

パフォーマンス・ベースト・ロジスティクスの紹介とゲームについて

佐藤亮@YNU

I. プラットフォーム化によるサービス・イノベーション - PbH の分析の必要

パワー・バイ・ジ・アワー=PbH。別名をパフォーマンス・ベースト・ロジスティクス=PBL と呼ばれている。

製品や製品製造をプラットフォームにして、他社がそのプラットフォームを使うさまざまなビジネスをできるようなおおきなエコシステム（関連業界）を作る。そのうえで、自社は専門知識や深い知識を提供するというサービスをビジネスの核にしていくという流れがある。

製造業のプラットフォーム事例 富士ゼロックス、TSMC、GE

GE はエンジンを製造している。伝統的にタービンを製造している。さまざまな影響を最小限に食い止めることができるというインセンティブによって突発的なエンジン修理を削減する方法を探索するようになる。1 基のエンジン点検から学んだことをすぐに他の技術者やエンジニアと共有し、同じエンジンの航空機がメンテナンスのため突発的に使えなくなるのを防ぐとか、定期点検前の修理回数を減らそうとする。将来的なエンジン故障や故障防止のための適切な点検時期を予測する計算方法を編み出す。データや経験を積むほど、サービスが効率よく提供できる。大量データがあるから可能なのだ。これまでは認識されていなかった知識を基盤とした規模の経済である。専門化によってフィルタされたビッグデータ利用でもある。なお、ゼロックスも GE も「深い知識」の部分をソフトウェアにしていない。

GE のビジネスは、パワー・バイ・ジ・アワーという名称で販売されているが、その具体的なビジネスモデルは何か、詳細はよくわからない。なので、飛行機のエンジンのサプライヤーとしての GE と、顧客である飛行機メーカーとの間のメンテナンス「契約」の側面の論文を勉強する。さらには、メンテナンスサービスという側面にとらわれず、より一般化して、専門サービス提供による製造業の営業モデルのイノベーションとして展開する準備にする。

II. 論文の紹介

“Performance Contracting in After-Sales Service Supply Chains”

Kim, S-H, Cohen, M.A, Netessine S. *Management Science*, Published Online: December 1, 2007.

PbH をエージェントモデル (Principal-agent モデル) の枠組みで分析している。

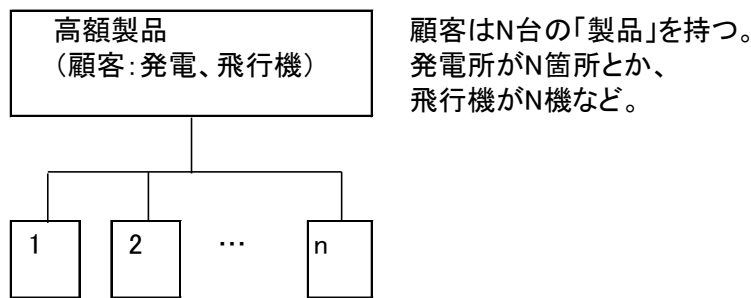
以下で粗く説明する。

1. 状況の説明

顧客は高額の商品や設備を持つ。飛行機や発電所。顧客はそれらを稼働させることで売上を得ている。顧客と各サプライヤーは契約を結んでいる。たとえば、発電所を所有する企業が顧客とすると、タービン、ボイラー、変圧設備、管理装置、等々の「システム部品」(モジュール部品)から設備が構成される。飛行機の場合は、アビオニクス(自動操縦、通信などの航空電子装置)、エンジン、着陸装置、機械部品、攻撃装置(戦闘機の時)といったモジュールがある。

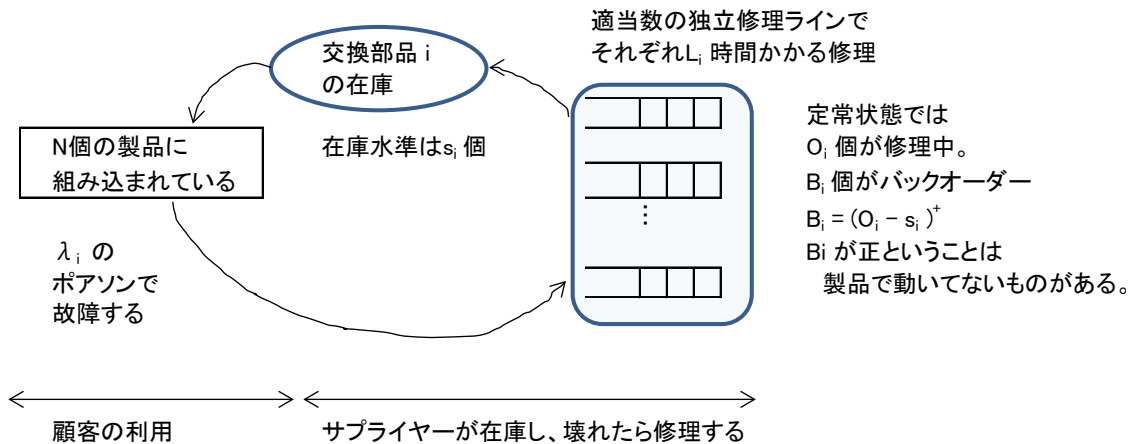
顧客は、設備を安定稼働することで売上を得る。設備は1からnの部品で構成されているので、1からnまでの交換部品のどれか1種類でもなければ、稼働できない。そんな設備をN箇所所有しているのである。

もし設備が故障し、故障時に特定の交換部品がなければ、その交換部品の修理がサプライヤーの工場で終わるまで待たなければならない。また、そうした設備をN箇所あるのだ。(なので、交換部品の品切れについてはペナルティをかけた動機がある。また、それぞれのサプライヤーに対して、故障率に対応しつつ、十分な在庫数を保有してほしい。)



一つの製品はn個のモジュール部品から成る。
各部品には、それぞれのサプライヤがいる。

サプライヤーiの交換部品iの供給の様子



2. 顧客とサプライヤーの契約

顧客は顧客独自の目的関数を持ち最適化をはかる。

サプライヤーも独自の目的関数を持ち、最適化をはかる。

契約の内容（何を決定すると契約が定まるか）を説明する。

顧客とサプライヤー i との契約を考える。

2.1 顧客の支払い

契約は顧客からサプライヤーへ支払われる3つのコスト項目の合計からなる。

(1) 固定金額を支払う (w_i)

(2) サプライヤーの固定費の何割かを補償（補てん）する

（サプライヤーがかかったコスト C_i に係数 α_i を乗じた金額を補償する）

(3) バックオーダーが発生したら、つまり、取り換え部品を即時対応できなければ、サプライヤーにペナルティを課す。（バックオーダー個数（未納個数） B_i にペナルティ係数 v_i を乗じた金額を支払いから減じる）

したがって、顧客からサプライヤーへの支払い契約は、

支払額 = 固定費 + 補償額 - 品切れペナルティ である。

$$T_i(C_i, B_i) = w_i + \alpha_i C_i - v_i B_i$$

つまり、サプライヤー i との契約は $\langle w_i, \alpha_i, v_i \rangle$ という三つ組みの値を決めることである。

・ $\alpha_i = 0$ 、かつ $v_i = 0$ の場合は（純粹）固定額契約（FP）となる

・ $\alpha_i = 1$ 、かつ $v_i = 0$ の場合は cost-plus (C+) と呼ばれ、サプライヤーのコスト C_i が全額保証される。

2.2 サプライヤーの収入は顧客から支払われる契約額

$$T_i(C_i, B_i) = w_i + \alpha_i C_i - v_i B_i$$

2.3 顧客とサプライヤーはそれぞれの効用関数を持ち、その最大化をはかる

(1) サプライヤーの期待効用関数

$$E[U_i(T_i(C_i, B_i) - C_i) - \phi_i(a_i) | a_i, s_i]$$

ここで、 s_i は安全在庫レベル。 a_i は性能品質向上努力・体制によるコスト削減効果。 $\phi_i(a_i)$ は a_i を実施するための費用などの不効用。なお、コストは $C_i = c_i s_i - a_i + \varepsilon_i$ であり、在庫の部品単価を c_i とするときの在庫額から削減費を引き、ランダム変動の ε_i を加えている。

C_i, B_i は確率変数。

(2) 顧客の期待効用関数

$$E[U_0(-\sum_{i=1,n} T_i(C_i, B_i) | \{a_i, s_i\})]$$

(3) 顧客もサプライヤーもリスク回避的だとして設定する。その表現を次で定める。X を確率変数として

$$E[U_i(X)] = E[X] - r_i \text{Var}[X]/2$$

$r_i \geq 0$ の数値の大きさをリスク回避の強さを表現する。

なお、顧客の添え字は $(i = 0)$ であり、サプライヤーは $i = 1, 2, \dots, n$ である。

2.4 パフォーマンス・メジャー (サプライヤーを評価する尺度)

サプライヤーの評価は、すべての N 個の顧客システムが稼働し続ける(available)ことである。顧客のシステム(発電施設だったり航空機製品だったりする)は、ひとつでも部品が提供されないと稼働しないので、バックオーダーが一件も発生しないことが稼働し続けることの意味である。なので、サプライヤー i のパフォーマンスメジャー A_i を次で定義する。

$$A_i = 1 - B_i / N$$

3. 契約とイベント (事態の推移) の関係

1 期の契約

- (1) 顧客がサプライヤー i と契約をむすぶ提示する。
- (2) サプライヤーはそれを受け入れるか、いやなら契約しない。(変更の余地なし) 契約した場合は $\langle w_i, \alpha_i, v_i \rangle$ という三つ組みが決まる。
- (3) 契約したサプライヤーは(1) コスト削減の努力・方策を実施し、(2) 交換部品の補充点 s_i を決定する。
- (4) 契約期間満了時となり、コストの実現値とバックオーダー数が実現する。
- (5) 契約に従ってサプライヤーは契約金 $T_i(C_i, B_i) = w_i + \alpha_i C_i - v_i B_i$ を得る。

4. 顧客とサプライヤーのそれぞれの最適化問題

4.1 顧客にとっての first-best solution (本当の最適解=第1の最適解)

すべてのサプライヤーの努力と在庫水準 $\{a_i, s_i\}$ が観察可能なときには、次の最適化問題を解くことで真の最適解が得られる。U₀ は顧客の効用関数。

(AFB)

$$\min_{\{w_i, \alpha_i, v_i, a_i, s_i\}} E[U_0(\sum_{i=1}^n T_i(C_i, B_i) | \{a_i, s_i\})]$$

subject to (1) バックオーダーの期待値が設定値 \hat{B}_0 以下。 (AR: availability req.)

(2) a_i, s_i のもとでの各サプライヤーの期待収益が非負。

(IR: individual rationality それぞれに契約が妥当)

この顧客最適化問題 (AFB) は解析解をもつ。最適値を与える $w_i, \alpha_i, v_i, a_i, s_i$ が定まるわけ

である。そのときサプライヤの利益はゼロ。

4.2 顧客にとっての現実解 (second-best solution)

(1) サプライヤにとっての問題

ある契約を提示され、契約した場合には、〈固定費、補償費、品切れペナルティ〉が定まる。記号では〈 w_i, α_i, v_i 〉だった。その3つのパラメータのもとで、サプライヤ i は、コスト削減努力と安全在庫量 (a_i, s_i) を自社内で工夫して、利益 (効用) を上げようとする。

(2) 顧客にとっての現実的最適化問題 (セカンド・ベスト最適解) は、理想的最適解を求める問題 (AFB) の制約に、上記のサプライヤの最適化行動を追加したような問題になる。結論的に言えば、この「顧客の現実的最適化問題」の解析解はない。(論文では、頑張っていろいろな場合を分析し、肉薄しようとしている。)

以下では、顧客問題のセカンドベストな解を SB という上付き文字をつけて表すことにする。たとえば、 α_i^{SB}, s_i^{SB} で、補償費係数と安全在庫を表す。セカンドベストな解は、本来は数学的な解であるが、現実実現されている企業行動の場合も、セカンドベストな解だと解釈する。

数理的解析を大幅に完全に略す。

5. 事例

アメリカの戦闘機部隊の場合の例。機数 $N=156$ 機が、適宜、配備されている。いくつかの取りまとめのための過程・前提をおいて、本モデルのパラメータを計算すると次の通り。なお、これは、セカンドベスト最適解に対応する (ハズである)。

		アビオニクス	エンジン	着陸装置	機械部品	兵器
サプライヤ	Subsystem	avionics (a)	engine (e)	landing gear (l)	mechanical (m)	weapons (w)
平均在庫	μ_i	10.46	19.36	13.72	16.87	8.43
部品単価	c_i (in \$1,000)	21.52	6.60	31.08	8.52	14.85

Table 2: μ_i and c_i for each subsystem.

		コストのばらつき小 $\rho_i = 0.02$					コストのばらつき大 $\rho_i = 0.1$					
i		a	e	l	m	w	a	e	l	m	w	
契約状況	補償	α_i^{SB}	0.54	0.67	0.88	0.41	0.51	0.63	0.35	0.92	0.48	0.75
	ペナルティ	v_i^{SB}	5.77	8.11	1.46	6.49	4.35	5.01	12.61	1.14	5.97	3.06
サプライヤ	コスト削減と	a_i^{SB}	99.74	21.66	38.15	50.58	73.10	79.14	43.11	25.01	44.04	37.52
	在庫水準	s_i^{SB}	9.29	23.12	10.51	19.26	8.66	9.35	22.77	10.39	19.27	8.96
稼働率		\hat{A}_i	98.75%	99.69%	97.69%	99.54%	99.33%	98.77%	99.65%	97.63%	99.54%	99.42%
評価尺度												

顧客の方が、7倍ほどリスク回避的 ($r_o/r_e = 7$) .GE の株式時価総額は、ボーイングの時価

総額の 7 倍なので、リスク回避率は 7 になる（理由は不明。一般知識らしい）。（顧客がボーイング、エンジンのサプライヤが GE）. $r_a/r_0 = 1.79$, $r_e/r_0 = 0.15$, $r_l/r_0 = 11.79$, $r_m/r_0 = 1$, $r_w/r_0 = 3.33$ であった。

サプライヤのコストが大きい時と小さい時の、最適契約と、サプライヤーの行動を比較できる。

全サプライヤーのコストの不確実性 ρ_i は同一とする。

契約において、不確実性が高いほど、同一の稼働率 (A_i) を実現するためのコストプレミアム (補償 = α_i) が上がる傾向。エンジンを除いて。エンジンのサプライヤーだけが、不確実性が高いほどプレミアムが下がるということは、GEの方が、顧客よりもリスク回避性が低いのである（現実とモデルが合っている）。

在庫水準は、コスト不確実性が上がってもほとんど影響を受けずに一定的である。

III. PbH ゲーム

4人ゲームで、PbHの手順をゲーミングモデルの骨格にする。

一人は顧客、3人はそれぞれサプライヤー

ラウンド = n で次を行う。

(1) 顧客がサプライヤー i と契約をむすぶ提示する。

<固定費、補償額係数、品切れペナルティ係数> $\langle w_i, \alpha_i, v_i \rangle$

(2) サプライヤーはそれを受け入れるか、いやなら契約しない。（提示された契約を変更する余地なし）契約した場合は $\langle w_i, \alpha_i, v_i \rangle$ という三つ組みが決まる。

(3) 契約したサプライヤーは(1) コスト削減の努力・方策を実施し、(2) 交換部品の補充点 s_i を決定する。

(4) 契約期間満了時となり、コストの実現値とバックオーダー数が実現する。

(5) 契約に従ってサプライヤーは契約金 $T_i(C_i, B_i) = w_i + \alpha_i C_i - v_i B_i$ を得る。

次のラウンド ($n + 1$) に進む。

ゲームの目標は、製造業の多くに適用可能な新たな販売方式を探ること。販売方式の変更を含む、新たなビジネスモデルを探ることである。それとプラットフォーム戦略を統合していきたい。う～む。

(京都会合での発表は以上です。)