

解析的な衝突確率法に基づく粒子輸送計算手法の開発

Development of particle transport calculation method based on analytical collision probability

*松村 哲夫¹、亀山 高範¹
¹東海大

解析的衝突確率法に基づく新しい粒子輸送計算手法を2次元(2D)にて開発した。対象内の任意の領域 R_a から R_b への衝突確率 CP は、領域 R_a と領域 R_b を含むシステム全体の断面積がゼロの場合に解析的に計算できる。領域 R_a と R_b の代表点間の距離と平均断面積による減衰効果を用いることで、ゼロ断面積での CP 値から減衰効果を考慮した CP 値を近似できる。領域を狭くすることで、減衰効果を考慮した CP 値を真値に近づけることができる。参照解のある2次元問題などに適用し、短い計算時間で十分な解析結果を得た。

キーワード：解析的手法、衝突確率法、輸送計算、2次元、領域間距離

1. 計算手法 2次元体系で領域 R_a の線源 $S(R_a)$ から検出ポイント P_d へのフラックス $\phi(P_d \leftarrow R_a)$ は、領域 R_a の座標 (X_{ai}, Y_{ai}) $i = 1, 2$ と検出ポイント P_d の座標 (X_d, Y_d) から式(1)で計算できる。中性子・光子などの粒子に対するマクロ断面積 Σ_t による減衰効果は Bickley 関数 $K_{i1}(\Sigma_t \ell)$ で示されるが、これを領域 R_a の代表点との距離 L と Σ_t による減衰効果 $K_{i1}(\Sigma_t L)$ で近似することで、 $1/\ell = 1/\sqrt{x^2 + y^2}$ の積分となる。 $1/\ell$ の積分は式(2)の様に解析的に求められる[1]。

$$\phi(P_d \leftarrow R_a) = \int_{(X_d-X_{a1})}^{(X_d-X_{a2})} dx \int_{(Y_d-Y_{a1})}^{(Y_d-Y_{a2})} dy \frac{S(P_d)}{2\pi V_a \ell} k_{i1}(\Sigma_t \ell) \cong k_{i1}(\Sigma_t L) \frac{S(R_a)}{2\pi V_a} \int_{(X_d-X_{a1})}^{(X_d-X_{a2})} dx \int_{(Y_d-Y_{a1})}^{(Y_d-Y_{a2})} dy \frac{1}{\ell} \quad (1)$$

$$\int dx \int dy \frac{1}{\ell} = y \operatorname{asinh}\left(\frac{x}{\operatorname{abs}(y)}\right) + x \operatorname{asinh}\left(\frac{y}{\operatorname{abs}(x)}\right) \quad (2)$$

領域 R_a から R_b への衝突確率 $CP(R_b \leftarrow R_a)$ は R_b の座標 (X_{bi}, Y_{bi}) $i = 1, 2$ を用いて、式(3)の様に4重積分になるが、相対距離 $\Delta x = X_b - X_a$, $\Delta y = Y_b - Y_a$ などを用いることで2重積分に簡素化し、解析的に求められる。

$$CP(R_b \leftarrow R_a) = \int_{X_{b1}}^{X_{b2}} dx_b \int_{X_{a1}}^{X_{a2}} dx_a \int_{Y_{b1}}^{Y_{b2}} dy_b \int_{Y_{a1}}^{Y_{a2}} dy_a \frac{\Sigma_{tb}}{2\pi \ell V_a} k_{i1}(\Sigma_t \ell) \\ \cong k_{i1}(\Sigma_t L) \frac{\Sigma_{tb}}{2\pi V_a} \int_{\Delta x_{min}}^{\Delta x_{max}} d\Delta x \int_{\Delta y_{min}}^{\Delta y_{max}} d\Delta y w(\Delta x) w(\Delta y) \frac{1}{\ell} \quad (3)$$

ここで、 $w(\Delta x)$, $w(\Delta y)$ は積分の重み、 Σ_{tb} は領域 R_b のマクロ断面積である。

2. 検証解析 参照解が示されている Fletcher's 2次元問題を解析し[2]、線源領域を細かく mesh 分割すれば(64×64 mesh など)、参照解に近づくことを確認した(図)。また、メッシュ分割が2×2 mesh 程度でも相対誤差3%以下と実用的な精度で計算できることが示された。2×2 mesh 分割の計算時間は通常のPCで0.17秒、64×64 mesh 分割でも248秒と現実的な時間で計算が可能であった。遮蔽模擬体系の計算なども実施し、散乱断面積がある問題でもメッシュ分割すれば、参照解に近づくことが確認できた。

3. まとめ 解析的衝突確率法に基づく新しい2次元(2D)輸送計算法を開発し、参照解のある2次元問題などに適用し、実用的な計算時間で十分な解析結果を得た。今後、3次元の遮蔽・臨界体系などへ本手法を展開する。

参考文献

- [1] T. Matsumura: N.S.E. 183, 407-420 (2016).
 [2] M.T. Capilla, et al: Annals of Nuclear Energy, 87, 89-100 (2016).

* Tetsuo MATSUMURA¹ and Takanori KAMEYAMA¹

¹ Tokai University

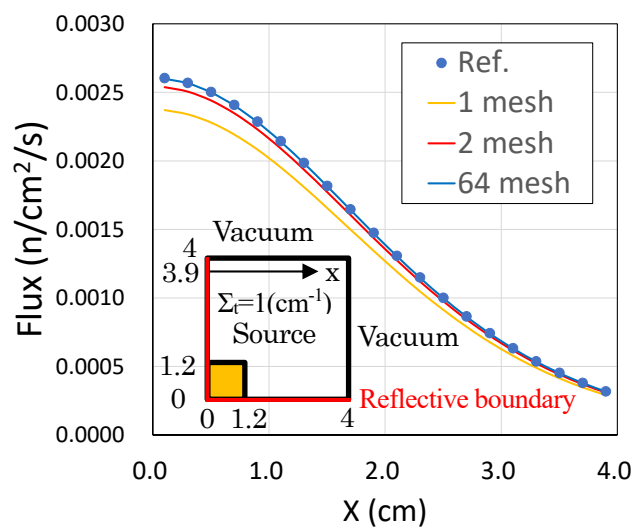


図 Fletcher's 2次元問題の参照解との比較