

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安定性と膜内構造
Title(English)	Stability and inner structure 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)	日本機械学会講演論文集, No.16-1, ,
Citation(English)	DVD Proceedings of MECJ-16, No.16-1, ,
発行日 / Pub. date	2016, 9

J2410102

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安定性と膜内構造

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

Stability and inner structure 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, School of Engineering, Dept. of Mechanical Engineering
Ohokayama 2-12-1-NE-6, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

The stability and inner structures of high-speed liquid lithium film flows on the wall was studied hydrodynamically 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 objective of our research is to materialize the thin and high-speed film flows of liquid lithium on the wall in a high vacuum as an accelerator target. Our current subject matter is to investigate the interactive coexistence with both inner structures each other; the potential core layer under the surface of a film flow and the boundary layer developing on the wall. The wall film flow like a wall jet has a potential core with uniform velocity profile on the side of the liquid free surface in the absence of the pressure gradient. Since the boundary layer on the wall is laminar or on the way to turbulent transition, the thickness of the boundary layer was estimated less than a half of the film thickness. The thickness of the potential core was therefore evaluated more than a half of one.

Key Words : Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Accelerator target, Liquid lithium, Wall film flow, Flow stability, Shortwave approximation, Neutrally stable, Potential core, Boundary layer, Interactive coexistence

1. 緒 言

我が国では、癌が 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⁽¹⁾、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、癌治癒後の 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）⁽²⁾⁽⁴⁾が注目されている。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、高真空中の高速で薄い液体リチウムの液幕噴流ないし壁面液膜流⁽⁵⁾を実現するため、液幕噴流の安定性⁽⁶⁾を議論したのに引き続いて、その後の一連の報告^{(7a)-(7c)}では、壁面液膜流の安定性について議論してきた。

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。

本一連の研究では、高真空（ 10^{-3} Pa）中の液体リチウム流動実験^{(8), (9)}において実際に実現された壁面上の厚さ $h_F = a = 0.5 \sim 0.6$ mm の高速リチウム液膜流について、液幕噴流⁽⁶⁾と対比させながら、その線形安定性を理論解析し、上述の流動実験に基づいて、長波近似あるいは短波長（深水波）近似の下で評価した結果を考察してきた。

本報では、そこから浮かび上がってきた課題である、壁面液膜流内の液表面側のポテンシャルコア層（渦無し）と壁面境界層（粘性・渦有り）が、相互に影響を及ぼし合いながら共存する内部構造について考察する。

^{*1} 正員、東京工業大学 工学院 機械系（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1- NE-6）

^{*2} 正員、東京工業大学 先端原子力研究所、^{*3} 非会員、(株)マックスメディカル、(前京都大学 原子炉実験所)、

^{*4} 正員・フェロー、東京工業大学 先端原子力研究所

E-mail: nakagawa@mech.titech.ac.jp

2. 線形安定性解析の結果および短波長波（深水波）近似下での安定性の再評価

2・1 線形安定性解析とその結果^(7a)

神部・Drazin の著書⁽⁹⁾が、Landau and Lifshitz の教科書⁽¹⁰⁾の§26 から引用しているように、「運動方程式の解の全てが、…現実にかかるわけではない。…流れは、流体力学の方程式に従うだけでなく、安定でなければならない。」すなわち、「不安定な流れは存在しない」ため、工学的にも実現できないから、流れの安定性を考えることは、流れが関係する機械を設計する上で極めて重要である。

液幕噴流⁽⁶⁾では、自由表面が表裏 2 面存在したが、壁面液膜流^(7a)では、壁面に接する側の液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 つの表面波が存在できたが、壁面液膜流では、存在できる表面波は、1 つだけに限られる。

本研究では、液幕噴流と壁面液膜流に対する設計上の優劣判定を最終目標にして、従来は別々に取り扱われていた液幕噴流⁽⁶⁾と壁面液膜流^(7a)について、上述した液幕噴流の表裏 2 液面に発生する表面張力の波の間の位相差を $\theta=0$ とおき、かつ壁面 ($y=0$) 上でその波の振幅 $\eta_0=0$ において、壁面上の液膜流を記述することによって、上述の液幕噴流と壁面液膜流の安定性を、共通の土俵上で可能な限り統一かつ統合的に理論解析してきた。

本研究の壁面液膜流は、壁面上の流下距離 L ($\approx 60\sim 100$ mm^{(5),(9)}) が十分短く、壁面摩擦が液面の波と流れの安定性にあまり影響を及ぼさないと考えて、液幕噴流の線形安定性解析⁽⁶⁾と同様、液体リチウムの粘性を無視し、非粘性、非圧縮、渦無しの仮定の下で、線形安定性解析を行い、以下の結果を得た^(7a)。

$$k\rho(\omega/k-U)^2 \tanh ka = k^2\sigma \quad (1)$$

ここで、 k : 波数、 ρ : 密度、 ω : 角速度、 U : 流速、 σ : 表面張力係数。

分散関係式 (1) を展開して整理し、 ω について解くと、

$$\omega = kU \pm \sqrt{\frac{k^3\sigma/\rho}{\tanh ka}} \quad (2)$$

2・2 短波長波（深水波）近似下での安定性の再評価^{(7a)-(7c)}

図 1 (b) の準静止写真⁽⁸⁾における液面上の流下方向のさざ波（凹凸）は、波長 $\lambda \approx 2$ mm（波数 $k = 2\pi/\lambda \approx 3 \times 10^3$ ）とかなり短いので、式 (2) の波について、図 1 (b) の準静止写真に基づく評価

$$ka \approx 3 \times 10^3 \times 0.6 \times 10^{-3} = 1.8 \quad \therefore \tanh ka \approx \tanh 1.8 \approx 0.95 \quad (3)$$

つまり誤差 5 % 込みの短波（深水波）近似、すなわち、波長 $\lambda = 2\pi/k$ が液膜厚さ $h_F = a = 0.6$ mm に比べ十分小さい

$$ka \gg 1 \text{ のとき, } \tanh ka \approx 1 \quad (4)$$

の近似の下で安定性を再評価すると、分散関係は次式となる。

$$\therefore \omega/k \approx U \pm \sqrt{k\sigma/\rho} \quad (5)$$

式 (5) の波速（根号部分）をオーダ評価すれば、リチウム温度 220 °C で、

$$c = \sqrt{k\sigma/\rho} \approx \sqrt{3 \times 10^3 \times 0.391/510} = 1.52 \text{ m/s} \ll U \sim 30 \text{ m/s} \quad (6)$$

よって、① このさざ波は、密度 ρ の慣性力に対して、表面張力 $k\sigma$ を復元力とする波である。② 分散関係式 (5) または波速 c の式 (6) 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。③ 上記①の波速の波は、壁面上で、この波速に比べ約 20 倍大きな流速 U の液膜流に押し流される（超臨界流）、④ 波は分散性（波速が k に依存する）。⑤ 波速 c 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。



Fig.1 Photographs of the surface of liquid lithium film flows on the concave wall in a high-vacuum ($< 10^{-3}$ Pa), i. e., 220 °C in temperature at the saturation pressure of lithium, $h = 0.6$ mm in thickness, and $U = 30$ m/s in velocity. Strobe exposures of camera were (a) 1 ms and (b) 10 μ s, respectively. These figures are quoted Fig.7 (a) and (b) in the paper experimented by Kobayashi, et al. ⁽⁸⁾.

3. 壁面液膜流内に形成されるポテンシャルコア層と境界層の共存構造

3・1 壁面液膜流のポテンシャルコア層

本一連の研究では、自由表面を持つ流れとその上の波の線形安定性解析をポテンシャル流れの場合において行うため、非粘性・渦無し流れを仮定し^{(6), (7a)}、併せて、壁面上で発達する境界層（粘性・渦有り）については、粘性流れとして取り扱って、平板境界層の線形中立安定曲線を援用した^(7c)。すなわち、Prandtl⁽¹¹⁾以来の境界層理論の基本概念である、ポテンシャル流れと粘性流れを空間的に分離して解析するという方法論を踏襲している。

本研究の壁面液膜流では、その壁面噴流的（wall jet like）な特徴であるポテンシャルコア（ノズル噴出直後の、比較的乱れが小さく高速流速が減速せずに一様流速を保持している領域では、粘性の影響が現れず、ポテンシャル流れとして取り扱える）⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾層が形成されていると理解できる。本報では、これをポテンシャルコア層と呼ぶ。

さらに、本一連の研究では、液自由表面が高真空中にあるため、自由液面側には周辺流体とのせん断混合層が生じないから、上述のポテンシャルコア層は、流速が自由液面側から低下することなく保持されると考えられる。将にこのことが、自由液面上の波と流れの線形安定性解析で仮定した非粘性・渦無し流れ、すなわち、自由液面側にポテンシャルコア層としてポテンシャル流れが存在することを、必要かつ十分に保証している。

したがって、粘性の影響が現れて流速が低下するのは、もっぱら壁面上の境界層側からだけに限られると考えられる。そして、上述のポテンシャルコア層の下限域は、壁面境界層だけによって制限されると考えられる。

本報では、この自由液面直下の自由表面側に形成されるポテンシャルコア層と、壁面上に発達する境界層が、相互に影響を及ぼし合いながら共存する安定な液膜流の内部構造について、定量的に評価して考察する。

3・2 壁面境界層の厚さおよび乱流遷移の評価

壁面噴流的（wall jet like）にスリットノズルから噴出した壁面液膜流は、ノズル出口の流速分布が一様であり、壁面（底面）上の境界層の厚さ δ は、ノズル出口の地点で $\delta=0$ と考えられるから、このノズル出口の地点を仮想原点として、層流境界層が発達し始め、流下レイノルズ数 $Re_{x=L} = UL/\nu = 3.5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ 、あるいは排除厚さ δ^* で評価した局所レイノルズ数 $Re^* = U\delta^*/\nu = 1.73 \sqrt{Re_{x=L}} = 3.5 \times 10^3$ までを、層流境界層であると仮定する。上述の壁面液膜流の下流端（流下距離 $L \approx 100$ mm）における層流境界層厚さ δ_L を、Blasiusの厳密解に基づいて概算すれば、

$$\delta_L = 5.0 L / \sqrt{UL/\nu} = 5.0 \sqrt{L\nu/U} = 5.0 \sqrt{0.100 \times 1 \times 10^{-6} / 30} = 2.89 \times 10^{-4} \text{ [m]} \approx 0.29 \text{ [mm]} \quad (7)$$

となり、液膜厚さ $h_F = a = 0.6$ mmの高々半分弱程度の厚さであることがわかる。

また、液膜流の下流端 ($L \approx 100 \text{ mm}^{(8)}$) における流下レイノルズ数 $Re_{x=L} = 2.7 \times 10^6$ (表 1 の $U = 30 \text{ m/s}$ の値) から判断すれば、壁面境界層は未だ完全に乱流遷移していない (乱流スポットが現れては消える段階) と判定される^{(15),(16)}から、境界層厚さを高々式 (7) の程度とすれば、液膜流の液表面 (高真空: 10^{-3} Pa) 側には、ポテンシャルコア層が、液膜厚さの半分 (0.3 mm) 以上残っていると考えられる。この液膜厚さに比べて割合厚いポテンシャルコア層が、壁面境界層の主流として壁面境界層を牽引し、壁面境界層の発達を支えていると理解できる。逆に、壁面境界層の発達が、壁面境界層の厚さを増加させ、ポテンシャルコア層を排除する (上へ押し上げる) ため、ポテンシャルコア層を加速する結果、ポテンシャルコア層が弱まることを防いでいると考えられる。このような壁面に垂直上向きの排除流速 v_L は、液膜流の下流端 $x = L$ において、次式で評価できて⁽¹⁷⁾、(表 1 も参照)

$$v_L = 0.8605U\sqrt{\nu/LU} = 0.8605U/\sqrt{Re_{x=L}} = 0.8605 \times 30 / (2843/1.73) = 0.01571 \text{ [m/s]} = 15.7 \text{ [mm/s]} \quad (8)$$

液膜流速 $U = 30 \text{ m/s}$ の僅か 0.052% の値の v_L が、高真空中で圧力勾配の無い液膜流を維持していることがわかる。

したがって、本研究の壁面液膜流を設計する方針としては、層流境界層が、運動量損失が大きい乱流境界層に遷移する前の、この流動状態を狙うのが、安定性の観点からだけでなく、工学的にも最善であると判断できる。

3・3 壁面液膜流上の短波長波 (深水波) の深さ方向減衰の評価

本節では、上述したポテンシャルコア層と、壁面上に発達する境界層が及ぼし合う影響を、ポテンシャルコア層の液表面に発生する短波長波 (深水波) が深さ方向に減衰する程度を通して評価する。

短波長の液面波 (深水波) では、波数 k の波 (振幅や流速) の流体粒子が円運動を呈し、その振幅 (半径) が深さ η 方向に (自由表面から底面に向かって) 指数関数 $e^{-k\eta}$ に比例して急速に減衰することが知られている⁽¹⁸⁾。

具体的には、図 1⁽⁸⁾ の波長 $\lambda = 2\pi/k \approx 2 \text{ mm}$ の場合を、深さ $\eta = 0.6 \text{ mm}$ (底面である壁面上) で評価すれば、

$$k\eta = (2\pi/\lambda) (0.6 \times 10^{-3}) = \{2\pi/(2 \times 10^{-3})\} (0.6 \times 10^{-3}) = 0.6\pi \quad (9)$$

であるから、壁面液膜流の表面における表面張力の波の振幅 (円運動の半径) や流速は、底面である壁面上で、

$$\therefore e^{-k\eta} = e^{-0.6\pi} = 0.1512 \quad (10)$$

すなわち、 15% (約 $1/7$) まで減衰する。よって、液表面の短波長の波と、壁面 (底面) が及ぼし合う影響は、表面波の振幅が深さ方向に壁面 (底面) 上で 15% (約 $1/7$) まで減衰する程度の大きさであることがわかる。

次に、液表面の短波長の波と、壁面上の層流境界層が及ぼし合う影響を、 $U = 30 \text{ m/s}$, $x = L$ のときの排除厚さ

$$\delta^* = 1.73L / \sqrt{UL/\nu} = 1.73\sqrt{L\nu/U} = 1.73\sqrt{0.100 \times 1 \times 10^{-6} / 30} = 0.1053 \times 10^{-3} \text{ [m]} \approx 0.105 \text{ [mm]} \quad (11)$$

の位置の深さ $\eta = h_F - \delta^* = 0.6 - 0.105 = 0.495 \text{ mm}$ で評価すれば、

$$k\eta = (2\pi/\lambda) \times 0.495 = \{2\pi/(2 \times 10^{-3})\} (0.495 \times 10^{-3}) = 0.495\pi \quad (12)$$

であるから、壁面液膜流の表面における短波長の波の振幅や流速は、壁面上で発達中の層流境界層の δ^* 付近で、

Table 1. Flow velocity, wave number and Reynolds numbers of liquid lithium film flows on a wall in a high-vacuum;
the joint data experimented by Takahashi, et al.(Takahashi, et al., 2012) and Kobayashi, et al.(Kobayashi, et al., 2014). ^(7c)

Velocity U [m/s]	Wave number k [1/m]	Reynolds numbers [-]	
		$Re_{x=L} = UL/\nu$	$Re^* = 1.73\sqrt{Re_{x=L}}$
5.0	≈ 0	2.86×10^5	925
10.0	illegible	5.76×10^5	1313
15.0	illegible	8.69×10^5	1613
30	3×10^3	2.70×10^6	2843

$$\therefore e^{-k\eta} = e^{-0.495\pi} = 0.211 \quad (13)$$

すなわち、21.1% (約 1/5) まで減衰する。よって、液表面の短波長の波と、壁面上の層流境界層が及ぼし合う影響は、表面波の振幅が深さ方向に 21.1% (約 1/5) まで減衰する程度の大きさであることがわかる。

4. 結 語

壁面上の高速 ($U = 30 \text{ m/s}$) で安定なリチウム液膜流 (厚さ 0.6 mm) の内部では、高真空 (10^{-3} Pa) に接する液面側に形成されるポテンシャルコア層が液膜厚さの半分以上を占め、壁面上に発達する層流境界層 (乱流遷移途中) が残り半分弱を占め、両層が短波長の表面波の深さ方向減衰にして 15~21%の相互影響の下で共存している。また、壁面法線方向の僅かな排除流速が、高真空中で圧力勾配の無い壁面上の高速液膜流を維持していると言える。

文 献

- (1) (財)がん研究振興財団, がんの統計'13 (2013), p.25.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7a) 中川順達, 高橋実, 古林徹, 有富正憲, 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, 機講論 (2015 年度年次大会), No.15-1 (2015), S0510404.
- (7b) 中川順達, 高橋実, 古林徹, 有富正憲, ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)中性子源用高速リチウム壁面液膜流の実験結果の考察, 機講論 (第 93 期流体工学部門講演会), No.15-34 (2015), 0215.
- (7c) 中川順達, 高橋実, 古林徹, 有富正憲, 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安定形成, 機講論 (第 22 期関東支部総会講演会), No.160-1 (2016), GS0507.
- (8) Kobayashi, T., Miura, K., Hayashizaki, N. and Aritomi, M., *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.88 (2014), pp.198-202.
- (9) 神部 勉, Drazin, P. G., 流体力学 安定性と乱流, (1998), p.6, 東京大学出版会.
- (10) Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., *Fluid Mechanics*, (1950), §26, Pergamon. (竹内 均 訳), 流体力学 1, (1970), 東京図書.
- (11) Prandtl, L., (1904), Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *Verh. III Intern. Math. Kongr. Heidelberg*, pp.484-491.
- (12) 富田幸雄, 流体力学序説, (1978), p.276, 養賢堂.
- (13) 深野徹, 流体力学(II), (1994), p.154, 裳華房.
- (14) 社河内 敏彦, 噴流工学 -基礎と応用-, (2004), p.4, 森北出版.
- (15) 田古里哲夫, 荒川忠一, 流体工学, (1989), p.137, 東京大学出版会.
- (16) Schubauer, G. B. and Klebanoff, P. S., (1956), Contributions on the mechanics of boundary layer transition. *Rep. Nat. Adv. Comm. Aero. Washington*, No.1289.
- (17) 日野幹夫, 流体力学, (1992), pp.263-268, 朝倉書店.
- (18) Ippen, A.T., *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, (1966), pp.31-32, McGraw-Hill., および 文献(17)の pp.178-179.