注目しています。その技術！

“心臓”を超えた!? タンパクや菌の濾過に最適な，優しく正確な送液方法

谷口　僚 , 小林政三郎 , 川上哲也

ジャパンマシナリー株式会社

1. はじめに

1日あたり10万回動き，約80万時間の連続運転に耐え，30億回以上も作動するポンプ．このポンプは，如何なる時も動き続け，こぶしほどの大きさで，重量はたった約300 g．そんなハイスペックなポンプが一体どこにあるのか？ 胸に手を当てて考えてみて欲しいー．

昨今の食品業界において，製造技術や製品の高度化に伴い，設備機器へのユーザーの要望は日々多様化している．移送用ポンプに対しても同様であり，例を挙げると，組成を崩したくない / 異物混入を最大限抑えたい / 空運転や液漏れのリスクを回避したい / 整備にかかる時間や費用を抑えたい，など様々である．送液ポンプはチューブポンプやロータリーポンプが広く普及しているが，これらの高度なニーズを満たす製品は選択肢が多いとはいえない現状である．そこで，本稿ではQuattroflow（クアトロフロー）4連ダイアフラムポンプを紹介する．医薬やバイオテクノロジー分野で多数の実績があり，食品業界でも注目が高まるポンプである（Fig. 1）．

2. 送液原理

人間にとって，最も身近なポンプは何だろうか．それはまぎれもなく“心臓”である．4つの部屋と弁から成り，収縮と拡張によって大切な血液を体の隅々まで送り届ける役目を担う．Quattroflowはそんな心臓の送液原理に着目し，模倣したポンプである．Fig. 2に分解図を示す．本ポンプはケーシング，ダイアフラム，逆止弁から成る4つの小さなチャンバーを主として構成される．モーターの先には偏心したシャフトが固定されており，回転運動に伴って偏心シャフトが4つのダイアフラムを順に押し回すことで送液が行われる．液体に与える剪断が少ないことがダイアフラムの特徴であり，この独自の構造により，柔らかな心拍のように物性を崩さない液体移送を実現した．



Fig. 1　Quattroflow.

3. 流量特性

Fig. 3にQuattroflow（QF150S）の水を用いた流量曲線

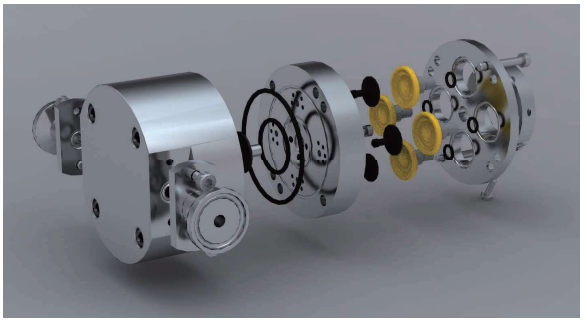


Fig. 2　Exploded view.

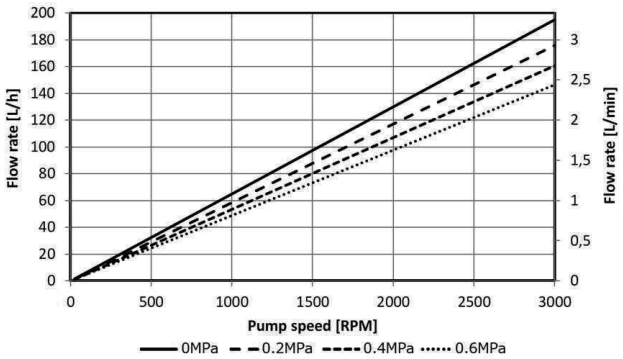


Fig. 3　Performance curve.

† Fax: 06-6342-1555, E-mail: osaka@jmc.asia

© 2020 Japan Society for Food Engineering

を示す．横軸はポンプの回転数 [rpm]，縦軸は流量 [L/h] であり，4 つの線は吐出圧の違いである．回転数に対して流量は線形に増加しており，吐出圧が異なる場合でも同様の傾向である．これらはブレンドや抽出操作において簡易に制御できることを示している．また，1 台で 1〜150 L/h の非常に幅広いレンジを有しているため，要求流量の大きな変化にも対応可能である．

さらに，小型の機種は 0.06〜30 L/h（QF30SU）から，大型の機種は 1,000〜16,000 L/h（QF20k）までと多様な流量レンジの製品が用意されている．開発スケールから量産スケールまで様々な流量域に対応可能であり，全て同一の送液原理であるため，スケールアップ検討も容易といえる．

4. 脈 動 特 性

ポンプ選定基準の 1 つである脈動の程度について，水を用いて流量変動および圧力変動の評価を行った．Fig. 4 に試験装置の構成を示す．使用した機種は QF150S，流量センサとして Endress & Hauser 社の Promag 10H04，圧力センサとして Labom 社の Pascal CS2110 を用いた．回転数は低回転（500 rpm）および高回転（3000 rpm）とし，吐出圧 0.0 MPa（大気開放）の場合，0.6 MPa の場合で計測を実施した．

Table 1 に流量変動の測定結果を示す．低回転時の最小流量と最大流量の差は 1 L/h であり，高回転時においても 4 L/h と低く抑えられている．平均流量に対しての比率は 3% 以下である．

また，Table 2 に圧力変動の測定結果を示す．最小圧力と最大圧力の差は最大 0.018 MPa であり，平均圧力に対しての比率は 3% である．これらの結果より，ダイアフラムを 4 連にすることで，順に吐出が繰り返され，脈動を抑えた安定した送液を達成していることが定量的に確認できた．

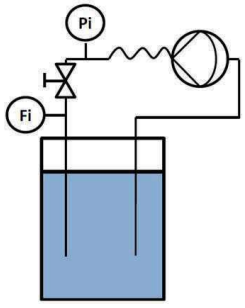


Fig. 4 Experimental setup (pulsation).

Table 1 Flow pulsation.

回転数 [rpm]	吐出圧 [MPa]	最低流量 [L/h]	最高流量 [L/h]	平均流量 [L/h]	変動 (脈動) [L/h]
500	0.0	36	37	36	1
	0.6	30	31	31	1
3000	0.0	215	216	216	1
	0.6	175	179	176	4

Table 2 Pressure pulsation.

回転数 [rpm]	吐出圧 [MPa]	最低圧力 [MPa]	最高圧力 [MPa]	平均圧力 [MPa]	変動 (脈動) [MPa]
500	0.0	0.031	0.033	0.032	0.002
	0.6	0.588	0.606	0.598	0.018
3000	0.0	0.039	0.041	0.040	0.002
	0.6	0.592	0.603	0.595	0.011

5. 発 熱 特 性

変質しやすい液体の輸送において，ポンプ通過の際の発熱は重要な検討項目となる．そこで，QF150S を用いて発熱量の検証を実施した．試験装置の構成は Fig. 5 に示す通りである．断熱容器に入れられた常温の水を最低 300 秒間循環運転し，温度の上昇値を測定した．温度センサには Dostmann electronic 社の P670，圧力センサには Labom 社の Pascal CS 2110 を用いた．試験条件は回転数 750 rpm, 3000 rpm, 吐出圧 0.0 MPa（大気開放），0.2 MPa, 0.6 MPa である．なお，測定された温度から参考として発熱量 P[W] を以下の式により算出した．水の比熱 c は 4.182 [J/g K] とする．

$$P[\mathrm{W}] = m[\mathrm{g}] \times c[\mathrm{J/g\ K}] \times dT/dt[\mathrm{K/s}] \qquad (1)$$

Table 3 に結果を示す．温度上昇値は 750 rpm の場合

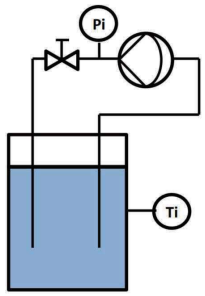


Fig. 5 Experimental setup (heat input).

Table 3 Heat input.

回転数 [rpm]	吐出圧 [MPa]	流量 [L/h]	質量 m[g]	温度上昇 dT[K]	時間 dt[s]	発熱量 P[W]
750	0.0	57	420	0.5	300	2.9
750	0.2	54	420	0.5	300	2.9
750	0.6	47	420	0.8	300	4.7
3000	0.0	209	547	1.9	300	14.5
3000	0.2	193	547	2.3	300	17.5
3000	0.6	164	679	4.0	330	34.4

© 2020 Japan Society for Food Engineering

で最大 0.8 K，3000 rpm の場合でも最大 4.0 K であり，低く抑えられていることがわかる．したがって，送液時の熱負荷が小さく，例えばタンパクなどの熱に弱い液体の搬送にも適しているといえる．

6. コンタミネーション（異物混入）評価

ポンプに起因するコンタミネーションリスクの検討のため，一般的なチューブポンプと Quattroflow，およびメンブレンフィルター（孔径 12 μm）を用いて 8 時間の水の循環試験を行った．流量は 100 L/h とする．医薬品向けのグレードのホースを使用した．

Fig. 6 はチューブポンプを用いた場合の循環試験後のメンブレンフィルター表面拡大画像である．6.1～12.7 μm 程度の微粒子が発生し，フィルターの空孔が一部閉塞している様子がわかる．これはチューブポンプが送液する際にチューブが強くしごかれるため，微細なチューブの欠けが発生し，破片が液に混入，フィルターが目詰まりしたと推測される．

一方，Fig. 7 は Quattroflow を用いた場合の循環試験後のメンブレンフィルター表面拡大画像である．フィルター表面にチューブの破片はなく清浄な状態が保たれおり，チューブポンプの場合と比較して顕著な差がみられた．これは，Quattroflow は接液部に摺動する部品がなく，コンタミネーションの発生リスクが低いためと考えられる．

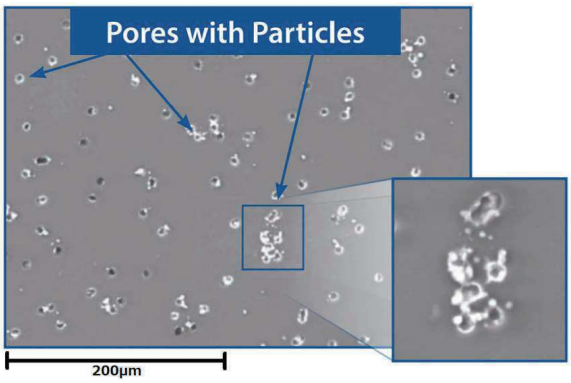


Fig. 6 In case of tubing pump.

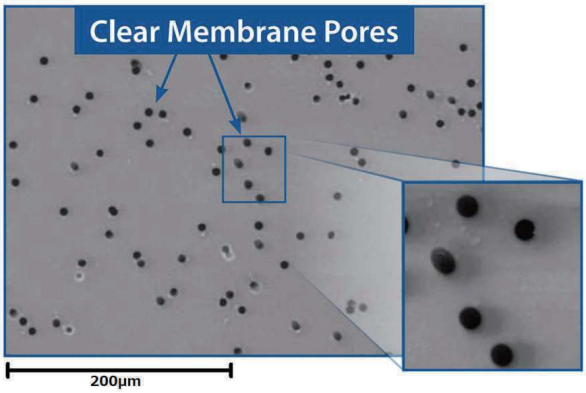


Fig. 7 In case of Quattroflow.

7. お わ り に

本稿では 4 連ダイアフラムポンプ Quattroflow の評価を行った．改めて本ポンプの特徴を下記に記す．

- 物性を崩さない
（低剪断，低脈動，低発熱）
- 圧力変化に対する高い流量安定性
- メカニカルシールなし
（液漏れなし，空運転可能，自吸可能）
- 0.06 L/h → 16,000 L/h までスケールアップ可能
- 部品点数が少なくメンテナンスが容易
- CIP，SIP，オートクレーブ，ガンマ滅菌対応
- シングルユースポンプヘッド選択可

大切なタンパクや菌などデリケートな液体をそのまま送液することができ，高い運転安全性と使いやすさを誇る．また，コンタミネーションのリスクが低いため，フィルターの目詰まりの解決や濾過効率の上昇にも貢献できるポンプである．これまで以上に食品業界でも活用されることが期待される．

© 2020 Japan Society for Food Engineering