

ミニレビュー

粒子線ラジオグラフィの
理工学への応用

掛布光孝

X線の代りに荷電粒子ビームを用いる粒子線ラジオグラフィは1960年代に利用が始まり、多くの実施例が、Koehler¹⁾、河内²⁾らにより紹介されている。ここでは、ラジオグラフィに陽子などの荷電粒子を用いる利点とそれを活かした最近の応用例、動向について紹介する。

図1に、物質に入射した荷電粒子ビームの強度変化を、X線の場合と比較しながら模式的に示した。物質に入射した荷電粒子は、物質中の電子とクーロン相互作用を繰り返す過程でエネルギーを失い、その大部分がレンジ近傍に停止する。このため、ビーム強度 ($1/\text{cm}^2/\text{s}$) は、レンジの手前まで緩やかに減衰した後、レンジ近傍で急激に減少し、粒子の最も深い停止位置でゼロとなる。そこで、レンジの大きさが試料の厚さと同程度となるように荷電粒子の入射エネルギーを選ぶと、この急激な強度変化を

厚さ変化の検出に利用できる。すなわち、図1の試料①のようにX線の透過ビーム強度変化 ΔI_x の小さいわずかな厚さ変化も大きな強度変化 ΔI_p で検出することが可能となる。また、試料②のように厚さ変化が大きい場合は、レンジの大きさを境としたより厚い部位と薄い部位の間で非常に高いコントラストを持つ映像が得られる。このように、わずかな厚さ変化も高いコントラストで検出できることがラジオグラフィに荷電粒子を用いる第一の利点である。さらに、粒子の入射エネルギーを適切に選ぶことにより、中性子では透過力が大きすぎて撮影困難な薄い試料も撮影できる (第二の利点)。

ラジオグラフィに荷電粒子を用いる第三の利点は、大強度のビームが容易に得られることである。荷電粒子ビームは加速器からイオンビームとして取り出すことができ、数 μA のビーム電流が容易に得られる。仮に $1\mu\text{A}$ のビームを 10 cm 四方の照射野に広げたとして、毎秒 1 cm^2 当たり 6×10^{12} 個の粒子を撮影に利用できる。これは、日本原子力研究所の原子炉 (JRR-3M) に付設された熱中性子ラジオグラフィ設備で利用できる熱中性子束 1.5×10^8 ($1/\text{cm}^2/\text{s}$) に比較して4桁以上大きい。この結果、シャッタ速度が $1/1\,000$ 秒以上の高速シャッタ撮影、毎秒数百コマ以上の高速度撮影が容易となる。ただし、前述のように、物質に入射した荷電粒子は物質中でエネルギーを失い、粒子から失われたエネルギーは最終的に試料の熱負荷となる。このため、ビーム電流は試料への熱的影響と必要とされるシャッタ速度のバランスから決定される。

最近、この高コントラストと高速シャッタ撮影、高速度撮影の容易な利点が着目され、粒子線ラジオグラフィが流体挙動の可視化に活用されている。高橋らは、タンデム型加速器から得られる 13 MeV 、 100 nA の陽子ビームを利用して、 n -ヘキサン溶媒を用いた厚さ 3 mm の磁性流体中にヘリウムガスを導入したときの非一様磁場中での気泡の挙動を調べた³⁾。撮影

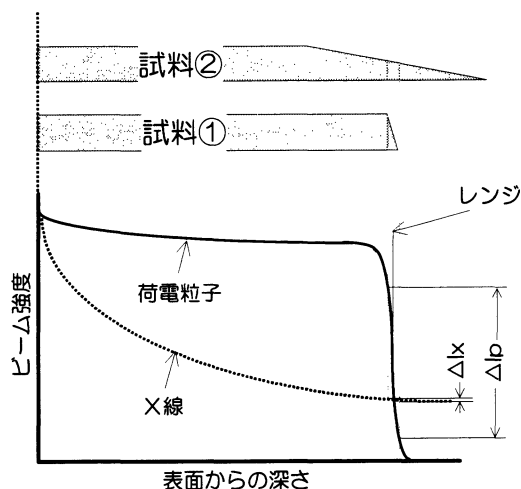


図1 物質中のビーム強度の変化 (模式図)

は、シャッタ速度 1/1 000 秒、毎秒 60 コマで行われた。また、12 MeV、10 nA の陽子ビームを用い、内径 1.94 mm (肉厚 30 μ m) のニクロム製パイプに直接通電したときの、内部を流れるエチルアルコールに発生する沸騰気泡の様子も調べている⁴⁾。このとき、低熱流速域ではシャッタ速度 1/4 000 秒、毎秒 60 コマの高速シャッタ撮影が行われ、高熱流速域では毎秒 1 000 コマの高速撮影が行われている。さらに、アルミ製平板状非ループ型蛇行細管ヒートパイプの 0.6×0.7 mm の矩形流路内を流動するフロンの気泡スラグの挙動観察に応用し⁵⁾、シャッタ速度 1/4 000 秒、毎秒 2 000 コマの高速撮影を行った。

筆者は、高コントラストと薄い試料の撮影可能性に着目し、サイクロトロン加速器から得られる 18 MeV の陽子ビームを用いて、厚さ 1.7 mm の偏平アルミ管に作られた幅 0.6 mm、高さ 0.3, 0.5, 0.9 および 1.1 mm の矩形流路内部の液冷媒 (HFC134a) を可視化した⁶⁾。図 2 に陽子のエネルギーを 16.3 MeV に調整したときに得られた高さ 0.3 mm の流路内の撮影結果を示した。左下から右上にのびた平行線状の影は、各流路を分ける厚さ 0.15 mm のアル

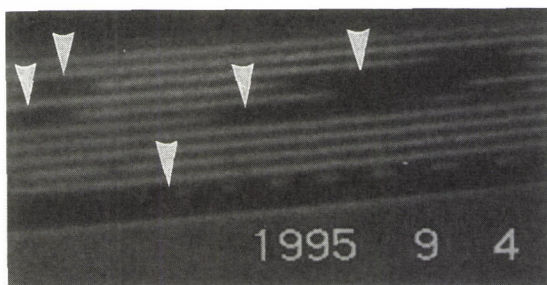


図 2 偏平アルミ管内部の液冷媒の映像
沸騰により管内を高速流動する液冷媒(膜厚: 0.3 mm)をシャッタ速度 1/10 000 秒で撮影した。写真は 1 フィールドをプリントアウトしたもので、矢印で示す黒い影が液冷媒を表す。

ミの壁の影である。矢印で示した黒い影が液冷媒の塊を表し、液冷媒が非常に高いコントラストで撮影できたことがわかる。流路高さの異なる他の試料についても陽子のエネルギーを 9.8 - 16.1 MeV の範囲で調整することにより同様の映像が得られた。このことから、陽子エネルギーを試料ごとに適切に調整すると、液冷媒が高いコントラストで撮影できることが実証された。

このように、試料の大きさ、撮影目的ごとに最適なビーム設計を行えば粒子線ラジオグラフィは非常に有用な可視化手段となる。

最後になるが、医学利用の分野では、稲田らが重粒子シンクロトロンから得られる 4.8 GeV の炭素イオンビームを用いた重粒子線ラジオグラフィに成功している⁷⁾。今後、医学分野で培われた種々の技術の理工学分野への活用が期待される。

Key Words : particle radiography, proton beam, visualization

文 献

- 1) Koehler, A. M. and Berger, H.: Research Techniques in Non-destructive Testing, Vol. 2, p.1, edited by Sharpe, R. S., Academic Press Inc. (London), LTD (1973)
- 2) 河内清光: NIRS-M-43, 184 (1981)
- 3) 高橋 修, 河原全作, 他: 磁性流体連合講演会講演論文集, p. 48 (1994)
- 4) 高橋 修, 河原全作, 他: 第 33 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p. 247 (1996)
- 5) 高橋 修, 河原全作, 他: 第 34 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p. 255 (1997)
- 6) 掛布光孝: 第 16 回混相流シンポジウム講演論文集, p. 9 (1997)
- 7) Inada, T., Nishimura, K. et al.: *Jpn. J. Med. Phys.*, **16**, (3), 217 (1996)

(株 豊田中央研究所)