

## 液面制御システムにおける安定化制御

### Stabilized Control for Damping Systems of Liquid Surface Vibration

○菅谷 純一\*, 早坂 保\*, 服部 正行\*, 大河内 彰\*\*

○Junichi Sugaya\*, Tamotu Hayasaka\*, Masayuki Hattori\* and Akira Okouchi\*\*

\*仙台電波工業高等専門学校

\*\*筑波大学大学院

\*Sendai National College of Technology

\*\*Graduate School of Tsukuba University

キーワード: 液面振動(liquid surface vibration), マットラボシステム(MATLAB system),  
容量-電気変換回路(capacity - electricity conversion circuit),  
同期整流(synchronous rectification), 安定化制御(stabilized control)

連絡先: 〒989-3128 仙台市青葉区愛子中央1丁目16-1 仙台電波高専電子制御工学科  
菅谷純一, Tel.: (022)391-6128, Fax (022)391-6146, E-mail: sugaya@cc.sendai-ct.ac.jp

## 1. はじめに

実生活の中で現れる製品の質の劣化を招くような工場現場での振動や乗り物での揺れを抑える制御を振動制御と呼ぶ。液面制御の研究は液体輸送時の振動制御はもちろん、クレーン制御<sup>1)</sup>や耐震センサなどの応用に関連して重要な課題である。ここで取り扱う液面制振システムはボールネジ上の移動によって液面の揺れを抑制するコンピュータと一体の制御システムのことである。このシステムによって液面の揺れをいかに抑えるか、その適切な制御を見つけ出すことが本稿での目的である。

これまでの研究では、Visual Basic(以下、VBと略記する)システムによる液面制御シ

ステムの構築を行ってきた<sup>2)</sup>。これは液面の揺れを振子の揺れと近似的に考えることで、振り子の揺れ止め制御の場合と同様に、通常の線形制御則を液面制御システムにも適用できると考えられる。ここでは制御部分のシステムをこのVBシステムからさらにMATLABシステムに変更することで、液面制御を実現した<sup>3)</sup>。システムの変更によって、制御パラメータの変更などの操作がより簡便になり、操作性が向上した。

一方、これまでは、ダイオード整流方式の容量-電気信号変換回路(以下、C/V変換回路と略記する)による液面制御であった。また、新しく提案した同期整流方式のC/V変換回路を用いた液面制御を紹介する<sup>4)</sup>。これは、液位を検出するセンサの静電容量の周波数特性から、液位の変化とC/V変換出力

との間の線形性の良いものを選択することが必要となる。

以上、この報告では①液面制御システムの紹介、②MATLAB による液面制御を実現、③同期整流方式の C/V 変換回路の出力特性を改善およびその液面制御効果、④初期液位の変化に対しての非線形制御の適用についても述べる。

## 2. 液面制御システムの構成

### 2.1 液面制御システム

液面制御システムとは、液槽内の液体の揺れを安定させるために、液槽が AC サーボモータによりボールねじ上を移動する制御システムのことである。

液面制御システムの外観図を図 1 に、システムの基本構成を図 2 に示す。液体は簡単のため水を使用している。

液面制御システムは以下の機器で構成されている。制御用コンピュータ(以下、コンピュータとのみ記す)としては CPU に Pentium4

(1.8GHz)を搭載した PC/AT 互換機を用いた。また 16bits の分解能を有する dSPACE 社製の DS1104 という拡張ボードを使用し、コンピュータからの入出力を行っている。

なお本研究では、dSPACE DS1104 をマルチコントローラボードと呼んでいる(以下、MCB と略記する)。制御におけるサンプリング時間は 10[ms]としている。AC サーボモータは定格出力 200[W]、定格回転数 2000[rpm]の

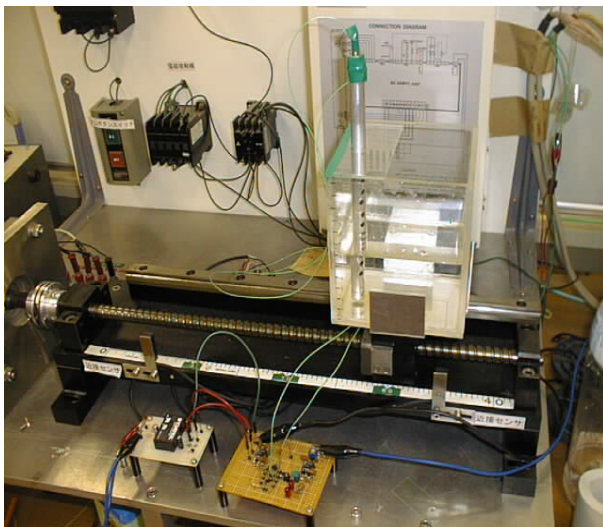


図 1 液面制御システムの外観図

特性を持つ。

ボールねじのリードは 8[mm]で、全長 400[mm]である。液面の変位を検出するセンサは、同軸二円筒型であり、アルミニウムやステンレスなどで製作されている。液槽は上面を開放した一辺 100[mm]の立方体でアクリル板にて製作し、ボールねじのナット上にある台座の上に設置した。具体的な制御の仕方次のようである。液位情報は液面変位検出センサにより検出されるアナログ信号であるため、MCB の A/D 変換機能によりデジタル信号に変換されてからコンピュータに入力される。一方、ボールねじ上の台座の位置はモータのレゾルバからパルス信号で出力されるため、MCB のカウンタ機能でパルスをカウントし、その後、コンピュータに入力している。

これらの情報を元にコンピュータでは、全状態フィードバック制御則として制御プログラムで速度指令値を算出する。速度指令値は、コンピュータからの信号を MCB の D/A 変換機能によりアナログ電圧に変換した後、サーボアンプに入力する。サーボアンプによりサーボモータを駆動し、ボールねじ上の台座を左右に移動させる。台座が左右に動くことで、液面の揺れを安定化させることができる。なお、制御用ソフトとして MATLAB を使用している。

液面制御の際、フィードバックには位置情報、液位情報のほかに各々の速度情報、加速度情報が必要となる。これらは差分をとることにより求められるが、それには一定時間毎にセンサからの値を検出しなくてはならない。そこでこの液面制御システムでは、MCB

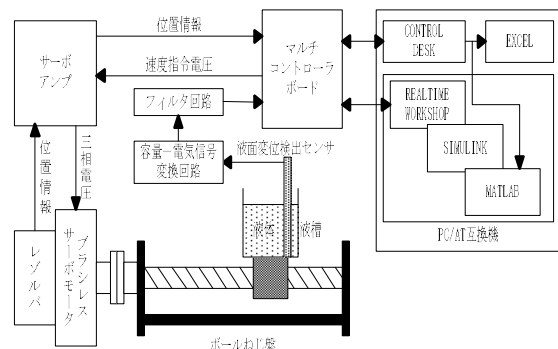


図 2 液面制御システム

のカウンタ機能を使用し、サンプリング周期 10[ms]のタイマ割り込みを行っている。

## 2. 2 MATLAB/SIMULINK および MCB

従来の液面制御システムは、制御用プログラムを VB で作成し、AD/DA ボード、カウンタボードを使用したものであった。新しい液面制御システムは、制御用プログラムを MATLAB/SIMULINK で作成し、各ボードに代わって MCB を使用した。

MATLAB/SIMULINK で作成した制御則は REAL-TIME WORKSHOP により MCB 上で実行される。制御用プログラムを VB で記述した場合は、制御則に加え、外部機器から情報を得る為の手続きを行なわなければならないので、プログラミングは非常に複雑になる。それに比べ MATLAB/SIMULINK を使用した場合は制御則をブロック線図で作成できるため、VB を使用する場合に比べ、プログラミングの知識などは必要ない。また、MCB を用いることで、外部機器との接続も簡単にでき、従来のシステム以上に研究や開発が期待できる。

MCB は、AD/DA 変換機能 (16bits) やカウンタ機能をもつ制御用ボードである。この MCB を用いることで、MATLAB/SIMULINK で作成した制御プログラムを簡単に実行することが可能になる。

## 2. 3 液面変位検出センサ

液面変位検出センサの原理は、図 3 (a) に示す平行平板コンデンサの原理を用いている。二つの電極間の誘電体 1 と誘電体 2

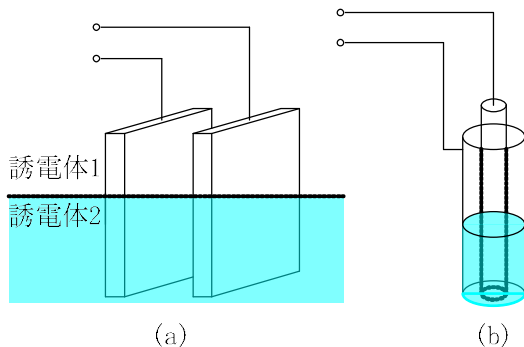


図 3 センサの原理と構造

の誘電体の比率が変化すると、それによってもって静電容量が変化する。これを利用することで、誘電体 2 の変化を検出することが可能になる。本研究で用いるセンサは図 3 (b) のような、同軸二円筒型の形状をしている。図 3 (a), (b) のようなセンサの形状は、可動部が無いので安定した測定ができ、測定の精度もよい。本研究の液面変位検出センサは液位の変化を静電容量の変化として検出するものである。

本研究では C/V 変換回路を用いて、静電容量の変化を電圧の変化に変換することで、その電圧情報をコンピュータに取り込み液面制御を行っている。

## 2. 4 ダイオード整流方式センサ回路

従来の C/V 変換回路は、コンデンサブリッジとダイオード整流を用いた図 4 に示す回路である。発振回路からは正弦波が出力され、コンデンサブリッジに印加される。センサの静電容量  $C_s$  と調整用のコンデンサの静電容量  $C_r$  が同じ容量であれば、コンデンサブリッジは平衡状態になり、この回路の出力  $v_o$  は 0 [V] になる。液位が変化し、センサの静電容量が変化すると平衡がくずれ、液位の変化に応じた電圧が出力される。

$$C_s = C_r \quad \text{ならば} \quad v_o = 0 \text{ [V]}$$

$$C_s \neq C_r \quad \text{ならば} \quad v_o \neq 0 \text{ [V]}$$

出力された電圧を増幅し、フィルタを用いて交流成分を除去する。その後、AD 変換することで、液位の変化をコンピュータに取り込むことが可能になる。

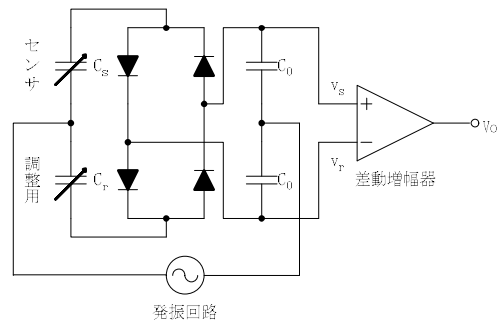


図 4 ダイオード整流方式 C/V 変換回路

液面制御を行わない揺れ（自由振動）を図5に、ダイオード整流方式C/V変換回路を使用した液面制御結果を図6に示す。

## 2.5 同期整流方式センサ回路

ダイオードで整流を行う場合、次の条件を満たしていると仮定している。

- ・それぞれのダイオードの特性が一致
- ・ダイオードの抵抗成分（順方向）が0

しかし、実際にはダイオードの特性にそれぞれバラツキがある。また、順方向で0.6~0.7[V]程度電圧降下があることから、抵抗成分もある。ダイオード整流方式のC/V変換回路は、これらの値による液位の検出誤差を含んでいると考えられる。

一方、同期整流方式は、素子の特性によらない整流方式である。そのためダイオード整流方式よりも液位の検出精度を高められると考えられる。同期整流方式のC/V変換回路を図7に示す。同期整流方式ではセンサ部の電圧 $v_s$ と調整部の電圧 $v_r$ の差を発振回路の出力 $v_i$ と掛け合わせることで液位の変化を電圧の変化に変換している。出力 $v_o$ は直流成分と交流成分の和であるので、ローパスフィルタにより交流成分を除去することで、必要な直流成分のみを取り出すことが可能である。

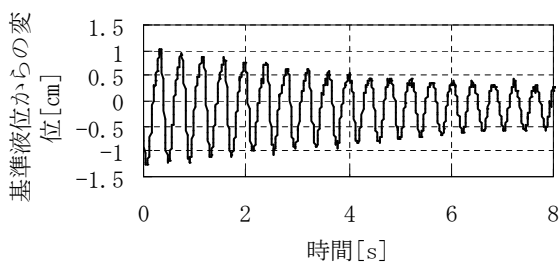


図5 自由振動の測定結果

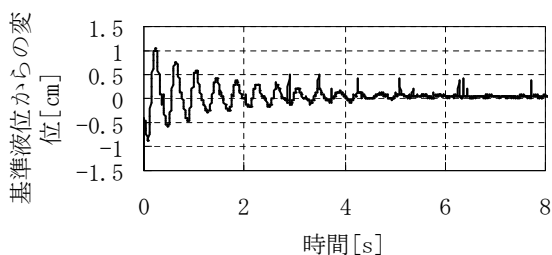


図6 ダイオード整流方式の制御結果

同期整流方式のC/V変換回路を製作し、液面制御実験を行った。出力特性を測定した結果、図8の結果が得られた。図8は、基準液位を5[cm]とし、基準液位から液位を変化させた場合の出力電圧の変化である。出力特性の測定結果から、ダイオード整流方式の出力特性は、ほぼ線形関係である。

しかし、同期生優方式の出力特性は線形関係でなく、液位の変化に対する感度もダイオード整流方式に比べ低いことがわかる。

## 3. 同期整流方式C/V変換回路の改善

### 3.1 センサの周波数特性の測定

同期整流方式C/V変換回路の発振回路の発振周波数は、ダイオード整流方式の場合と同じ周波数であった。また、バランスコンデンサ $C_0$ の値も同じであった。これらの値が同期整流方式C/V変換回路には適していないため、出力特性が線形でないと考えた。まず、最適な発振周波数を決定するためセンサの周波数特性の測定を行った。その結果を図9に示す。図9は、各液位におけるセンサの

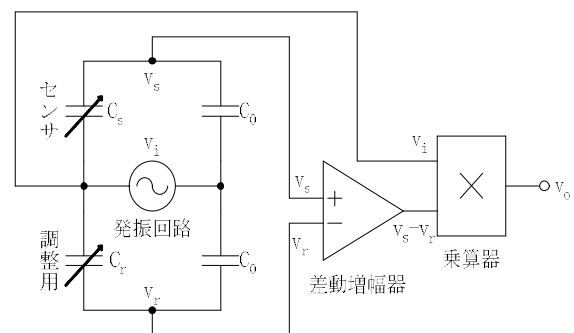


図7 同期整流方式C/V変換回路

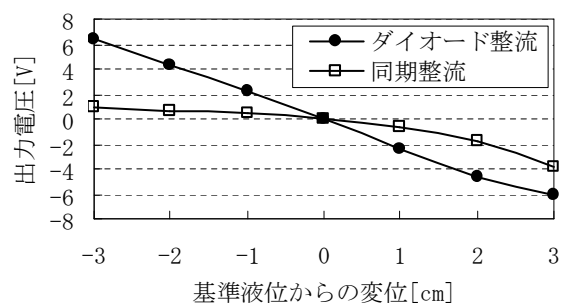


図8 C/V変換回路の出力特性

静電容量が、周波数によってどのように変化するかをインピーダンスメータを用いて測定した結果である。また、セラミックコンデンサについて測定した結果も併せて示した。図 9 より、セラミックコンデンサの容量がどの周波数においてもほぼ一定であるのに対して、センサの静電容量は周波数によって変化するということが分かった。図 10 は図 9 の 100 [kHz] ~1 [MHz] に注目した拡大図である。この周波数範囲において、センサ容量はほぼ一定の値になる。また、液位の変化 1 [cm] に対してセンサ容量が約 30 [pF] 一定幅で変化する<sup>5)</sup>。同期整流方式 C/V 変換回路の発振周波数には、この容量が一定になる範囲が適していると考えた。

### 3. 2 バランスコンデンサ $C_0$ の検討

続いて、バランスコンデンサ  $C_0$  について検討を行った。 $C_0$  をそれぞれ 100 [pF], 1000 [pF], 10000 [pF] とし、発振回路の発振周波数を変化させたときの液位の変化と出力電圧の大きさの関係を測定した結果を次ページ図 11~図 13 に示す。 $C_0$  を 100 [pF] とした場合、どの発振周波数においても液位

の変化に出力電圧の変化が比例していないことが確認できた。また、発振周波数が高くなるほど出力電圧が高くなる傾向が確認できた。 $C_0$  を 1000 [pF] とした場合、発振周波数が高いほど比例関係に近づく傾向があることが確認できたが、まだ比例関係にあるとはいえない。 $C_0$  を 10000 [pF] とした場合、発振周波数が高いほど比例関係に近づく傾向があることが確認できた。さらに、発振周波数 300 [kHz] においてほぼ比例関係の出力特性を得ることができた。 $C_0$  の検討を行った結果、発振周波数が高いほど、もしくは、 $C_0$  が大きいほど液位の変化と出力電圧

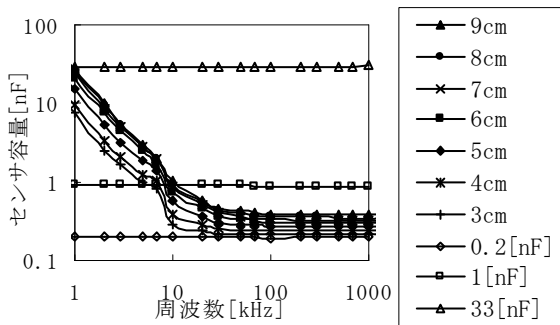


図 9 センサ容量の周波数特性 1

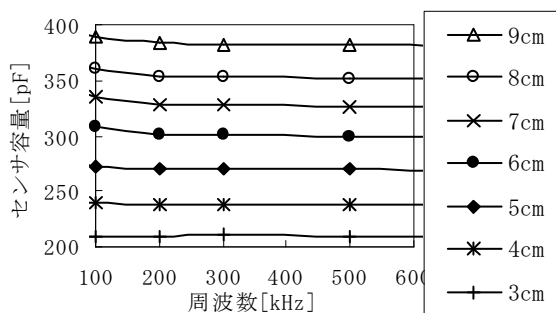


図 10 センサ容量の周波数特性 2

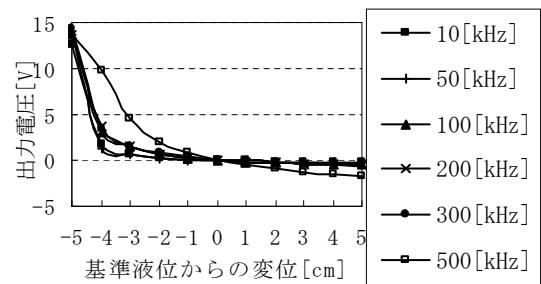


図 11  $C_0$  : 100 [pF] の場合の出力特性

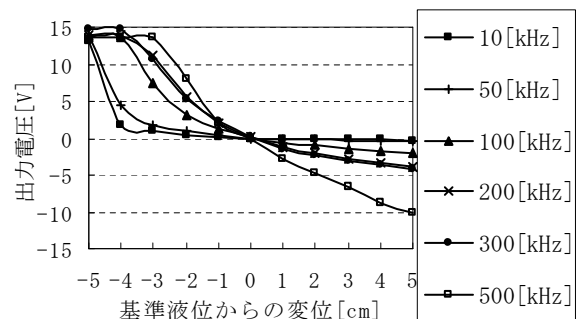


図 12  $C_0$  : 1000 [pF] の場合の出力特性

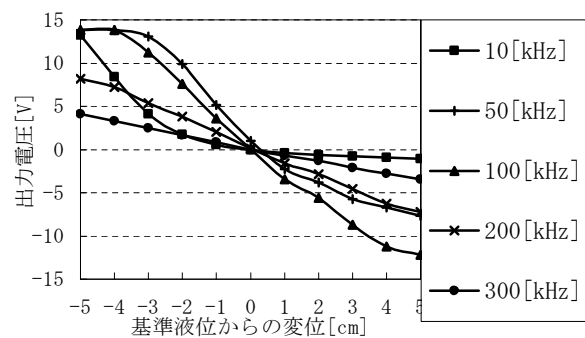


図 13  $C_0$  : 10000 [pF] の場合の出力特性

の大きさが比例関係に近づく傾向があることが分かった。しかし、発振周波数が高すぎる、もしくは、 $C_0$ が大きすぎると、平衡状態にするための零調整が困難になる。このことから、発振周波数を 300 [kHz]、 $C_0$ を 10000 [pF] とすることが適当であると考えられる。

### 3.3 同期整流回路を用いた液面制御の結果

センサ容量の周波数特性の測定と  $C_0$  の検

表 1 改善前後の値

	発振周波数 [kHz]	$C_0$ [pF]
改善前	100	470
改善後	300	10000

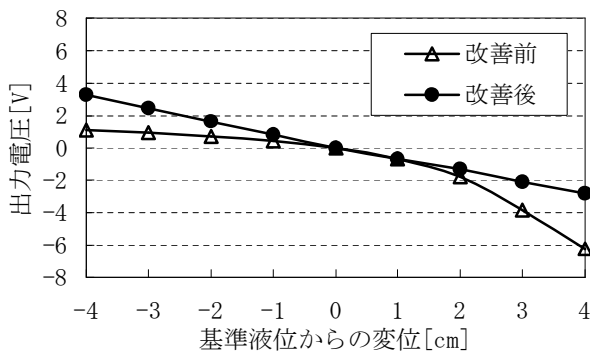


図 14 同期整流方式 C/V 変換の出力特性

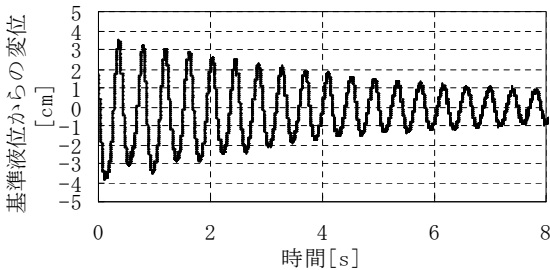


図 15 改善後の自由振動の液位検出結果

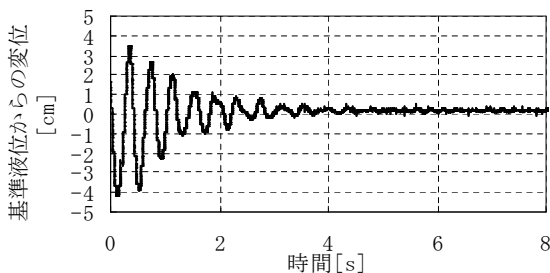


図 16 改善後の液面制御結果

討を行い、同期整流方式 C/V 変換回路の出力特性を改善した。改善前後の値を表 1 に示す。また、改善前後の同期整流方式 C/V 変換回路の出力特性を図 14 に示す。出力特性を改善し、液面制御実験を行った結果を図 15、図 16 に示す。同期整流方式 C/V 変換回路の出力特性を改善した結果、液面制御効果を確認した。

### 4. 非線形制御則の適用

初期液位の変化に対して初期の安定な制御効果を得られる変化許容型の制御をロバスト安定化制御と言う。ここでは、ロバスト安定化による制御方式を液面制振制御に対して適用する。基準からの変化分は不確かさと解釈したときの非線形制御則は以下のとおりである<sup>6)</sup>。

$$u = -z g(x) \quad (1)$$

$$z = 2.9231 \theta + 0.9643 \dot{\theta} + 0.0026 p + 0.2984 \dot{p}$$

$$g(x) = \frac{1}{|z|} (\alpha \|x\| + \beta), \quad (\alpha=1, \beta=5) \quad (2)$$

$$\|x\| = \sqrt{\theta^2 + \dot{\theta}^2 + p^2 + \dot{p}^2}$$

ここで、 $\theta$  は液位、 $p$  は台座の位置を表す。この非線形制御則は次の MATLAB によるブロック図 (図 17) として表される。

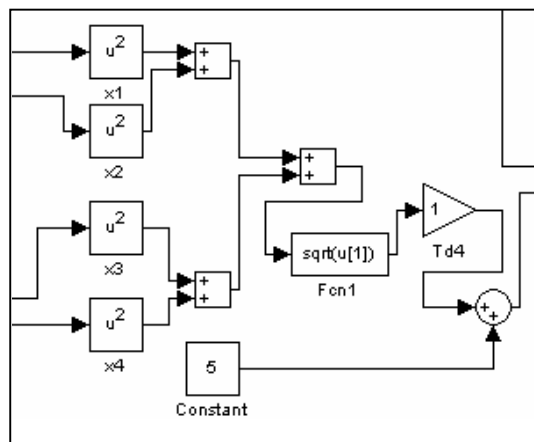


図 17 非線形制御則のブロック図

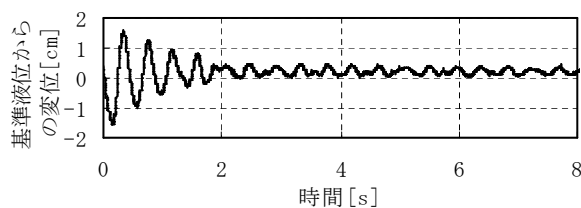
図 18 は、初期液位を 4[cm]および 8[cm]とした非線形制御方式による制御応答の結果である。

この波形の整定時間はほぼ 2 秒で図 16 の線形の場合における整定時間約 4 秒と比較して小さいことから、十分制御効果があると言える。また、基準液位が変化しても、図 18(a), (b)ともに微小振動があるものの、整定時間がそれほど変化していないことから、ロバスト性も実現できるように考えられる。

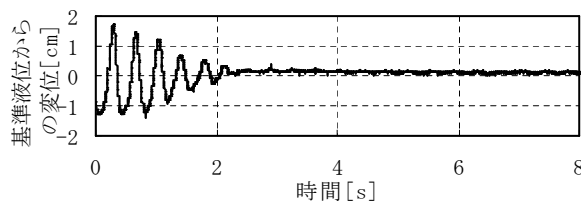
## 5. まとめ

液面制御システムを VB システムから MATLAB システムに変更し、同様の液面制御が行えることを確認した。このシステムの変更により、制御用プログラムの作成が容易になった。また、液位検出精度向上のため同期整流方式 C/V 変換回路を提案した。同期整流方式 C/V 変換回路の出力特性が線形でなかったことから、その改善を行うため、センサ容量の周波数特性の測定やバランスコンデンサの検討を行った。

その結果、同期整流方式 C/V 変換回路の出力を改善し、MATLAB システムと同期整流方式 C/V 変換回路を組み合わせ、液面制御を実現させた。また、非線形制御則を適用した場合の応答結果から、整定時間の向上が確認できた。



(a) 初期液位を 4[cm]



(b) 初期液位を 8[cm]

図 18 非線形制御則による応答結果

今後は、同軸 2 円筒型液位センサが長くなった場合などの線形性の確認や水害の防災への応用など、センサや検出回路の改善を目指す。また、MATLAB システムでの制御則の変更が容易になったことで、非線形制御則による初期液位の変化に対するロバスト性について、さらなる検討をしていく。

## 参考文献

- 1) 進藤, 孫, 坂和: コンテナ・クレーンの振れ止め制御, 計測自動制御学会論文集, **19-5**, 430/432 (1983)
- 2) 菅谷, 芝, 服部: 液体輸送時の液面制振制御に関する研究, 仙台電波工業高等専門学校紀要, **31**(2001)
- 3) 大河内, 菅谷, 服部: 液面制振システムにおける安定化制御方式について(第 1 報), 電気関係学会東北支部大会講演論文集, **1B3** (2005)
- 4) 菅谷, 大河内, 服部: 液面制御システムの安定化制御方式について—同期整流方式とマルチボードを用いて—, 仙台電波工業高等専門学校紀要, **35**(2005)
- 5) 大河内, 菅谷, 服部: 液面制振システムにおける安定化制御方式について(第 2 報), 電気関係学会東北支部大会講演論文集, **2D16**(2006)
- 6) B.R.Barmish, M. Corless, and G. Leitmann: A new class of stabilizing controllers for uncertain dynamical systems, SIAM J. Contr. Optimiz **21**, 246/255(1983)