

豪雨時に発生する山地斜面パイプ流の数理シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 准教授 市川 温

山地斜面流域の雨水流出機構に関する研究は、1930年代の Horton による研究以来、数多く行われてきた。特に、1960年代に提唱された変動流出域概念は、今日の多くの雨水流出モデルの基礎となっている。その一方で、国内外で実施された詳細な斜面水文観測によって、変動流出域概念とは異なる新たな事実が明らかとなった。具体的には、降雨時における流出水の大部分が降雨前から斜面に貯留されていた水であることが確認され、特に土壌-岩盤境界面上に発達した大空隙(パイプ)内の水の流れが重要であることが示された。本研究では、このパイプ流を格子ボルツマン法によって直接的に数理計算することを目的とする。

山地斜面における実際のパイプ部は、ネットワーク上に枝分かれしていると考えられるが、まずは比較的単純な、幅 2cm、長さ 1m の直線的なパイプを想定した。

はじめに、境界条件の適用方法として、Halfway Bounce-Back 法 (HBB 法) とよばれる方法を用いた場合の計算結果を示す。図 1 は、流入・流出口に周期境界条件を適用し、流れがほぼ定常に達した状態でのパイプ内の流速分布である。流速分布は、上流 (x_{10})、中流 (x_{200})、下流 (x_{390}) の各断面でほとんど同一であり、理論解にほぼ一致している。つぎに、流入・流出口に一般境界条件(流入口で流速、流出口で圧力を指定する)を適用した結果を図 2 に示す。パイプ内のどの位置においても、計算流速が理論値よりもかなり大きな値となっており、適切な計算結果が得られていない。

このことから、計算プログラムや計算条件を見直したが、計算結果が大きく改善することはなかった。そこで、境界条件の与え方を抜本的に見直し、Non-Equilibrium Bounce-Back 法 (NEBB 法) を用いることにした。

図 3 は NEBB 法で周期境界条件を適用した場合の計算結果である。どの計算断面でも流速分布は理論値に一致している。図 4 は NEBB 法で一般境界条件を適用した場合の計算結果である。この場合も、流速分布は理論値に一致している。

HBB 法では、一般境界条件を用いた場合に適切な計算結果を得ることができなかったが、NEBB 法では周期境界条件・一般境界条件のいずれにおいても適切な計算結果を得ることができた。その理由は格子ボルツマン法の緩和時間係数と計算時間間隔に関係していると考えている。HBB 法はこれらに対して敏感であるのに対し、NEBB 法は値の設定について比較的自由度が高いことが知られている。当初、プログラム開発の容易さを優先して HBB 法を採用したが、結果的に NEBB 法のほうが適切な結果を与えることが明らかとなった。

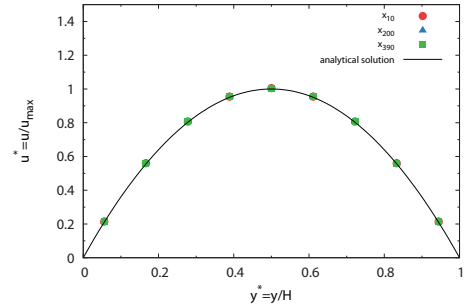


図 1: HBB 法による計算結果 (周期境界条件)

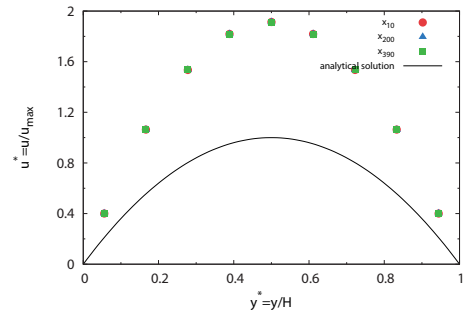


図 2: HBB 法による計算結果 (一般境界条件)

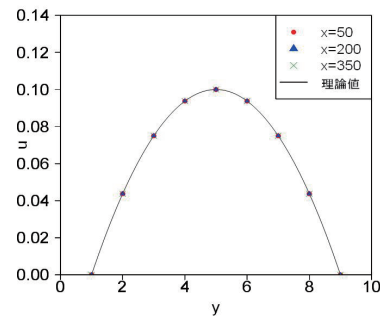


図 3: NEBB 法による計算結果 (周期境界条件)

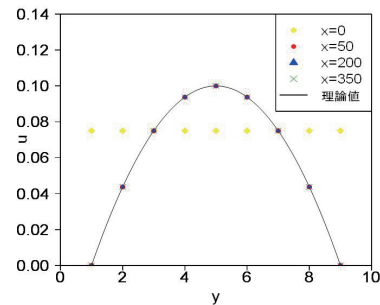


図 4: NEBB 法による計算結果 (一般境界条件)