

電気回路の定性的理解を助ける水モデルの検討

ポリテクカレッジ滋賀 電子技術科
 (近畿職業能力開発大学校附属
 滋賀職業能力開発短期大学校)

仲野 忠行

1. はじめに

従来から、電気回路を学ぶ際に、高い電圧から低い電圧へ向かって電流が流れる現象を、水が高いところから低いところへ移動する物理現象になぞらえて説明することがある。電気回路の入門書には、これらのモデルについての記述はあるものの、電圧や電位、電流の簡単な説明に使用される程度である。

そこで、従来からある水を使ったモデルを、各電気回路素子についてさらに詳細に定義することで、電気回路理論の定性的理解を助ける水モデルを作れるのではないかと考え、ここに報告する。

2. 各水モデルの説明

水モデルを使用する目的は、目に見えない電気現象を目に見える水の流れや圧力に置き換えることで複雑な電気現象の理解を助けることにある。特にコンデンサやコイルの電気現象は微分や積分を伴うため、数式で説明することが多く、学生が理解不足に陥りやすい。したがって、コイルやコンデンサの電圧、電流をどのようにして水モデル上で表現するかが重要と思われる。

以下に、アース、定電圧源、抵抗、コンデンサ、コイル、交流電圧源、スイッチの水モデルの定義を説明する。特に、コンデンサとコイルについては、

電圧、電流が水モデル上のどのような物理量に対応するのかについて説明する。

(1) 使用する水モデルの概要と電圧電流との関係

水を蓄積できる水槽と水槽間を接続するパイプで構成されるモデルとする。水は電荷に該当する。

パイプは水槽間の底部を接続するものとし、各水槽の底部の水圧（水面からの深さあるいは水面の位置の高さ）が電圧に該当し、水槽内やパイプ内を流れる水流（単位時間当たりの水の移動量）が電流に該当する。

(2) アースの水モデル定義

無限の大きさの水槽で定義する。どんなに水が流れ込んでも、流れ出ても水面の位置は0Vで変化しないものとする（図1）。（アースの内部抵抗 = 電圧/電流 = 0 Ωを意味する）

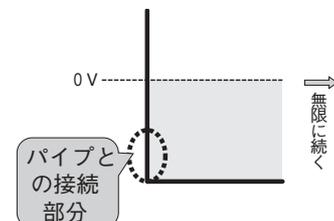


図1 アースの水モデル

(3) 定電圧源の水モデル定義

無限の大きさの水槽で定義する。どんなに水が流れ込んでも、流れ出ても水面の高さ（電圧）は一定

で変化しない (図2)。(定電圧源の内部抵抗 = 電圧 / 電流 = 0 Ωを意味する)

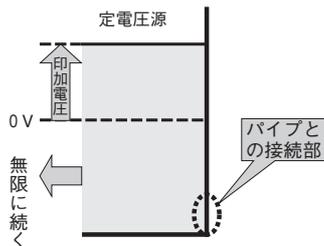


図2 定電圧源の水モデル

(4) 抵抗の水モデル

抵抗は水槽と水槽をつなぐパイプで定義する。定電圧源の水モデルとアースの水モデルを抵抗の水モデルでつなぐことで、パイプの両端に水圧の差 (電圧) が発生して、水の流れ (電流) が生じる (図3)。

電気抵抗が導体の長さに比例し断面積に反比例するのと同様に、水モデルでのパイプの抵抗値は長さに比例し、断面積に反比例すると定義する

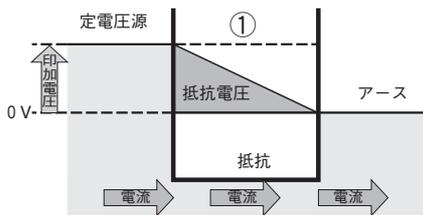


図3 抵抗の水モデル

(5) 2端子コンデンサの水モデル

2端子コンデンサは、パイプ内 (抵抗) を流れる水の移動を妨げる仕切板で定義する。回路図記号では、抵抗とコンデンサを直列接続したものになる。

パイプの断面積は2端子コンデンサの容量に、パイプの抵抗値は2端子コンデンサの内部抵抗に相当する (図4)。

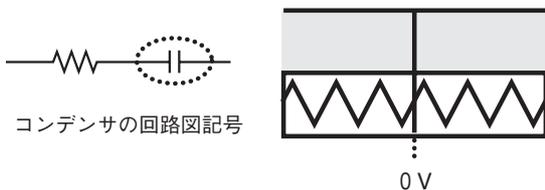


図4 2端子コンデンサの水モデル

パイプ内の仕切板はパイプの端から端まで移動できるものとする。(それ以上移動した場合は2端子コンデンサの耐圧を超えてしまうことに相当し、破壊されてしまう。)ただし、板には、スプリングがついており、板の左右の水圧が異なれば、スプリングの復元力とつりあうところで停止するものとする。仕切板左右の水圧 (電圧) が同じであれば中央の0Vに位置に戻ろうとする力が働く。スプリングの復元力は自然長からの距離に比例することから、仕切板の0V位置からの距離が電圧に比例する (図5)。

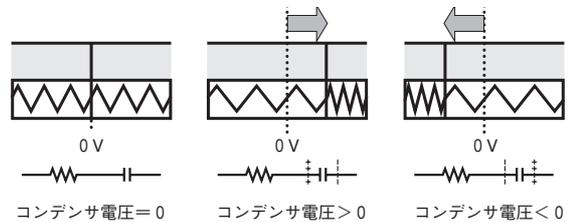


図5 コンデンサ電圧と仕切板位置の関係

コンデンサを流れる電流の有無および方向は、仕切板の移動方向に一致する。また、一端から流入した電流と他端から流出する電流は常に同じである。

コンデンサに一定の電流が流れると、時間を横軸としたコンデンサ電圧は直線的に増加する ($i = dQ/dt = CdV/dt$ より、電流一定のとき電圧変化の傾き一定) ことから、仕切り板 (電圧) 移動速度はコンデンサ電流と比例関係にある (図6)。

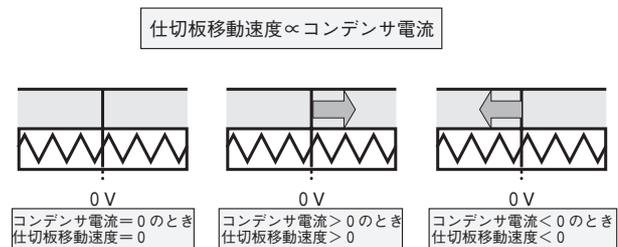


図6 コンデンサ電流と仕切板移動速度の関係

コンデンサ電圧を急に変化させたときのコンデンサ電流の大きさを数式で考えると、 $i = dQ/dt = CdV/dt$ の dV/dt が非常に大きくなることから、非常に大きな電流が流れることになる。式の上だけでは実際の現象をイメージしにくい、2端子コンデン

サの水モデルでは仕切板が一瞬にして、ある距離移動することになる。このことは、一瞬にして、仕切板の移動体積分の電荷が移動したことになり、移動時間がきわめて小さいことから非常に大きな電流が流れるというイメージがつかみやすい(図7)。(実際に移動する電流の大きさはパイプの抵抗値(コンデンサの内部抵抗)の制限を受ける)

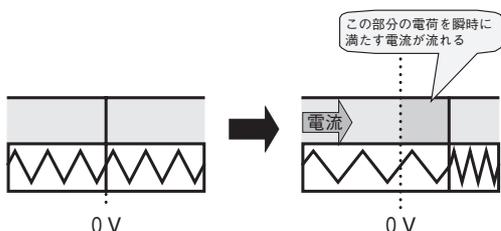


図7 コンデンサ電圧を急に变化させたときの大電流発生の水モデルイメージ

(6) 1端子がアースに接続された1端子コンデンサの水モデル

1端子がアースに接続されているコンデンサでは、アース端子側の電圧は常に0Vで、アース端子側に流れる電流は他端子を流れる電流と同じであることから、スプリングを利用した複雑なパイプモデルではなく、アース側の電荷やスプリング、仕切板を取り除き、定電圧源で定義したような水槽を有限の大きさにした単純な水槽構造のモデルで定義できる(図8)。

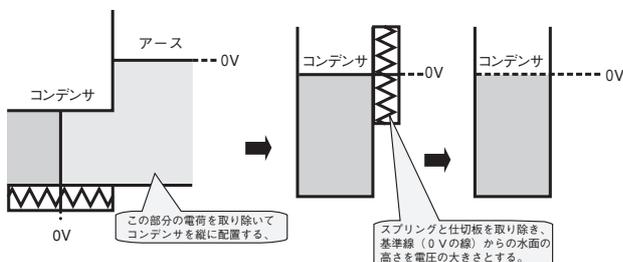


図8 1端子がアースに接続されたコンデンサの水モデル

水槽構造のコンデンサの水位と電荷の関係は次のように定義する(図9)。

- アースの水位と同じ：電荷はゼロ
- アースの水位より上：正電荷が充電

アースの水位より下：負電荷が充電
 コンデンサの静電容量が対向導体の面積に比例すると同様に、水モデルでのコンデンサの容量は底面積(水槽の横幅)に比例すると定義する。
 同じ水量(電荷Q)が蓄積されても、底面積(静電容量C)が小さいと深さ(電圧V)は大きくなる。(Q = CVの関係が成り立っている)

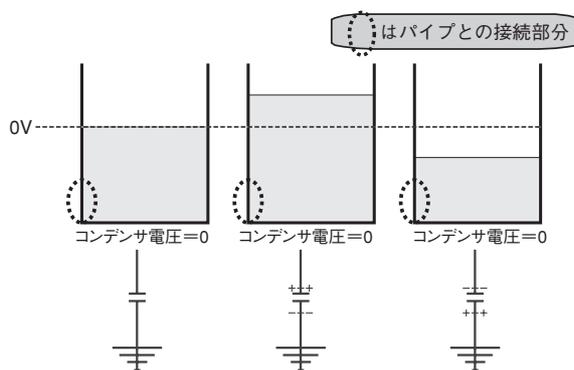


図9 1端子コンデンサの水モデル

また、コンデンサに一定の電流が流れると、時間を横軸としたコンデンサ電圧は直線的に増加する($i = dQ/dt = CdV/dt$ より、電流一定のとき電圧変化の傾き一定)ことから、水面(電圧)移動速度はコンデンサ電流と比例関係にある(図10)。

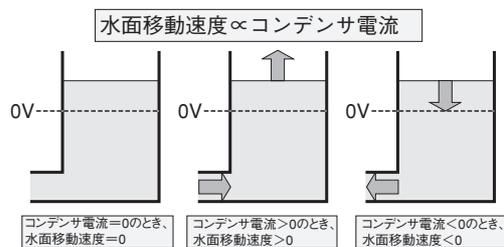


図10 コンデンサ電流と水面移動速度の関係

(7) コイルの水モデル

コイルは、パイプ内(抵抗)を流れる水の移動速度の変化を妨げる水車で定義する。回路図記号では、抵抗とコイルを直列接続したものになる(図11)。

コイルを流れる電流の有無および方向は、図12に示すように水車の回転方向に一致する。また、コイルを流れる電流の大きさは、図13に示すように水車

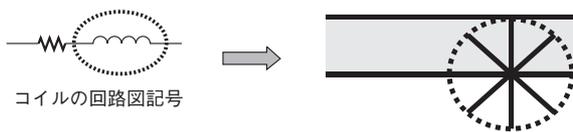
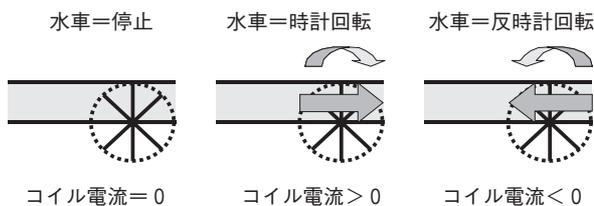


図11 コイルの水モデル



注) コイル電流は右向き方向が正と考えている。

図12 コイル電流と水車回転方向の関係

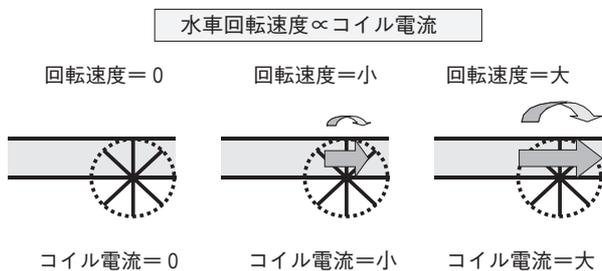


図13 コイル電流と水車回転速度の関係

の回転速度に比例する。

コイルに一定の電圧を加えると、時間を横軸としたコイル電流は直線的に増加する ($e = -Ldi/dt$ より、電圧一定のとき電流の傾き一定。負号は e を起電力と考えたとき、電流の増加方向と反対になるため) ことから、水車の羽根左側面の電圧が右側面の電圧より大きいと、この電圧差に比例して水車の回転速度は直線的に増加する。実際は、図14に示すように、電圧が加わる以前の水車の回転状態により、加速する場合と減速する場合がある。

水車の回りにくさがコイルのインダクタンスに相当する。水車を回りにくくする方法として、水車の重量増加や水車の羽根を大きくすることが考えられる。今回作成した水モデルコイルの図では、すべて同じ図を使用し、インダクタンスは同じ値としている。

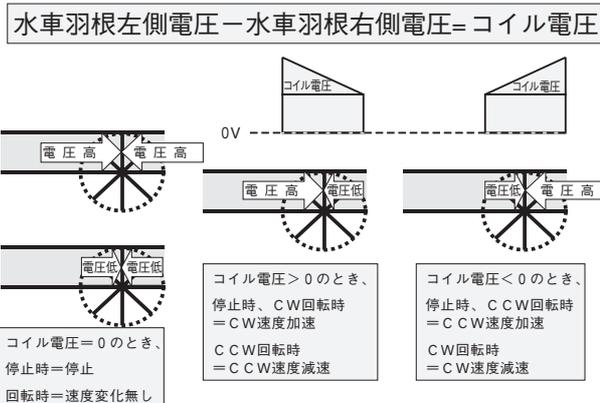


図14 コイル電圧と水車の回転速度変化の関係

コイル電流を急に变化させたときのコイル電圧の大きさを数式で考えると、 $e = -Ldi/dt$ の Ldi/dt が非常に大きくなることから、非常に大きな電圧が発生することになる。式の上だけでは、実際の現象をイメージしにくいですが、コイルの水モデルでは一定速度で回転している水車 (コイル) を含んだパイプ (抵抗) の流れを一瞬にして堰き止めることになる。このことは、一瞬にして、コイル電流がゼロになり、堰き止められた逃げ場のない水が、一定速度で回転しようとする水車の圧力を受け非常に高い水圧 (電圧) が発生することを想像でき、高電圧の発生イメージをつかみやすい (図15)。

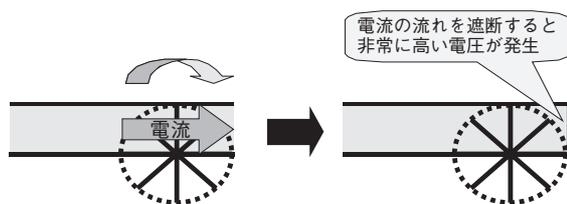


図15 コイル電流を急に变化させたときの大電圧発生の水イメージモデル

(8) 交流電圧源の水モデル

定電圧源の水モデルにおいて、時間によって水面の高さが周期的に変化するモデルとする。



図16 交流電圧源の水モデル

(9) スイッチの水モデル

水槽とパイプの接続面は上下方向に移動でき、これをスイッチの水モデルとする。

開閉は瞬時に行えるものとする。

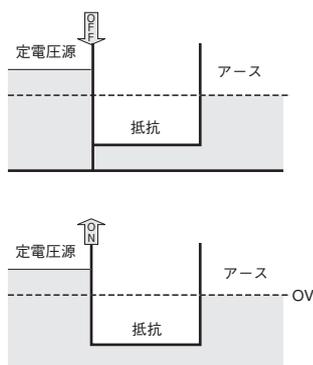


図17 スイッチの水モデル

3. 水モデル図表の概要

今回作成した水モデルを使って、RLC回路の1次遅れ（過渡現象）波形と交流波形の概略を定性的に理解できる図表（図表1, 2）を作ってみた。

作成した図表（以下、水モデル図表）は、ワープロの罫線を使った表に表計算ソフトの図形描画機能を使用した水モデルのイメージ図等を複数枚貼りつけたものである。

水モデル図表は、回路図、水モデル図、波形図の3種類の図で構成される。水モデル図表の使い方は次のようである。

1. 回路図を眺め、水モデル図が正しいことを確認する。

2. 代表的な時間における複数の水モデルを眺め、電圧・電流の時間変化を矢印やブロックなどでイメージし、波形を想像する。
3. 波形図を眺め、水モデル図で想像した波形が正しいことを確認する。

4. おわりに

従来からある水を使ったモデルを、各電気回路素子についてさらに詳細に定義することで、電気回路理論の定性的理解を助ける水モデルを検討した。

今回、水モデルを作成して、過渡現象や交流回路現象を図表で表現してみたが、学生側の理解しやすさの評価については行っておらず、各波形が実際の波形（指数関数や三角関数）と異なっていたり、著者の知識不足から流体力学における間違った表現もあるのではないかと思います。ご容赦いただき、ご意見いただければ幸いです。

今回作った水モデルは、力学との類似性を図表で表そうとしたものである。次回は力学の数式との類似性を考慮に入れた水モデルを検討していきたいと思う。

<参考文献>

図解でわかるはじめての電気回路 大熊康弘著
技術評論社

図表 1 過渡現象の水モデル図表

	C R直列回路	R C直列回路	R L直列回路
回路図			
OFF時	<p>コンデンサ電圧=抵抗電圧=0</p>	<p>抵抗電圧=コンデンサ電圧=0</p>	<p>抵抗電圧=コイル電圧=0</p>
ON時 (変化開始)	<p>印加電圧=抵抗電圧</p>	<p>印加電圧=抵抗電圧</p>	<p>印加電圧=コイル電圧</p>
変化途中	<p>印加電圧=抵抗電圧+コンデンサ電圧</p>	<p>印加電圧=抵抗電圧+コンデンサ電圧</p>	<p>印加電圧=抵抗電圧+コイル電圧</p>
変化終了	<p>印加電圧=コンデンサ電圧</p>	<p>印加電圧=コンデンサ電圧</p>	<p>印加電圧=抵抗電圧</p>
波形			

図表2 抵抗、コンデンサ、コイルの交流回路水モデル図表

	R回路	C回路	L回路
回路図			
位相 $\pi/2$			
位相 π			
位相 $3\pi/2$			
位相 2π (0)			
電圧、電流波形 (周期 $\parallel 1$)			
電圧、電流波形 (周期 $\parallel 0.5$)			