

サプライ・チェーンの リスク管理における 数理モデル

有江 禎晶 (東京海洋大学 学部4年)

久保 幹雄 (東京海洋大学 教授)

アウトライン

- イントロダクション
- リスク管理のアプローチ
- 数理モデル
- モデルの利用

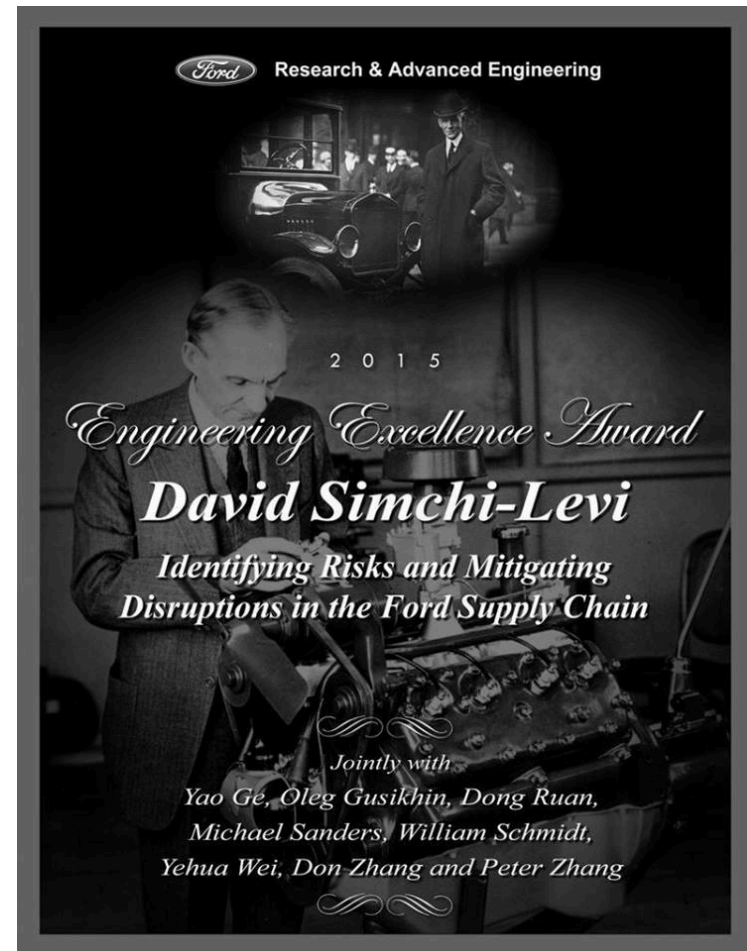
紹介

FordMortorsとMITのSimchi-Leci教授
らがIFFORMSのWagner賞を受賞した
事前研究

線形最適化を用いて、サプライ・チェ
インの供給リスクを定量的に評価す
るためのモデルを提案した。

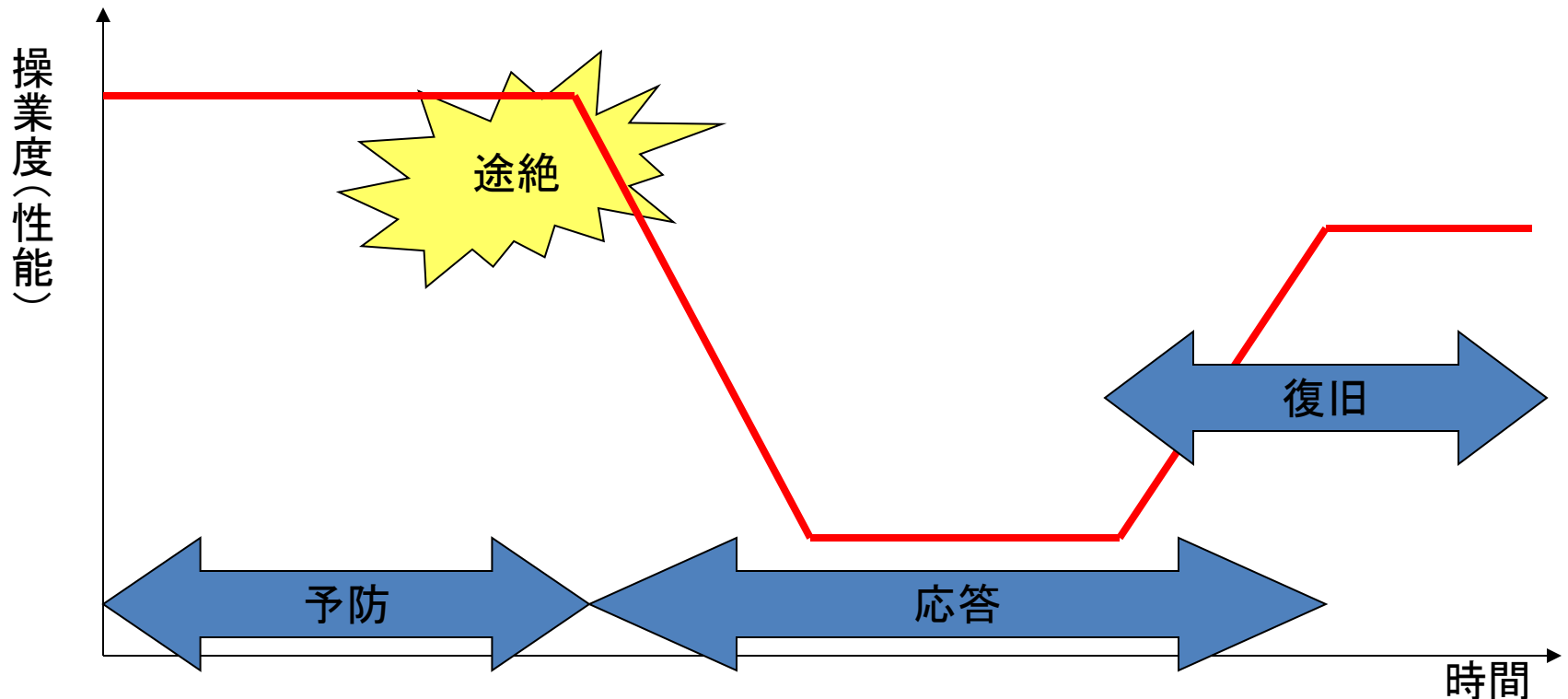
URL:

[https://www.informs.org/Re
cognize-
Excellence/INFORMS-Prizes-
Awards/Daniel-H.-Wagner-
Prize-for-Excellence-in-
Operations-Research-
Practice](https://www.informs.org/Recognize-Excellence/INFORMS-Prizes-Awards/Daniel-H.-Wagner-Prize-for-Excellence-in-Operations-Research-Practice)



サプライチェーン・リスク管理

- 効率性だけでなく、リスクに対して柔軟かつ頑強なサプライチェーンを目指す。
- サプライチェーンの途絶 (disruption) を考慮する。

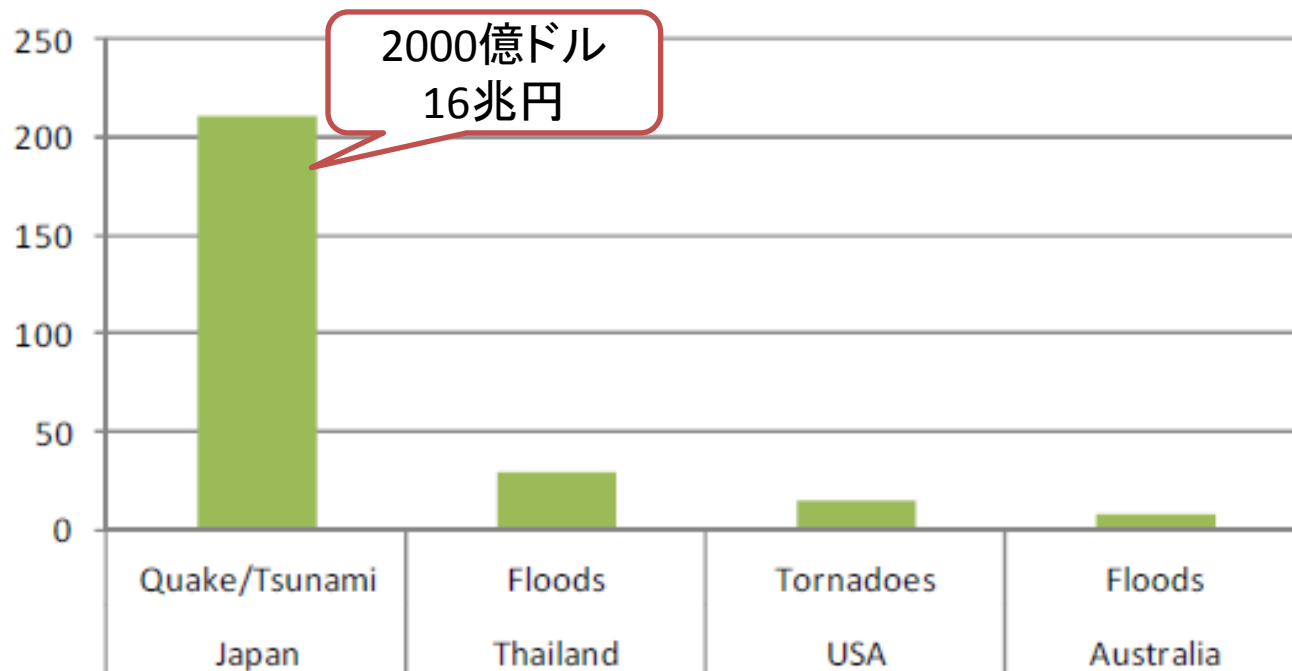


重要性の高まり

- 大規模災害の発生頻度の増加
 - － 自然災害:地震, 津波, 台風・ハリケーン・サイクロン, 雪崩, 竜巻, 干ばつ, 噴火, 飢饉, 洪水, 重症急性呼吸器症候群(SARS), 牛海綿状脳症(BSE), 口蹄疫, 鳥インフルエンザ+ドミノ(将棋)倒し現象
 - － 人的災害(人災):原子力発電所の事故, テロリストによる攻撃(CBRNE災害), 戦争, ストライキ, 暴動
- サプライ・チェーンのスリム化
 - － カンバン方式(リーン生産方式)に代表される在庫削減活動 =>脆弱性増加
- グローバル化
 - － 長リード時間, アウトソーシング, 治安・政治的・為替リスク

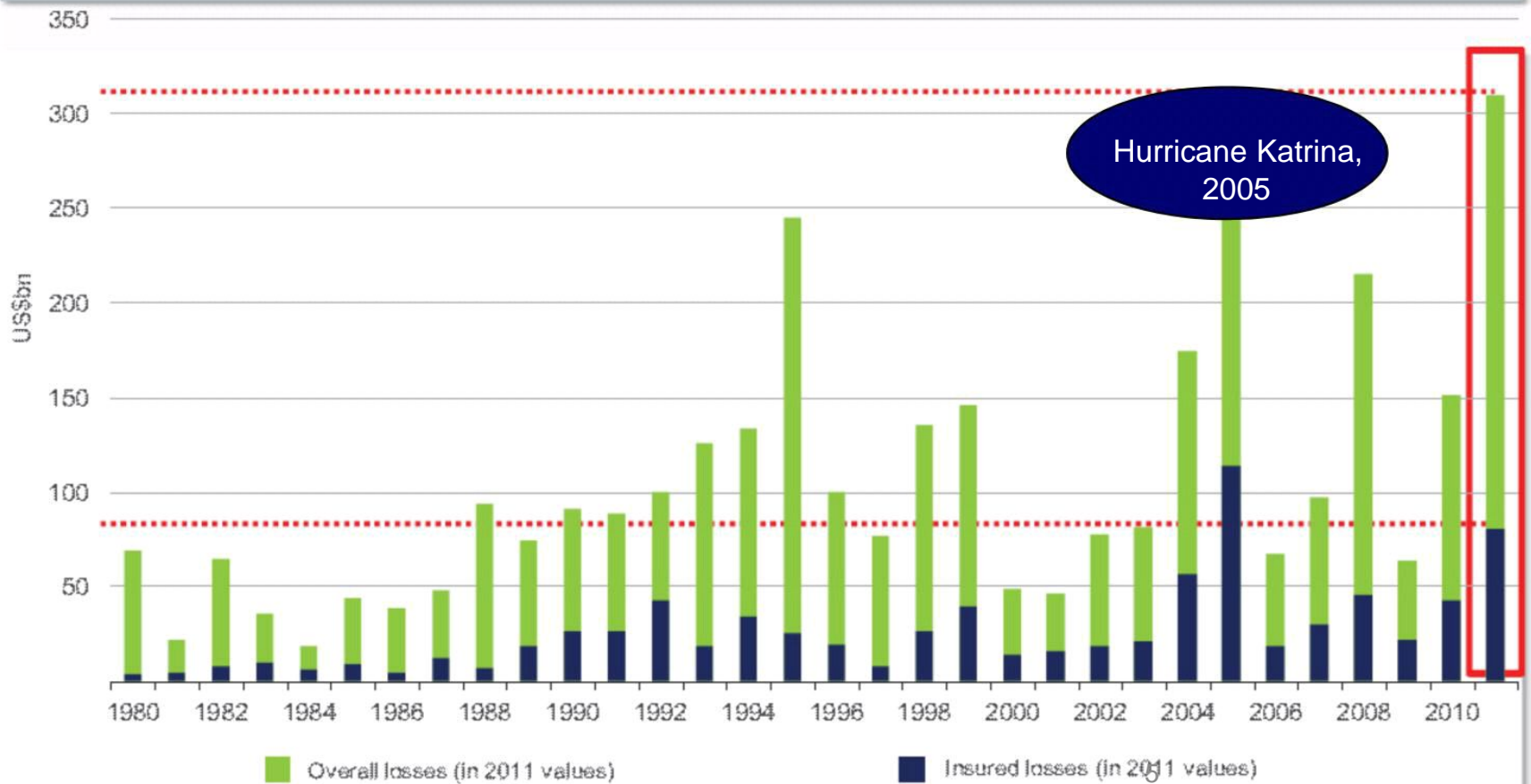
- タイの洪水によりインテルの売上ダウン
- 日本の津波によりGMのトラックプラント閉鎖

Natural Disasters 2011 Cost (\$B)



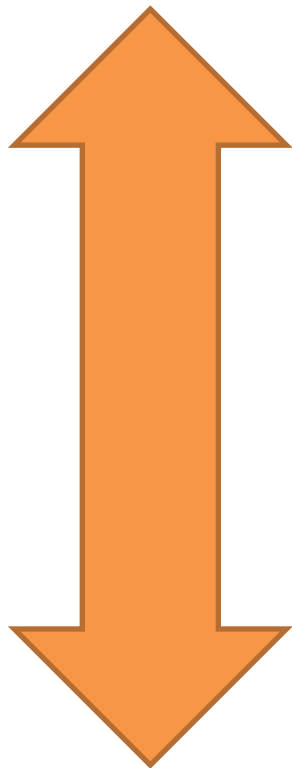
Worldwide Natural Disasters 1980 2011 Source: Munich Re

Losses in 2011 (January – September): Overall = US\$ 310bn; Insured = US\$ 80bn



様々なリスク

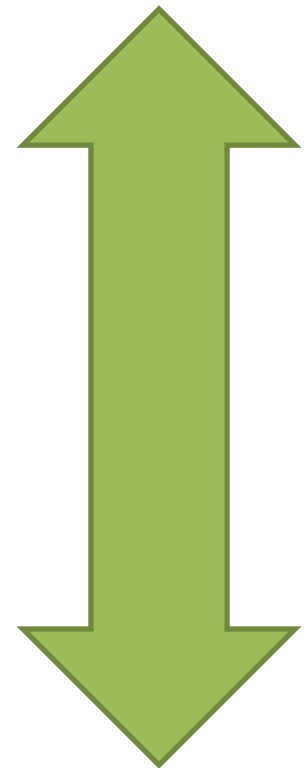
予測可能



予測不可能

自然災害
地理的なリスク
伝染病等
テロ攻撃
環境リスク
石油価格変動
人件費高騰
通貨変動
偽造品の流通
納期遅れ
市場変更
供給拠点の能力不足
需要予測の変動
現場での軽いトラブル

コントロール可能



コントロール不可能

エボニック社の工場

- 工場が爆発しナイロン12(燃料タンクやシート
の生地等に使用)の供給がストップ
- 再開まで6ヶ月間もの期間が必要となり、
- その間下流部にある企業に被害が生じた。

※ ナイロン12:ポリアミド, 密度が低く丈夫

東日本大震災

災害発生後、一部のサプライ・チェーンの供給途絶が連鎖的に他工程の生産活動の停滞につながるケース



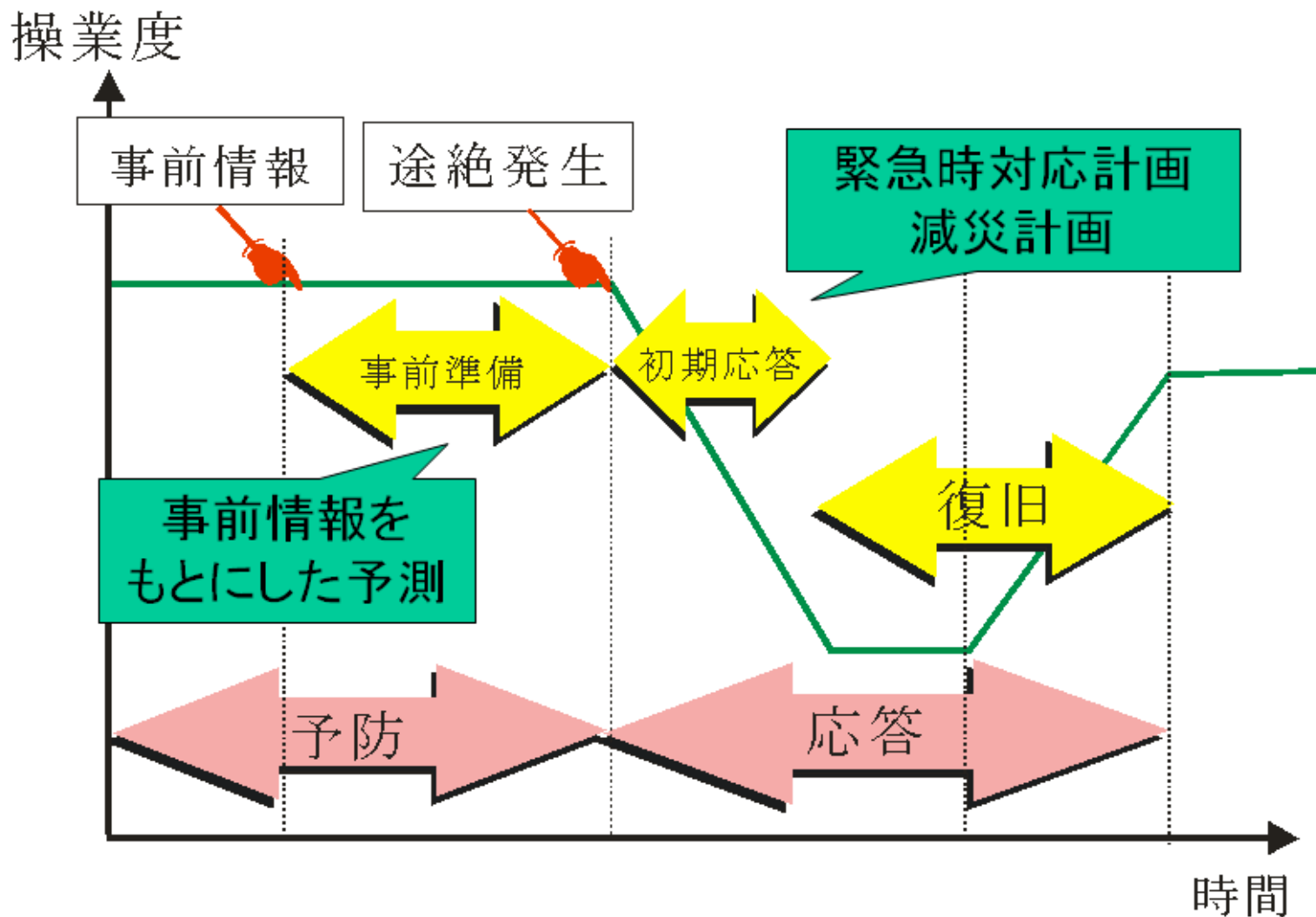
出典:

<https://www.keidanren.or.jp/japanese/journal/trend/201112ex/kigyo10.html>

出典:

http://www.kurumaerabi.com/car_news/info/41783/

リスクに対する対処法



アウトライン

- イントロダクション
- リスク管理のアプローチ
- 数理モデル
- モデルの利用

リスク管理の現状

- その場しのぎや勘で判断を行い明確な指標を持っていない場合が多い。
 - 予測・コントロール不可能なリスクに脆弱となっている場合が多い。
- 過剰に投資を行いリスク管理を行っている場合がある。
 - 資金や資源の浪費の可能性も

リスク管理の現状

- 顧客の要求が大きい部分のリスク管理に力を入れている。
- サプライ・チェーン全体のフォードは、約20%ほど行っている。
- 残り80%の中に、途絶で甚大な被害が発生するものが含まれている。



単価が安く、通常時の利益率が高くないが、
途絶が発生した場合の損失額が大きな所がある。

3種類のリスク

- 大きなリスク (Obvious high risk)
デュアルソーシング等で対策
- 小さなリスク (Low risk)
日々の超過在庫等で対処
- 見えないリスク (Hidden risk)
→ 予想していない場所が危険に晒されている可能性がある。

今までのリスク管理では、
不十分な場所が存在する。
実際に被害がでている。

見えないリスク

- 例) 自動車業界

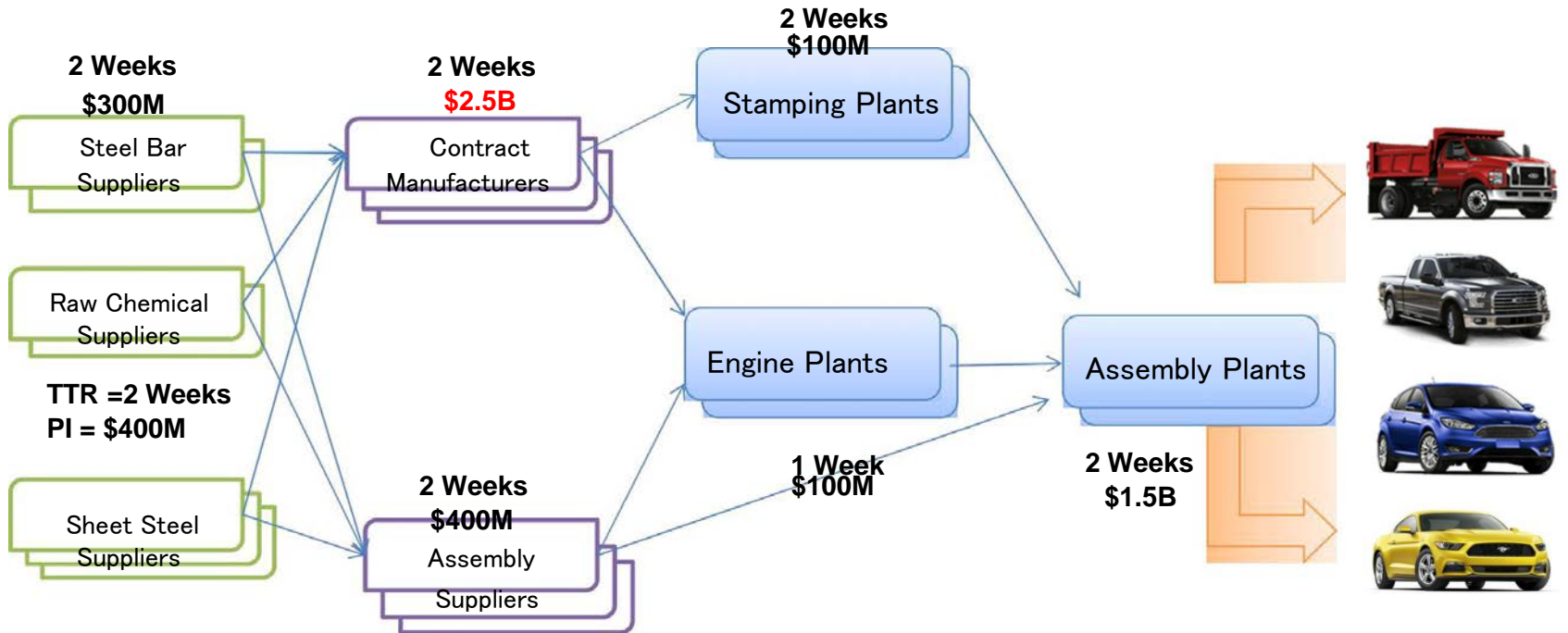
- Oリングやバルブの供給拠点

- ✓ 単価が車の製品自体、それを構成するエンジンやシートやフレームと比較して安い。
- ✓ 通常営業時のコストは全体からすると極めて小さい。



その工場の委託会社が一つだけ存在
途絶発生時、需要を満たせるのか？

Illustrating Our Approach



契約工場が他の組み立てプラントにも繋がっている
しかし、その工場の数が少ない場合被害が大きい

見えないリスクへの対策

- 自然災害等で供給途絶が発生した場合、その発生した場所が企業にとってウィークポイントなのか？
- 実際に途絶発生後から対応するのではなく、事前に対策すべきである。
- 第一段階としてウィークポイントを発見すべきである。

アウトライン

- イントロダクション
- リスク管理のアプローチ
- 数理モデル
- モデルの利用

フォードの挑戦

- 複雑なサプライ・チェーン構造
 - 50以上の組み立てプラント
 - 10層もの供給地点
 - 1次サプライヤーが1400社、60カ国以上に展開、全部で4400拠点存在
 - 55000パーツ存在
 - 年間600万台生産

モデル作成へ

- プラントが停止した時にどの程度被害があるかプラント毎に知りたい。
- 実際に途絶を考慮したシミュレーションをする。
- ウィークポイントとなるプラントを知りたい。

モデルに必要な要素

- プラント情報
- BOMとそれに対応するパーツ
- 販売量と利益
- パイプライン在庫
- 途絶期間

これらを基に最適化

データの入手方法

- シンプルなアンケートで、実際に最適化を行うためのデータを確保する。

被害評価の方法

特定のサプライヤーに想定されるリスクを評価するために各地点に対して、途絶回復にかかる時間(Time To Recover)を計算します。

下記の簡単なアンケートに答えて調査することが可能です。

1. 供給地点

- プラントの設置場所(国や地域や都市等)

2. プラントにある部品

- 製品番号と種類
- 製品のコスト
- 部品の年間使用量
- 部品の在庫情報(days of supply)
- プラントの年間料金

3. 最終製品

- OEM の最終製品
- 最終製品の利益率

4. OEM 工場へのサプライヤーからのリードタイム

- 日数

5. Time to recovery(TTR) プラントが完全に復旧するまでの時間

- 供給地点プラントが被害を受けた
→軽度の場合
- 重度の場合

6. 対応時の費用

- 別のプラントから部品を送ることは出来ますか？その際、どの程度の費用が発生しますか？
- プラントは柔軟な対応が出来ますか？その際、どの程度の費用が発生しますか？

7. 供給地点リスク評価

- 供給プラントがシングルソーシングになっていませんか？
- 代わりの売り手がパーツを供給出来ますか？
- 供給プラントは財政的に安定しますか？
- 供給プラントは柔軟に対応出来ますか？(リードタイムやプラント容量や fill-rate)

8. 供給地点と部品の関係を戦略的に緩和

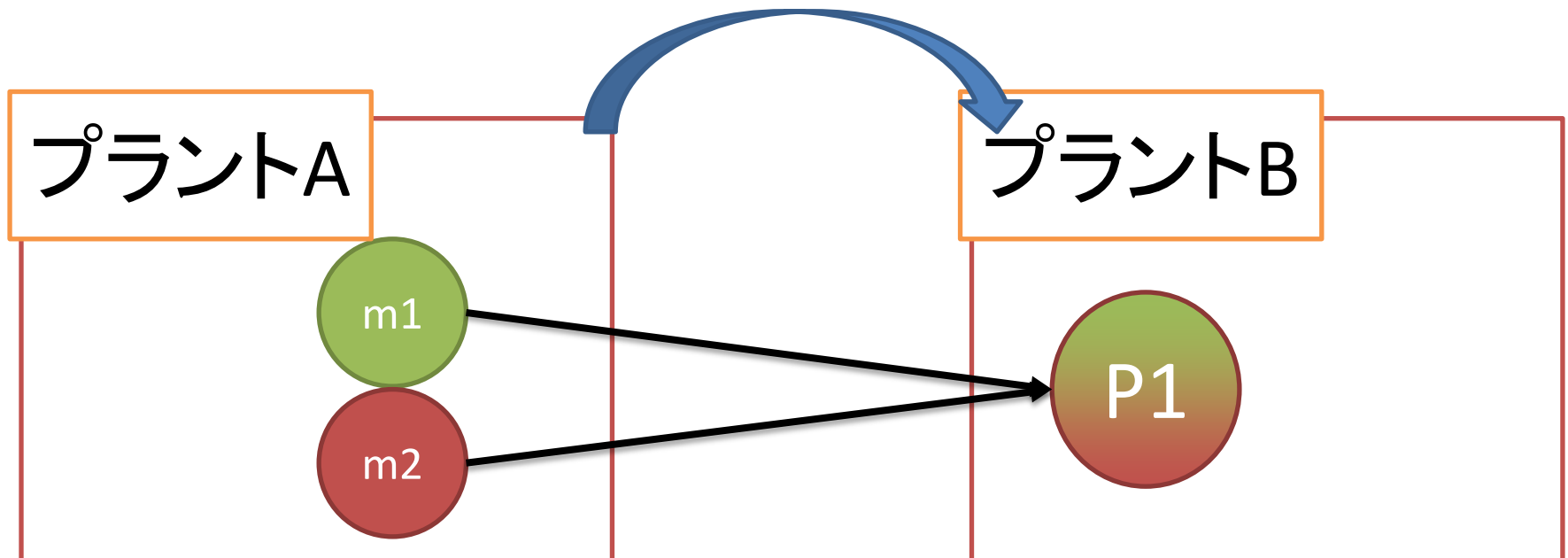
- 供給プラントを選択可能に
- 在庫を増やす
- その他

被害評価の方法

1. 供給地点
2. プラントにある部品
3. 最終製品
4. 委託プラントへのリードタイム
5. プラント復旧までの時間
6. 対応時の費用
7. 供給地点のリスク評価
8. 供給地点と部品の関係を戦略的に緩和

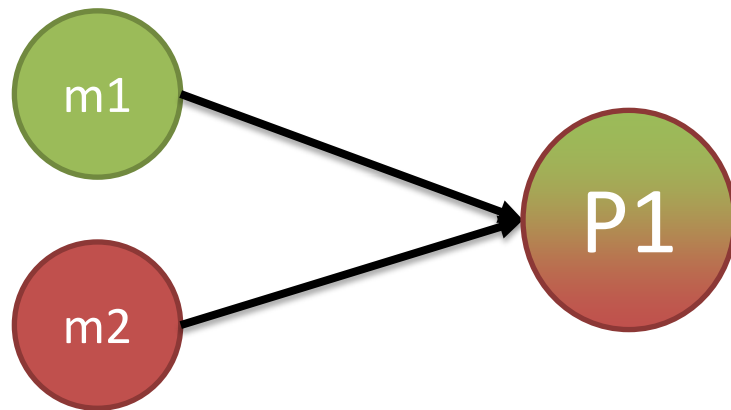
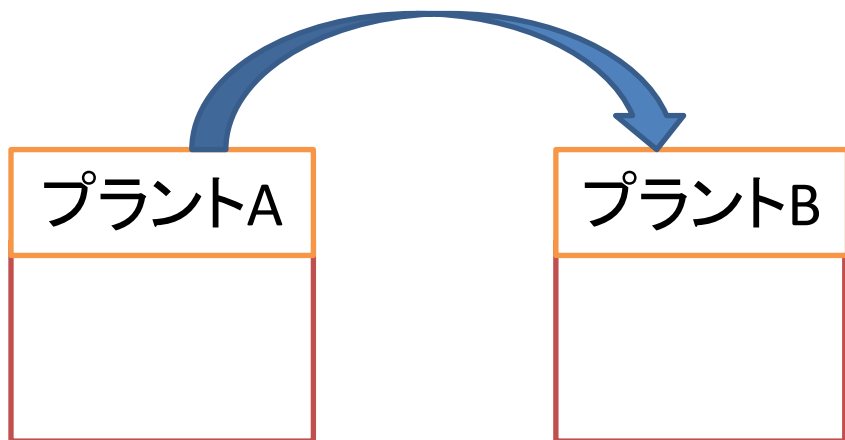
サプライ・チェーンのグラフ化

- サプライ・チェーンネットワークは、プラントのネットワークだけでなく、製品や半製品のネットワークと一緒にになっている。



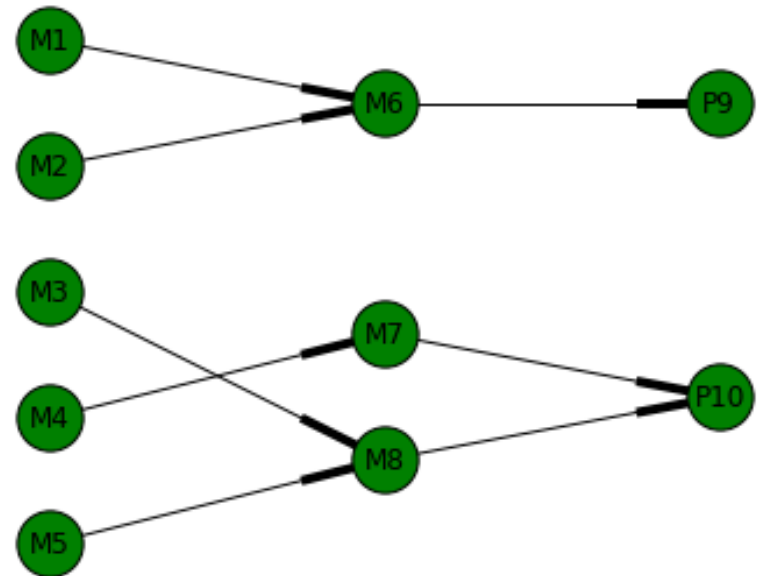
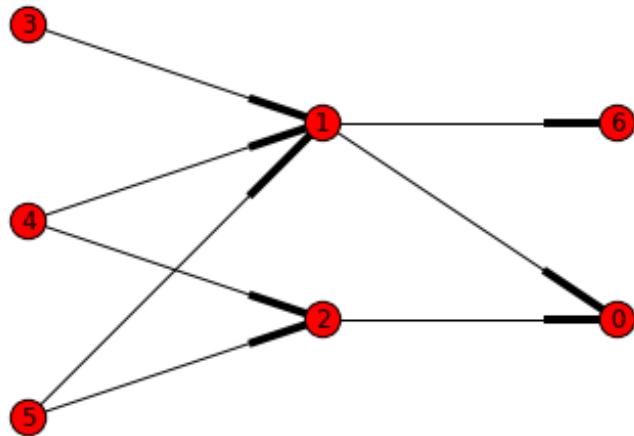
サプライ・チェーンのグラフ化

- プラントグラフと製品グラフが存在している

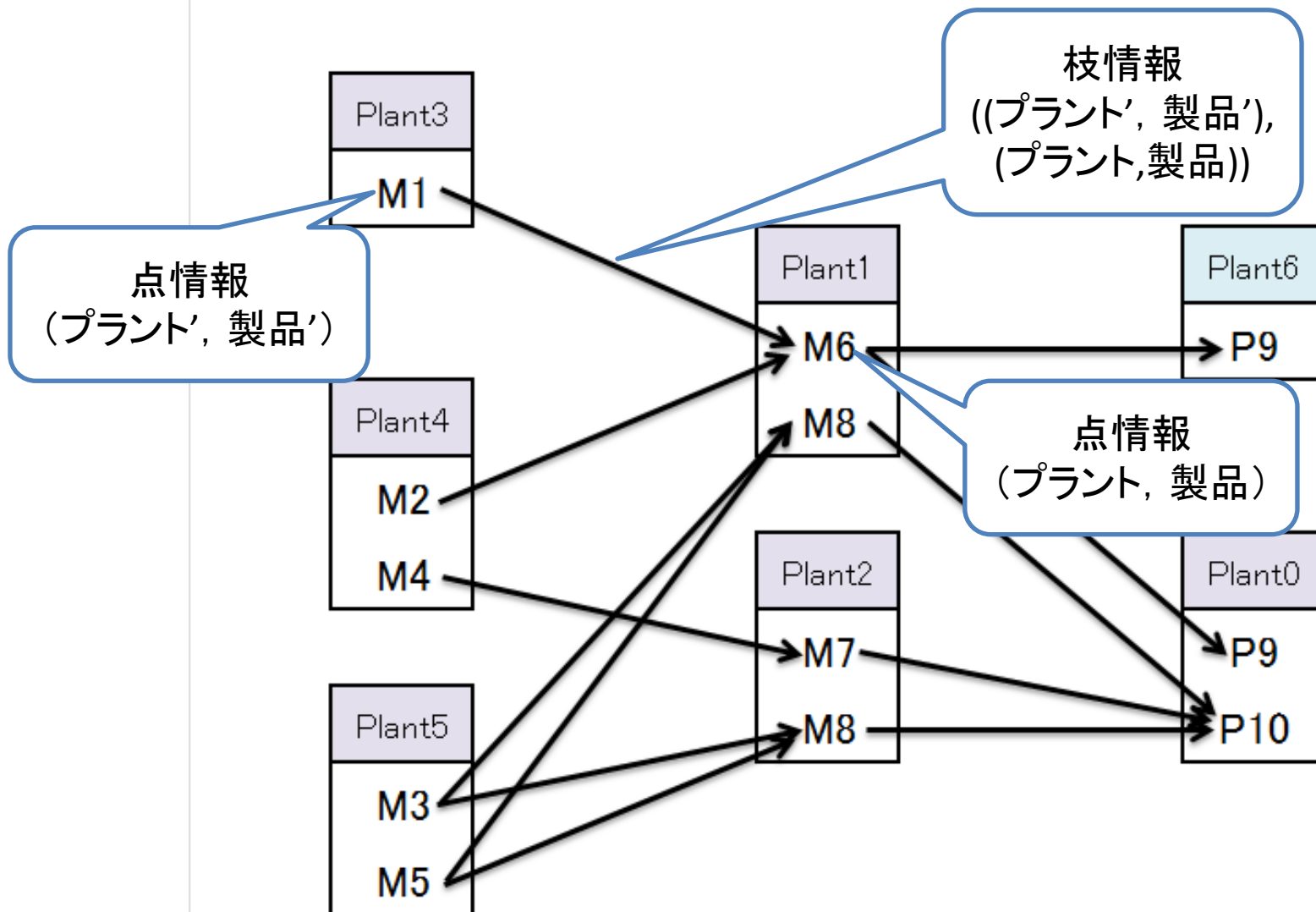


サプライチェーンのグラフ化

プラントグラフ + 製品グラフ
(プラント間の輸送) (製品の親子関係)



サプライ・チェーンのグラフ化



途絶時のコスト最小化

- 見えないリスクを有するプラントを知ることが第一段階
- フォード社はモデルを使用して、各製造ラインに対して2週間の途絶を想定し最適化を行った。
- 途絶が発生した際の販売機会損失額を最小化する最適化を行った。

モデル定式化

グラフ

$Prod_{NA}$: 全体グラフ

N : 点 (B,P)

A : 枝 ((B',P'),(B,P))

集合

S : シナリオ

D^s : 途絶シナリオ

B : プラント

R : 需要地点

P : 製品及び半製品

F : 製品

$Plant_i$: プラント情報

変数

l_{ip} : 販売機会損失台数

x_{ip} : 生産量

$r_{(jq,ip)}$: 輸送量

パラメータ

c_{ip} : 販売利益

d_{ip} : 需要量

I_{ip} : パイプライン在庫

t^n : 途絶期間

M_i : プラント容量

BOM_{qp} : BOM データ

添字

i, j : 各プラント

p, q : 各製品及び半製品

s : 各シナリオ

モデル定式化

$$\text{minimize} \quad \sum_{(i,p) \in (R,F)} c_{ip} l_{ip}$$

$$\text{sb.to} \quad x_{ip} \leq \sum_{(jq,ip) \in A} \frac{r_{(jq,ip)}}{BOM_{qp}} \quad \forall (i,p) \in N$$

$$\forall q \in CHILD_p$$

$$\sum_{(jq,ip) \in A} r_{(jq,ip)} \leq I_{ip} + x_{ip} \quad \forall (i,p) \in N$$

$$x_{ip} = 0$$

$$\forall (i,p) \in D^s; \forall s \in S$$

$$l_{ip} \geq d_{ip} t^n - x_{ip}$$

$$\forall (i,p) \in (R,F)$$

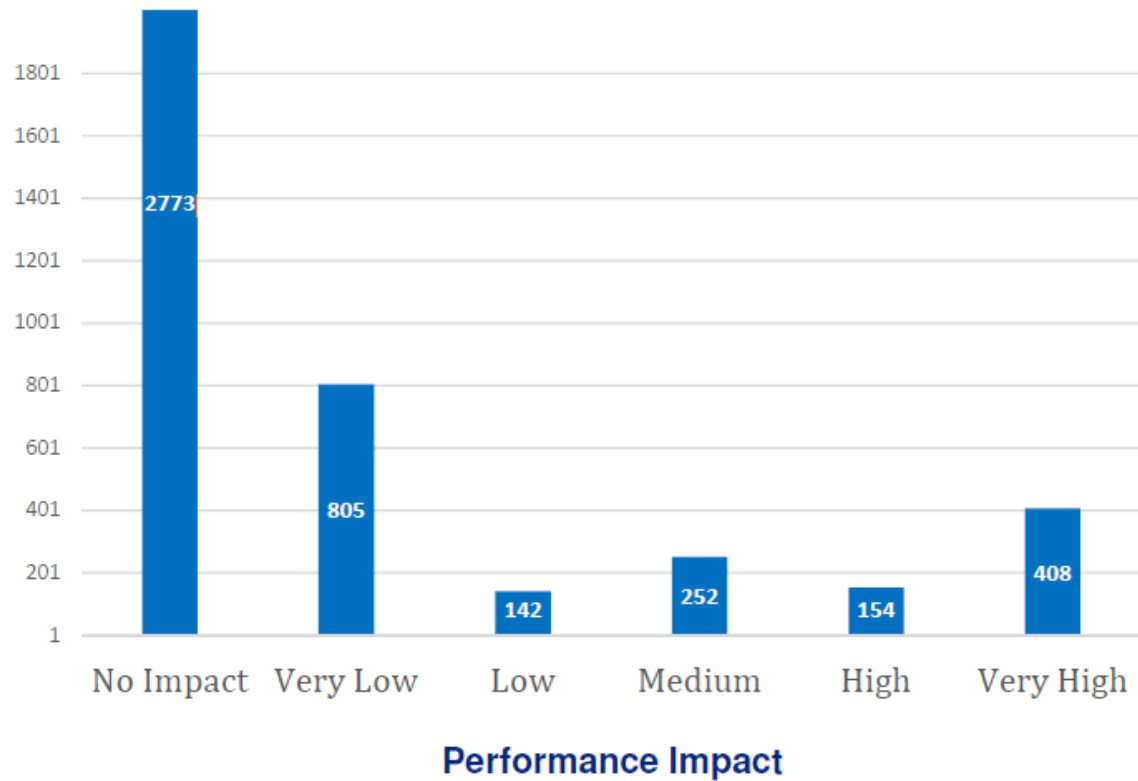
$$\sum_{p \in Plant_i} x_{ip} \leq M_i t^n$$

$$\forall i \in B$$

$$x_{ip}, r_{(jq,ip)}, t^n \geq 0$$

フォードの結果

Number of Sites



Another 2773 sites with No Impact

結果への反応

- 分析をした結果61%のプラントは途絶が発生しても影響はないが、2%のプラントの被害が甚大だった。
- フォードの予測と異なる結果も多く含まれた。

新たなモデルの作成へ

- 2週間で被害の出たプラントはどの程度まで耐えることが可能なのか？
- 各プラントの強靭さを知りたい。
 - 途絶が原因となる販売機会損失が発生する直前の途絶日数を、シミュレーションで予測する。

モデル定式化

グラフ

$Prod_{NA}$: 全体グラフ

N : 点 (B,P)

A : 枝 ((B',P'),(B,P))

集合

S : シナリオ

D^s : 途絶シナリオ

B : プラント

R : 需要地点

P : 製品及び半製品

F : 製品

$Plant_i$: プラント情報

変数

x_{ip} : 生産量

$r_{(jq,ip)}$: 輸送量

t^n : 途絶期間

パラメータ

d_{ip} : 需要量

I_{ip} : パイプライン在庫

M_i : プラント容量

BOM_{qp} : BOM データ

添字

i, j : 各プラント

p, q : 各製品及び半製品

s : 各シナリオ

$$R \subseteq B$$

$$F \subseteq P$$

モデル定式化

maximize t^n

$$\text{sb.to } x_{ip} \leq \sum_{(jq,ip) \in A} \frac{r(jq,ip)}{BOM_{qp}} \quad \forall (i,p) \in N$$

$$\forall q \in CHILD_p$$

$$\sum_{(jq,ip) \in A} r(jq,ip) \leq I_{ip} + x_{ip} \quad \forall (i,p) \in N$$

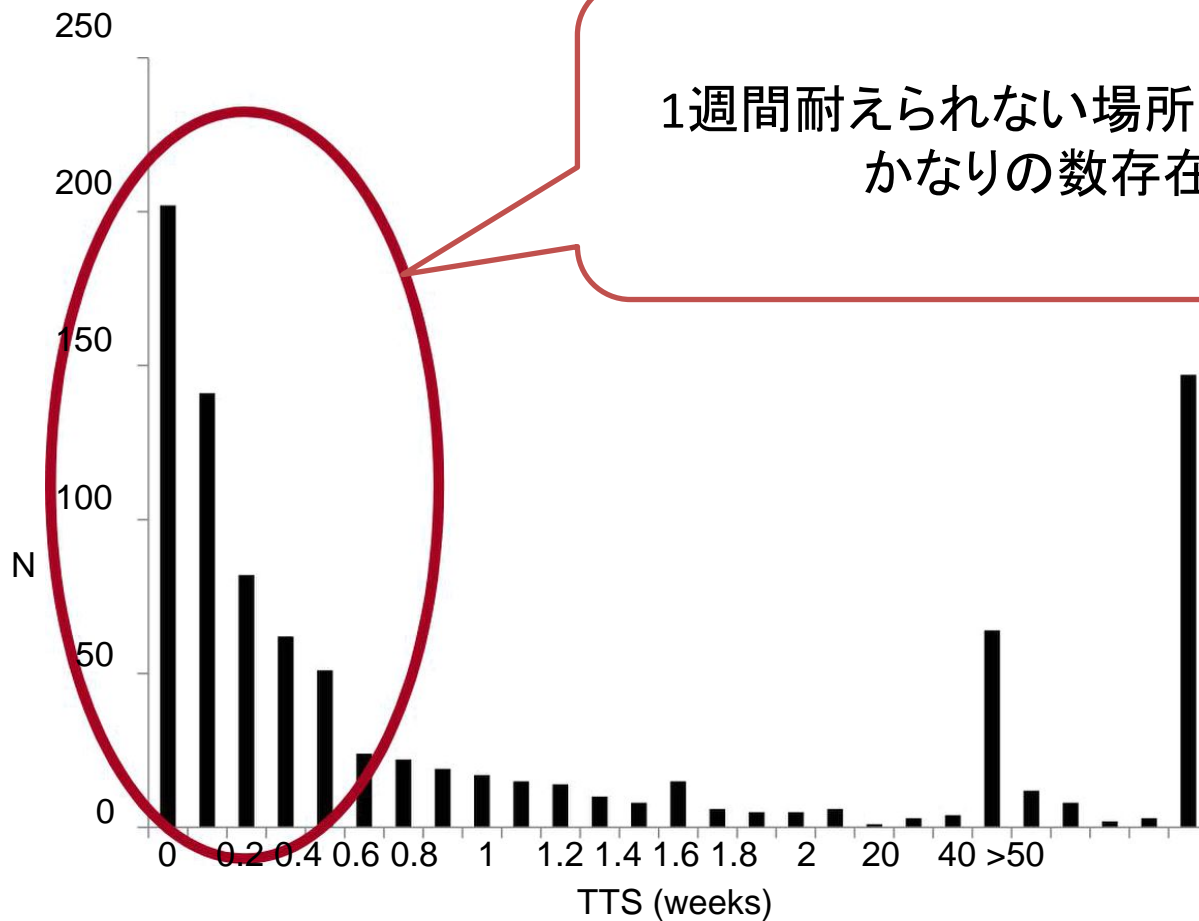
$$x_{ip} = 0 \quad \forall (i,p) \in D^s; \forall s \in S$$

$$x_{ip} \geq d_{ip} t^n \quad \forall (i,p) \in (R, F)$$

$$\sum_{p \in Plant_i} x_{ip} \leq M_i t^n \quad \forall i \in B$$

$$x_{ip}, r(jq,ip), t^n \geq 0$$

フォードの結果



1週間耐えられない場所が
かなりの数存在した。

アウトライン

- イン트로ダクション
- リスク管理のアプローチ
- 数理モデル
- モデルの利用

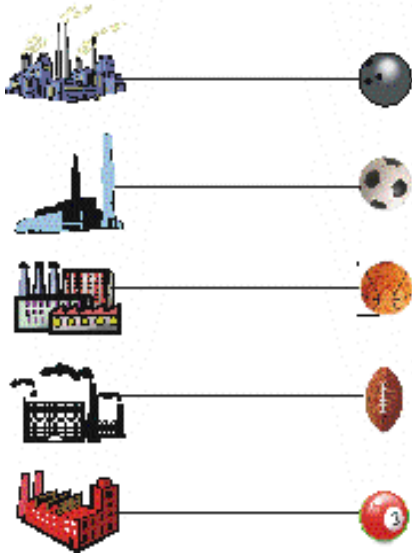
モデルの利用

- 意思決定の一手段であること
 - － 戦略的なリスク分析
 - プラントや部品に想定されるリスクの発見
 - 効果的な資源を優先や配分
 - デュアルソーシングや緩和戦略の強化
 - リスク緩和コスト削減の機会発見
 - － 戦術的な危機回避
 - 新たなリスク発見の責任者への警告
 - － 作戦的な途絶への対応
 - 途絶後の効果的な資源配分の発見

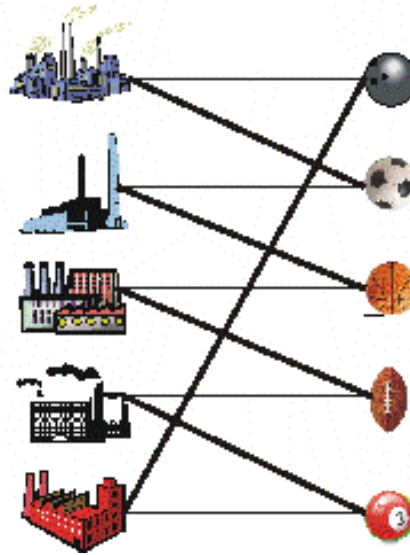
フォードが得た物

- リスク管理の新たなツール
- 危険性のある供給点と部品のリスト
 - フォードが元々危険と判断していた1500地点
 - モデルで発見した25億ドル以上の被害がでる2600地点
 - 2600地点のうち1100地点は危険と判断していた
 - モデルで新たな1500地点の発見に成功
 - 400地点は危険でなかった

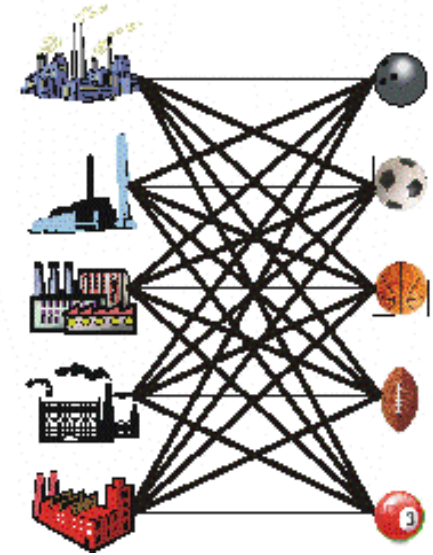
柔軟な生産



1-柔軟性



2-柔軟性



全-柔軟性

Graves-Tomlin: 需要の不確実性に対処: 2-柔軟性で十分
最近の実験 : 供給も不確実な場合には2-柔軟性では不十分

柔軟な対応をした例

- ペプシボトルグループ
 - サプライヤー近くの化学工場が火災
 - 素早く材料を生成する工場の変更
- ノキア
 - 供給プラントの火災
 - 部品を標準化していたため被害小

在庫管理

- 今までの実験結果だけでなく、新たな判断材料を増やす。
- 1番目のモデル(コスト最小化)を利用し、新たなモデルを作成

→ 今、在庫をどの程度持つべきなのか？

期待値最小化へ

- 途絶シナリオをプラント毎に確率をつけて作成して、被害額最小化を目指す。
 - 例)各プラント10%の確率で2週間の途絶が発生する
- パラメータのパイプライン在庫を、変数に変更する。

モデル定式化

グラフ

$Prod_{NA}$: 全体グラフ

N : 点 (B,P)

A : 枝 ((B',P'),(B,P))

集合

S : シナリオ

D^s : 途絶シナリオ

B : プラント

R : 需要地点

P : 製品及び半製品

F : 製品

$Plant_i$: プラント情報

変数

ℓ_{ip}^s : 販売機会損失台数

x_{ip}^s : 生産量

$r_{(jq,ip)}^s$: 輸送量

I_{ip} : パイプライン在庫

パラメータ

ρ^s : 確率

c_{ip} : 販売利益

d_{ip} : 需要量

t^{n^s} : 途絶期間

M_i : プラント容量

BOM_{qp} : BOM データ

添字

i, j : 各プラント

p, q : 各製品及び半製品

s : 各シナリオ

モデル定式化

$$\text{minimize } \sum_{s \in S} \rho^s \sum_{(i,p) \in (R,F)} c_{ip} \ell_{ip}^s + \sum_{(i,p) \in N} h_{ip} I_{ip}$$

$$\text{sb.to } x_{ip}^s \leq \sum_{(jq,ip) \in A} \frac{r_{(jq,ip)}^s}{BOM_{qp}} \quad \forall (i,p) \in N$$

$$\forall q \in CHILD_p; s \in S$$

$$\sum_{(jq,ip) \in A} r_{(jq,ip)}^s \leq I_{ip} + x_{ip}^s \quad \forall (i,p) \in N; \forall s \in S$$

$$x_{ip}^s = 0 \quad \forall (i,p) \in D^s; \forall s \in S$$

$$\ell_{ip}^s \geq d_{ip} t^{n^s} - x_{ip}^s \quad \forall (i,p) \in (R,F); \forall s \in S$$

$$\sum_{p \in Plant_i} x_{ip}^s \leq M_i t^{n^s} \quad \forall i \in B; s \in S$$

$$x_{ip}^s, r_{(jq,ip)}^s, t^{n^s} \geq 0$$