

Scratch Runoff Model Description ver.1

31 Aug 2023

(IIS Open Campus version)

Dai Yamazkai, Minami Okada, Taishi Yazawa

Yamazaki Lab (Global Hydrodynamics Lab),
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

ここでは、教育用プログラミング言語 Scratch を用いて開発した降雨流出モデリングゲームの仕組みを説明する。

- このモデリングゲームは、降雨流出プロセスの基本的な要素を抽出して、体験型ゲームとして楽しめるように設計したものである。
- なお、オープンキャンパスにて使用したバージョンはオープンソースとして CC-BY 4.0 ライセンスで公開されている(<https://scratch.mit.edu/projects/826788978/>)。
- Web ブラウザでアクセスするだけでゲームとして体験できるほか、ソースコードの閲覧および複製・改変が可能である。
- なお、操作はキーボードを必要とせずクリックまたはタッチのみで行えるため、スマートフォンやタブレットなどでも動作するようになっており、講義やワークショップでの体験しやすさを意識している。

Scratch では横 480・縦 360 ピクセル(以下 px とする)のゲーム画面上を用いて、様々なスプライトの相互作用をプログラムとして記述することでアニメーションやゲームを表現する。

- 座標は画面中心が $x=0, y=0$ となっており、右上が $x=240, y=180$ となる。
- 画面上に存在する全てのスプライトは、アニメーション1フレームごとにソースコードで指示された動作を行う。

本モデルでは、降雨として斜面の上空に発生した水粒子スプライトが、斜面を通過して河川に流出する過程をラグランジュ的に追跡することで、降雨流出過程を表現している。

- 画面下部に基岩・土壌・土地被覆の3つのスプライトから構成される斜面を、左が上流側で右が下流側となるように配置し、斜面下端に当たる画面右下に河川スプライトを配置した。
- 土地被覆スプライトは斜面を4分割した各区間に1つずつ配置し、森林・草地・都市の3つのタイプを設定することができる。
- オープンキャンパスで使用したバージョンのモデル詳細を以下に説明する。

1. タイムステップ管理と降雨生成

本モデルでは、10 カウントのタイムステップの間に、降雨として発生した水粒子の動きを計算する。

- 降雨流出シミュレーションの入力データとなるハイトグラフを、各タイムステップの降雨強度として設定する。降雨強度の最大値は 30 である。
- 1タイムステップの間に、降雨生成スキームが 100 回繰り替えされる。降雨生成スキームでは、「降雨強度/30」の確率で降雨粒子が斜面上空のランダムな位置 ($x=[240\sim160]$ の乱数、高度は $y=160$ で一定) に生成される。つまり、1ステップの間に降雨強度として設定した値の約 3.3 倍の水粒子が生成されることになる。
- 降雨生成スキームが 100 回繰り替えされると次のタイムステップに進み、10 番目のタイムステップが終わるとシミュレーションが終了する。
- なお、降雨生成スキームの繰り返し回数によってタイムステップを管理するのは、ゲーム画面内に存在する水粒子の数が多くなると計算処理が遅くなるため、実時間での時間管理に障害が発生するためである。
- 生成された降雨粒子は、1 フレームあたり Y 方向に -10px の速度で地表面まで降下する。

2. 降雨損失と浸透

降雨粒子が地表面に到達すると、土地被覆タイプに応じてことなる確率で降雨損失が発生したあとで、地表面に浸透する。

- 土地被覆タイプが草地および森林の場合は、降水粒子が土地被覆オブジェクトに触れた時に 30%の確率で降雨損失となり降雨粒子が消滅する。消滅しなかった降雨粒子は、雨滴から球形の水粒子に見た目を変えて地表面に浸透し、1フレームあたり Y 方向に -1px の速度で土壌まで降下していく。
- ただし、土地被覆タイプが森林の場合は、水粒子が降下中に樹幹に触れている間は樹幹遮断が発生して降雨粒子が消滅する。樹幹遮断の発生率は、森林では降雨粒子のうち約 40% が土壌に到達するように調整した。(具体的には、降雨粒子が樹幹に触れている場合、1フレームあたり 3%の確率で樹幹遮断が発生するとした)
- 土地被覆タイプが都市の場合は、降雨粒子が土地被覆オブジェクトに触れた時に 10%の確率で降雨損失が発生するとし、都市では自然状態に比べて流出率が高くなることを表現した。
- また、都市では水粒子が降下せずに、土地被覆オブジェクトの上を滑るように1フレームあたり X 方向に 15px 、Y 方向に -2px の速度で移動することで、斜面方向の速い表面流を表現した。

3. 地中水移動と河川への流出

地表面から浸透した水粒子が土壌に浸透すると、地中水移動スキームに移り、河川へ流出するまでの水粒子の動きを計算する。

- 水粒子が土壌中にあるときは、1フレームあたり X 方向に 0.1pm 、Y 方向に -0.5px の速度で水

粒子が移動する。

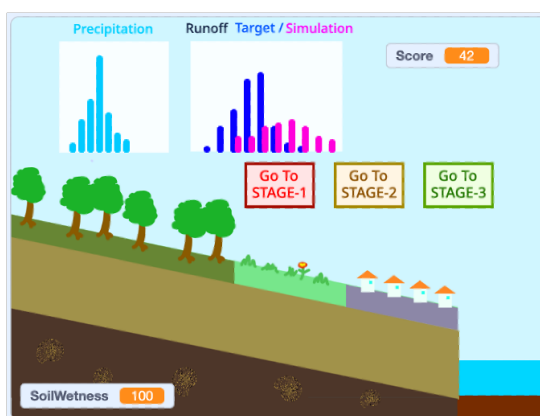
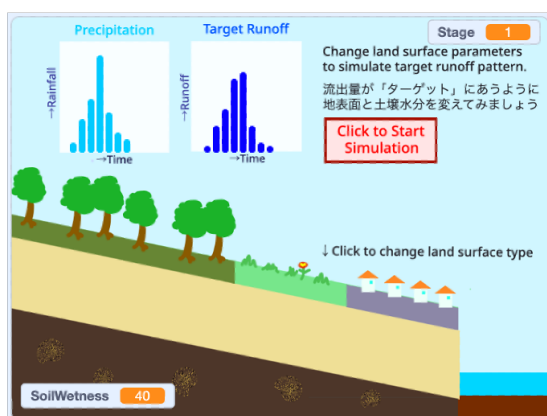
- 土壌には土壌水分 θ が 0～100 %の範囲で定義されており、水粒子が土壌に触れているときは 1 フレームあたり $3 \times (100 - \theta) / 100$ %の確率で水粒子が土壌に吸収されて消滅し土壌水分が 2%上昇する。土壌が乾燥しているほど水粒子が吸収されて流出量が減り、土壌が飽和に近づくと流出する成分が増えることを表現している。なお、土壌水分の初期値はシミュレーション開始前に 20%刻みで設定できる。
- 土壌中を降下した粒子が基岩にたどり着くと、基岩には浸み込まずに 1 フレームあたり X 方向に 3px,Y 方向に-0.2px の速度で側方流として基岩上を河川に向かい移動する。
- 表面流もしくは側方流によって水粒子が河川スプライトに触れると、その時点のタイムステップにおける流出とカウントされて、水粒子が消滅する。

4. ゲームの流れ

降雨流出モデリングゲームは、シミュレーション前の地表面状態の調整、シミュレーションの実行、シミュレーション後の結果表示と3つのステップに分けられる。Scratch のゲームが始まると

シミュレーション前の地表面状態の調整ステップ(図: 左側)では、入力降雨データのハイトグラフが水色棒グラフで、目標とする流出のハイドログラフが青色棒グラフで示される。

- 直感的に入力と出力の関係性を理解してもらう意図で、単位はあえて表示しなかったが、タイムステップ1カウントあたりに生成が期待される降雨粒子数と河川に流入する水粒子数を示している。
- プレイヤーは、入力ハイトグラフと目標ハイドログラフの形状の違いを見ながら、土地被覆スプライトの種類(森林・草地・都市)と土壌スプライトの土壌水分の初期値(0-100%まで 20%刻み)で調整する。
- 地表面状態の調整ができれば、「Click to Start Simulation」ボタンを押すことで、シミュレーションの実行ステップに移り、2.1-2.3 節で説明した流れで計算が実行される。シミュレーションは1回約 35 秒で実行できる。



シミュレーションが終了すると結果表示ステップに移行し(図: 右側)、ハイトグラフと目標ハイドログラフに加えて、シミュレーション結果のハイドログラフがピンク色で表示され、スコアが計算される。

- さらに、目標ハイドログラフとシミュレーション結果の類似度が計算され、スコアとして表示される。
- スコアは Nash-Sutcliffe 係数をもとに、以下の式で求めている。ただし、 R_{tar}^t と R_{sim}^t はタイムステップ t における目標流出量とシミュレーション流出量、 $\overline{R_{tar}}$ は目標流出量の 10 タイムステップ間の平均値である。

$$Score = 100 - 50 \times \frac{\sum_{t=1}^{10} (R_{tar}^t - R_{sim}^t)^2}{\sum_{t=1}^{10} (R_{tar}^t - \overline{R_{tar}})^2}$$

- スコアは多くのケースで 0-100 の範囲に収まるように調整されている。
- 場合によってはマイナスの値をとることもありうるが、これは想定外のスコアが表示されることで「そもそもスコアはどうやって求めているのだろう」とユーザーに興味を持ってもらうことを意識している。

入力ハイトグラフと目標ハイドログラフは、正解となる地表面状態に対して 90 点以上のスコアがでるように設定している。

- ただし、降雨生成・降雨損失・土壌による水分吸収は、乱数を用いた確率過程として表現しているため、同じ地表面条件でシミュレーションを行っても同じスコアが得られるとは限らない。正解となる地表面状態でも、ごく稀に 90 点を下回ることがありうる。
- また、目標ハイドログラフは、開発者によるテストシミュレーションをもとに設定しているため、まったく同じ結果が得られる確率は極めて低いためスコアが 100 点となるケースは実質的にはあり得ない。
- ゲームについて説明する際は、これらのスコアの特性を理解しておいたほうが良いと考えられる。

スコア表示後にステージを選択するボタンが表示されて、クリックすることで地表面状態を調整するステップに戻る。

- 今回は、あえてゲームクリアとなる合格スコアを設定しなかった。少しでも良いスコアを目指して繰り返しシミュレーションをすることで、地表面状態と流出パターンとの関係の理解が進むことを期待している。
- オープンキャンパスの時点では、入力降雨量と目標流出量が異なる3つのステージを作成した。
- 1つ目のステージは都市化の影響、2つ目のステージは森林と土壌水分の影響、3つ目のステージは上流側と下流側に降った雨が時間差を持って河川に到達すること、を学べるように設計している。