

# ファジー理論に基づいた昇降装置によるアルミニウムからの水素生成制御

前川 孝司・田上 英人

Hydrogen generation control from aluminum and water by using lifting device based on fuzzy logic  
Koji MAEKAWA, Hideto TANOUE

## Abstract

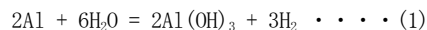
Hydrogen generation is made from the chemical reaction of the surface activated aluminum and water, and the membership functions of the error between the measured value of hydrogen generation per minute and the target value and the error rate of change are respectively prepared fuzzy rules were created. Based on the membership functions and fuzzy rules, we created a control system in which the lifting device inside the generator changes the amount of contact between aluminum and water and the target hydrogen generation is performed per minute. As compared with the PI control system created as the experimental result, the error rate could be reduced to 1/5.

Keywords : Fuzzy logic , Aluminum , Hydrogen generation

## 1. 緒言

科学技術の発展とともに人類が消費するエネルギーは増大し続けており、現在、その多くは化石燃料を消費することで得られている。地球温暖化などの環境問題が問題視されている中で、太陽光や燃料電池など再生可能エネルギーに注目が集まっている。現在、水素ガスは生成時にCO<sub>2</sub>を出してしまう化石燃料の改質から生成するのが一般的であり、CO<sub>2</sub>を排出しない水素生成方法が望まれている。一方、水素は起爆範囲の広い可燃性ガスであるが、高圧の水素タンクに溜めて使用することが一般的である。高圧のタンクを用いるため、高圧ガス配管など対応した設備が必要となることに加え、人為的なミスや災害等で事故が発生した際には大きな事故になる可能性がある。

そこで、本研究では、CO<sub>2</sub>を排出しないアルミニウムと水との反応を用いて、水素が必要なときに必要な量だけの水素生成する水素生成制御システムの構築を目的として研究を行う。アルミニウムと水との反応は、以下の式(1)で表される。



この反応は発熱反応の一種であることに加え、温度依存性の特徴を有している。反応時の熱が発生し、その熱によって水素生成反応が促進され、更なる反応熱を生むため、反応の制御が非常に困難とされている。また研究で用いるアルミニウムは加工工場等で排出される産業廃棄物であるアルミニウムの切削屑を再利用している。そのため、使用した切削工具の種類や切削状況、使用したアルミニウム合金の種類によって、アルミニウムの含有量や不純物の割合、酸化度合いが異なり、反応で得られる水素量や発生までのタイミングなどのパラメータが変化することが予想される。構築する制御系は変化するパラメータに対応しつつ、かつ促進された場合も抑制し、水素発生を制御できるものでなければならない。制御方法としては、温度依存性を利用し、反応器内の温度をコントロールするものもあるが、制御のために必要な電力が発生した水素から得られる電力を上回ってしまうため、特別な用途や環境を除き、好ましくない<sup>1)</sup>。一方、水素発生反応は水とアルミニウムが接触すること

により起こるため、アルミニウムに対し水を加える方法がある。反応機内を高い温度で維持しやすく、高い流量を必要とする場合に有効であるが、一度加えた水を除去することが困難であり、必要以上の水素を発生させてしまう可能性が高い。そこで、本研究では水に対してアルミニウムを加えて水素制御する方法について検討した。

## 2. 制御実験

### 2. 1 活性化アルミ微粒子

通常のアルミニウムは表面が水酸化膜などで覆われているため内部まで水と完全に反応することが難しい。よって、本研究では工場等から排出されたアルミニウムの切削屑に圧縮粉砕などの特殊な加工を施し、表面を活性化したアルミニウムを粒径75μm以下の微粒子である活性化アルミ微粒子（以後、アルミと示す）を用いた。純粋なアルミニウムに水を加えても、表面積に比例したごく微量の水素しか得られない。これに対して、用いたアルミには、製造過程で生じさせた細かい亀裂が無数にある。それらの亀裂が反応場となり、また、生成された生成物による応力で自己成長する。それにより通常では表面で止まる水の分解反応が、亀裂が粒子全体に行きわたることで3次元的な表面反応になっていると考えられる。これにより水と酸化還元反応を起こし常温常圧（25℃, 1atm）でも、アルミ1gと水 1ml から、理論上約1.3リットルの水素が得られるが、実際には平均で約 1.1リットル程度の水素が生成される<sup>2)</sup>。

先述したようにアルミと水との反応は、発熱反応であり、かつ温度が上昇すると反応が加速する温度依存性を有する。そのため、反応が活発になれば、自身の反応熱により、反応が更に活発化する特徴がある。

### 2. 2 昇降装置

加速的に促進される反応を制御するためには反応熱のポジティブフィードバックのループを断つ必要がある。反応熱を抑えるような冷却を外部から入力する方法があるが、膨大な電力が必要となり適切ではない。そこで、ON-OFF 制御の考えを元に、

アルミニウムと水との接触量を反応容器内で変化させることの出来る昇降装置を作製した。作成した装置の図、実物の写真をそれぞれ図1および図2に示す。図1のCAD図の装置内部にある筒のイメージが、図2(a)の写真である。図2(b)の外観にもあるように、外部に取り付けたモーターを回転させることで、内部の筒がラック・ピニオン機構により上下に動く。この装置を用い、アルミの入った筒を昇降させることで、反応熱により促進され続け制御が出来ない状態になっても、接触している反応物であるアルミニウムと水がなくなることで反応を止めることが出来る。制御量を反応から得られる1分間あたりの水素量とし、操作量をアルミニウムと水との接触量と定義した。

### 2.3 PI制御

過去に行われた研究より、アルミと水との水素発生特性が一次遅れ系+むだ時間であると捉えられる<sup>3)</sup>ことから、一般的に使用されるPI制御モデルを用いることとした。反応による水素発生量が目標値を上回る際にはアルミの入った内部の筒を水の上にあげ、水とアルミの接触面積を小さくする。一方、発生量が目標値を下回る際には、内部の筒を水中に沈め、アルミと水の接触面積を大きくし反応を促す。

筒内には、アルミ2gとpH調整と実験開始時の発熱材として水酸化カルシウムを0.05g入れた。なお、昇降装置には水を2L入れてあるため、内部のpHは10.83となる。

先述したように制御対象となる水素発生特性が、一次遅れ+むだ時間で近似できることが出来、かつ水素発生自体は積分要

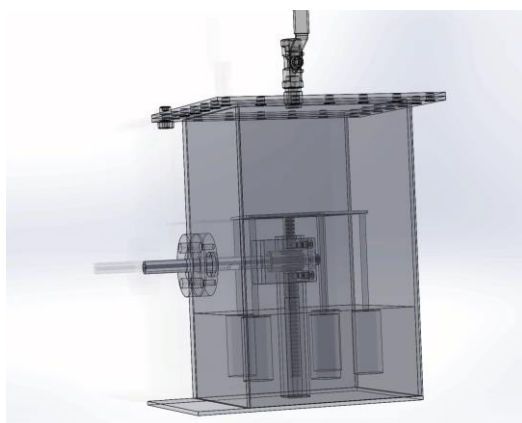


図1 昇降装置CAD図



(a) 内部の筒



(b) 装置外観

図1 昇降装置の実際の写真

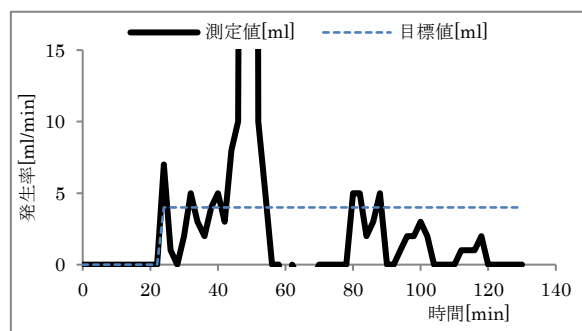


図3 PI制御を用いた水素発生制御実験

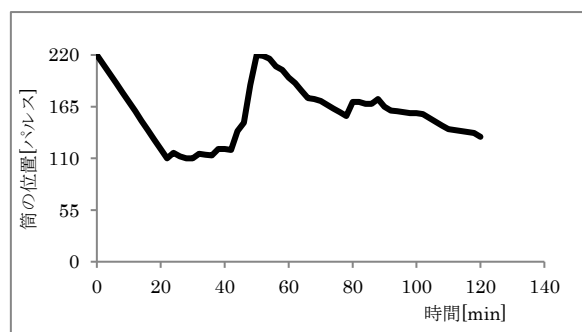


図4 PI制御実験の筒の位置変位

素であるため、Ziegler - Nichols らが提案したステップ応答法(1942年)が有効である。ステップ応答法によりパラメータの調整を行った。調整したパラメータを用いてPI制御による水素発生制御実験を行った。1分間あたりの水素発生の時間変化の結果及びその時刻における筒の位置を図3、図4にそれぞれ示す。筒の位置は、筒が完全に水中に沈んだ位置を0、完全に水上にある位置を220とした。

図3および図4に示したように、筒を水に徐々に沈め、20分頃から水素発生が確認された。その後、42分までは目標値に近づくように振動しつつ、水素発生が行われた。しかし、筒が水中からあげた50分頃でも水素発生が加速し、大きく超過し、設定目標値の43倍の215ml/minを示した。一方、水素発生が目標値を下回って、筒を水中に沈めた後も関わらず、水素発生が20分以上に渡り確認できない時間があった。これらはパラメータを調整しても同様のことが確認された。筒を水中から上げたことで反応が加速、水中に沈めることで反応が抑制されたことから、水に多く触れすぎること、反応に必要な熱が水に奪われ反応が抑制され、逆に水にあまり触れないことで熱が筒内にこもり反応が加速したと考えた。

### 2.4 基礎特性実験

新たな制御系設計のため、作製した昇降装置を使用し、アルミの入った筒を水中に沈めた後、すぐに引き上げた場合と沈めたままにした場合でそれぞれ水素発生特性を測定した。測定結果を図5および図6に示す。

筒内に入れたアルミおよび水酸化カルシウム量はPI制御実験と同様にアルミ2.0gと水酸化カルシウム0.05gである。図5のアルミを水に沈めた後、10秒後に水上へあげた実験では、開始から5分後に反応が確認され、10分には9.5ml/min、42分には図5では枠外で示されていないが160ml/minの水素

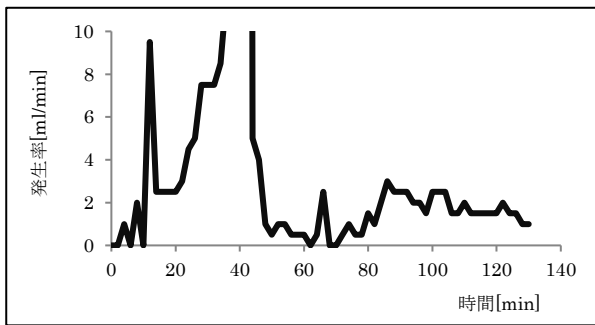


図5 すぐに筒を水から上げた際の水素発生

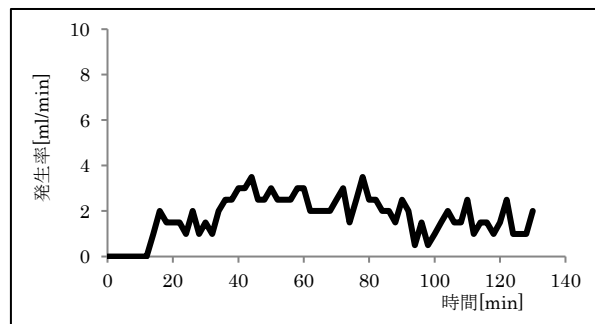


図6 水中に沈めたままの水素発生

発生を計測した。水に接触した後に、水からあげることで、反応熱が水に奪われないため、熱が寄与し反応が活発化したと考えられる。一方、水中に沈めたままの実験では、開始から14分後に反応が確認され、その後は約2 ml/minの水素発生を計測した。水中に沈んだままにすることで、反応熱が周囲の水に奪われ、反応が継続的に行われたと考えられる。

これらの結果から、構築する制御系では、水素発生させるためには水に沈める必要があるが、沈めたままでは、反応は抑制され、水上にあげることで活発化する操作を場合によって適切に変える必要がある。

2.5 ファジー制御

条件によって操作を変える制御として、「もしこうならば、こうする」といったように条件ごとに異なる動作を行うルールを設けることが出来るファジー制御が有効である。ファジー制御では「こうならば」を判断するメンバーシップ関数と、「こうする」を決めるファジールールとを設定し、それらに従って出力が行われる。メンバーシップ関数は、目標値  $y_d$  [ml/min]、測定値  $y$  [ml/min] との偏差  $e$  ( $e = y_d - y$ ) と、偏差変位  $de$  ( $de = e_n - e_{n-1}$ ) をそれぞれ作成した。作成したメンバーシップ関数を図7に、ファジールールを表1にそれぞれ示す。図や表に用いられているNB, NS, ZO, PS, PBにおいてNは負方向、Pは正方向、Bは大きい、Sは小さい、ZOは誤差なしをそれぞれ意味している。メンバーシップ関数の縦軸は、NBやNS, ZO, PS, PBそれぞれの一致の度合いを表している。

偏差0の場合はZOの一致度を1として偏差が負または正に大きくなれば、ZOの一致度が下がるように設計した。ファジールールは、正の値をとるときにアルミニウムの入った筒を水中に沈める方向、負の値をとるときに筒を水上に引き上げる方向に移動させるよう動作を設定した。例として、偏差 $e$ がNBかつ偏

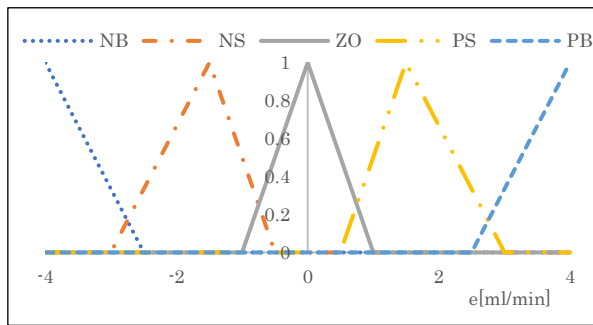


図7(a) 偏差eのメンバーシップ関数

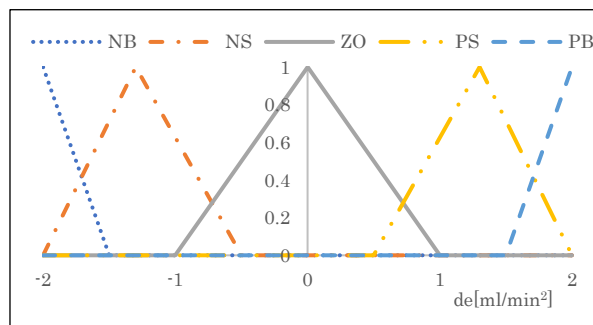


図7(b) 偏差変位deのメンバーシップ関数

表1 ファジールール

		De				
		NB	NS	ZO	PS	PB
e	NB	90	45	-45	-90	0
	NS	45	45	-80	0	0
	ZO	30	-80	0	0	60
	PS	-80	0	-40	60	120
	PB	0	-40	60	120	150

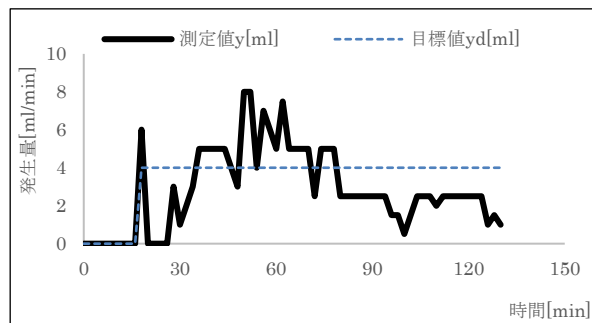


図8 ファジー制御実験結果

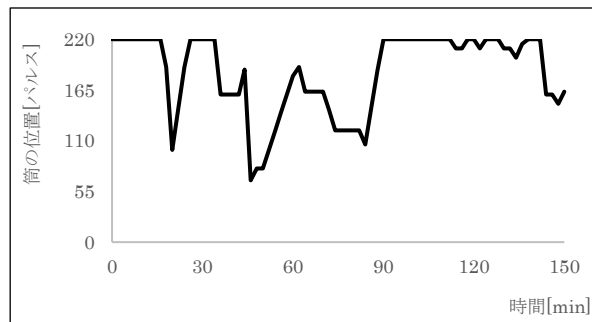


図9 ファジー制御実験における筒の位置変化

差変位 $d_e$ がNBの場合は、水素発生量が不足しており発生が沈静化傾向にあることから、反応を促すためアルミニウムと水の接触量を増やす必要があると考え、90の重みだけ水中に沈めるよう動作を設定した。次に、偏差 $e$ がZ0かつ偏差変位 $d_e$ がNSの場合は、水素発生量の偏差は無いが少し反応が沈静化傾向にあるため、少し反応を活発にするため、水によって反応熱が逃げないように筒を80の重みだけ引き上げるよう動作を設定した。偏差 $e$ がNBかつ偏差変位 $d_e$ がNBの場合は、水素発生量が大きくオーバーしており、かつ、反応が活性化傾向にあることから、反応熱をすばやく逃がし、反応を沈静化させるため150の重みだけ筒を水中に沈めるよう動作を設定した。作成したファジー制御に従って行った実験結果を図8、対応する筒の位置変化を図9にそれぞれ示す。PI制御を行った際に確認された爆発的な水素発生が抑えられ、目値付近の発生実験開始16分から124分まで約2時間継続することができた。測定回数を $n$ 回、目標値を $y$  [ml/min]、測定値を $y_a$  [ml/min]とした際、誤差率 $E$  [%]を式(2)にしたがって計算した。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \frac{\sqrt{(y_k - y_a)^2}}{y_a} \cdot \dots \cdot (2)$$

PI制御での誤差率は242%であったのに対し、ファジー制御では41%と大幅に向上することができた。

### 3. 結果及び考察

活性化アルミニウム微粒子と水との反応による水素発生の制御に、ファジー理論を用いた制御系を設計した。アルミと水の接触面積を変えることで水素発生率を調節できると考え、昇降装置を作製し、制御系を実装した。実験により、誤差率は41%と先行研究(-2%~4%)<sup>4)</sup>と比較すると高い値であるが、安全な方法で所望の水素発生量を一定時間実現できた。本制御系を改良し用いることで、燃料電池への供給水素等、広い応用が期待できる。

本実験ではアルミ1g当たり185.5[ml]の水素発生と理論値の14%しか発生させることができない。また、災害時などでの本研究の応用においては、外部からの電力を必要とするため、現実的ではない。これらの問題の解決には、外部からの電力供給がない状態で水素を発生させ、その水素により電力を作りこの装置を駆動させる機構の開発、また、アルミの水素発生ポテンシャルを最大限に引き出すため、外部から熱を与えるなどの工夫と機構の開発し、実験する必要があると考えられる

### 謝辞

本研究は平成29年度卒業研究生の中村隆氏、由尾優馬氏の協力を得た。ここに記して深謝する。

廃アルミニウムとして部材をご提供いただいた北九州工業高等専門学校教育支援室の上手政春様をはじめとする技術専門職員の皆様に深く感謝申し上げます。また本研究は、JSPS 科研費 JP17K06327 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) 最首花恵・小坂拓也・土屋範芳・渡邊則昭：「温泉水と廃アルミニウムを用いた地産地消型水素生成システムの実現の実験的検討」, 日本地熱学会誌, Vol. 39, No. 1, pp. 15-24(2017)
- 2) 高原健爾・前川孝司・梶原寿了・渡辺正夫・山之内庸一・川口秀樹：「活性化アルミ微粒子を用いた水素発生特性測定」, 平成19年電気学会全国大会講演論文集, pp7-108(2007)
- 3) 前川孝司・高原健爾・梶原寿了・大山和宏・渡辺正夫：「ARMA モデルを用いた活性化 Al 微粒子と水との反応の記述」, 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 8, No. 8, pp68-75(2009)
- 4) 前川孝司・高原健爾・梶原寿了・渡辺正夫：「ファジー理論に基づいた活性化 Al 微粒子と水との反応による水素生成の制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 3, pp150-156(2011)

(2018年11月 5日 受理)