2005.9.16 JIMA秋季全国大会
愛知学院大学 (名古屋)

制御理論に基づくミルクラン型物流システムの特性解析

武蔵工業大学
後藤　正幸，増井　忠幸，俵　信彦

はじめに (背景)

情報化
グローバル化
商品の多品種化
ライフサイクルの短縮化

→ 市場環境の変化

情報技術

複雑な物流プロセス

サプライチェーン･マネジメント
ロジスティクスの情報化

効率的なモノの流れや
経済的な在庫管理

情報共有の有効性 (情報の価値)

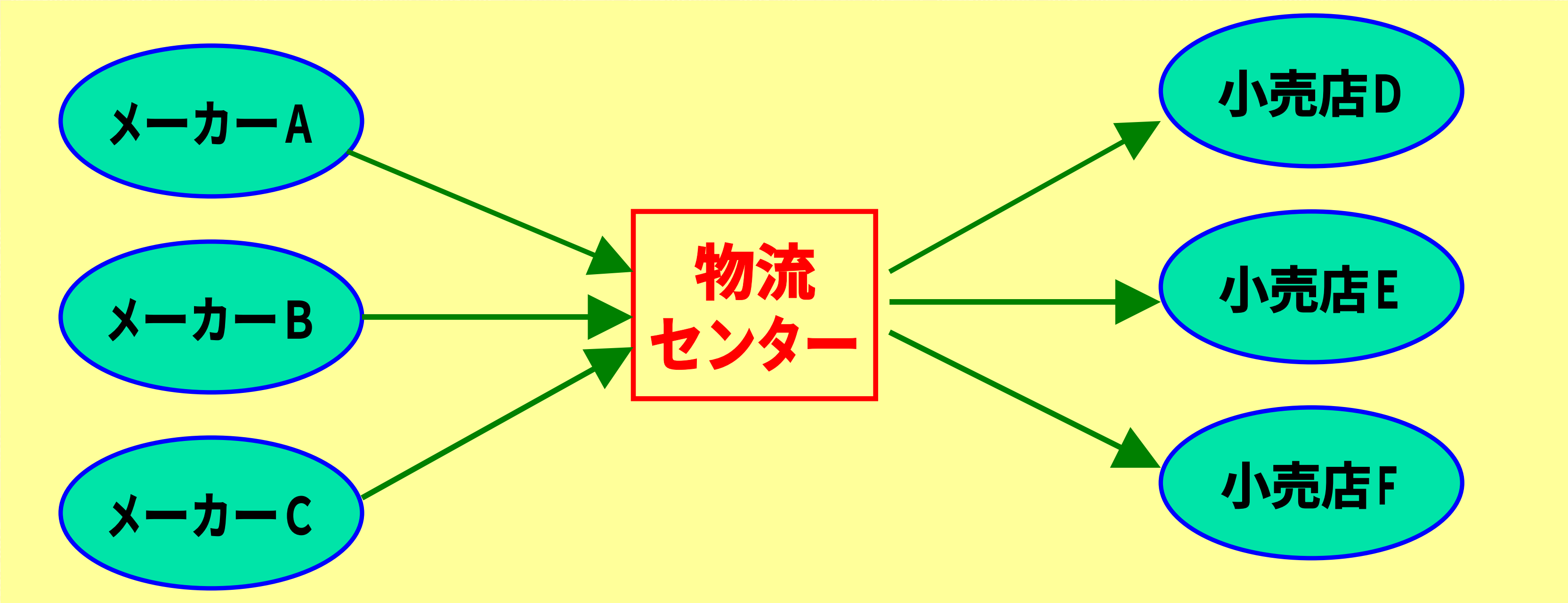
情報を共有しさえすれば良いのか???

･情報チェーン (情報の流れ) のマネジメント,
･新たな物流パラダイムの開発　　も重要

2005,9,16
JIMA秋季全国大会

はじめに（背景）：企業の目的

- 企業の利益増は、“売上を伸ばすこと”と“コストを低減すること”によって、実現される。
- コストを下げる一つの方法は、在庫を低減し、輸送費用を管理することである。
- 物流、サプライチェーンは企業活動の“強力なツール”として、差別化に寄与する。



研究目的

従来の多段階流通在庫モデル：

メーカーで生産される製品を中間在庫拠点である物流センターで一括納入し、小売店に仕分け配送する

在庫過剰 **あるいは** **品切れ**

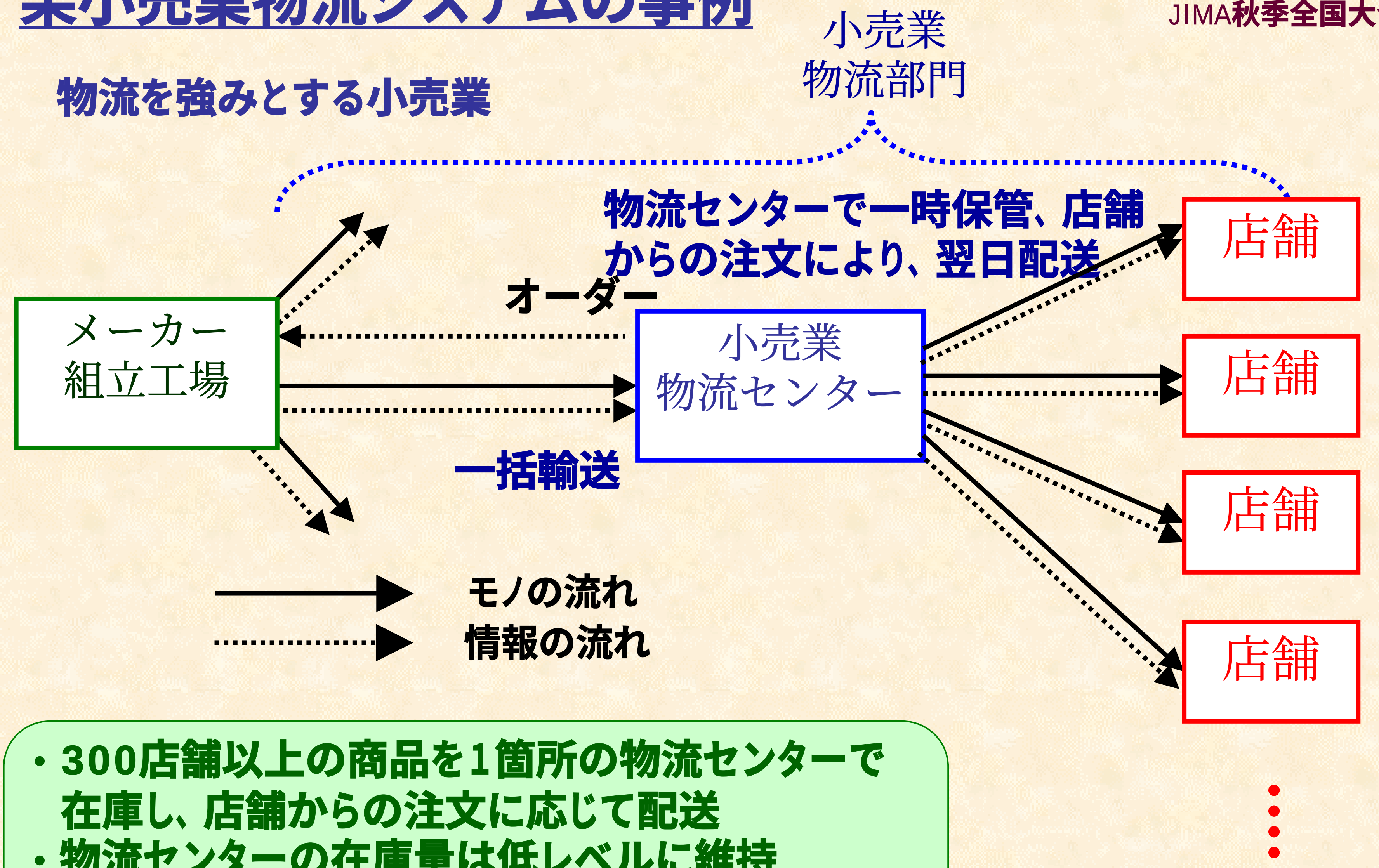
ミルクラン型物流システム

将来の理想系として、**メーカーから直送方式を適度に組み込み**ながら、センターの倉庫を有効活用

本研究では、伝達関数法による制御理論の枠組みを用いて、ミルクラン型物流システムの特性解析を行う

某小売業物流システムの事例

物流を強みとする小売業



- 300店舗以上の商品を1箇所の物流センターで在庫し、店舗からの注文に応じて配送
- 物流センターの在庫量は低レベルに維持
- 非常に多くの商品を扱うため、一括配送の威力が発揮されている。

2005,9,16
JIMA秋季全国大会

従来の多段階流通在庫モデル

多段階流通プロセス

メーカー

発注Ow(t)

物流センター

在庫
Iw(t)

発注Os(t)

小売店

在庫
Is(t)

需要
d(t)

市場

$N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}2)$

市場の需要のばらつきに対応するための在庫(安全在庫) を持つ

従来の多段階流通在庫モデル

多段階流通プロセス

メーカー

発注Ow(t)

物流センター

在庫
Iw(t)

発注Os(t)

小売店

在庫
Is(t)

需要
d(t)

市場

$N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}2)$

小売店の発注のばらつきに対応するための余分な在庫(安全在庫)を持つ

変数の定義： t期における各段階の各変数

	小売	物流センター
需要量	d(t)	ー
期末在庫量	$I_s(t)$	$I_w(t)$
発注量	$O_s(t)$	$O_w(t)$
安全余裕	S_s	S_w
リードタイム	ー	$L_w = 1$
メーカーのリードタイム	L_m	

従来の多段階流通在庫モデル

$$O_s(t) = (L_w + 1)\mu - I_s(t) - \sum_{j=1}^{Lw} O_s(t-j) + S_s$$

発注Ow(t)

発注Os(t)

メーカー

物流センター

在庫
Iw(t)

小売店

在庫
Is(t)

需要
d(t)

市場

$N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}2)$

$$I_s(t) = I_s(t-1) + O_s(t - L_w - 1) - d(t)$$

従来の多段階流通在庫モデル

$$O_w(t) = (L_m + 1)\mu - I_w(t) - \sum_{j=1}^{Lm} O_w(t-j) + S_w$$

発注Ow(t)

発注Os(t)

メーカー

物流センター

在庫
Iw(t)

小売店

在庫
Is(t)

需要
d(t)

市場

$N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}2)$

$$I_w(t) = I_w(t-1) + O_w(t - L_m - 1) - O_s(t-1)$$

Lm

Lw

従来モデルの計算式

小売店

在庫

$$I_s(t) = I_s(t-1) + O_s(t - L_w - 1) - d(t)$$

注文

$$O_s(t) = (L_w + 1)\mu - I_s(t) - \sum_{j=1}^{Lw} O_s(t-j) + S_s$$

センター

在庫

$$I_w(t) = I_w(t-1) + O_w(t - L_m - 1) - O_s(t-1)$$

注文

$$O_w(t) = (L_m + 1)\mu - I_w(t) - \sum_{j=1}^{Lm} O_w(t-j) + S_w$$

リードタイムと安全余裕

発注 ←— リードタイム —→ 納入

安全余裕

市場の需要は常に変動している。予測できない変動に対応するために、ある程度の余分を持つ必要があり、安全余裕が生まれる。

- 在庫のばらつきが大きいほど、安全余裕を持つ必要がある。
- 在庫のばらつきは、リードタイムが長いほど、大きくなる。
  これは<u>発注から納入されるまでに需要が変動</u>するため。

ミルクラン型物流モデル

納入Rs(t)
必要量に応じて
納入する

発注Os(t)

市場

メーカー

リードタイムLs

小売店

Is(t)

Os(t-Lm-1)

$N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\sigma}2)$

戻り
Iw(t-1)+Os(t-Lm-1)-Rs(t)

出発
Iw(t-1)

物流
センター

Iw(t)

残りはセンター
に回収して在庫

小売店に納入される量(t期)

$$R_s(t) = \alpha O_S\left(t - L_m - 1\right) + (1-\alpha)\left\{\mu - Is\left(t-1\right) + S_s\right\}$$

Lm期前にメーカーに発注した量

t期首現在、必要としている在庫量

- *Rs (t)*に α を取り入れて、納品量を決める。ただし、 α の値は $0 \leq \alpha \leq 1$。

  $\alpha=0 \longrightarrow Rs(t)=\mu-Is(t-1)+Ss$

  $\alpha=1 \longrightarrow Rs(t)=Os(t-Lm-1)$

ミルクラン型物流システムのモデル式

小売店

納品

$$R_s(t) = \alpha O_S\left(t - L_m - 1\right) + (1-\alpha)\left\{\mu - Is\left(t-1\right) + S_s\right\}$$

在庫

$$I_s(t) = I_S\left(t - 1\right) + R_s\left(t\right) - d\left(t\right)$$

発注

$$O_s(t) = (L_w + 1)\mu - I_s(t) - I_w(t-1) - \sum_{j=1}^{Lw} O_s(t-j) + S_s + Sw$$

センター

在庫

$$I_w(t) = I_w(t-1) + O_s(t - L_m - 1) - R_s\left(t\right)$$

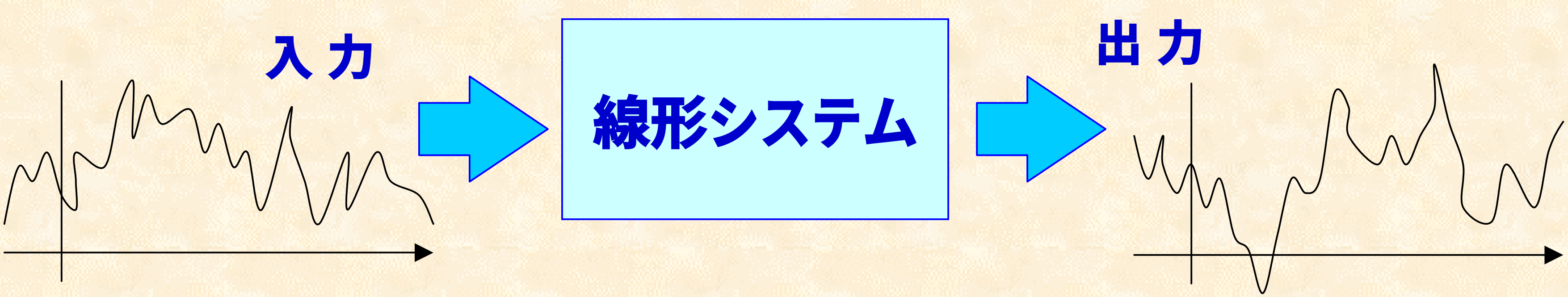
伝達関数法による解析

- 提案するモデルの有効性を評価する
- 条件

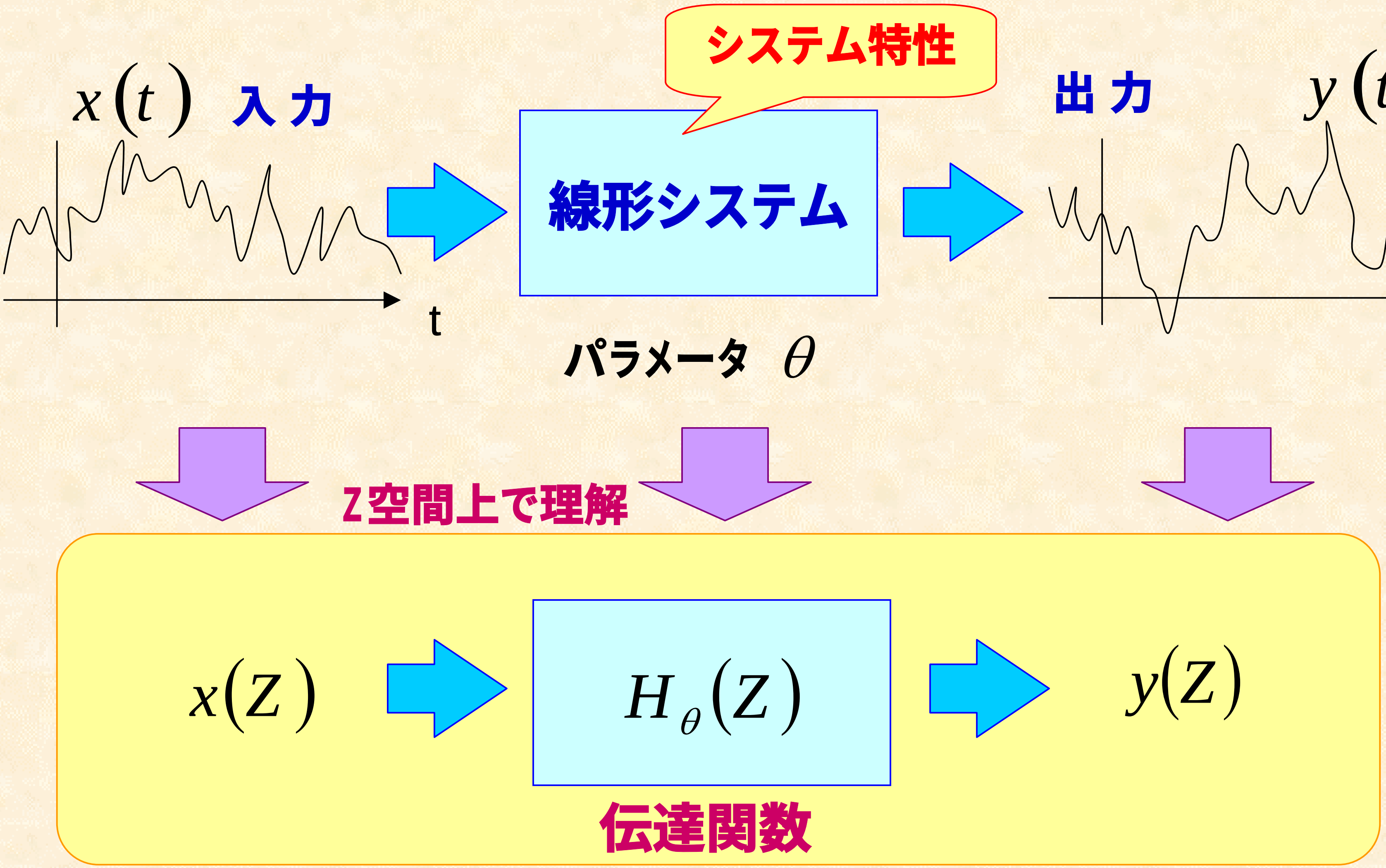
  物流センターのリードタイム： Ls＝1

伝達関数法とは

定常確率過程を入力とする線形システムの挙動を周波数空間で把握するための解析手法。システムの安定条件、評価関数の理論値を分析できる



伝達関数法による解析



$$y(Z) = H(Z)x(Z)$$

ミルクラン型物流システム(時間空間モデル)

小売店

納品

$$R_s(t)=\alpha O_S\left(t-L_m-1\right)+(1-\alpha)\left\{\mu-Is\left(t-1\right)+S_s\right\}$$

在庫

$$I_s(t)=I_S\left(t-1\right)+R_s\left(t\right)-d\left(t\right)$$

発注

$$O_s(t)=(L_w+1)\mu-I_s(t)-I_w(t-1)-\sum_{j=1}^{Lw}O_s(t-j)+S_s+Sw$$

センター

在庫

$$I_w(t)=I_w(t-1)+O_s(t-L_m-1)-R_s\left(t\right)$$

ミルクラン型物流システム(Z空間モデル)

小売店

納品

$$R_s(Z) = \alpha Z^{-L_w-1} O_S(Z) - (1-\alpha) Z^{-1} I_S(Z)$$

在庫

$$I_s(Z) = Z^{-1} I_S(Z) + R_s(Z) - D(Z)$$

発注

$$O_s(Z) = -I_s(Z) - I_w(Z) - \sum_{j=1}^{L_w} Z^{-j} O_S(Z)$$

センター

在庫

$$I_w(Z) = Z^{-1} I_w(Z) + Z^{-L_w-1} O_s(Z) - R_s(Z)$$

ミルクラン型物流システム(Z空間モデル)

伝達関数モデル

$$I_S(Z)=\frac{-(1-\alpha)Z^{-L_w-1}-(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j}}{(1-\alpha Z^{-1})\left\{(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j}+Z^{-L_w-1}\right\}}D(Z)$$

$$O_S(Z)=\frac{1}{\left\{(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j}+Z^{-L_w-1}\right\}}D(Z)$$

$$R_S(Z)=\frac{(\alpha+Z^{-1}-2\alpha Z^{-1})Z^{-L_w-1}+(1-\alpha)(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j-1}}{(1-\alpha Z^{-1})\left\{(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j}+Z^{-L_w-1}\right\}}D(Z)$$

ミルクラン型物流システム(Z空間モデル)

伝達関数モデル

$$I_w(Z)=\frac{-(1-\alpha)\sum_{j=0}^{L_w-1}Z^{-j-1}}{(1-\alpha Z^{-1})\left\{(1-Z^{-1})\sum_{j=0}^{L_w}Z^{-j}+Z^{-L_w-1}\right\}}D(Z)$$

在庫量、発注量、納入量は全て需要 D(Z) を入力とする伝達関数によるシステムとして記述できる

在庫量、発注量、納入量の変動は全て需要の変動によってドライブされる

リードタイムL_m=1の場合

D (Z) → *Is* (Z) の伝達関数

$$I_S(Z) = -\frac{1-\alpha Z^{-2}}{1-\alpha Z^{-1}} D(Z)$$

$$O_S(Z) = D(Z)$$

D (Z) → *Rs* (Z) の伝達関数

$$R_S(Z) = \frac{Z^{-1}\left\{1-\alpha+\alpha Z^{-1}-\alpha Z^{-2}\right\}}{1-\alpha Z^{-1}} D(Z)$$

$$I_w(Z) = -\frac{(1-\alpha)Z^{-1}}{1-\alpha Z^{-1}} D(Z)$$

D (Z) → *Iw* (Z) の伝達関数

逆Z変換によるパワースペクトル解析

$$V_S = \frac{\sigma^2}{2\pi i}\int_{|Z|=1} \frac{1-\alpha Z^{-2}}{1-\alpha Z^{-1}} \frac{1-\alpha Z^2}{1-\alpha Z} \frac{dZ}{Z}$$

$$V_W = \frac{\sigma^2}{2\pi i}\int_{|Z|=1} \frac{(1-\alpha)Z^{-1}}{1-\alpha Z^{-1}} \frac{(1-\alpha)Z}{1-\alpha Z} \frac{dZ}{Z}$$

$$V_R = \frac{\sigma^2}{2\pi i}\int_{|Z|=1} \frac{\left(1-\alpha+\alpha Z^{-1}-\alpha Z^{-2}\right)}{1-\alpha Z^{-1}} \frac{\left(1-\alpha+\alpha Z-\alpha Z^2\right)}{1-\alpha Z} \frac{dZ}{Z}$$

複素空間の閉局面
に関する複素積分

⇒ 留数定理

留数定理による複素積分の導出

$$V_S = \frac{\sigma^2}{2\pi i}\int_{|Z|=1}\frac{1-\alpha Z^{-2}}{1-\alpha Z^{-1}}\frac{1-\alpha Z^2}{1-\alpha Z}\frac{dZ}{Z}$$

$$= res(\alpha) + res(0)$$

留数は、Z=0, αの2つ。

Z=αは1次の留数

$$\mathrm{Res}(\alpha) = \lim_{Z\to\alpha}(Z-\alpha)\frac{(Z^2-\alpha)(1-\alpha Z^2)}{(Z-\alpha)(1-\alpha Z)Z^2} = -\frac{1-\alpha^3}{\alpha(1+\alpha)}$$

Z=0は2次の留数

$$\mathrm{Res}(0) = \lim_{Z\to 0}\frac{d}{dZ}Z^2\frac{(Z^2-\alpha)(1-\alpha Z^2)}{(Z-\alpha)(1-\alpha Z)Z^2} = \frac{1+\alpha^2}{\alpha}$$

リードタイムL_m=1の場合の理論式

店舗の在庫量分散

$$V_S = \frac{2\alpha^2 + \alpha + 1}{\alpha + 1}\sigma^2$$

センターの在庫量分散

$$V_W = \frac{(1-\alpha)^2}{1-\alpha^2}\sigma^2$$

店舗納入量の分散

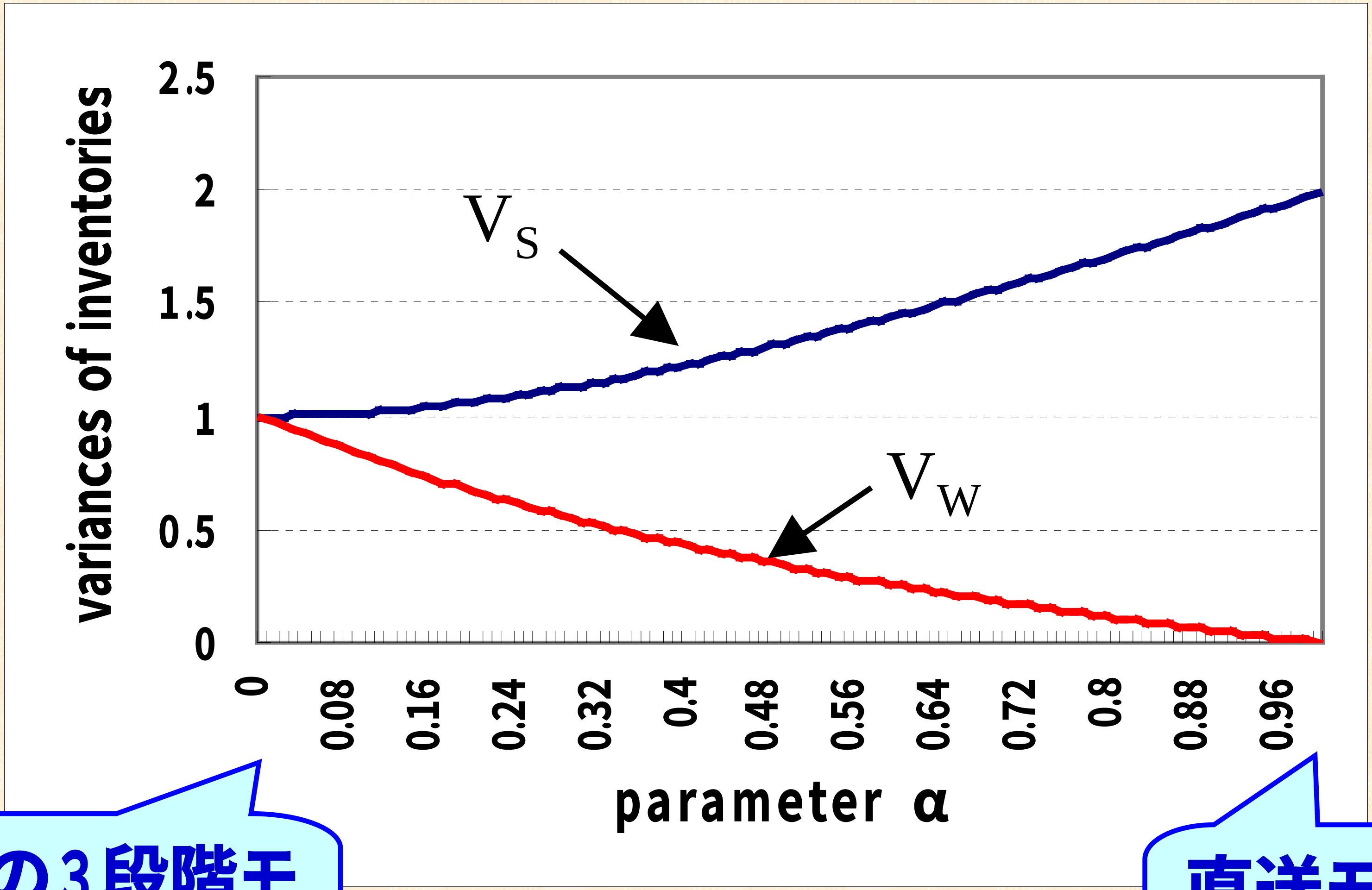
$$V_R = \frac{-(1-\alpha)^2(1+\alpha^2)+(1+\alpha)(-\alpha^3+3\alpha^2-2\alpha+1)}{\alpha(1+\alpha)}\sigma^2$$

発注量分散

$$V_O = 0$$

数値解析による評価①

店舗とセンターの在庫量分散とパラメータの関係



従来の3段階モデルと等価

図. パラメータαと在庫量分散の関係

直送モデルと等価

在庫量変動、発注量変動の関係

$\sigma = 1.0$		店舗		センター	
		在庫量変動	発注量変動	在庫量変動	発注量変動
従来モデル		2.000	1.000	2.000	1.000
提案モデル	α =0.0	1.000	1.000	1.000	
	α =0.1	1.018	1.000	0.818	
	α =0.2	1.067	1.000	0.667	
	α =0.3	1.138	1.000	0.538	
	α =0.4	1.229	1.000	0.429	
	α =0.5	1.333	1.000	0.333	
	α =0.6	1.450	1.000	0.250	
	α =0.7	1.576	1.000	0.176	
	α =0.8	1.711	1.000	0.111	
	α =0.9	1.853	1.000	0.053	
	α =1.0	2.000	1.000	0.000	

数値解析による評価②

店舗とセンターの両在庫量分散のトレードオフを考慮した評価関数を導入

$$J = \beta V_S + (1-\beta) V_W$$

店舗とセンターのどちらの在庫量を減らすかを示すウェイト(重み)

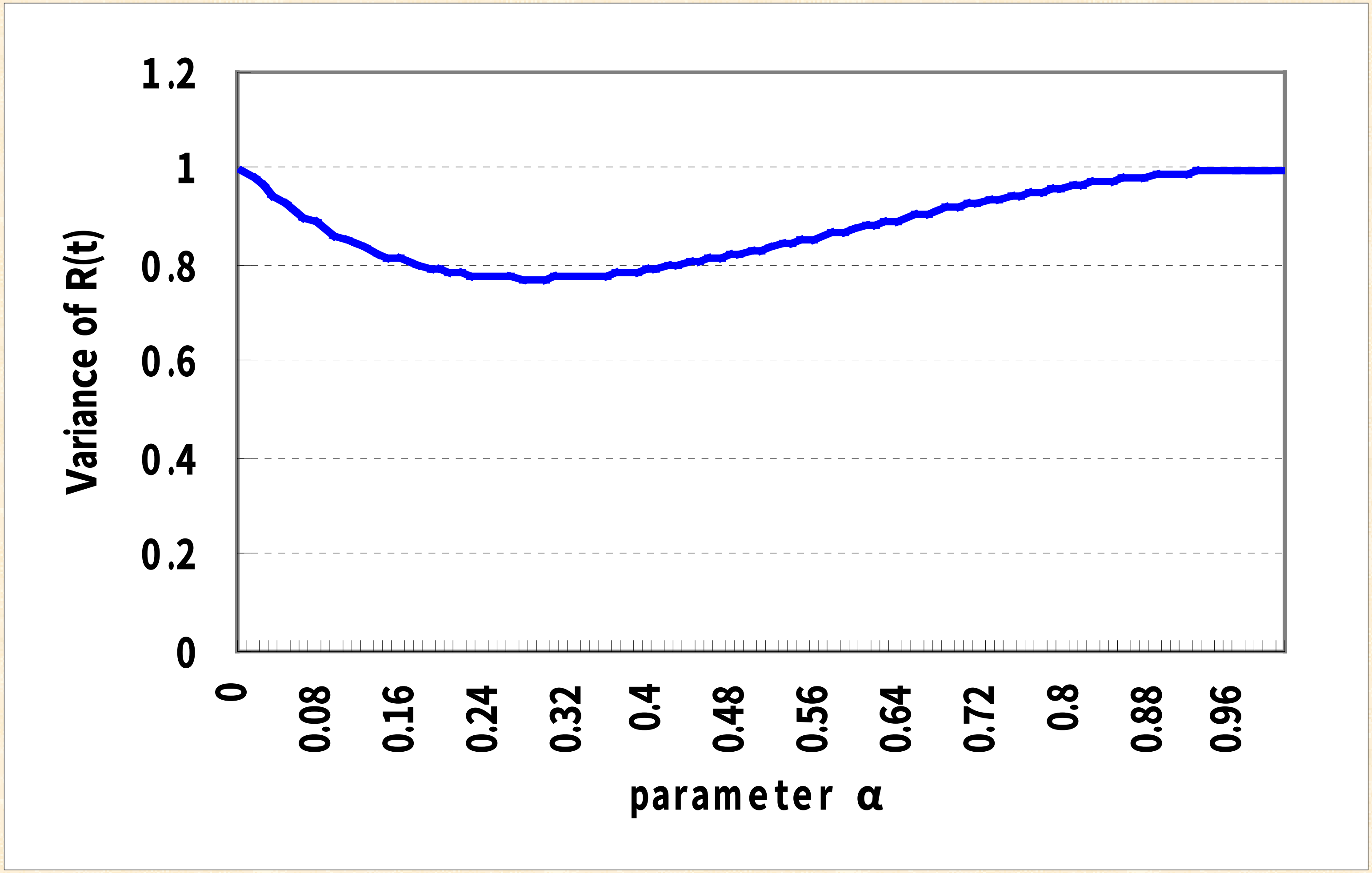
βを与えた時に、その時の評価関数J を最小化するα

評価関数の重みβと最適パラメータ

β	最適なパラメータの値 α	V_S	V_W	J
β =0.0	1.000	2.000	0.000	0.000
β =0.1	1.000	2.000	0.000	0.200
β =0.2	1.000	2.000	0.000	0.400
β =0.3	0.826	1.747	0.095	0.591
β =0.4	0.581	1.427	0.265	0.730
β =0.5	0.414	1.242	0.414	0.828
β =0.6	0.291	1.131	0.549	0.898
β =0.7	0.240	1.093	0.613	0.949
β =0.8	0.118	1.025	0.789	0.978
β =0.9	0.054	1.006	0.898	0.995
β =1.0	0.000	1.000	1.000	1.000

数値解析による評価③

店舗への納入量の分散とパラメータの関係



考察

小売店

顧客へのサービスレベルに対応した上で、発注してから納入されるまでの間に生じた需要のばらつきに対処可能。これにより、在庫量を低減できる

センター

直送方式を組み込むことにより、メーカーが製造した商品を全て一時保管しなくてもいいので、その分、在庫量を低減できる。

小売店舗とセンターの双方において、在庫量低減のために有効であることが理論上、示された。

まとめ

直送と従来の多段階方式の中間的な物流方式であるミルクラン型物流システム

- 伝達関数法による特性解析
- 在庫量変動の面で、従来の3段階モデルよりも優れる。
- 発注量変動に変化はないので、メーカーの負荷は増大しない。

今後の課題

本研究のモデルにおいては

トラックの必要台数や走行距離、センターの配送リードタイムの厳密な取り扱いなどを取り入れてなかった

通常、小売店は1店舗ではなく、１つのセンターで数十から数百の店を取り扱っていることが多い。取り扱う商品の品目数も多く、また上流であるメーカーの数も多い。

現実的ケースで、本研究で提案する方式が、果たして適用可能であるか、細かい配送管理が可能であるか、といった点を検証する必要がある。