

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)中性子源用高速リチウム液膜流の線形安定性解析
Title(English)	Linear stability analysis of high-speed lithium film flows for the neutron source in Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)
著者(和文)	中川順達, 高橋実, 古林徹, 有富正憲
Authors(English)	Masamichi NAKAGAWA, Minoru TAKAHASHI, Toru KOBAYASHI, Masanori ARITOMI
出典(和文)	日本機械学会2015年度年次大会DVD論文集, , No. 15-1,
Citation(English)	DVD proceedings of Mechanical Engineering Congress, 2015 Japan (MECJ-15), , No. 15-1,
発行日 / Pub. date	2015, 9

S0510404

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)中性子源用高速リチウム液膜流の線形安定性解析*

中川 順達^{*1}, 高橋 実^{*2}, 古林 徹^{*3}, 有富 正憲^{*4}

Linear stability analysis of high-speed lithium film flows for the neutron source in Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

Masamichi NAKAGAWA^{*1}, Minoru TAKAHASHI, Toru KOBAYASHI and Masanori ARITOMI

^{*1} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Mechanical Sciences and Engineering
Ohokayama 2-12-1-NE-6, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

The stability of high-speed liquid lithium film flows on the wall was analytically studied for the neutron source in Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), which makes cancers and tumors curable with cell-level selections and hence high QOL. The object of our research is to materialize the thin and high-speed wall film flows of liquid lithium in a high vacuum as an accelerator target. The linear analysis approach is made to the stability on high-speed thin film flows of liquid lithium in a high vacuum, contrasting with the analysis of high-speed lithium sheet jets in our previous paper. We proved analytically that the wave of surface tension on high-speed thin lithium film flows in a high-vacuum has the same dispersive relation as the wave of surface tension of the fast and non-dispersive asymmetric wave on high-speed lithium thin sheet jets in a high-vacuum in our above previous paper. We also proved analytically that the high-speed lithium thin film flows are neutral stable under a long-wave approximation, and that the high-speed lithium thin film flows in a high-vacuum are of supercritical flows as the same as the above lithium thin sheet jets in a high-vacuum.

Key Words : BNCT (Boron Neutron Capture Therapy), Accelerator target, Liquid lithium, Film flow, Surface tension, Flow stability, Linear analysis, Long-wave approximation, Neutral stable, Supercritical flow

1. 緒 言

我が国では、癌は 1981 年から日本人の死亡原因の第 1 位であり、2012 年には総死亡の約 3 割を占めており(財団研究振興財団, 2013)、癌対策は喫緊の課題となっている。近年、癌や腫瘍を細胞単位で選択して治療可能で、癌治療後の QOL (生活の質) が高く、夢の癌治療法と言われる BNCT (Boron Neutron Capture Therapy : ホウ素中性子捕捉療法) (Tanaka, et al., 2002), (Bengua et al., 2006), (Kobayashi, et al., 2007)が注目されており、我が国の成長戦略の重要な柱の一つとなっている。その中性子源用陽子線加速器ターゲットとして計画される、高速で薄い液体リチウムの液幕噴流ないし壁面液膜流(Takahashi, et al., 2012)を実現するため、前報(中川他, 2014)で液幕噴流の安定性を議論したのに引き続き、本論文では、高真空中の液体リチウムの薄い液膜流の安定性について議論する。

本研究対象は、加速器利用環境下のため高真空 (10^{-3} Pa) 中の流れであり、かつ液体リチウムが加速器ターゲット自身の冷却材(顕熱媒体)を兼ねるから、十分な流送除熱性能を確保するため高速流れであること、さらに治療に不要かつ有害な γ 線の発生を減らすため、液幕ないし液膜には核反応ターゲットとしてある範囲の薄さが要求されること、等の制約がある。反面、治療用中性子線を原子炉から取り出さずに得られるという長所がある。

本論文では、2008~2010 年度にわたって文部科学省 科学研究費補助金・基盤研究(A) (課題番号: 20240054)として東京工業大学 原子炉工学研究所で実施された、高真空 (10^{-3} Pa) 中の液体リチウム流動実験(Takahashi, et al., 2012)において、実際に実現された壁面上の厚さ $h = 0.5$ mm の液体リチウム液膜流について、前報(中川他, 2014)で議論した液幕噴流と対比させながら、その線形安定性を解析し、長波近似の下で安定性を評価する。

^{*1} 正員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-NE-6)

^{*2} 正員, 東京工業大学 原子炉工学研究所, ^{*3} 京都大学 原子炉実験所, ^{*4} 正員, フェロー, 東京工業大学 原子炉工学研究所
E-mail: nakagawa.m.ac@m.titech.ac.jp

2. 壁面液膜流の線形安定性解析

本論文では、高真空中の壁面上の薄いリチウム液膜流について、Hagerty and Shea の液幕噴流に対する線形安定性解析（大気中の水幕噴流実験付き）(Hagerty and Shea, 1955)を、高真空中の薄いリチウム液幕噴流に適合させて分散関係式（波速）を導いた前報(中川他, 2014)の解析をベースにして、これを縮約する形で理論を再構成する。

すなわち、前報(中川他, 2014)の液幕噴流では、自由表面が表裏2面存在したが、本論文で扱う壁面液膜流では、壁面に接する側の液体面が壁面によって自由を拘束されるため、自由表面が残りの側の1面だけに減少している。ゆえに、液幕噴流では、表裏それぞれに表面波が1つずつ、合計して2つの表面波が存在することができたが、壁面液膜流では、存在できる表面波は、1つだけ限られる。

図1に解析対象の側面図を示す。本解析では、以下の仮定を用いる。

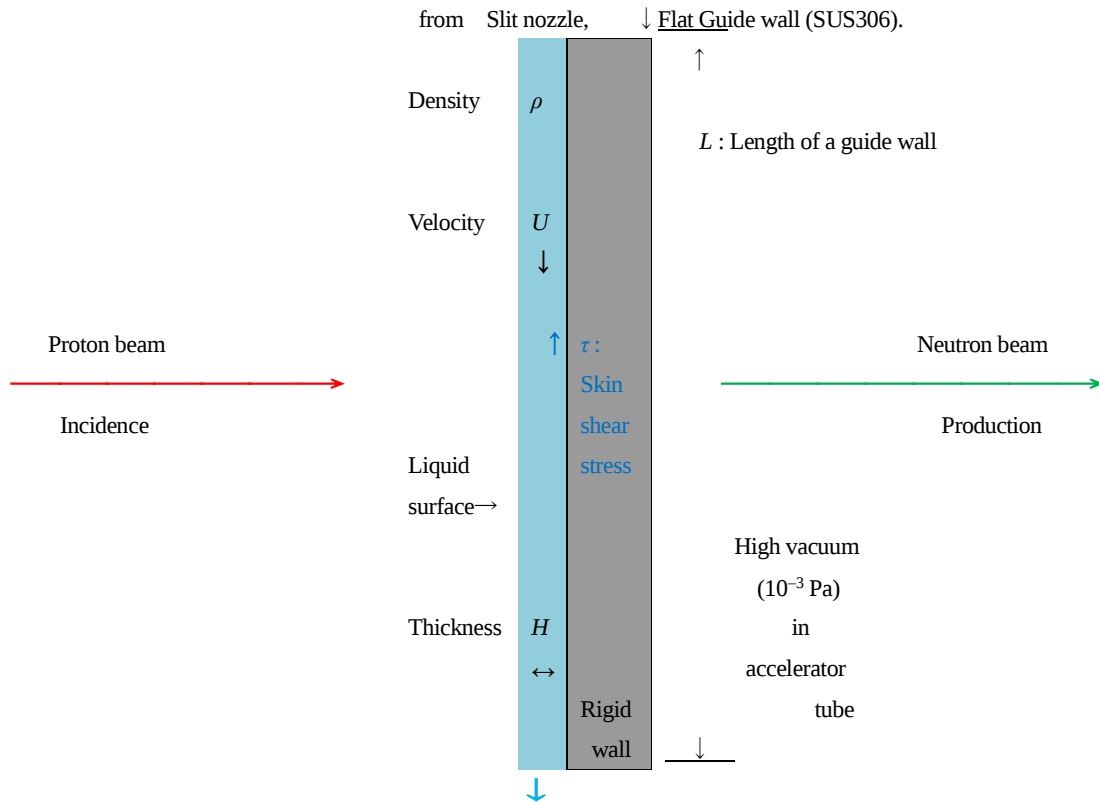


Fig.1 A side view of a wall film flow (a film flow on a wall) as the liquid lithium target flowing in a high vacuum.

1. 液体リチウムの一様流速 U （鉛直下向きに x 軸をとる）は、重力の影響が無視できるほど十分に大きい。実際、密度が液体リチウムの約2倍の水を用いた薄い液幕噴流の実験 (Hagerty and Shea, 1955), (Taylor, 1959a, 1959b) を見れば、重力の影響はほとんど問題にならないこと（本仮定 1. の妥当性）が、実験時の写真から実証される。

2. スリットノズルから壁面噴流的（wall jet like）に高真空（ 10^{-3} Pa）中に流出した液体リチウムは、非粘性、非圧縮性、渦無しとする。

本研究の壁面液膜流では、壁面上の流下距離が十分短く（約 60 mm (Takahashi, et al., 2012)）、壁面摩擦はあまり効かないと考えられるから、前報(中川他, 2014)の液幕噴流における線形安定性解析と同様、液体リチウムの粘性を無視した。高真空中でのリチウム蒸気（飽和圧力：融点 180°C にて 10^{-7} Pa～沸点 344°C にて 10^{-4} Pa）の存在は問題にならない。解析における周囲の気相の密度と流速が、いずれも $\rho_A = 0$, $V' = 0$ (Hagerty and Shea, 1955) とおけることは、前報(中川他, 2014)の 3・3 節を参照されたい。また、本論文で参照した実験(Takahashi, et al., 2012)で用いた壁面スリットノズルの形状は、同参考文献の Fig.7 (b)に示されるとおり、出口開口の隙間 $\delta = 0.5$ mm, 横幅 $b = 50$ mm, 出口後の凹曲壁面の曲率半径 100 mm であり、その開口形状は、長い平行部を持つスリットと見做せる。

3. 液体リチウムの表面には、表面張力が働く。（ σ ：表面張力係数）

4. リチウム液膜流の表面 ($y = a$) は、振幅 η_0 、角速度 ω の微小な波 ($\eta_0 \ll a$) によって乱される。(液膜厚さ : $h_F = a$) なお、本論文では、前報(中川他, 2014)で論じた液幕噴流の表裏 2 表面の間の位相差は、当然 $\theta = 0$ となる。

5. 流れは定常である。(単位奥行き当たりの体積流量は、壁面上のリチウム液膜流の場合、 $h_F U = aU = \text{一定}$ 。これは、二次元流れ近似でもある。)

6. 仮定 4 により微小に乱されたリチウム液膜流表面の方程式は、次のように記述できる。ただし、 k : 角波数。本論文の壁面上のリチウム液膜流では、 $0 \leq y \leq a$ (壁面からリチウム液膜流の表面まで) の側だけを考える。

$$y = a = h_F \text{ (リチウム液膜流の表面) で, } y = y_1 = \eta_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad (1a)'$$

かつ

$$y = 0 \text{ (壁面, すなわちリチウム液膜流の底面) で, } y = 0 \quad (1c)$$

ここで、式番号は、前報(中川他, 2014)のリチウム液幕噴流の解析と対比し易いように、(1a)', (1c) とした。

仮定 2 の渦無し条件から、速度ポテンシャル ϕ が存在できて、次の変数分離された形の方程式で表わせる。

$$0 \leq y \leq a \text{ (リチウム液膜流内) で, } \phi = -Ux + (A \cosh ky + B \sinh ky) e^{i(kx - \omega t)} \quad (2)$$

$$\text{ただし、係数 } A = i(\omega/k - U)(1 - e^{i\theta}) \eta_0 / 2 \sinh ka = 0 \quad (\because \theta = 0), \quad B = i(\omega/k - U) \eta_0 / \cosh ka$$

式 (2) を仮定 1 および仮定 2 の渦無し条件の下で成り立つ圧力方程式 (3) (一般化されたベルヌーイの定理)

$$U^2/2 = -\partial\phi/\partial t + q^2/2 + \Delta p/\rho \quad (3)$$

(仮定 2 の非圧縮性条件も用いた) に代入すれば、リチウム液膜流と高真空 (10^{-3} Pa) 雰囲気との圧力差は、

$$\Delta p = -i k \rho (\omega/k - U) (B \sinh ky) e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

リチウム液膜流の表面の表面張力、すなわち曲率 (二次元近似) を持つ液表面における液内外の圧力差は、

$$y = a = h_F \text{ (リチウム液膜流の表面) で, } \Delta p = -\sigma (\partial^2 y / \partial x^2) \quad (5)$$

式 (1a)', (4) を式 (5) に代入し、仮定 4 を用いて整理すると、次式となる。

$$k \rho (\omega/k - U)^2 \tanh ka = k^2 \sigma \quad (6)$$

したがって、分散関係は、式 (6) によって与えられる。この分散関係式 (6) は、前報(中川他, 2014)のリチウム液幕噴流における反対称波 ($\theta = 0$) の場合の式 (14) と同じである。分散関係式 (6) を展開して整理すると、

$$\omega^2 \tanh ka - 2\omega k U \tanh ka + k^2 U^2 \tanh ka - k^3 \sigma / \rho = 0 \quad (7)$$

ω について解くと、

$$\omega = kU \pm \sqrt{\frac{k^3 \sigma / \rho}{\tanh ka}} \quad (8)$$

したがって、高真空中の壁面上の薄いリチウム液膜流の表面で発生する波は、式 (8) によって表現できる。この分散関係式 (8) は、前報(中川他, 2014)で論じた液幕噴流における反対称波の分散関係式 (16) と同じである。

ゆえに、分散関係式 (8) から、高真空中の薄い液体リチウムの壁面液膜流 (液の自由表面が 1 面だけ存在し、液の底面は固体壁面に接しているため、表面張力の波が 1 種類だけ存在する) 上の波と、液幕噴流 (液の自由表面が表裏 2 面に存在するため、両表面の間で互いに位相差を持つ 2 種類の表面張力の波が存在する) における、優越する方の、速くて非分散性の反対称波とに共通する普遍性を持つことが推察される。そこで、次の 3 章で、この式 (8) の波について、前報(中川他, 2014)と同様に、長波近似の下で安定性を議論する。

3. 長波近似下の安定性評価

式 (8) 内をオーダ評価する．液膜厚さ $h_F = a$ が，波長 $\lambda = 2\pi/k$ に比べ十分薄い

$$ka \ll 1 \text{ のとき, } \tanh ka \approx ka \quad (9)$$

なる長波近似が成り立つ．

長波の水理学上の基準は， $kh_F = ka \ll 0.251$ (室田, 1969)だから， $ka \leq 0.251$ として評価すれば，液膜厚さ $h_F = a = 0.5 \text{ mm}$ に対して， $k \leq 0.251/a = 0.126/(5 \times 10^{-4}) = 502$ ， $\therefore k = 2\pi/\lambda \leq 502$ となる．ゆえに，長波近似が可能な波長の範囲は， $\lambda \geq 2\pi/502 = 0.0125 \text{ m} = 12.5 \text{ mm}$ と求まる．このとき，式 (9) の長波近似を展開式 (7) に適用すれば，

$$\omega^2 ka - 2\omega k U ka + k^2 U^2 ka - k^3 \sigma/\rho = 0$$

ka で割り， ω について解くと，

$$\omega \approx kU \pm \sqrt{k^2 \sigma/\rho a} = kU \pm k\sqrt{\sigma/\rho a} = k(U \pm \sqrt{\sigma/\rho a})$$

だから，次の分散関係式を得る．

$$\therefore \omega/k \approx U \pm \sqrt{\sigma/\rho a} \quad (10)$$

式 (10) の波速 (根号部分) をオーダ評価すれば，

$$\sqrt{\sigma/\rho a} \approx \sqrt{0.384/506/5 \times 10^{-4}} = 1.23 \text{ m/s} \ll U \sim 5.0 \sim 15.0 \text{ m/s (Takahashi, et al., 2012)} \quad (11)$$

ゆえに，① この波は，式 (11) の波速の形から，密度 ρ の慣性力に対して，表面張力 σ/a を復元力とする波である．② 分散関係式 (10) または波速の式 (11) の根号内が負にならないから，いかなる波に対しても，高真空中の壁面上の薄いリチウム液膜流は不安定にならないこと，③ 上記①の波速の波は，壁面上で，この波速に比べて 1 桁近く大きな流速 U の液膜流に押し流されること (超臨界流)，④ 波の非分散性 (波速が k によらない)，がわかる．また，⑤ 上記②で述べたように，波速の根号内が負にならないから，角速度 ω は複素数 $\omega_{\text{Real}} \pm i\beta_{\text{Imag}}$ にならない．すなわち，不安定の増幅率 $\beta_{\text{Imag}} = 0$ (中立安定) である．(ここで，添字 Real : 実部，Imag. : 虚部)

文 献

- Bengua, G., Kobayashi, T., Tanaka, K., Nakagawa, Y. and Unesaki, H., TPD-based evaluation of near threshold mono-energetic proton energies for the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ production of neutrons for BNCT, *Physics in Medicine and Biology*, Vol.51 (2006), pp.4095-4109.
- Hagerty, W. W. and Shea, J. F., A Study of the Stability of Plane Fluid Sheets, *Journal of Applied Mechanics*, Transactions of ASME, Vol.22 (1955), pp. 509-514.
- Kobayashi, T., Bengua, G., Tanaka, K. and Nakagawa, Y., Variations in lithium target thickness and proton energy stability for the near threshold ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ accelerator-based BNCT, *Physics in Medicine and Biology*, Vol.52 (2007), pp.645-658.
- 室田 明, 応用流体力学 (1969), p.117, 共立出版.
- 中川順達, 高橋実, 有富正憲, 古林徹, ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)中性子源用高速リチウム液幕噴流の安定性, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.819 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0316.
- Takahashi, M., Kobayashi, T., Zhang, M., Mák, M., Štefanica, J., Dostál, V. and Zhao, W., Study on High Speed Lithium Jet For Neutron Source of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), *Journal of Power and Energy Systems*, Vol.6, No.2 (2012), pp.324-338.
- Tanaka, K., Kobayashi, T., Sakurai, Y., Nakagawa, Y., Ishikawa, M. and Hoshi, M., Irradiation characteristics of BNCT using near-threshold ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ direct neutrons: application to intra-operative BNCT for malignant brain tumors, *Physics in Medicine and Biology*, Vol.47 (2002), pp.3011-3032.
- Taylor, G., The dynamics of thin sheets of fluid II. Waves on fluid sheets, *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, Vol.253 (1959a), pp.296-312.
- Taylor, G., The dynamics of thin sheets of fluid III. Disintegration of fluid sheets, *Proceedings of Royal Society of London, Series A*, Vol.253 (1959b), pp.313-321.
- (財)がん研究振興財団, がんの統計'13 (2013), p.25.