここでは、基本的には、緊急調達により需要リスクへの対処が可能であり、緊急調達の単価は、当然、自社生産や予約調達の単価を上回り、自社生産の単価は予約調達の単

価よりも低いと想定する。

ただし、場合によっては、予約調達から緊急調達への切替えに関して、一定量の遷移区間を設定することがあり、この区間内では、緊急調達の単価は抑制された水準に留めることになる。この場合、緊急調達に2段階があると見なすことができる。

また、自社生産、予約調達、緊急調達の単価は、その量に依らず一定とする。電力供給のサプライチェーンにおいて、大規模事業者は、性能が異なる数十台の発電機（火力プラント）の出力負荷の組合せを調整する経済負荷配分⁽¹⁰⁾を計画する。そのため、自社生産単価は、供給量の影響を受ける。ここでは、小規模なサプライチェーンを対象とするため、自社生産単価が生産量に依存しないものとして扱う。

自社生産が、外部の設備保有者との長期契約による発電である場合には、単価一定として扱うことができる。自社生産に、コスト性能が出力負荷に強く依存する設備、あるいはコスト性能が著しく異なる複数の設備を有し、単価が生産量に影響される場合においても、予約調達の単価を超えないという前提であれば、運用方策の解は、大きく変わることはないものと考えられる。その場合、単価一定として自社生産量を決め、出力負荷を反映してコストを再計算したり、複数設備の間での負荷配分を決めることで、計画をより精緻なものにできる。

(4) 想定需要超過の回避 想定需要超過が短期的に発生することも大きなリスク要因であるが、それが継続して緊急調達が長時間に亘る場合、緊急調達先にとってもインパクトが大きいので、さらに大きなリスク要因となると想定される。したがって、想定需要超過の継続に関しては、調達コストに反映させるだけでなく、想定需要超過が長時間に亘るイベントについて、その生起確率を許容値以下に制限する制約条件を扱う。

3. 予約調達の最適化

〈3・1〉 モデルの前提条件 電力供給のサプライチェーン・モデルに関し、想定需要超過およびその確率の概念や供給コストの特性を説明する。説明の便宜上、運用の前日に計画を立てるものとし、時間要因を考慮しない1時点モデルと時間要因を考慮した多時点モデルに分けて記述する。1時点モデルでは、1つの時区間（翌日の平均）を想定し、需要リスクの下で、事業収益を最大化（あるいは供給コストを最小化）する目的関数、想定需要を超過する確率に関する制約条件を用いる。

次いで、時間要因を考慮したモデルに言及する。多時点モデルでは、複数の時区間（翌日の複数の時間帯）を想定する。目的関数については、個々の時区間の総和となり、1つの時区間での想定需要超過確率に関する制約条件については、個々の時区間に課される。複数の時区間に亘る想定需要超過の継続に関する制約条件（後出）については、時区間をカップルした扱いが必要となる。

〈3・2〉 最適化モデル

(1) 変数

まず、1 時点に注目して変数の関係を記す。計画時点での自社生産量を S 、予約調達量を X 、実行時点での需要（実需要）を Q とする。予約調達量 X が独立変数となる。計画時点での需要は、予測誤差の確率分布を n ノードの離散分布で近似的に表現して、期待値 $\underline{Q}$ と係数 R_m ($m=1, \dots, n$) を用いて、需要 $R_m \underline{Q}$ とその値を取る確率 P_m の組で与えることができる。

図 3 は、予測誤差のために翌日の実需要が異なるケースの供給の状況、すなわち実需要に応じた調達オペレーションの様子を示している。図 3(a)では、予測誤差を考慮して、前日の予測結果から想定需要 (Plan basis demand) および予約調達を決めている。想定需要とは、自社生産の上限値と予約調達量を加えたものである。図 3(b)では、予測対象時点（翌日）における需要の確率分布を、9 ノードの離散分布で表現している。需要の確率分布は、需要期待値 (Expected demand) と予測誤差の確率分布から定める。需要がアップサイドに大きく振れた場合（図 3(b)で需要量 Q_8 および Q_9 のケース）には、自社生産と予約調達では需要をカバーしきれない想定需要超過が生じ、緊急調達が必要となる。この計画の想定需要超過確率 (Under-predicted or over-demand probability) は P_8+P_9 となる。

時間とともに変わる需要を扱う場合、多時点モデルで計画を作成する。1 日を K 時点とする場合、時区間 k ($1, 2, \dots, K$) での自社生産量を S_k 、予約調達量を X_k 、実需要を Q_k

とする。予約調達量 X_k が独立変数となる。図 4 は、多時点モデルでの時区間ごとの供給計画の例を示しており、予測誤差のために実需要がアップサイドに振れた場合に備えて、想定需要を需要期待値よりも大きく設定している。この図は、時区間ごとに計画する予約調達量と需要予測期待値との関係、想定需要超過確率の許容範囲と調達予約量の関係を示している。想定需要超過確率は、需要期待値と誤差の確率分布から算出され、図中の 5 時区間に対して、 $P(08:00)$ 、 $P(10:00)$ 、 $P(12:00)$ 、 $P(14:00)$ 、 $P(16:00)$ として与えられている。

(2) 目的関数 ここでも、まず、1 時点に注目して目的関数を記す。まず、供給コストの最小化に着目する。 S および Q が与えられれば、供給コスト f は X の関数となる。 K_s 、 K_x 、 K_p は、それぞれ、自社生産、予約調達、緊急調達の単価とする。

(a) 需要が大きい場合： $Q \geq S+X$

追加コストを支払って不足分を緊急調達する。

$$f = K_s S + K_x X + K_p (Q - S - X) \dots\dots\dots (1)$$

(b) 需要が小さい場合： $Q < S+X$

自社の生産を抑制する。

$$f = K_s (Q - X) + K_x X \dots\dots\dots (2)$$

したがって、実需要に対する供給コストは、図 5(a)に示したように 2 段階の折れ線関数となる。実需要は翌日まで確定しないので、供給コストは、需要の確率分布に関する期待値であり、 Q を $R_m \underline{Q}$ で置き換えた n 通りのコスト曲線（折

図 3 実需要に応じた調達オペレーション
Fig. 3. Real demand based supply operation

図4 時区間ごとの供給計画の例
Fig. 4. Illustrated time-wise supply policy

れ線)を、生起確率 P_m を重みとして加え合わせた関数となる。

以上に記したモデルでは、緊急調達単価が一様(1段階)であり、実需要に対する供給コストは2段階の折れ線関数となる。予約調達から緊急調達への切替えに関し許容誤差(Transition dead zone)を設定する場合、緊急調達の単価が2段階となり、実需要に対する供給コストは図5(b)に示すように3段階の折れ線関数となる。実需要から自社生産分を減じた外部調達量は、①緊急調達が不可欠な予約不足領域、②許容誤差の範囲でバランスできる領域、③自社生産を抑制する調達過剰領域にケース分けできる。図5(c)に、予約調達に関し遷移区間を設定する場合の領域別コスト関数を示す。

ここでは、事業収益(目的関数)は売上高から供給コストを差し引いたものであり、前者は需要に比例して一定となるので、外部調達量と事業収益の関係は、外部調達量と供給コストの関係から決まることになる。

次に、全時区間に亘る事業収益の最大化を想定する。これは、それぞれの時区間での事業収益の総和であり、目的関数は線形関数となる。

(3) 想定需要超過の制約条件 想定需要超過には、時区間ごとに課される条件と、複数の時区間に亘って課される条件がある。通例、長期に亘る想定需要超過は、短期の想定需要超過に比してより厳しく発生回避が求められる。例えば、時区間当たりの想定需要超過が10回に1回許されても、連続した2時区間に亘る想定需要超過は、1000回に1回しか許されないという状況もありうる。

ここでは、まず、単独の時区間(1時点モデル)に着目して想定需要超過を扱う。想定需要超過確率(Over-demand

(a) Without transition dead zone

(b) With transition dead zone

- ① $Q \geq X + P + \delta \Rightarrow$
 $f = K_s S + K_x (X + \delta) + K_s (Q - S - X - \delta)$
- ② $X + S < Q \leq X + S + \delta \Rightarrow$
 $f = K_s S + K_x (Q - S)$
- ③ $Q \leq X + P \Rightarrow$
 $f = K_s (Q - X) + K_x X$

(c) Piece-wise cost function for case (b)

図5 調達量と供給コストの関係

Fig. 5. Relation between purchase volume and supply cost

probability) は分布のアップサイドのテイルに関する小さな値となるので、離散分布で扱うのは必ずしも得策ではない。図6に、需要予測と供給不足(想定需要超過)の関係を示す。ここでは、予測誤差の分布に正規分布、時区間当たりの予測誤差の独立性を仮定して、想定需要超過確率の上限制約から想定需要の下限值(これ以上を想定しないと想定需要超過確率が過大となる)を決めて、予約調達量の下限値を設定する。

いま、ある時区間における想定需要(自社生産量 S + 予約調達量 X)と時区間の想定需要超過確率 P を関係付ける。以下で変数 Z は、時区間の想定需要超過確率の対数と線形関係にある補助変数であり、関係式 $S + X = (2 - Z)Q$ を満たすものとする。 $P = \text{Exp}[aZ + b]$ で想定需要超過確率を近似し、その上限値を P_x とすると、次式が得られる。

$$P \leq P_x \Rightarrow \text{Log}[P] = aZ + b \geq \text{Log}[P_x]$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

図7に、予測誤差の累積分布関数を指数関数で回帰した場合の計算例を示す。この生起確率 P の対数と変数 Z の関係を用いて、時区間ごとの想定需要超過確率の上限(モデルリスク対応の必要に応じては下限)に関する制約条件を、変数 Z の下限(上限)に関する制約条件に書き換えることができる。したがって、想定需要超過確率に関する上

図6 需要予測と供給不足の関係
Fig. 6. Predicted demand and supply policy

図7 累積分布関数の指数関数による近似
Fig. 7. Sample approximation function for cumulative prob. dist

限制約は、予測誤差の確率分布を元に予約調達の下限制約に還元されることがわかる。

多時点モデルでは、個別の時区間の制約条件を同時に扱うことになる。

(4) 想定需要超過継続の制約条件 次に、想定需要超過の状態が継続 (Over-demand continuation) して複数の時区間 (多時点モデル) に亘る事象に関する制約条件を記述する。それぞれの時区間ごとに、想定需要超過の発生をどこまで許容するかという確率に関する上限制約は、上記のように、想定した予測誤差の確率分布を元に、予約調達量の下限制約として還元される。

時区間ごとの想定需要超過確率の対数と線形関係にある補助変数を用いることにより、複数の時区間に対する想定需要超過確率に関する制約条件を表わせる。いま、図4の1日 (5 時区間) の各時間帯に対し制約が課されるとする。その条件は、上限値を P_z とし、各時区間で予測誤差が独立であるとして、次のように表わされる。

$$P(08:00) P(10:00) P(12:00) P(14:00) P(16:00) \leq P_z \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \log[P(08:00)] + \log[P(10:00)] + \log[P(12:00)] \\ & + \log[P(14:00)] + \log[P(16:00)] \geq \log[P_z] \end{aligned} \quad (5)$$

時区間ごとの生起確率は、補助変数の線形関数に近似できるので、想定需要超過の継続を回避するための制約条件は線形不等式制約として記述できる。

〈3・2〉最適化の計算方法 供給コストの関数に現れる折れ線 (区分線形) の関数は、補助変数を導入して線形計画法⁽¹³⁾により解くことができる。この折れ線関数自体は、絶対値関数と直線の組合せから合成することができる。絶対値関数を線形計画で扱う方法は、投資ポートフォリオ最適化に対して提案されている絶対偏差モデル等で用いられており、そのテクニックを適用できる⁽¹⁶⁾。

(1) 区分線形の供給コスト 以下に、予約調達から緊急調達に変わる際に遷移区間を設定するケース (3 段階の折線) に関し、供給コストの関数を記述する。1 時点モデルで目的関数とする時区間の収益 PF は、供給単価を K_d 、需要期待値を Q とすると、供給による売上げの期待値と供給コスト期待値 Y から、次のように表わせる。

$$PF = K_d Q - Y \rightarrow \text{Max.} \quad (6)$$

図5(b)の3領域における供給コストは、図5(c)から、次のような制約条件を用いて表現する。以下において、 Y_1, Y_2, Y_3 は供給コストを表わすための補助コスト関数であり、 u, v, w_2, w_3 は折線を扱うための補助変数である。

$$Y_1 = (K_x - K_s)X + K_x \delta + K_s(Q - \delta) \quad (7)$$

$$Y_2 = w_2 + u \quad (8)$$

$$Y_3 = w_3 + v \quad (9)$$

$$u = (1/2)(K_p - K_x)(X + S + \delta - Q) \quad (10)$$

$$v = (1/2)(K_x - K_s)(X + S - Q) \quad (11)$$

$$-w_2 \leq u \leq w_2 \quad (12)$$

$$-w_3 \leq v \leq w_3 \quad (13)$$

ここで、 Y_1, Y_2, Y_3 は、図5(b)の折れ線のコスト関数 Y の一部をなす直線部分①、②、③のそれぞれに対応して定義されており、次のような関係がある。

- ・ 区間①の供給コスト関数 ($Y_2=0, Y_3=0$) : $Y=Y_1$
- ・ 区間①②の供給コスト関数 ($Y_3=0$) : $Y=Y_1+Y_2$
- ・ 区間①②③の供給コスト関数 : $Y=Y_1+Y_2+Y_3$

(2) 収益期待値 予約調達量を独立変数として、1 日 (n 時区間) の事業収益の確率的な最大化は、以下のように定式化できる。

・ 需要予測値が Q であるとき、実需要は、それぞれ生起確率 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ で、 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ となる。それぞれの需要 Q_k に対応して、自社生産量 S_k 、緊急調達量 W_k が決まる。

・ 供給コストの期待値は、それぞれの需要 Q_k に対して、自社生産量 S_k 、予約調達量 X 、緊急調達量 W_k から決まる供給コスト f_k を用いて、 $\sum P_k f_k(Q_k, S_k, X, W_k)$ となる。

・ 売上高の期待値は、それぞれの実需要 Q_k に対して、売上

高が $K_d Q_k$ となるため、 $K_d \sum P_k Q_k = K_d Q$ となる。したがって、時区間の事業収益の期待値は次式となる。

$$PF = \sum \{K_d P_k Q_k - f_k(Q_k, S_k, X, W_k)\} \dots\dots\dots (14)$$

複数の時区間に亘る多時点モデルで、事業収益を最大化する場合には、時区間ごとの事業収益の総和を最大化する。

4. 予約調達最適化への適用

〈4・1〉 1 時区間の最適化 ケーススタディの評価条件を以下に示す。翌日を 1 時区間（代表的な半時間）で扱う。

- ・ 自社生産（発電）量： 40000 kWh/h
- ・ 翌日需要の期待値： 80000 kWh/h
- ・ 翌日需要の予測精度： 誤差の分布は正規分布とし、標準偏差 5% で予測可能
- ・ 予測誤差の確率分布は、9 ノード離散分布で近似
- ・ 予約調達から緊急調達の切替えに、5000kWh/h 裕度を仮定
- ・ 想定需要超過許容度（想定需要超過確率の上限値）： 0.001 以下（1000 時区間に 1 回の発生までを許容）
- ・ 生産・外部調達・供給単価として、生産単価： 10 円/予約調達単価： 15 円/緊急調達単価： 30 円/供給単価： 20 円を仮定

〈4・2〉 1 時区間の計算結果 1 時区間のケースにおいて予約調達量と事業収益の関係を図 8 に示す。制約条件から決まる想定需要超過確率の下限（Lower bound）より高い（Allowable probability）領域（制約内点）で、最適予約調達量が与えられている。これは、調達過剰サイドよりも調達不足サイドで事業収益の低下が大きいため、予約調達量が大きい方が確率的に収益を最大とするためである。この非対称性は、予約調達量の選択において、需要期待値をもって想定需要を決めることが得策でないことを示唆している。予測誤差が大きいほど、需要期待値を想定需要としたときの予約調達量と最適予約調達量の乖離は大きくなる。

図 8 事業収益を最大とする予約調達量
Fig. 8. Optimum volume of reserved purchase

また、緊急調達単価が増加すると、最適予約調達量が大きくなる傾向が認められる。

図 9 に、需要予測精度、想定需要超過許容度（想定需要超過確率の上限値）を変えたときの最適予約調達量の変化を示す。予測誤差が大きく、想定需要超過制約上限値が小さいと、最適予約調達量は大きくなる。制約上限値が非常に小さい場合、この制約条件は決定的な影響を持つことになる。

〈4・3〉 28 時区間の最適化 多時点モデルを適用するケースを示す。ここで、翌日の半時間単位の 28 時区間の供給計画に対して、予測誤差の大きさを標準偏差 3%，時区間ごとの想定需要超過確率の上限値 0.1，5 時区間に亘る想定需要超過が継続する確率の上限値 10^{-5} および 10^{-6} という条件下でケーススタディを実施した。図 10 に示した需要期待値と自社生産（自社設備による発電）計画を、前提条件と

図 9 想定需要超過許容度に対応する予約調達量
Fig. 9. Lower bound of reserved volume according to allowable prob. for over-demand

図 10 需要期待値と自社生産計画
Fig. 10. Expected demand and self-production schedule

図 11 想定需要超過制約の下での最適予約調達計画

Fig. 11. The optimum volume of reserved purchase subjective to over-demand probability constraints

して運用計画を立てる。

〈4・4〉 28 時区間の計算結果 図 11 に計算結果の例を示す。両端の時区間では、予約調達量はゼロとなる。時区間ごとの最適予約調達量は、1 時区間モデルで言及したように需要期待値をベースとして算出される値よりも供給過剰サイドにシフトしたものとなっている。ここで、想定需要超過の継続に関し生起確率 10^{-6} を上限とした場合に、特定の時区間にピークを生じる特徴的なパターンが現れている。このようなパターンは、制約条件により想定需要超過が 5 時区間継続する確率を抑えていることを反映しており、確率の上限値を 10^{-5} に緩和すると顕著でなくなる。

時区間 28 のケースの最適化計算は、1 万変数規模の線形計画であり、パソコンを用いて 20 分程度の所要時間で解が得られる。

5. まとめ

日本の電力市場は、2007 年度に向けて段階的に完全自由化され、電力ビジネスに競争原理が導入される最中にある。事業者にとっては、収益が不安定となるため、収益変動リスクの管理が大きな課題となっている。このような背景の下で、電力供給のサプライチェーンの運用計画で中心課題となる、自社生産、予約調達を最適化する手法を開発した。

本手法は、電力供給を在庫機能を持たないサプライチェーンと捉えて、確率計画法を用いることにより、需要予測誤差のため需要量と供給計画に乖離が生ずるリスクの下で、事業収益を最大化する。手法の特徴は、①区分線形（折れ線）の目的関数を用いて予約調達の過不足がコストに与える効果をモデル化したこと、および②想定需要超過確率に関する制約条件を導入して想定需要超過リスクをモデル化したことにある。

区分線形の目的関数は、直線と絶対値関数を組み合わせることにより定義した。想定需要超過確率に関しては、時

区間ごとに発生する確率に対する制約、複数の時区間に亘って継続する確率に対する制約を導入した。

開発した手法を 1 時区間、28 時区間のサプライチェーンの運用計画のケースに適用し、リスク管理に有効な定量的知見を得ることができた。

- ・最適予約調達量は、需要期待値を想定需要とするときの値よりも大きくなる

- ・予測誤差が大きく、想定需要超過制約上限値が小さいと、最適予約調達量は大きくなる

- ・最適予約調達量が制約条件から決まる想定需要超過確率の下限より高い領域（制約内点）で与えられる場合がある

このような数値結果より、手法の有効性を確認できた。

（平成 18 年 5 月 8 日受付、平成 18 年 10 月 19 日再受付）

文 献

- (1) D. スミス 外 (久保幹雄 監訳)：「サプライ・チェーンの設計と管理」，朝倉書店 (2002)
- (2) 貝原俊也・藤井 進：「マルチエージェントによるサプライチェーンの企業間交渉モデル」，システム/制御/情報，Vol.46, No.10, pp.615-622 (2002)
- (3) 山本要一：「電力取引入門」，エネルギーフォーラム (2005)
- (4) L. Clewlow and C. Strickland：「Energy Derivatives Pricing and Risk Management」，Lacima Group Pty Limited (2000)
- (5) J. ウェングラー (鮫島隆太郎 訳)：「電力取引とリスク管理—エネルギー市場取引入門」，エネルギーフォーラム (2003)
- (6) J. Lemming：「Electricity Price Modelling for Profit at Risk Management」，Riso Report (2003)
- (7) N-H von der Fehr and D. Harbord：「Competition in Electricity Spot Markets: Economic Theory and International Experience」，Memo. No.5/98, Dept. of Economics, Univ. of Oslo (1998)
- (8) B. Johnson, V. Nagali, and B. R. Romine：「Real Options Theory and the Valuation of Generation Assets」，The new power markets, pp.73-101, Risk Books (1999)

- (9) 長谷川淳・田中英一：「電力の翌日最大需要予測システムの研究開発動向」，電学論，Vol.114，No.9，pp.835-838 (1994)
- (10) 吉川元庸・澤 敏之：「火力・用水発電所の運用計画作成手法」，電学論，Vol.114B，No.12，pp.1220-1226 (1994)
- (11) 資源エネルギー庁：「総合エネルギー調査会電気事業分科会資料」，同庁ホームページ (2006)
- (12) 今野 浩：「線形計画法」，日科技連 (1987)
- (13) 小林康弘・仲田智将・真鍋裕司・清野隆正：「供給不足リスク制約の下での生産・調達計画手法」，2003 年日本 OR 学会秋季研究発表会予稿，1-I-1 (2003)
- (14) 小林康弘・仲田智将・真鍋裕司・三島英裕：「供給不足リスク制約の下での生産・調達計画手法(2)」，2004 年日本 OR 学会春季研究発表会予稿，1-G-5 (2004)
- (15) 小林康弘・仲田智将・真鍋裕司：「供給不足リスク制約の下での生産・調達計画手法(3)」，2004 年日本 OR 学会秋季研究発表会予稿，2-H-4 (2004)
- (16) 今野 浩：「理財工学 I」，日科技連 (1995)

小林 康 弘

(正員) 1947 年生。1975 年東京大学大学院工学系研究科博士課程原子力工学専攻修了。同年(株)日立製作所に入社。1979～1980 年，米国 MIT エネルギー研究所客員研究員。1990 年，電気学術振興賞論文賞受賞。現在，同社日立研究所において，数理計画技術，金融工学の研究開発に従事。工学博士。日本金融・証券計量・工学会，応用時系列研究会会員。

真 鍋 裕 司

(正員) 1977 年生。2003 年早稲田大学大学院理工学究科修士課程経営システム工学専攻卒業。同年，(株)日立製作所日立研究所に入所。現在，リスク管理技術の研究開発に従事。品質管理学会，日本 OR 学会，応用時系列研究会員。

仲 田 智 将

(非会員) 1968 年生。1994 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程工業経営学専攻。同年(株)日立製作所日立研究所入所。金融工学技術の研究開発に従事。2006 年より，同社金融システム事業部にて金融ビジネスコンサルティングを担当。日本金融・証券計量・工学会。

日 下 智

(非会員) 1956 年 10 月 3 日生。1980 年 3 月東北大学工学部機械工学第二学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。火力発電プラント計装・制御システム計画を担当。現在，売電事業の推進・運営業務に従事。火力原子力技術協会会員。