

ファジィ制御の導入手順

実施事例をもとに

2019年 ver. 1.0
倉谷 隆博

1. ファジ制御の概要

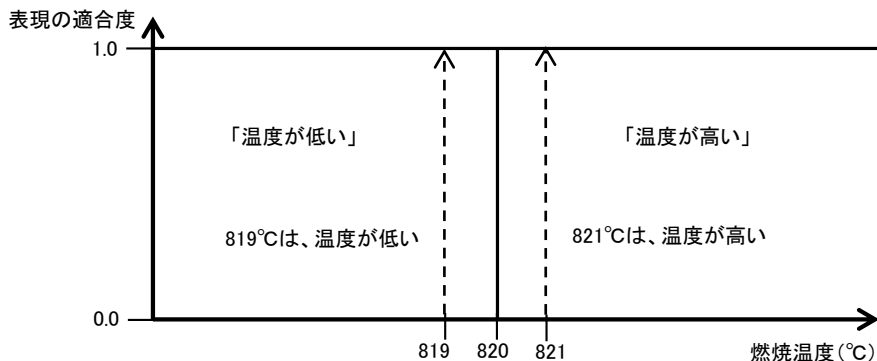
ファジィ制御(あいまい制御)は、**集合に属する度合いを0から1の値で示す「メンバーシップ関数」**で表すファジィ集合の考え方と、「IF X=A THEN Y=B」(もし、XがAならば、YをBにする)形式のルールの考え方を組み合わせた制御方法である。

例えば、燃焼炉の温度制御では、「もし、燃焼温度が少し高ければ、燃料の供給速度を少し下げる」ことが必要になるが、これを、「IF X=A THEN Y=B」形式のルールで記述すると、X=A(前件部、あるいは条件部)に相当する部分は、「燃焼温度(X)が少し高い(A)」であり、Y=B(後件部、あるいは操作部)に相当する部分は、「燃料の供給速度量(Y)を少し下げる(B)」である。

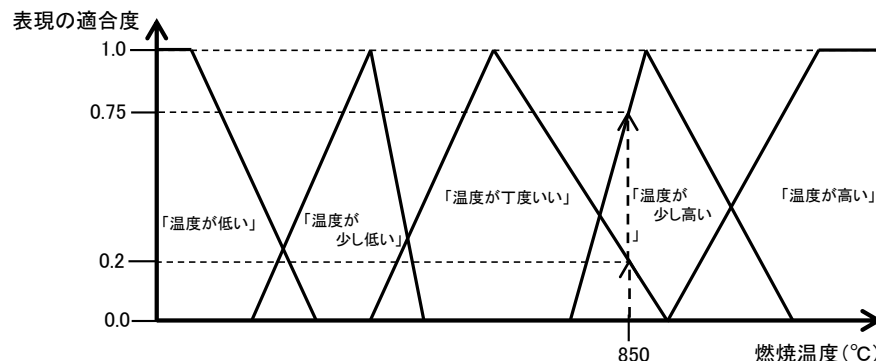
このルールの条件部と操作部の表現は、定性的な表現、あいまいな表現になっている。「燃焼温度が800℃であれば」、「燃料の供給速度を10%下げる」といった表現であれば定量的な表現であるといえるが、「燃焼温度が少し高い」、「燃料の供給速度を少し下げる」という表現において、「少し高い」、「少し下げる」の部分は定性的な、あいまいな表現になっている。

ファジィ制御は、このような定性的な表現、あいまいな表現を取り扱うところに特徴があり、ここに記した「もし、燃焼温度が少し高ければ、燃料の供給速度を少し下げる」というような制御ルールを実現する方法である。

ここで、定性的な表現、あいまいな表現を取り扱うのが、メンバーシップ関数である。例えば、(図1)に示すように、燃焼炉の燃焼温度が、820℃以上を高い、それ未満を低いというように表現した場合、821℃は燃焼温度が高く、819℃は燃焼温度が低いということになり、表現に違和感を覚える。つまり、821℃は高く、それとわずか2℃しか違わない819℃は低いと言い切ってしまうのは、言い過ぎであるように感じる。メンバーシップ関数は、このように白黒がはっきりしないような状態を工学的に取り扱うための一つの手段である。(図2)に示すようにその表現に当てはまる度合い(適合度)の考え方を導入することで、例えば、現在の燃焼温度850℃は、「少し高い」の表現適合度=0.75、「丁度いい」の表現適合度=0.2 であるというように表現するため、ことによって、定量的な値と定性的な(あいまいな)表現を紐づけることが可能になる。



(図1) 白黒をはっきりさせた表現を使用した場合



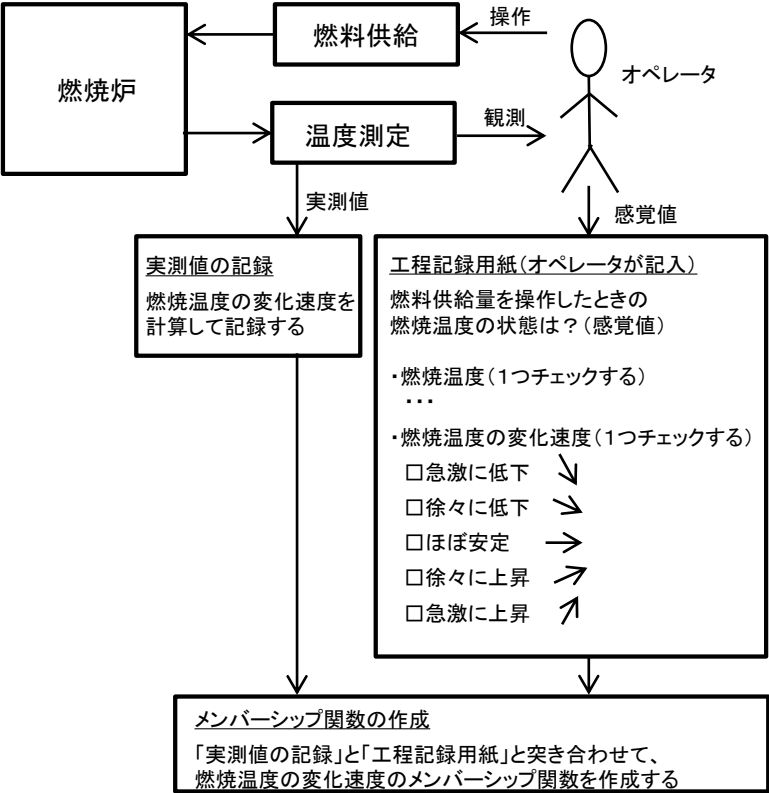
(図2) あいまいな表現を使用した場合(メンバーシップ関数)

2. メンバーシップ関数(1/2)

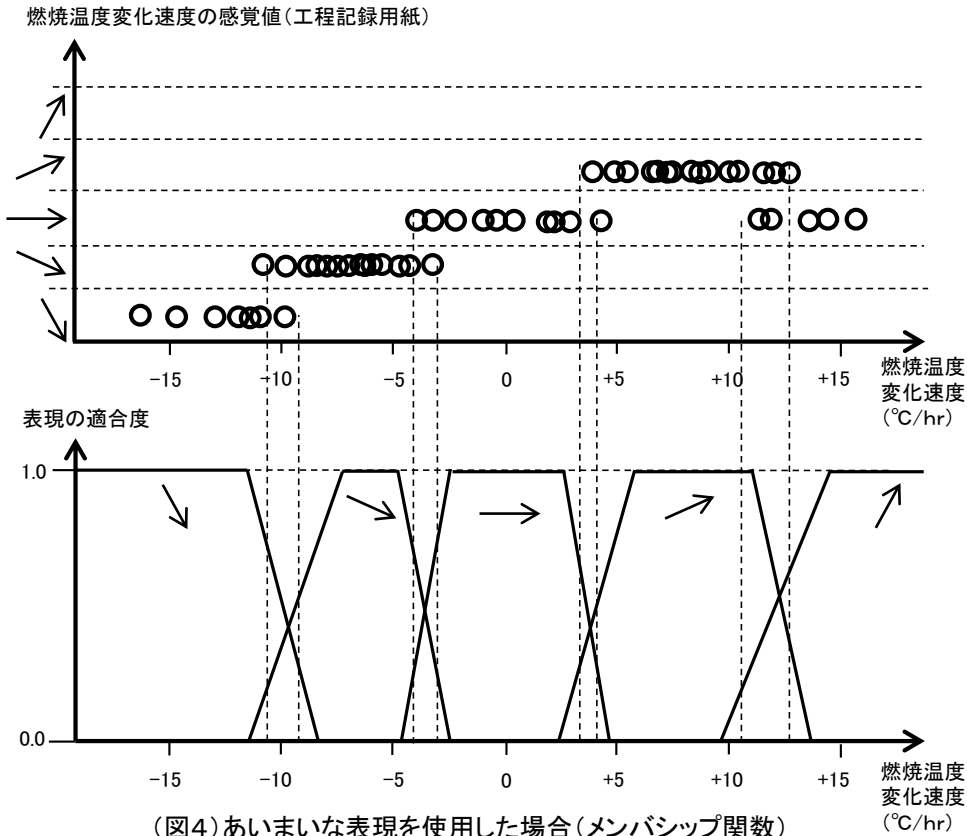
メンバーシップ関数は知見・経験をもとに作成することになる。しかし、この作業は定性的なものを定量化するということであり、主観に左右されるなど容易ではない。ここでは実際に有効であった、メンバーシップ関数の作成を手助けする方法の一例を示す。

焼炉の燃焼温度の変化速度のメンバーシップ関数を作成したときに実施した方法である。
運転操作のなかでプロセス変量の速度変化を捉えることは極めて重要であるが、変化速度は直感的な量であり、運転オペレータにヒアリングしただけでメンバーシップ関数を作成するのは難しい。そこで、運転オペレータが燃焼温度制御に係る操作を行ったとき、オペレータが感じた燃焼温度の変化度合いを記録に残しておいてもらい、これを、このときの燃焼温度の実測値から求めた燃焼温度の変化速度と突き合わせることによって、メンバーシップ関数の作成に役立てた(図3)。

燃焼温度の変化速度は、「急激に低下している(↘)」、「徐々に低下している(↘)」、「ほぼ安定している(→)」、「徐々に上昇している(↗)」、「急激に上昇している(↗)」であり、(図4)に示す方法でそれぞれのメンバーシップ関数を求めた。



(図3)メンバーシップ関数の作成手順



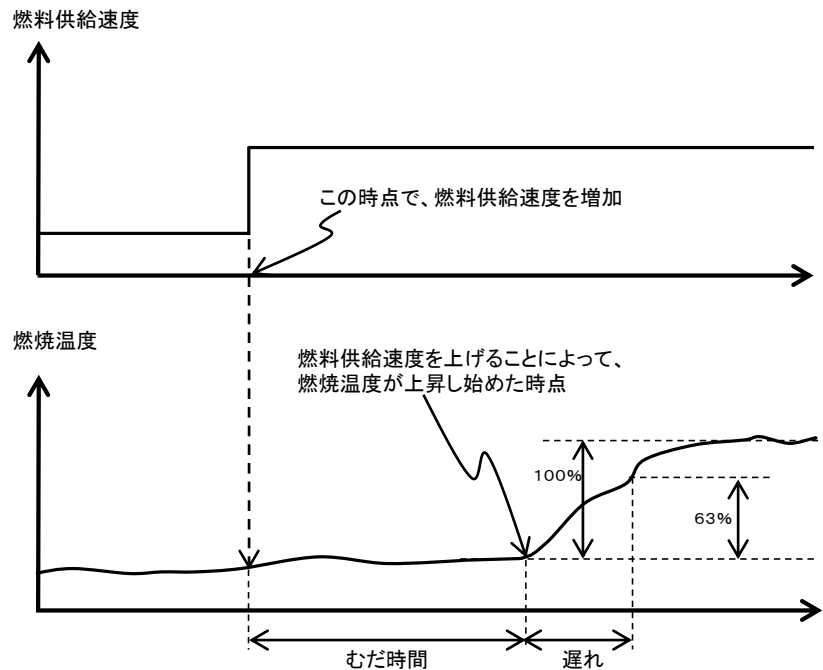
(図4)あいまいな表現を使用した場合(メンバーシップ関数)

2. メンバーシップ関数(2/2)

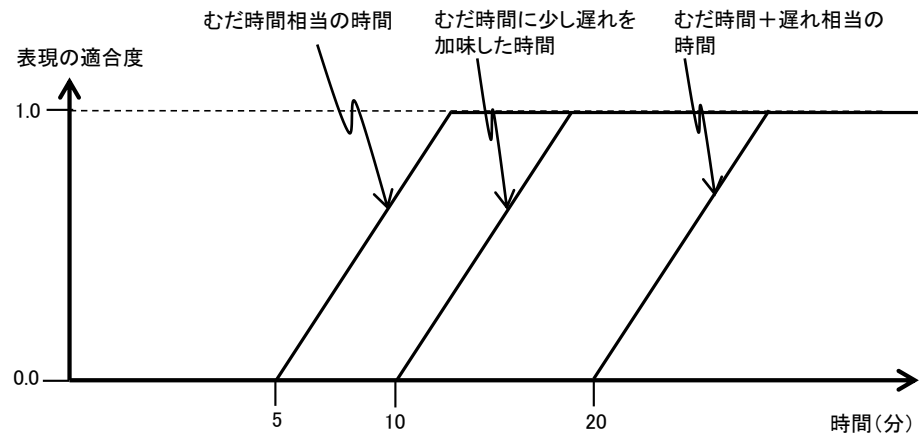
むだ時間は操作を加えてからその影響が出始めるまでの時間であり、遅れは操作を加えて影響が表れ始めてから到達値の約63%になるまでの時間(時定数)であり(図5)、**むだ時間と遅れが大きなプロセスでは、操作を加えてからその影響が変化として現れるまでの時間が長くなるため制御は難しくなる。**このようなプロセスでは、操作の影響としての変化がまだ現れていないときに次の操作を加える過剰操作になってしまう恐れがある。前の操作の影響が現れるまで待ってから次の操作を行う必要がある。

この過剰操作を防ぐためには、操作の影響が表れ始めてから次の操作を許可するようにする必要がある。つまり、操作を加えてから次の操作をするまでの間に操作を禁止する時間を設ける。この操作禁止時間はむだ時間と遅れを加味したもので、これもメンバーシップ関数で表した(図6)。

なお、むだ時間と遅れは、操作変数である燃料供給速度をステップ状に変化させて燃焼炉の燃焼温度の変化を観察する方法で大まかに把握したが、実際には、燃料供給速度に加え、燃焼空気流量など合計4種類の操作変数それぞれを無相関で変化させ(20分毎のM系列で操作、プラントに悪影響しないか注視して12時間実施)、燃焼炉の燃焼温度、燃焼炉の出口ガス温度などとの相互相関から、操作を加えてから変化が現れ始めるまでのおおよその時間を求め、それをもとにメンバーシップ関数を作成した。



(図5) むだ時間と遅れ(ステップ応答)



(図6) 操作禁止時間のメンバーシップ関数

3. 制御ルール

燃烧炉の燃烧炉温度とその变化速度をもとにした制御ルールを(表1)に示す。表のマス目の1つ1つが制御ルールである。他には、
 焼却温度と出口ガス温度の変化速度をもとにしたルールを用意した(省略)。なお、各々のメンバーシップ関数は記号で表す。

・燃烧温度(RYU)

記号	メンバーシップ関数
ST	低い
SM	やや低い
MM	丁度いい
LM	やや高い
LT	高い

・燃烧温度の変化速度(DRYU)

記号	メンバーシップ関数
SA	急激に低下 ↘
SM	徐々に低下 ↗
MM	ほぼ安定 →
LM	徐々に上昇 ↗
LA	急激に上昇 ↗

・操作禁止時間(TOTAL)

記号	メンバーシップ関数
LM	影響が現れ始める
LA	影響が明確になる
LT	影響が出尽くした後まで

・燃料フィード速度(OIL)

記号	メンバーシップ関数
NB	大幅に減らす
NM	大目に減らす
NS	少しへらす
ZE	現状維持
PS	少し増やす
PM	大目に増やす
PB	大幅に増やす

燃烧温度
(RYU)

SA ↘
 SM ↗
 MM →
 LM ↗
 LA ↗

燃烧温度の変化速度(DRYU)
 (表1) 制御ルールのマップ

ST	LA → (*1) → PB	LA → PB	LT → PM	LT → ZE	LT → ZE
SM	LA → PM	LA → PM	LT → PS	LT → ZE	LT → ZE
MM	LT → PM	LT → PS	LT → ZE	LT → NS	LT → NM
LM	LT → ZE	LT → (*2) → ZE	LT → NS	LA → NM	LA → NM
LT	LT → ZE	LT → ZE	LT → NM	LA → NM	LA → NB

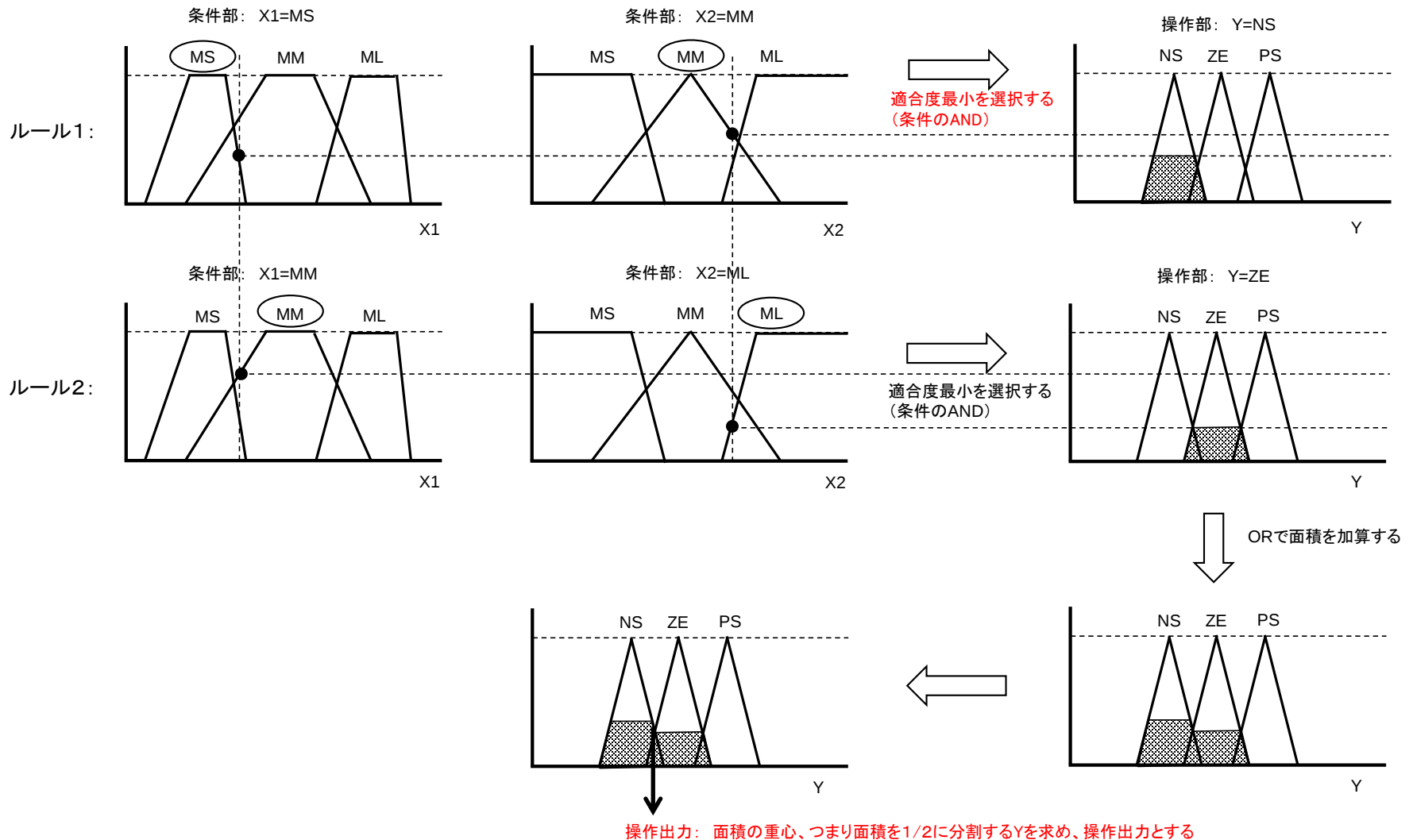
- ルールの説明(*1): IF (RYU=ST) and (DRYU=SA) and (TOTAL=LA) THEN (OIL=PB)
 IF 燃烧温度(RYU)が低く(ST)、燃烧温度の変化速度(DRYU)が急激に低下しており(SA)、かつ燃料供給速度を変更してからの経過時間(TOIL)が影響が明確になるぐらい(LA)であれば、THEN 燃料供給速度(OILを大幅に増やす(PB))
- ルールの説明(*2): IF (RYU=LM) and (DRYU=SM) and (TOTAL=LT) THEN (OIL=ZE)
 IF 燃烧温度(RYU)がやや高く(LM)、燃烧温度の変化速度(DRYU)が徐々に低下しており(SA)、かつ燃料供給速度を変更してからの経過時間(TOIL)が影響が出尽くしている(LT)のあれば、THEN 燃料供給速度(OILは変更しない(ZE))

4. 制御出力

制御出力の求め方に関して、説明を簡単にするため、ファジィ制御ルールが下記の2つの場合で説明する。

ルール1: IF $X1=MS$ and $X2=MM$ THEN $Y=NS$

ルール2: IF $X1=MM$ and $X2=ML$ THEN $Y=ZE$



参考にした書籍とURL

伊藤修ほか：「汎用ファジィコントロールシステム FRUITAX」、富士時報

伊藤修：「ファジィコントローラ」、数理科学

柳下修ほか：「ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用」、システムと制御

菅野道夫：「ファジィ制御」、日刊工業新聞社

倉谷隆博：「ファジィ制御導入による流動層型焼却炉の自動運転」、化学工学論文集（1995年21巻2号）