

サージタンクの安定性に対する既往の研究成果について (1)

九州電力土木部 正会員 村瀬 次 男

1. ま え が き

サージタンクの安定問題については、D. Thoma の研究以来数多くの理論的および実験的研究がある。これは、本問題が発電水工学の中で理論的に最も興味ある問題の一つとして如何に多くの水力学者、水力技術者の関心を集めてきたかの証左である。

本論は、サージタンクの安定問題は自動制御系の安定問題の範疇であるという著者の立場から、上述の研究の諸成果を総括し、これらに批評を加えたものである。

2. D. Thoma の研究 (1910 年)

Thoma の研究成果はトーマの条件として著名である。トーマの条件は

$$n \equiv A / A_{Th} > 1$$
$$A_{Th} \equiv al / (2\alpha g H_0) \quad (1)$$

ここで、 A : サージタンクの断面積

A_{Th} : トーマの条件を満足する限界の A

a , l および α : 導水路の断面積、長さおよび損失水頭係数

H : サージタンク水位 (放水池水位から測る), 添字 0 : 定常値 (以下同様)

で¹⁾、現在でもなお、サージタンクの必要最小断面を知る目安の役割を失っていない。

Thoma は、1908 年 Heimbach 発電所サージタンク ($n=0.92$) に発生した不安定サージの現象を理論的に裏付けるものとして、式(1)の条件を導いたのである。

さて、Thoma の考察した自動制御系をブロック線図で表わすと図-1 の通りである²⁾ (このような場合、一般に、ブロック線図は当該研究のすべてを表現し、その研究成果の評価をも決めるものである)。

図-1 から、Thoma の研究成果を簡単に批評すると次の通りである。

① 単独運転時の安定判別公式である。

(しかし、無負荷運転時にも適用できる)

② 理論出力一定の仮定である。

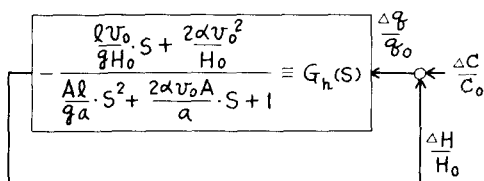
($q \cdot H = C$ (const.))

③ 電気機械系を全く考えていない。

④ 単働型サージタンクの公式である。

⑤ 水圧管を無視している。

⑥ 水車の効率変化を無視している。



q : 水車流量, c : 理論出力

図-1

3. J. Calame-D. Gaden の研究 (1927 年)

Calame-Gaden はトーマの条件では無視された要素をいくつか取り上げ、その影響を理論的に考察した。

Calame-Gaden の研究成果は次の 4 つに分けられる³⁾

(1) 速度水頭の影響

サージタンク直下の流速水頭が安定に貢献する度合として、

$$\left. \begin{aligned} n &> 1/(1+3\varepsilon) \\ \varepsilon &\equiv h_{r0}/H_0, \quad h_{r0} \equiv v_{r0}^2/(2g) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 v_{r0} および h_{r0} : サージタンク直下の流速および流速水頭

(2) 水車（水圧管を含む）の効率曲線の影響

水車効率曲線の傾斜が安定に影響する度合として、

$$\left. \begin{aligned} n &> 1 - (3/2) \cdot \lambda \\ \lambda &\equiv \{ (\partial \eta / \eta) / (\partial P / P) \} P = P_0, H = H_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 P および η : 水車の出力および効率

(3) 调速機の復原の影響（この研究は今まで紹介されていない）

调速機の剛性復原および負荷の周波数特性が安定に貢献する度合として、

$$\left. \begin{aligned} n &> 1 - (3/2) \cdot \delta / (1 + \delta) \\ \delta &\equiv R \cdot D, \quad R \equiv (df/f_0) / (dp/p_0), \quad D \equiv (dL/L_0) / (df/f_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 f および R : 调速機の検出周波数および瞬間速度調定率

L および D : 負荷およびその周波数特性定数（ $D=1$ or 2 と仮定）

(4) 並列運転の影響

電力系統の発電特性が安定に貢献する度合として、

$$\left. \begin{aligned} n &> 1 - (3/2) \cdot (1 - \beta) \\ \beta &\equiv dP/d(P+P') \text{ or } \beta = P_0 / (P_0 + P'_0) \quad (R' = R \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 P' および R' : 電力系統（当該発電所を除く）の調整全出力および平均 R

以上の研究成果のうち、特に、(2) および (4) は著名である。

さて、Calame-Gaden の考察した自動制御系をブロック線図で表わすと、それぞれ図-2~5の通りである。^{2),4)}

図-2~5 から、Calame-Gaden の研究成果を簡単に批評すると次の通りである。

① Thoma の公式の修正公式である。

（単独運転時、あるいは、並列運転時の公式である）

② 水車出力一定、あるいは、電力系統の全調整出力一定の仮定である。

（ $9.8 g H \cdot \eta = P (\text{const.})$ or $P + P' = \text{const.}$ ）

③ 電気機械系のゲインを考えている。

（しかし、電気機械系の遅れは全く考えていない）

④ 単働型サージタンクの公式である。

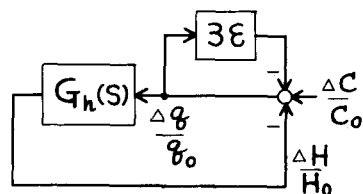


図-2

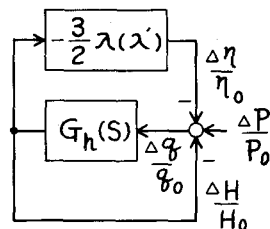


図-3

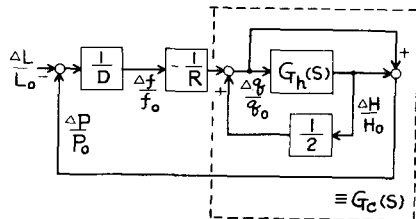


図-4

⑤ 水圧管の水の損失を考えている。

(しかし、水の慣性は考えていない)

⑥ サージタンク直下の流速水頭を考えている。

⑦ 水車の効率変化を考えている。

($\eta = \eta(P, H)$, $PaH^{\frac{3}{2}}$)

(しかし、どうも(2)の公式は間違っているらしい

$n > 1 + \lambda'$, $\lambda' \equiv \{(\partial \eta / \eta) / (\partial H / H)\}_0$ のままだよい)

図 - 5

⑧ (3)および(4)の公式も誘導過程に理論的な難

点が見られる。

(しかし、結論は両方とも正しい)

4. E.Scimemiの研究(1947年)

Scimemiはトーマの条件の存在を確認するため、実際の発電所について現地試験を行なった(表-1)。

表 - 1⁵⁾

Name of power station	Date of test	A. square metres	A _{Th} square metres	$n \equiv \frac{A}{A_{Th}}$	Other data
Pelos: (Damped oscillations lasting about $\frac{1}{2}$ to 1 hour)	8th March 1947	11.4	16	0.71	H=130 metres Tunnel length $\ell \approx 5,151$ metres Tunnel diameter $d = 2.9$ to 3.6 metres Losses $= 1.3v^2$ Unloading from 10,600 to 6,600 kW.
Fadalto: (Oscillations at the limit of stability)	15th March 1947 25th May 1947	31.7	65	0.49	H=110 to 90 metres $\ell = 2,515$ metres $d = 5.8$ metres Cross-sectional area of tunnel $a = 28$ square metres Losses $= 0.66v^2$ Unloading from 28,000 to 18,000 kW.
Partidoro: (First series of tests—damped oscillations lasting 2+ hours) (Second series of tests—stable and unstable oscillations were produced)	14th April 1947 27th to 30th April 1950	39.6	60	0.66	H=28.64 to 18.94 metres $\ell = 914$ metres $d = 3.05$ metres Unloading from 500 to 350 kW.
Caerano: (Oscillations dangerously unstable) (Damped oscillations)	3rd June 1947	12.56	85	0.15	H=17.0 to 16 metres $\ell = 1,784$ metres $d = 2.80$ metres $a = 6.16$ square metres Losses $= 0.38v^2$ Constant load of 690 kW. Constant load of 720 kW. (720–764 kW) Load variations between 690 and 1,090 kW
Heimbach: (Unsteady oscillations)	1908	4.9	5.35	0.92	H=70 to 110 metres $Q_0 = 20$ cu. metres per sec. $\ell = 2,700$ metres $a = 6.5$ square metres

表-1に示す発電所のサージタンク断面はすべてトーマの条件を満足しないから、Thomaの研究によるといづれも拡張的な振動を生ずる可能性があった。

Scimemiは試験の結論として、次のように述べている⁶⁾

- A_{Th} より可なり小さい断面積をもつサージタンクにおいても、Thomaのいう不安定サージの現象はなかなか実現しないこと
- その理由としては、Thomaの仮定した $q \cdot H = \text{const.}$ ($R=0$)の条件を自動的、かつ、安定に作り出すことが困難であること
- よって、トーマの条件の存在は確認できないが、実際のサージタンクの断面積は $A < A_{Th}$ としても差し支えなさそうであること

さて、Scimemi の試験した自動制御系をブロック線図で表わすと図-6 の通りである。²⁾

図-6 から、Scimemi の研究成果を簡単に批評すると次の通りである。

- ① 単独運転時の安定判別試験である。
- ② 実際の水路系および電力系統を使用している。
- ③ 外乱入力として負荷を考えている。
($\tilde{L} = \text{const.}$ or $\tilde{L} = \tilde{L}_0 \pm \Delta \tilde{L}$)
- ④ 単働型サージタンクの試験である。
- ⑤ $R=0$ という不可能なこと、あるいは、し
てはならないことの実現に努力している。

(この意味で、トーマの条件の存在を
否定する試験ではない)

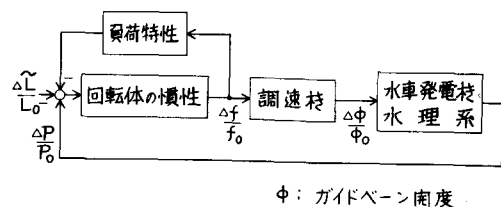


図-6

5. A. Ghetti の研究 (1947年)

Ghetti は、Scimemi の現地試験に対して、模型実験を行なった。実験は、Padova 大学の水力学研究所において、水路模型に小型の水車 (5.7 kW, 低速フランシス形) および発電機 (7.5 kVA, 交流) を接続し、モデル発電所を構成して行なわれた。

図-7 は Padova 大学の実験設備である。

Ghetti は実験の結論として、次のように述べている。⁷⁾

- a) サージタンクの断面積が A_{Th} の $1/2 \sim 1/3$
また、 $A_{Th\delta}$ の $1/2$ の場合でも十分安定で
あること (図-8)。
- b) その理由としては、実験設備の調速作用
に機械的な遅れがあること。
- c) サージタンクの断面積が大きいほど、ま
た、ガイドベーン開度 Φ が大きいほど、
安定度は高いこと (図-8)。
- d) 導水路の損失水頭 h_0 が大きいほど安定度
は高いこと - この場合は、実験による。
安定限界断面は理論計算の結果ともよく
合っている。
- e) サージングの周期および減衰比 (隣接の
振幅の比) を求める Vogt の式は、 $A >$
 A_{Th} の場合は実験結果とよく一致するが
 $A < A_{Th}$ の場合は相当の違いを生ずるこ
と (表-2)。

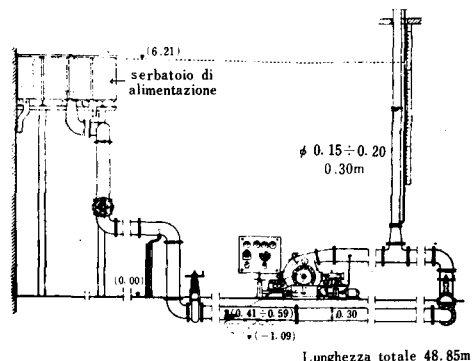


図-7

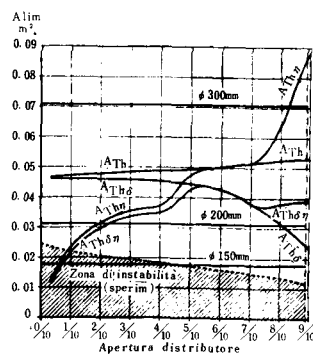


図-8 $A_{Thx} : A_{Th}$ に Calame-Gaden
の x の影響を加味したもの

表 - 2

Prova	Apertura distributore	Sezione pozzo	Sezione Thoma	Periodo delle oscillazioni t_o			Rapporto ampiezze oscillaz. q		
				calcolato	misurato	rapporto	calcolato	misurato	rapporto
5 A	2.8/10	0.0707	0.0482	14.50	15.10	0.96	0.75	0.74	1.01
4 A	3.4/10	0.0707	0.0487	14.60	15.40	0.95	0.67	0.65	1.03
9 A	3.8/10	0.0707	0.0490	14.71	15.50	0.95	0.64	0.61	1.05
1 B	2.2/10	0.0314	0.0477	9.64	10.50	0.91	1.31	0.94	1.39
2 B	3.2/10	0.0314	0.0484	9.73	10.60	0.92	1.35	0.88	1.53
4 B	3.8/10	0.0314	0.0488	9.78	11.00	0.89	1.37	0.87	1.57
1 C	2.2/10	0.0177	0.0477	7.24	8.80	0.82	2.01	1.20	1.67
6 C	4.7/10	0.0177	0.0495	7.47	9.00	0.83	2.40	1.00	2.40
7 C	5.7/10	0.0177	0.0503	7.62	9.70	0.79	2.69	0.80	3.36

$$t_o = \frac{lv_0}{g h_0} T_0, \quad q = e^{-\frac{2(1-\beta)-\beta\epsilon}{2(1-\beta)} \cdot T_0}, \quad T_0 \equiv 2\pi \sqrt{\frac{1-3\beta}{1-\beta} \cdot \epsilon \left\{ \frac{2(1-\beta)-\beta\epsilon}{2(1-\beta)} \right\}^2}, \quad \epsilon \equiv \frac{lav_0^2}{gAh_0^2}, \quad \beta \equiv \frac{h_0}{H_0}$$

さて、Ghetti の考察した自動制御系をブロック線図で表わすと図-9 の通りである。

図-6*¹ および9 から、Ghetti の研究成果を簡単に批評すると次の通りである。

- ① 単独運転時の安定判別実験である。
- ② 模型水路系およびモデル電力系統を使用している。
- ③ 外乱入力として、ガイドベーン・サーボ

および負荷を考えている。

$$(\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}_0 \pm \Delta \tilde{\Phi} \text{ or } \tilde{L} = \tilde{L}_0 \pm \Delta \tilde{L})$$

- ④ 単働型サージタンクの実験である。
- ⑤ 負荷として抵抗負荷を考えている。
- ⑥ 実験設備ではともかく、実際の発電所においては $R \div 0$ が成立していると考えている。

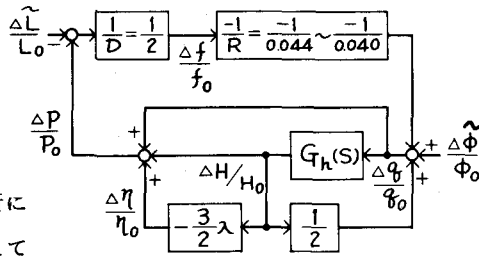


図 - 9

(この意味で、トーマの条件およびカラム・ガダンの条件の存在を否定する実験ではない。)

特に、実験後の理論的な考察について

- ⑦ 電気機械系のゲインを考えているが、その遅れは考えていない。
- ⑧ 負荷特性の内容を検討していない。
- ⑨ 実験結果を、間違っている $A_{Th\eta}$ と比較している*²
- ⑩ 表-2 の計算では、電気機械系のフィードバック要素を考えていない。

6. あとがき

本論は、自動制御系の安定問題という一つの大きな筋を通して纏めてあるので、著者としては、Jaeger 博士の評論⁸⁾とは別の意味で、水力関係者の参考になるかと思う。

終りに、貴重な外国諸文献を貸与され、種々御教示を賜った中央大学理工学部林泰造教授に感謝申し上げます。

*1 Ghetti の実験した自動制御系のブロック線図は図-6 と同じである。

*2 3. を参照のこと。