純流体素子を用いたコントローラと その船用プラントへの応用*

星野 敏**・伊藤雅則**

Fluidic Process Controller and Application for Ship Machinery Plant

By Satoshi Hoshino, Masanori Ito

Recently, the problem of less-maintenansability of ship machinery plants is attracting attention in the ship building industry.

This problem is closely concerned with reliability, so the authors studied the application of the fluidics which is very reliable since there are no mechanical moving elements.

As the object of application, the authors selected the controller which was causing troubles such as the sticking of the nozzle flapper or the abnormality of mechanics due to vibration, and made a comparative study of the fluidic controller and usual type controller in regards to less-maintenansability and controllability.

The process of study follows.

- (1) Analysis of controllability of the fluidic controller.
- (2) Analysis of controllability of the usual type controller.
- (3) Experiments with both types of controller concerning less-maintenansability on board.

The results of this study show that the fluidic controller presents no problems under an unfavorable condition such as a board ship, and has superior controllability in comparison with usual ones.

1. 緒 言

最近、業界ではプラントのレス・メインテナンス化の問題がその大きな動向の一つとなっている。この問題はプラントの信頼性と密接な関係を有しており、アプローチの方法はいろいろ考えられるが、今回はその一つとして、プラントの構成機器自体の信頼性の向上を機械的な可動部を少なくすることによって図ることを考え、可動部を持たない機器の一つの典型とされているフルイディックスの応用を試みた。適用の対象として従来その複雑なメカニズムのゆえにトラブルを起こしていたコントローラを選び、フルイディックスを用いたコントローラと従来のコントローラを実船において並列に装備し、1年半にわたって比較試験を行なって来た。この結果、フルイディックスを用いたコントローラはレン・メインテナンス性において、船舶のような悪い条件のもとでも全く問題なく使用出来ることが確認され、さらに、制御性の点でも従来のものよりすぐれた特性を有することが明らかになったのでここに報告する。

2. フルイディックコントローラの概要

フルイディックスは周知のようにノズルより拡大流路に噴出されたジェットが必ずいずれかの側壁に付着するという Coanda 効果を基本原理とするもので、内部に可動部を有する可動形の素子と可動部を有しない無可動形のものに大きく分けることができる。両者は共に単独素子として AND, OR, NAND, NOR 等の論理判断機能を持たせることができるが、複数個組み合わせることによりさらに増幅、演算の機能等も付与することができる。

一般に可動形の素子は流れの変化を可動部が補助する形になるため、空気の消費量は無可動形に対し比較的少ないが可動部分がトラブルの原因になることがあり、無可動形のもはこの逆の傾向をもつ。

今回コントローラとして実験に使用したものは、このフルイディックスのうち信頼性の点ですぐれている無可動形で、純流体素子といわれるものである。

Fig. 1 にその外形写真、Fig. 2 に機能のフローダイアグラムを示す。

Fig. 1 中の番号はそれぞれ次のものを示している。

- ①：比較回路 (Comparator) 集積素子
- ②：増幅・演算回路 (Amplifier & Integrator) 集

* 原稿受付 昭和50年11月28日

** 正会員 日本鋼管(株)(東京都千代田区丸の内1-1-2)

Fig. 1 外形写真

Fig. 2 フローダイアグラム

積素子

- ③：プロセス信号への正フィードバックゲイン調節ツマミ (Damping Control)
- ④：出力ゲイン調節ツマミ (Positive output rate)
- ⑤：出力ゲイン調節ツマミ (Negative output rate)

このコントローラの作動原理は、Fig. 2によれば、プロセス変数 P_V と設定値 S_P が差を生じると Comparator よりこの偏差を打ち消すようなデジタル出力を出し、さらに、この信号を Amplifier & Comparator により D/A 変換して出力するものである。

Fig. 1 および作動原理よりフルイディックコントローラが従来の P, PI, PID コントローラと比して構造上非常に簡単であり、したがって、機構上のトラブルに対する信頼性の点ですぐれていることが容易に類推できる。

Fig. 3 にフルイディックコントローラの入出力特性を示す。従来のコントローラのうち P 制御のものを例として考えると、その入出力特性は原点を通る直線となる。

したがって、フルイディックコントローラの場合、同じ偏差に対して P 制御の場合よりも大きなゲインを得ることができる。換言すれば、応答性の上でフルイディックコントローラがよりすぐれたものとなっているといえ

Fig. 3 入出力特性

る。

前述の三つのツマミは Fig. 3 によればそれぞれ、

- ③：全体のゲイン調整
- ④：第1象限内でのゲイン調整 (応答特性の調整)
- ⑤：第3象限内でのゲイン調整 (" ")

の役割を果たす。したがって、制御対象とのマッチングは従来のコントローラとは異なりより直接的に行なう必要がある。なお Fig. 3 中に示された3本の曲線はツマミ③による特性の変化を示したものである。

3. タービン船のボイラ燃料油温度制御システムへの応用

3.1 制御対象概要 実験を行なったボイラ燃料油温度制御システムの主要目を Table. 1 に、概略の機器構成を Fig. 4 に示す。

Table. 1 要 目

Ship Name	SHIMAMARU (SKK)
Builder	NKK TSU
Ship Type	Oil Tanker
DWT	252,000
SHP	36,000
Max FO Flow	about 10 T/H
Heater	SUNROD MV7-40-300
	35°C → 120°C at 6 M ³ /H
Cont. Valve	DC-1210D JIS 10K 50
C.V.	22.5 (19.8)
HTR. out-senser Distance	about 5 M

この系の特徴は、Heater 自体のむだ時間が大きい上、検出端、制御弁、管路とむだ時間および一次遅れのような遅れ要素が重なり全体として非常に大きなむだ時間および遅れを有する系となっていること。またこれらの値は特に燃料流量の変化による影響をよく受けるものであるが、その燃料流量が常用範囲内として 20% (停泊時) より 100% (荷油積降し時) まで変化すること。さらに、

Fig. 4 システム概要

Heater および制御弁の容量が最大負荷条件および低質燃料油の使用を満足するように設計され、低負荷および高質油の時には特に制御弁について可制御範囲以下の条件で使用せざるを得ないこと等があげられる。

この結果、従来よりこの系では低負荷時に燃料油ボイラ入口温度がハンティングし、高温もしくは低温警報が発せられることは避け得ないものとされていた。

3.2 適用・比較試験 ボイラ燃料油温度制御系は前述のような問題点を有しており、従来のP,PI,PIDのようなコントローラでは十分に制御することが出来なかった。

今回フルイディックコントローラをこの系に適用した目的はその予想される高い信頼性を確認することであるが、ほかにその制御性能を従来のコントローラと比較することでもあった。

3.2.1 実験装置 Fig.5およびFig.6 に実験装置の写真を示す。Fig.5はフルイディックコントローラパネルで、フルイディックコントローラのほか、温度変換器、圧力計、エアフィルタ等をまとめたものである。

Fig.5 フルイディックコントローラパネル

Fig.6 燃料油加熱器

また、Fig.6は燃料油加熱器の部分を示している。系にはこれとは独立に検出位置を同じくする従来のPIコントローラが設けられ、さらに制御弁入口に設けられた切替弁によりフルイディックコントローラ、PIコントローラのいずれかを選んで使用出来るようになっている。

3.2.2 実験方法 実験は本船の試運転時および就航後保証入きょ迄の約1年半にわたって行なったものである。

以下にその実験内容を示す。

① 制御性能比較試験	① 安定性試験	低負荷静定状態
		中負荷静定状態
		高負荷静定状態
② レス・メンテナンス性試験
長期無保守か動試験	② 過渡応答性試験	負荷急変時の追従性
(crash stop astern)
		温度設定値のStep変化への追従性

制御性能比較試験は主に本船の試運転時にフルイディックコントローラとPIコントローラを切替えて使用することにより、また、レス・メンテナンス性試験は主に就航後に、フルイディックコントローラを無保守で放置し、1回/日の計測により制御性能の変化を調べることで行なったものである。

なお、過渡応答性試験のために行った温度設定値に対するステップ応答試験は、実際の現象との関連からみれば燃料流量に対するステップ応答が好ましいものであるが、実船実験では特に意図しない限りこの同じパターンのステップ変化は得られるものではないこと、また、(温度一定の制御条件下での燃料流量のステップ変化)→(加熱蒸気流量の変化)、(燃料流量一定の条件下での温度設定値のステップ変化)→(加熱蒸気流量の変化という燃料流量変化)と温度設定値変化の間に加熱蒸気量を媒介とする対応関係が成立することから今回便宜的に採用したものである。

3.2.3 実験結果 負荷変動に対する過渡応答性

の比較として crash Stop Astern時の変動を Fig. 7 (a), (b), (c) に示す。ここで (c) の結果については本船と類形の PID コントローラを装備した船における計測

結果である。

(a), (b), (c) を比較する場合、それぞれ Crash Stop Astern の状態を調べたものであるが、回転数の

Fig. 7 負荷変動に対する応答

Fig. 8 ステップ応答

Fig. 9 (a) 就航後 6～9 か月間の運航実績

Fig. 9 (b) 就航後 15～17 か月間の運航実績

変化より明かなように、そのモードにかなり差があり、厳密な意味での相互の特性比較は出来ない。しかし、定性的には主機負荷すなわち燃料油流量変化に対する追従性はフルイディックおよびPIDコントローラの方がPIコントローラよりすぐれているということは出来よう。

次に温度設定値に対するステップ応答の比較をFig.8(a), (b), (c)に示す。(c)のPIDコントローラについては後述のシミュレーションによる結果を示した。

実験条件は燃料油流量 6 T/H (75% NSR) で温度設定値を 100℃より 110℃に上げた場合のものである。静定までに要する時間はフルイディックコントローラが約 24 分, PI コントローラが約 32 分, PID コントローラが約 26 分であり, 最大オーバーシュート量はフルイディックコントローラが約 4℃, PI コントローラが約 6℃, PID コントローラが約 5℃であった。このことより燃料油流量変動に対する追従性はフルイディックコントローラの方がPIDコントローラよりすぐれているということが出来よう。

次にレス・メンテナンス性に対する試験の結果として、就航後 6~9 か月および 15~17 か月の 2 期間の計測データをそれぞれ Fig.9(a), (b) に、また、計測終了後 (18 か経過) のフルイディックコントローラの汚れの状況および特性変化をそれぞれ Fig.10, Fig.11(a), (b) に示す。

1974 年 5 月本船が就航して以来フルイディックコントローラのか動状況は次の通りであった。

1974. 5~10	か動時間 4hr/day hunting
10	コントローラ特性 adjnst
10~	連続使用, No maintainance
1975. 6	コントローラチェック
6~	連続使用, No maintainance
11	試験終了

就航直後~6 か月間についてか動率が低かったのは、取扱いに不慣れであったこととコントローラの機構上の問題からゲイン調整が系に最適な状態で行なわれず、約 90% 負荷の状態でもハンティングを生じたため制御不

Fig.10 フルイディックコントローラの汚れ

COMPARATOR素子 入力特性

Fig.11(a) COMPARATOR の特性の変化

Amplifier & Integrator
入力特性

Fig.11(b) AMPLIFIER & INTEGRATOR
の特性の変化

能とみなされたことによる。しかし、その後 10 月に問題の箇所を改善し、ツマミを再調整し、ロックを施して位置を固定したところ Fig.9(a) に示すように安定した作動状態となった。図中計測が中断されている部分は一時的に PI コントローラが使用されたものである。また、温度設定値が高くなるとフルイディックコントローラではオフセットを生じることも明らかになった。

その後、No maintenance の状態で 100% のか動率で使用され、1975 年 6 月のチェックの際にもメンテナンスの必要性は皆無であった。Fig.9(b) はその後の 2 か月間のデータを示したものであるが、当時本船は減速運転を行っており主機負荷が低いために 2~3℃の範囲でハンティングを起している。また、温度設定値が低くなるとハンティングの幅が大きくなる。これ等について詳細は後述するが、フルイディックコントローラの特性上止むを得ないものである。

フルイディックコントローラの汚れについては、Fig.10 に示すように空気の出吐部がかなり黒く変化していること、また、エアフィルタ部に多少ではあるが油分が分離されて残留していたことは制御空気中への油分の混入が避け得ぬものであったことを示すものであることから、素子内部についても吐出部と同程度の汚れが壁面に固着していると考えてよい。ただ、素子表面の白い斑点

は装備当初、周囲に浮遊していた塗料の微粒子が素子より噴出する空気の流れによって吸引され近辺に付着したものである。

このような内部の汚れにもかかわらず、Fig.11 に示すようにコントローラの特長についてはほとんど変化を生じていない。このことは、試験期間が 18 か月と信頼性の調査の上では短いものであるが、可動部を持たないことのレス・メンテナンス性に対する利点を示すものであるということができよう。

4. フルイディックコントローラの特長のシミュレーションによる解析

コントローラの特長、特に安定性の問題は広範な条件の下で調べる必要があり、実船実験で実現出来る程度の条件では結果の信ぴょう性に関し疑問が残る。また、コントローラの調整についても、従来と全く異なった方式のものであるため、システムとのマッチングが最適となる状態を予知しておく必要があるという二つの要因により、システムおよび各コントローラのシミュレーションモデルを作成し、計測結果との対照によりその精度を確認した上で安定性について解析を行った。

4.1 シミュレーションモデル Fig.12 にシミュレーションモデルのブロックダイアグラムを示す。

これは以下のような考えに基づいて導かれたものである。

- ① 加熱蒸気および燃料油の加熱器入口温度は一定。

- ② 加熱器の熱交換特性は一次遅れで、しかも加熱時と冷却時とで非対称な特性となっている（加熱時の時定数： T_{H1} 、冷却時の時定数： T_{H2} ）。
- ③ 加熱器におけるむだ時間および燃料油管路でのむだ時間はそれぞれ燃料流量の関数である（両むだ時間と温度検出器のむだ時間の総和： τ_T ）。
- ④ 温度検出器特性は一次遅れであり、一定のむだ時間を有する（時定数： T_T ）。
- ⑤ フルイディックコントローラは設定値と入力との偏差に対し Fig.3 の関数で与えられる出力を出し、さらに、一次遅れのゲートを経て制御弁に信号を伝える（Dumping 時定数： T_D 、Positive output rate 時定数： T_P 、Negative output rate 時定数： T_N ）。
- ⑥ PI, PID コントローラは設定値と入力との偏差に対し、それぞれ比例+積分、比例+積分+微分の演算を行なう。

4.2 シミュレーションの結果 シミュレーションモデルの精度については Fig.8(b) に示した PI コントローラのステップ応答における実験との比較より、完全ではないが解析を行なうことについては十分信頼出来るものといえる。

コントローラの安定性の問題は、フルイディック, PI, PID についてコントローラの条件を最適にした上で設定温度および燃料油流量をパラメータとしてシミュレーションを行ない、安定限界、ハンティングの大きさ等を求め

相互の検討比較を行なった。

Fig.13 に 3 種類の安定性の比較およびフルイディックコントローラについてのパラメータによる安定状態の変化を示す。フルイディックコントローラについての実験点も同図上に記した（○印）。

この図において 100℃ の温度設定値に対するフルイディックコントローラの場合を例にとれば、点 P が安定限界であり、点 P より大きな流量に対して制御は安定となる。また、点 P より小さな流量範囲ではハンティングを生じ、その最高温度および最低温度は P から分かれる互に対称な 2 本の曲線によって示される。

PI, PID コントローラについても同様である。また、

Fig.12 シミュレーションモデル ブロックダイアグラム

Fig. 13 コントローラの安定性比較

フルイディックコントローラの安定領域に引かれている斜線群はコントローラの出力圧力を示している。

この図によれば、安定性についてはPIDコントローラが最もすぐれており、フルイディックコントローラは安定限界ではPIDとあまり差がないが、ハンティングの大きさの点で劣っているといえる。また、PIコントローラについては、常用範囲の約50%が不安定領域にはいり最小流量状態に近い2 T/Hの時ハンティングの幅が、 $\pm 16^\circ\text{C}$ と異常に大きく、負荷条件にもよるが一般的にはこの系への適用は好ましくないであろう。

フルイディックコントローラのみについていえば、安定領域は設定温度によって変化し、温度が低くなると不安定領域が広がる。このことは他のコントローラについてもいえるが図に記載することは省略した。

5. 考 察

以上の結果をまとめると、安定性についてはフルイディックコントローラはPIDコントローラよりわずかに劣るがPIコントローラと比較するとはるかにすぐれており、また、追従性の点ではフルイディックコントローラは最もすぐれたものであった。一般に安定性は精度と、追従性は感度と関係があることを考えるとフルイディックコントローラの感度をいさ少し犠牲にすれば精度を向上させることができるといえる。したがって、この精度と感度を包含した“制御性”という観点に立てば、フルイディックコントローラはPIDコントローラと比してそん色ないものとなる。このことは、コントローラの特性と制御対象の特性ととのマッチングの問題として説明出来るよう。

すなわち、実験の系では最大負荷状態における制御を可能にするために大きなサイズの制御弁が用いられており、この制御範囲の制限から加熱器の特性が、特に低負荷状態では温度上昇に対するゲインは高く低下に対するゲインは低いという非対称なものとなっている。したがって、コントローラにはこれと逆の出力特性が要求され

ることになるが、従来のPI, PIDコントローラでは構造上温度上昇、低下に対して対称な出力しか与えることが出来ない。PIDコントローラではその制御範囲の広さによりこの問題を補っているが、PIコントローラではこれが狭く、少しでも安定性を増すために追従性を犠牲にする結果、温度の上がりすぎ、下がりすぎというハンティングを生じやすくなる。これに対しフルイディックコントローラは温度上昇、低下に対するゲインを独立に変更することができるので制御対象の特性とのマッチングが可能となる。すなわち、温度上昇に対しては制御弁を徐々に開けるような信号を出し、低下に対しては急速に閉じる信号を出す結果として良好な制御性を得たものと考えられる。

レス・メンテナンス性についてはフルイディックコントローラの場合、可動部がなく構造が簡単なことから従来の機械的な構造を有するコントローラに比して高い信頼性を有することは十分に予想されていた。しかし、ただ一つ、フルイディックスの流路が制御空气中に混入した油、ごみ等により閉塞され制御不能に陥ること、特に集積化された回路は流路断面積が 1 mm^2 以下と小さいために船内のような低質な空気条件の下ではこの種のトラブルの発生する可能性が十分にあるという問題が実験当初考えられたわけであるが、1年半にわたる試験の結果、最初6か月は調整不備により使用と休止を繰り返したものの、その後コントローラ特性の調整のみでフルイディックスについては、交換・掃除等のメンテナンスを施すことなく正常な状態に復帰させることが出来たこと、また、それ以降は実験終了まで完全なレス・メンテナンスの状態で正常な動作を続けたこと、さらに、実験終了後のフルイディックスの汚れの調査の結果も良好なものであったことは実験当初の危が全く問題にならなかったということで、船用プラントに対してフルイディックコントローラは十分信頼性を持って使用できることを示したものである。

ただ、フルイディックコントローラは構造上空気の共振現象を伴うものであるため多少音を発する。これは船内という条件を考えればほとんど問題にならない程度のものであるが、従来のコントローラに比べるとやはり大きく、また、リーク音にも似ているため乗組員の注意を特に引いたようであった。

また、空気消費量についてもフルイディックコントローラ単体と従来の信号変換器付コントローラを比較すると、フルイディックの場合、従来のものの約2倍を必要とする。ただ、従来のものがポジションナーを必要とする場合、フルイディックコントローラでは出力信号が微小振動を伴っているため、制御弁に常時微小変位を与えることになり、摩擦力に起因する応答の遅れを小さくすることが出来るので特に必要とはならない。したがって、このポジションナーを加えた場合には両者の間の差は小さくなる。

Fig. 14 コントローラの総合比較

そのほか、フルイディックコントローラでは、Pコントローラと同様にオフセットを生じること、価格に関して現時点ではまだ生産量が少ないこともあり、従来のものと比べて割高であることなどの問題もあり、今後の使用に際しては合せ考慮される必要があろう。

以上のまとめとしてFig.14にフルイディック、PI、PIDコントローラの各因子についての比較を示す。

6. 結 言

フルイディックスが産業界に導入されてよりいろいろの分野でその応用がなされ、今なお新しい適用分野を求めて研究が続けられている。今回この特徴の一つである“可動部を持たない”という点に注目して船舶のレス・メンテナンス化へのアプローチの一方策として取り上げてみた。この結果、適用場所がコントローラという限られたものではあったが、フルイディックスがこの目的に対して十分適応出来る可能性を有していることが確認でき、さらに、制御性の面でも従来のコントローラと比

してこれを上回るものをも持っていることが明らかになった。

これらの問題に対する十分な評価は今後の広範な利用を待たなければならないものであり、また、フルイディックコントローラ自体にもまだ解決しなければならない多くの問題を残しているので、フルイディックスの応用も含め研究を続けたいと考えている。

最後に、この研究の実施に際し貴重な実験の場を与えていただいた昭和海運(株)、特に長期にわたり運航データの採取に協力をいただいた志摩丸乗組員、さらに、フルイディックコントローラに関し協力をいただいたオーバル機器工業(株)の関係諸氏に厚く謝意を表してまとめとします。

文 献

Fluidic Process Controller Scores On-Line by C. W. Street Jr. & E. L. Calvin CONTROL ENGINEERING OCT. 1970

正 誤 表

日本舶用機関学会誌 第11巻第1号

訂 正 箇 所	誤	正
目次(随想) 著者名	井 丹 潔	伊 丹 潔