製鉄所における大量品質管理データの解析事例と課題
－局所回帰モデリングと多変量統計的プロセス管理－

JFE スチール　茂森 弘靖

１．発表内容

（１）局所回帰モデルを用いた鉄鋼製品の品質設計システム
（２）多変量統計的プロセス管理による鉄鋼製品の品質操業管理システム

添付のスライド参照

２．質疑応答

Q.　１つ目の話について，制約条件下で最適解をどんどん見つけていっているが，長く使っていると，どこか最終結果に偏りが出てくる傾向が出てくるのか？

A.　活発に製品開発が行われていて，新しい点がどんどん出てきているので，最終結果が偏ることは今のところ起こっていない.

Q.　２つ目の話について，Q 統計量の異常の話だったが，一方，T2 統計量はどのようなときに出てきやすいのか？

A.　Q 統計量は相関関係のずれを検出するものである．T2 統計量は原点からの距離が大きくなると検出でき，従来の USPC でも検出しやすい．そのため，T2 統計量ではなく Q 統計量について焦点を当てて事例を説明した.

Q.　１の目の話について，局所回帰モデルのパラメータ計算で，多重共線性の問題はあまり考慮しなくてよかったのか？

A.　運転条件をたくさん振っているデータがたくさんあるので，ここでは多重共線性の問題を気にする必要がなかった.

Q.　２つ目の話の主成分分析の結果をフィードバックして，局所回帰モデルのパラメータを制度よく高速に計算することはやっているのか？

A.　使い分けをしている．１つ目の手法は，設計でオーダメイドで様々なバリエーションの製品に対して使っている．２つ目の手法は，１種類の運転条件でできるだけ品質が同じになるようにしている製品に対して使っている．よって，２つ目の手法の結果を１つ目の手法に活用することはしていない.

Q.　２つ目の話で，異常原因の優先順位付けの結果は，タグチメソッドなどの実験計画の入力になっているのか？

A.　その通り.

Q.　１つの話では，約１万件のデータを用いているが，それより古いデータは使いどころがないということか？

A.　生産サイクルで要求点に近いデータが欠損しないような大きさに決めている．レスポンスが遅くならないように，あまりデータのサイズが大きくなり過ぎないようにしている．

Q.　ある工場を対象に実績データを蓄積して使っているが，他の工場では全く使えなくなるのか？

A.　考え方は使えるが，同じデータは使えない．その対象となる工場のデータが必要になる．

Q.　御社の場合は，基本的に，製造現場も含めてＱＣは統計も含めて，これらの手法を行う前からやられていたように受け取った．製造現場ではデータ解析に対する懐疑的な見方はなく，現場もデータ解析の結果を受け入れているのか？

A.　10 年ほど前はすごく懐疑的な人が多く苦労したが, 最近は結果がちょっとずつ出てきて，懐疑的な人は減ってきた．

Q.　どれくらいきれいなデータで解析をしているのかが興味がある. PCA はノイズに対して非常に弱い手法で，ノイズがあるとかなり厳しいと思うが，本当の異常を切り落とすと結果が出なくなるが，どのようにしているのか？

A.　前処理もきちんとしていて，欠損データを除く，対象プロセス毎，対象製品毎に範囲を定めてノイズ除去している．また，予測モデルとの誤差にも範囲を定めてノイズ除去している．

以上

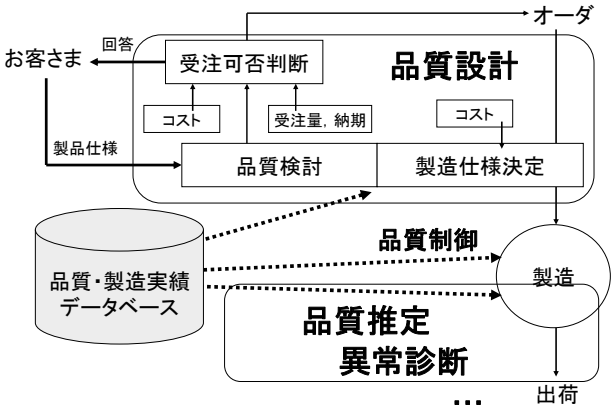
鉄鋼製造プロセスの特徴

- ■ 巨大装置産業
  - ・鉄鋼プロセス特有の特殊かつ高価な製造設備多数
- ■ 注文に基づく生産が基本
- ■ 多品種・小ロット生産へ対応可能
- ■ 製品完成までに多くの工場・プロセスを経由
  - ・製造設備制約、製品制約など様々な条件考慮必要
- ■ 果てしない技術開発
  - ・新商品開発，プロセス開発が活発
- ■ 古くから計算機による自動制御を導入.
  - ・多数のプロセス制御モデル
  - ・モデルのメンテナンス負荷低減が課題
  - ・大量データの有効利用のニーズ増大.

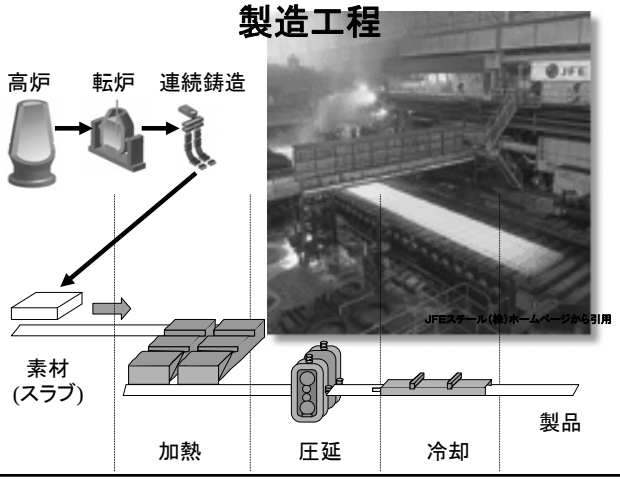
鉄鋼製品の品質指標

●材質
　強度(引張強度，降伏点，伸び，･･)
　靭性(吸収エネルギー，遷移温度，･･･)
　磁気特性(鉄損，･･･)
●寸法
　厚み，幅，長さ，･･･
●形状
　板クラウン，平坦度，平面形状，･･･
●表面品質
　粗度，
　疵
●内部品質

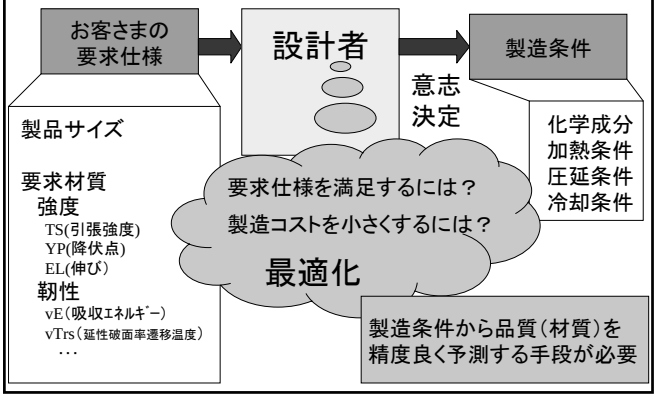
品質管理業務フローにおける位置付け



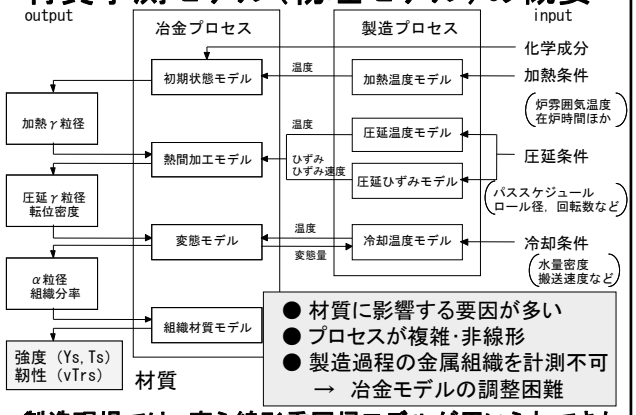
製造工程



品質設計(材質設計)



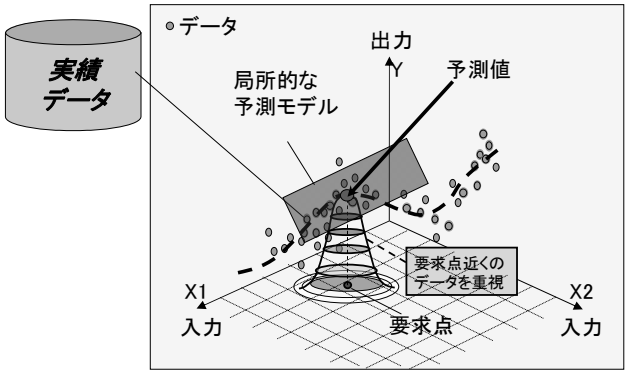
材質予測モデル(物理モデル)の概要



- ● 材質に影響する要因が多い
- ● プロセスが複雑･非線形
- ● 製造過程の金属組織を計測不可
  → 冶金モデルの調整困難

⇒ 製造現場では，専ら線形重回帰モデルが用いられてきた

局所回帰モデル



局所回帰モデルパラメータ計算方法

モデル化誤差を最小化する
パラメータθを決定する

minimize $J = \boldsymbol{e}^T \Lambda \boldsymbol{e}$

$= [\boldsymbol{y} - \Omega \boldsymbol{\theta}]^T \Lambda [\boldsymbol{y} - \Omega \boldsymbol{\theta}]$

by $\boldsymbol{\theta}$

$\boldsymbol{\theta} = [b, a_1, a_2, \cdots, a_M]^T$ $\quad \boldsymbol{e} = [e^1, e^2, \cdots, e^N]^T$

$\boldsymbol{y} = [y^1, y^2, \cdots, y^N]^T$

$\boldsymbol{y} = \Omega \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{e}$

出力値　パラメータ　誤差

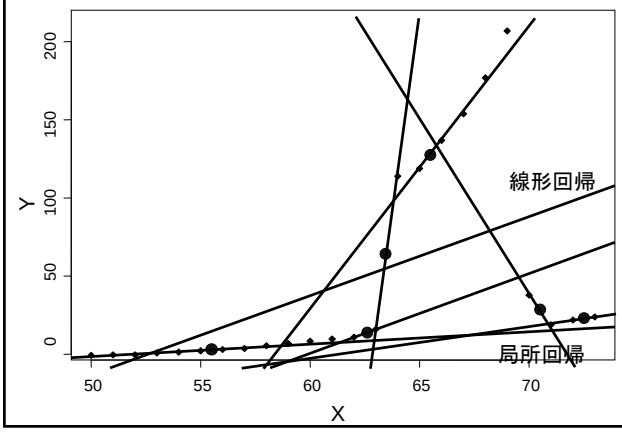
$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 \cdots, x_M^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 \cdots, x_M^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\ 1 & x_1^N & x_2^N \cdots, x_M^N \end{bmatrix} \qquad \Lambda = \begin{bmatrix} W^1 & 0 & 0 \\ 0 & W^2 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & 0 & W^N \end{bmatrix}$$

$$W^n \equiv \exp\left(-\frac{\Gamma^n}{p \cdot \sigma_\Gamma}\right)$$

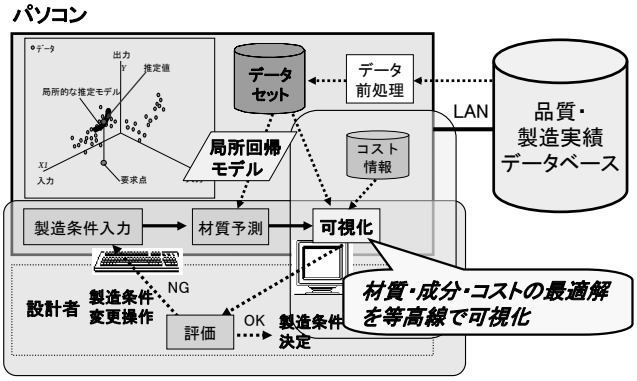
入力値　類似度

正規方程式　$(\Omega^T \Lambda \Omega)\boldsymbol{\theta} = \Omega^T \Lambda \boldsymbol{y}$

局所回帰モデル　数値例



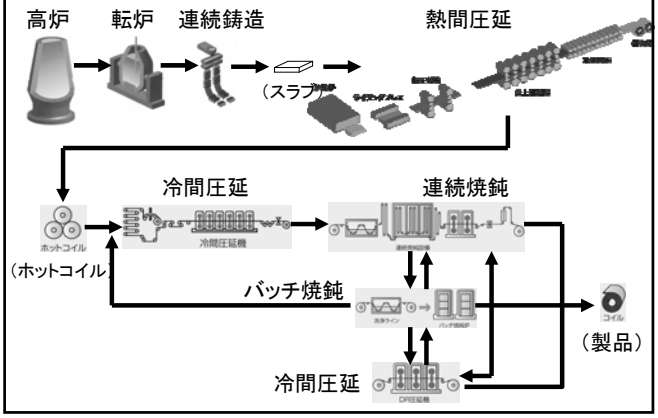
実用化した品質設計支援システム



品質設計支援システムのまとめ

- 局所回帰モデルを用いた鋼材の品質設計支援システムを実用化した．
- 2003年3月から現在まで，安定稼動している．設備変更等の環境変化があったが，継続使用されている．
- 提案システムは，次の点で大きく貢献している．
  - ・製品品質の向上
  - ・製造コストの低減
  - ・従業員満足度の向上
    - （設計時間　30～60分⇒10～15分）
    - （モデル保全負荷が大幅に低減）

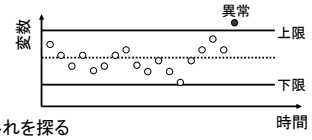
製造工程（冷延薄鋼板の一種）



従来の品質操業管理の課題

○従来型プロセス管理法:　一変量統計的プロセス管理
（**USPC**: Univariate Statistical Process Control）

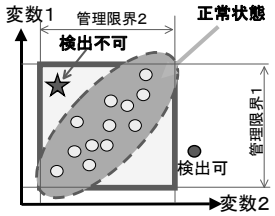
各操業条件（製造設備の運転条件）を一定にして生産すれば，
製品の品質は一定になる
↓
品質不良発生の原因を調べるには，
全ての操業条件の管理チャートを見て外れを探る



○課題

・多工程を経て製造される製品は，管理すべき操業条件の数が非常に多いため，**監視負荷が非常に高い**.

・各実績値が**管理範囲内であれば，異常検知は困難**.



多変量統計的プロセス管理

（**MSPC**: Multivariate Statistical Process Control）

各操業条件の実績値が互いに相関をもって連動することに着目
→各操業条件データを連動する方向を基に整理（主成分分析）し，
　２つの変数を監視.

・２変数のみの監視なので，全操業条件を監視する従来法と比べ，**監視負荷が大幅低減**.
・相関関係のずれなど，**従来法では発見できない異常の発見が可能**.

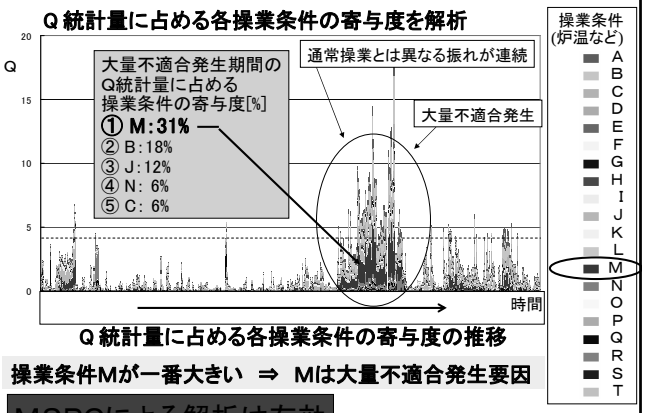
主成分分析の導入（データを表す空間を次元圧縮）

・T^2統計量
（規格化主成分得点の二乗和）

・Q統計量
（次元圧縮によって失われる
情報量：残差の二乗和）

解析事例1：　MSPCの結果（2）

Q 統計量に占める各操業条件の寄与度を解析



Q 統計量に占める各操業条件の寄与度の推移

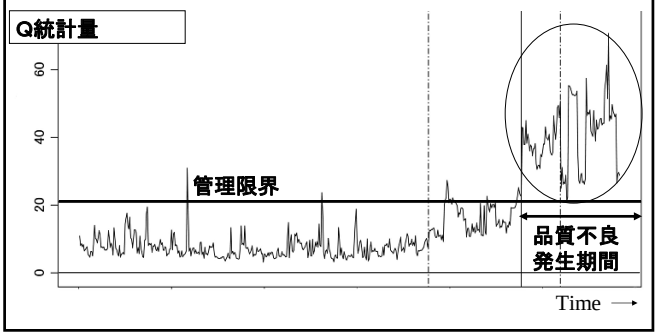
操業条件Mが一番大きい　⇒　Mは大量不適合発生要因

MSPCによる解析は有効

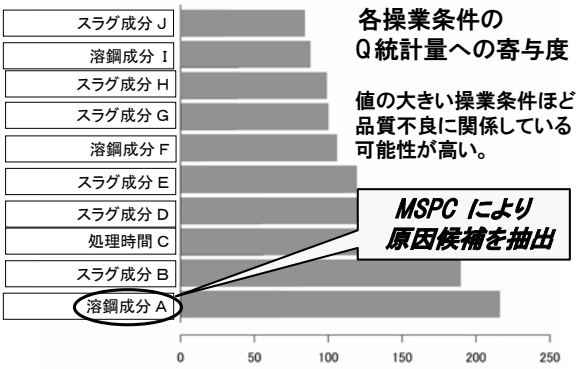
M: ある熱処理プロセスの炉温

解析事例2：　MSPCの結果（1）

USPCで異常発見できず.
製鋼で，品質不良発生期間において，Q統計量で異常発見.
熱延，冷延では，継続的な統計量の異常はなし.



解析事例2：　MSPCの結果（2）



**各操業条件の
Q統計量への寄与度**

**値の大きい操業条件ほど
品質不良に関係している
可能性が高い。**

***MSPC により
原因候補を抽出***

まとめ（多変量統計的プロセス管理）

操業条件の動く範囲が正常時と同等のため，従来法では異常が発見できず，原因の特定が困難.

→ MSPCの適用により，従来法では発見できなかった異常の検出と原因候補の抽出ができた.

→ 非常に大きな労力がかかる次の作業を優先順をつけて効率的に行うことができた.
　・品質不良発生メカニズムの仮説立案
　・製品分析による仮説立証（証拠発見）
　・実機実験での品質改善確認，等

→ 異常発生原因の早期特定の足がかりとして，大いに寄与できた.

今後の予定：　他の複雑なプロセスの予測・診断へ展開予定