

分離することを提案する。すなわち、制御系設計手法を適用して制御系の構造とそのパラメータを同時に導出する方法をとらず、現場における調整が行いやすい構造をあらかじめ設定しておく。パラメータは制御系に要求される仕様を満たすように設計するが、最終的には現場調整で決定する。次に、具体的な構造として下記を提案する。

(1) 既設制御系 (PI 制御系) をベースとし、それに IMC (Internal Model Control) あるいは外乱オブザーバを付加した 2 自由度制御系を適用する。図 1 に制御系のブロック図を示す。P は制御対象、C は既設制御系、Q は自由パラメータ、 K_f は後述のゲインである。

(2) 多変数系に対しては分散制御系とし、各サブシステム用のコントローラに(1)の 2 自由度 IMC を適用する。

上記の構造の利点は以下のものである。

(1) 図 1 の K_f を 0~1 の間で調節し、既設制御の出力に IMC あるいは外乱オブザーバからの信号を徐々に加算することにより、既設制御から新設制御に連続的に移行できる。

(2) IMC は安定化制御器のパラメトリゼーションの一種であり、感度関数、相補感度関数が自由パラメータの線形関数であるという利点を有する。外乱オブザーバは、IMC をさらに実用的に変形したパラメトリゼーションであり、感度関数、相補感度関数が自由パラメータによってより直接的に指定できる。そのため、現場におけるパラメータ調整が非常に容易である。

(3) 多変数制御系では、変数間の干渉を評価して適切な入出力の組み合わせを選択すれば、ある条件下では個々のループのゲインを制御系全体の安定性に影響を与えることなく独立して調整できる。その上で、各サブシステム用のコントローラに 2 自由度 IMC を適用すれば、ループごとの調整が可能になった上に、各ループも PI 制御から順次調整を進めていくことができ、段階的な調整、立ち上げが可能になる。

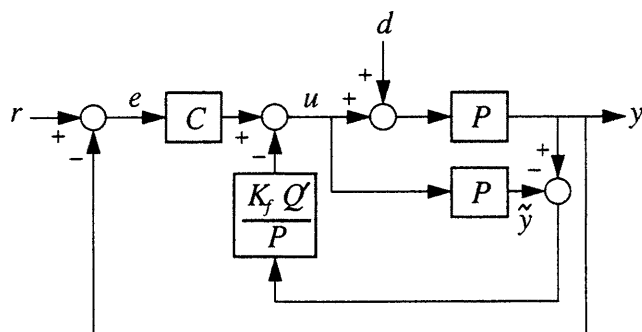


図 1 提案する 2 自由度 IMC (外乱オブザーバ型)

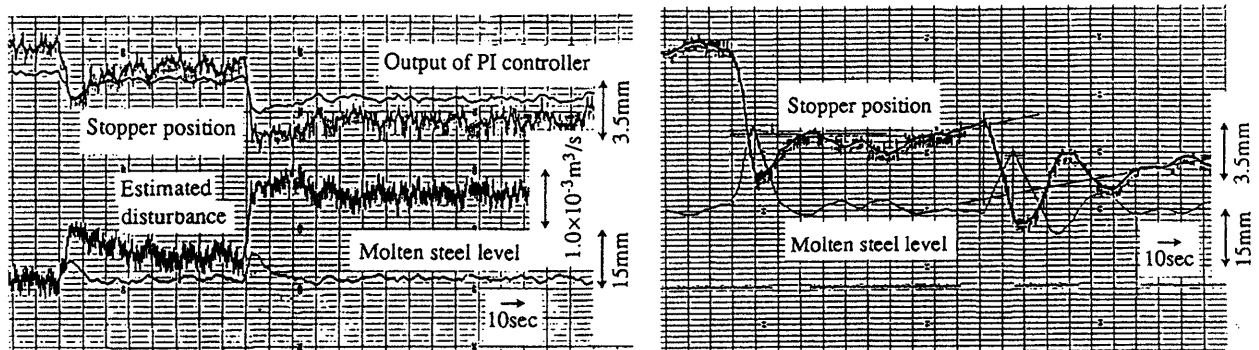
3. 連铸モールド内容鋼レベル制御への適用

溶鋼をモールドに注入して連続的に鋼片を製造するプロセスにおける溶鋼レベル制御に提案した制御系を適用した。本制御では、溶鋼をモールドへ注入するノズル内への不純物付着やその突発的剥離によるレベルの急変、モールドから引き出された鋼片がサポートロール間で膨張、収縮する非定常バルジングと呼ばれる現象による周期的なレベル変動などに対してレベルを一定に保つことが課題であるが、従来の制御方法ではこれらの外乱には十分に対処できなかった。

そこで、図 1 の 2 自由度外乱オブザーバを適用した。本制御対象の場合、図 1 の外乱 d は物理的な外乱によるモールドへ流入、流出する溶鋼流量の変動分 (外乱流量) に相当する。外乱オブザーバによって推定した外乱流量をモニタリングしながら、それを相殺する操作量をゲイン K_f を調整しつつ既設の PI 制御の出力に徐々に加算することによって、徐々に新設制御に移行させていくことができ、チューニングが大変容易である。

千葉製鉄所第 1 連铸機では図 2 に示すようにノズル内の付着物の剥離による溶鋼レベル変動の

ピーク値を従来制御の1/2~1/3に低減，同第3連鑄機では非定常バルジングによるレベル変動の振幅を同様に低減し，製品品質，歩留まりの向上などに大きく寄与している。



(a) 既設PI制御 (b) 既設PI制御+外乱オブザーバ
 図2 浸漬ノズル詰まりの剥離による湯面変動の抑制効果の比較

4. 冷延タンデムミルにおける板厚・張力制御への適用

冷延タンデムミルは，いくつかのスタンドを直列に配置し，熱延で圧延されたコイルを常温で製品の最終的な板厚まで圧延するプロセスである．スタンド間では圧延の安定化および圧延荷重低減のために圧延材に張力が付与されているが，この張力と圧延材の移送によって隣接スタンドの板厚と張力が複雑に干渉しあう．

従来の板厚・張力制御系は，操作量と制御量を1対1に対応させた一種の分散制御系となっていたが，制御性能向上のため，種々の制御理論適用も試みられている．しかし，これらの多くは集中制御系となるため，現場調整に課題がある．そこで，分散制御系の構造最適化を図るため，次のような手順で構造化特異値を用いて5スタンドタンデムミルにおける板厚・張力系の干渉を指数化し，干渉が分散制御の制御性能に与える影響を定量化した．

- (1) 非線形圧延モデルを線形化し，各スタンドの圧下位置およびロール速度（5スタンドを除く）を入力，板厚および張力（5スタンドを除く）を出力とする9入力9出力の線形モデルを得る．
- (2) 入出力を1対1に対応させた対角，および2スタンド以降で圧下位置とロール速度を入力，板厚と張力を出力とした2×2の構造としたブロック対角の2つの制御系の構造を設定する．
- (3) 非対角（非ブロック対角）成分を制御対象の不確かさとみなし，その大きさを構造化特異値を用いて評価し，制御系の相補感度関数に関する制約条件を求める．

図3が干渉指数であり，相補感度関数の大きさ（最大特異値）が干渉指数のプロットの下側に

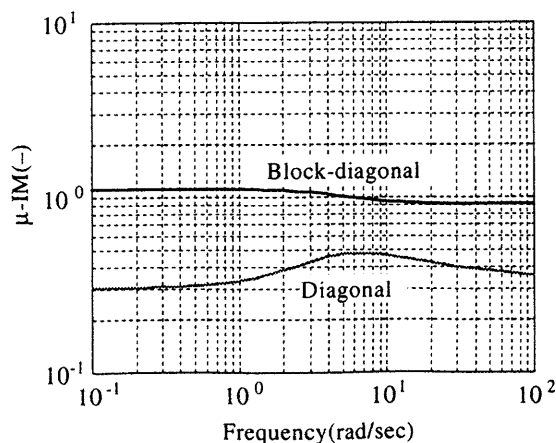


図3 構造化特異値を用いた板厚・張力制御系の干渉指数

あれば、その分散制御系の構造が適用可能である。干渉指数は、対角な制御系の場合は全周波数帯で1よりも小さく、適用不可能であり、ブロック対角の場合は低周波数帯では1を越えており、干渉によって制御性能の制約は受けるものの、この構造が適用可能であることが示された。

5. 熱延仕上ミル張力・ルーパ制御系への適用

熱延仕上ミルは、冷延タンデムミルと同様に直列に配置された複数のスタンドによって連続的に圧延を行うものであるが、スタンド間にルーパと呼ばれる機構が設置されている。ルーパはモータで駆動されるアーム状の構造で、圧延材を下方から支えることによって張力を調整するものである。圧延安定化のためにはルーパ角度の大きな変動は望ましくなく、張力とルーパ角度を同時に制御することが必要である。

従来、ロール速度とルーパ速度を操作量とした多変数制御の適用も行われてきたが、ここでは分散制御系として張力系とルーパ系のそれぞれに2自由度IMCを適用する。さらに、ルーパが張力変動に対して協調的に動くように、ルーパの機械インピーダンスを調整する機構をインピーダンス制御によって導入する。

千葉第3熱間圧延仕上ミルにおいて、ステップ状の圧下操作を与えて外乱に対する張力およびルーパの応答を比較した例を図4に示す。従来制御はルーパ角度をロール速度にフィードバックし、張力制御はオープンループとしたものである。本制御系では構造化特異値による干渉の解析結果に基づいて入出力の組み合わせを逆にしている。本制御系では、従来制御に比べて張力、ルーパ角度の変動が低減されている。また、集中制御系と比べても遜色ない応答性が得られることをシミュレーションで確認している。本制御系は、上記熱間圧延工場の安定稼働と製品品質の向上および世界初の熱間連続圧延の実現に大きく貢献している。

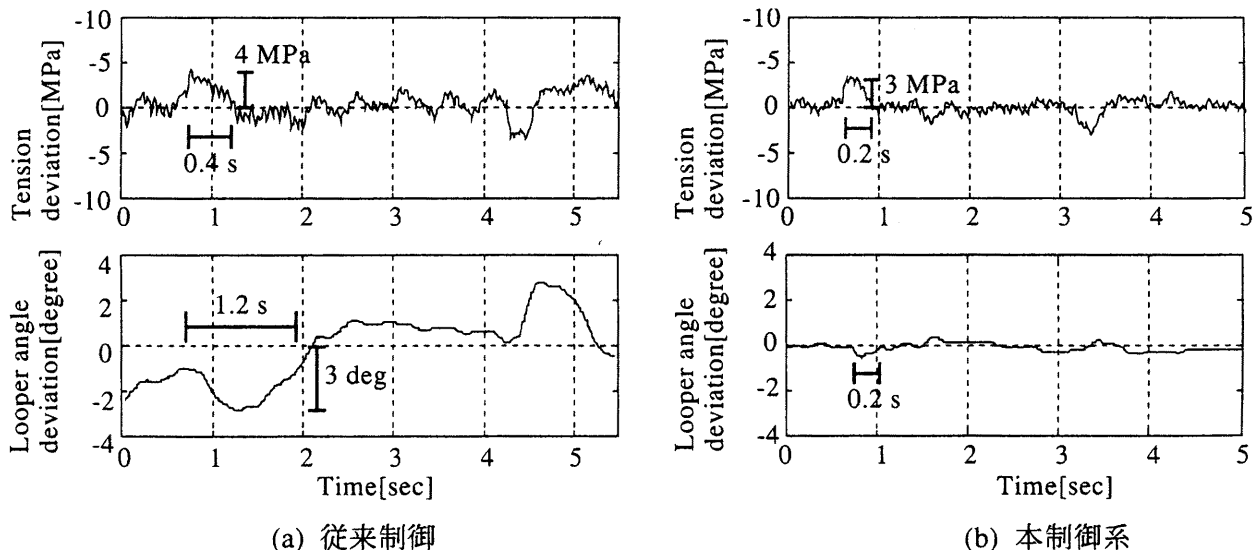


図4 ステップ状の圧下操作による外乱に対する張力およびルーパの応答

6. おわりに

本論文では、制御理論が提供する設計理論を用いず、実プロセスへの適用を念頭に置いて、あらかじめ調整のしやすい構造を設定し、物理的意味の明確な少数のパラメータの調整によってチューニングを行う方法を提案した。本方法の有効性、普遍性は、連铸モールド内の溶鋼レベル制御、熱延仕上ミル張力・ルーパ制御というまったく異なる2つのプロセスに実際に適用し、制御性能を向上することによって実証された。今後も本方法を鉄鋼プロセスに広く適用し、制御理論の実用化に寄与していきたい。