

Snap! のこと II

齋藤文康

2025 年 12 月 27 日

容量の関係で、「Snap! のこと」で扱っていた「再帰呼び出し」以降の項目を別文書にしました。

私の理解不足で間違っているところがある可能性もあります。正しい内容になるよう努めましたが、スクリプトを含め無保証です。

目 次

1 再帰呼び出し	3
1.1 再帰呼出しの例	3
1.1.1 階乗	3
1.1.2 ハノイの塔	3
1.2 再帰呼び出しの使用	4
1.2.1 繰り返し	4
1.2.2 my length	5
1.2.3 リストをリポート	7
1.2.4 take と drop	8
1.2.5 my contains	9
1.2.6 my uniques	9
1.2.7 my index of () in ()	10
1.2.8 リスト要素の巡回	11
1.2.9 指定の要素に対する delete と replace	13
1.3 = と identical	15
1.3.1 クイックソート(整列 / 並べ替え)	17
1.3.2 フィボナッチ数列	20
1.3.3 末尾再帰	22
2 高階関数	24
2.1 高階関数型プロックの基本	24
2.2 高階関数型の take と drop	26
2.3 操作を指定するリストの巡回	27
2.4 foldl, foldr	29
2.5 unfold	34
2.6 カリー化	36

1 再帰呼び出し

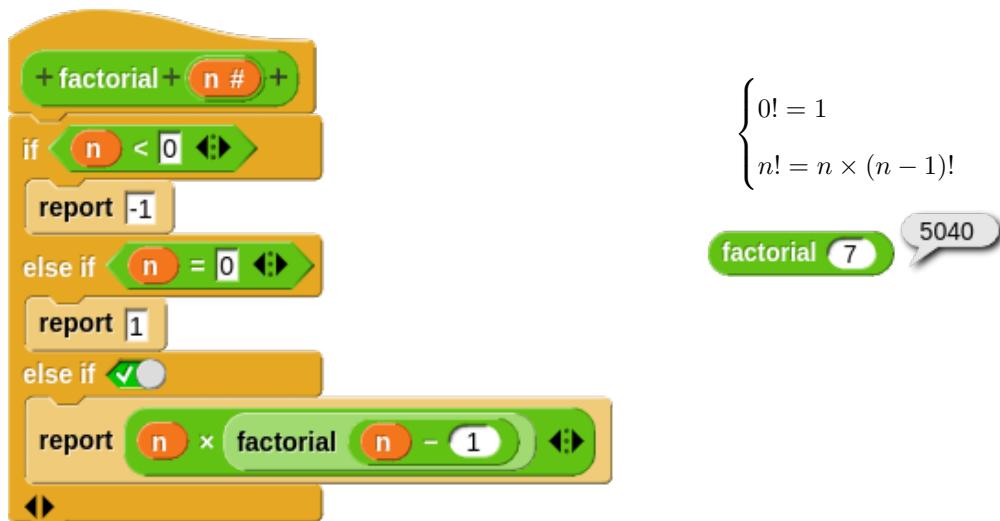
再帰、再帰呼出し（recursive call）は作成したブロックの中で自分自身を呼び出す（実行する）ものです。関数型プログラミングでは再帰呼び出しが繰り返し処理の手法になっています。

1.1 再帰呼出しの例

Scratch では値を返せなかったので、階乗やフィボナッチ数列はできませんでした。

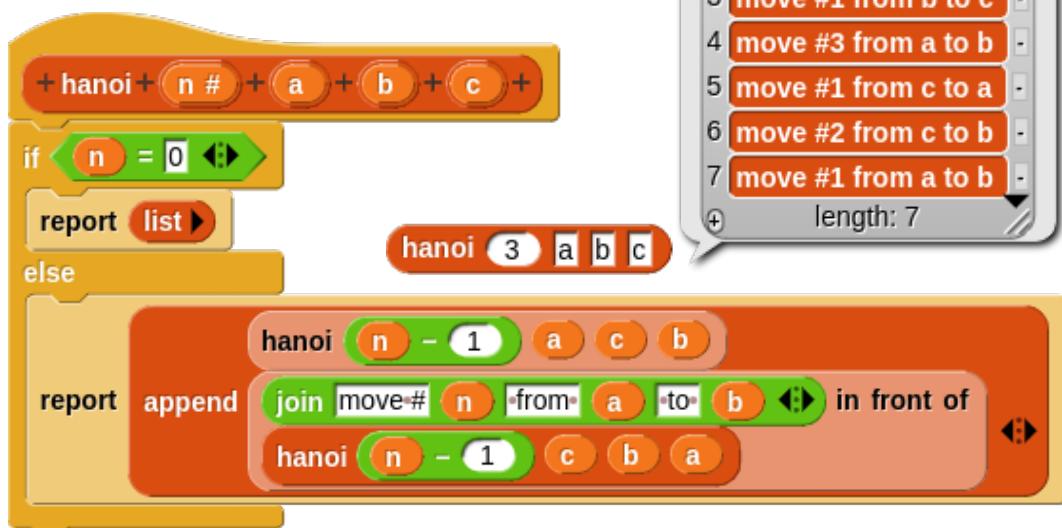
1.1.1 階乗

factorial 階乗は再帰呼出しの例としてよく使用されます。



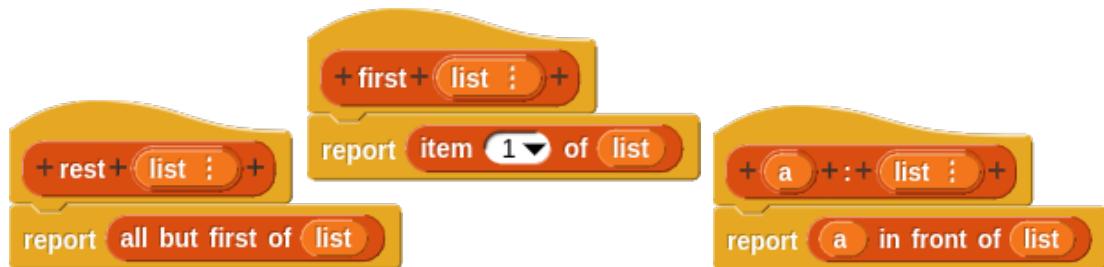
1.1.2 ハノイの塔

ハノイの塔のパズルも再帰呼び出しの例としてよく使用されます。



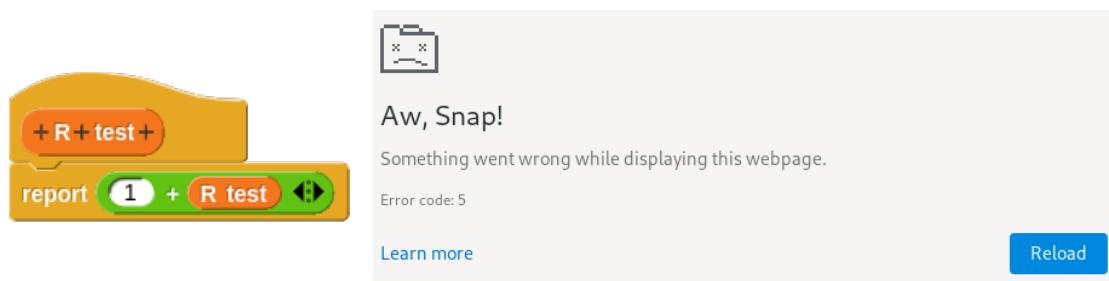
1.2 再帰呼び出しの使用

スクリプトの表示面積を小さくするために、3つのブロックを定義して使用します。



1.2.1 繰り返し

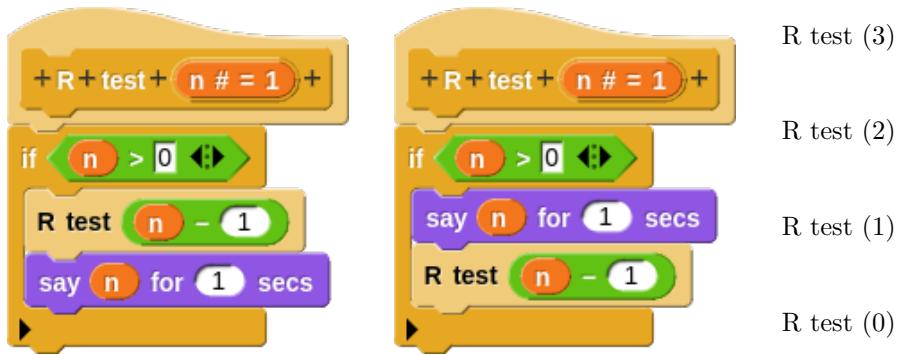
これはただ自分自身を呼び出すものです。(エラーになるので実行しないでください)



定義ブロックはどこかのスクリプトから呼び出されて実行されるわけですが、実行終了後に呼び出し元に帰る必要があります。呼び出し元のスクリプトの実行を継続するための情報を保存しておき、それを取り出してそこに復帰します。上記のスクリプトでは自分自身への無限呼び出しになり、情報を保存するための場所がなくなってしまいます。ただの無限ループというだけの問題ではありません。したがって、再帰呼び出しでは再帰呼び出しを終了するためのスクリプトが必要です。指定の回数繰り返す処理ならば、回数が 0 が終了条件です。リスト操作では、空リストが終了条件になります。リスト操作で Reporter 型のブロックを作成する場合、数値型では 0 を、リスト型では空リストを、Predicate 型のブロックを作成する場合は false を原則としてリポートして再帰を終了させます。空リストの場合は、`list` でも同じことです。

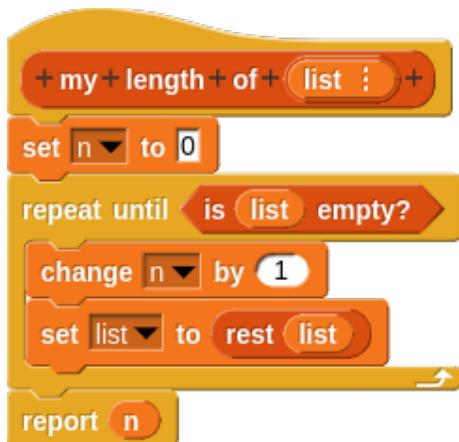


次は指定した回数だけ何かを行う定義ブロックです。n = 0 が終了条件になります。n の値を減らしながら以下の矢印(→)のように自分自身を呼び出していきます。この定義ブロックは 0 以下だと何もしないで呼び出し元に戻ります。呼び出し元に戻るを繰り返し、一番最初の呼び出し元に戻ったら終了です。再帰呼び出しブロックの位置により n の値はカウントアップにもカウントダウンにもなります。



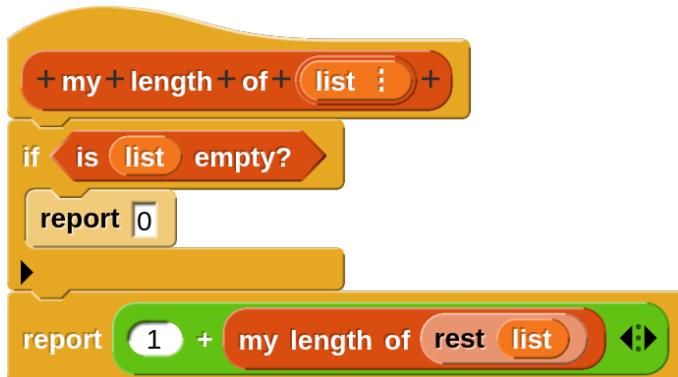
1.2.2 my length

リストの要素数を求める **length** ブロックを **repeat until** ブロックを使って作ってみます。要素数が 0 になるまで要素を一つずつ削除しながらカウントすることで求めます。

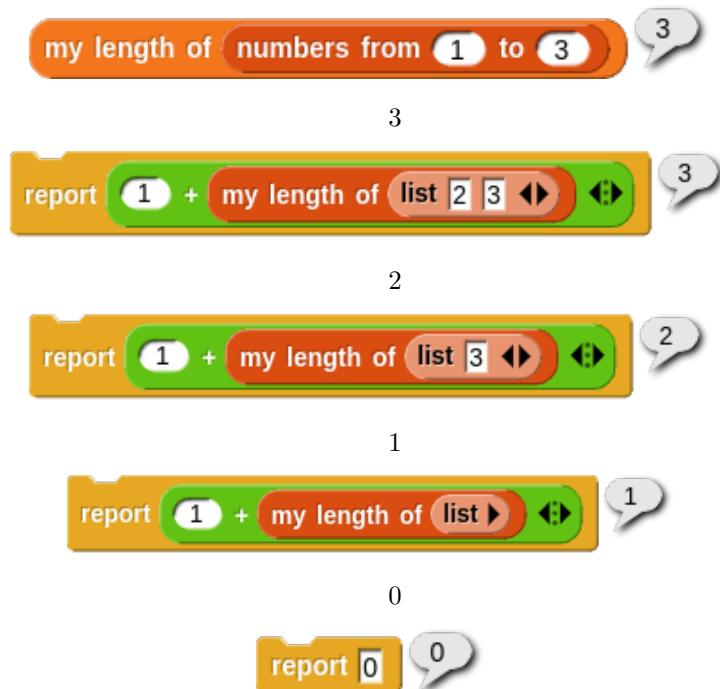


再帰版です。カウント用の変数が無いので理解しにくいですが、**report** が返す値がカウント用変数の役割を果たしています。**my length of rest list** でリストが空になるまで再帰呼び出しされて、0, 1, 2, ... と、**report** が返す値 +1 を積み重ねて、結果的に 0 からのカウントアップで要素数を求めることができます。自分自身を呼び出すことを除けば **repeat until** 版と同じやり方になります。

[リストの先頭要素を処理する。2 番目以降のリストを引数として自分自身を呼び出す。] ということをリストが空になるか条件が成立するまで、処理を行うのが再帰処理の基本です。この場合の処理は、リポートされた値（要素数）に 1 を加えているだけです。



実行される様子を見てみます。 で示す順に再帰呼び出しが実行され、0 と値が確定すると、
で示す順に返された値に 1 を加えて呼び出し元に値を返していきます。最終的に値は 3 になります。



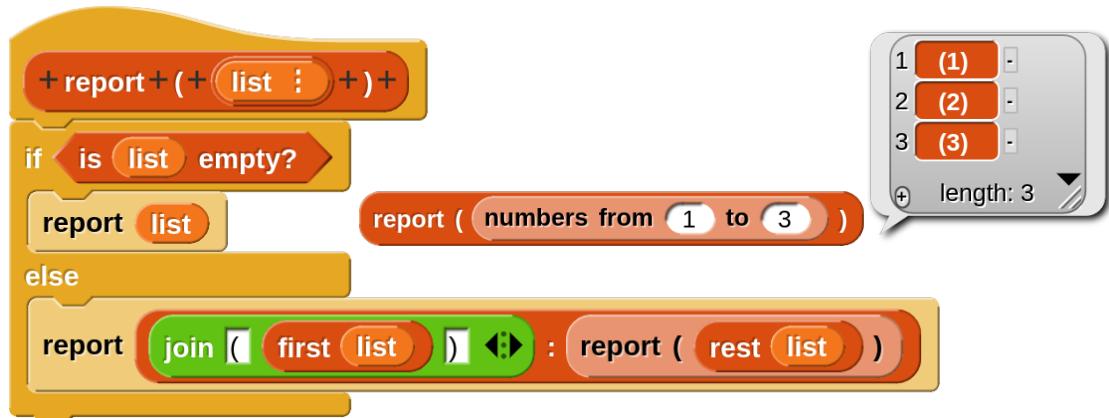
デバッグモードで 1 ステップ実行してみると、リストが空になると次のように、`my length of ()` が 0 を返り値としてこの場所に戻ってきます。それぞれの呼び出しで 1 を加えているのでカウントアップされています。



$1 + (1 + (1 + 0)) = 3$ のようにして、返ってきた値に対して加算が行われて終了します。

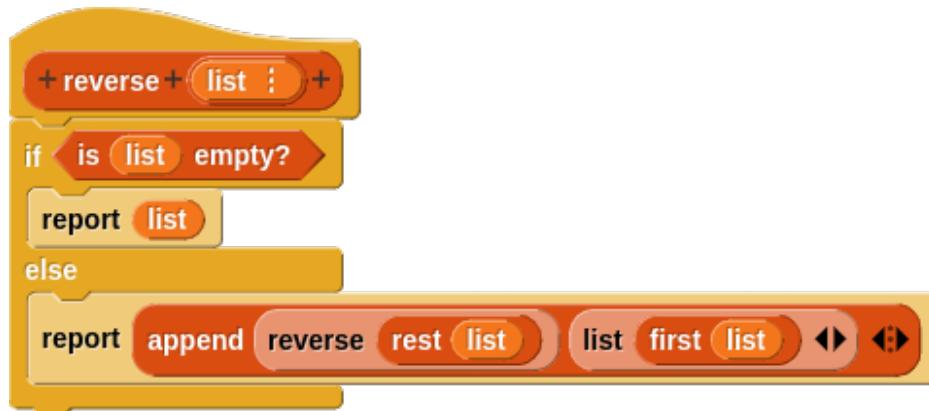
1.2.3 リストをリポート

リストの先頭の要素に対して操作し、その残りのリストに対して再帰呼び出しをした結果を加えることをリストが空になるまで行います。mapを行ったような結果になります。



リストの先頭の要素から操作したものを順に加えているのでこのようになりました。

残りのリスト操作の結果に先頭の要素を加えるようにすると、逆順リストが得られます。



appendはリスト同士を一つにするものなので、先頭の要素を [list ::] の中に入れてリストにしています。(ver.11では要素だけでもよくなりました。)

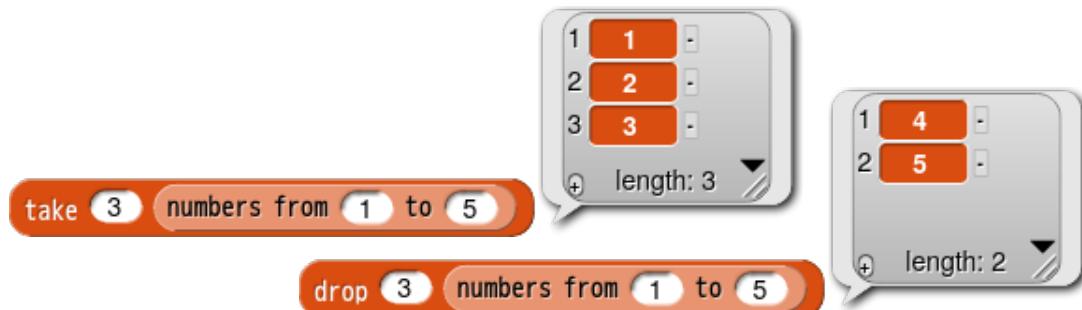


reverse (1 2 3)	[L2]	+	(1)	L3 = (3 2 1)
reverse (2 3)	[L1]	+	(2)	L2 = (3 2)
reverse (3)	[L0]	+	(3)	L1 = (3)
reverse ()	()			L0 = ()

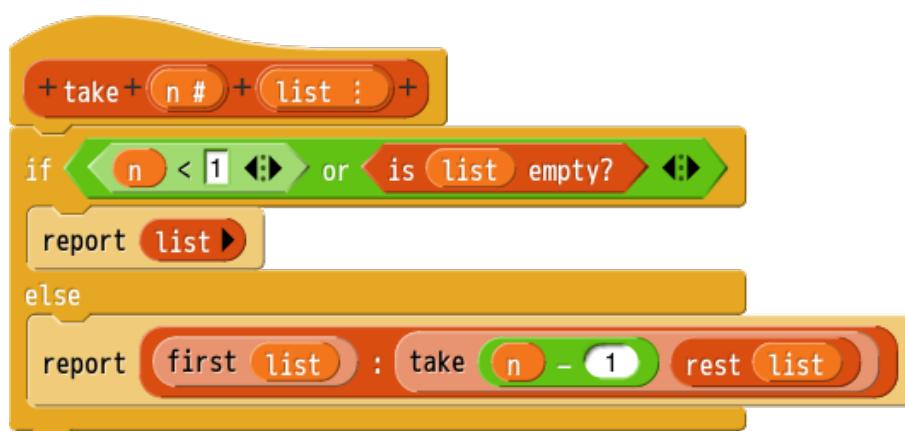
デバッグモードで1ステップ実行して眺めてみると、実行の様子が見られておもしろいです。

1.2.4 take と drop

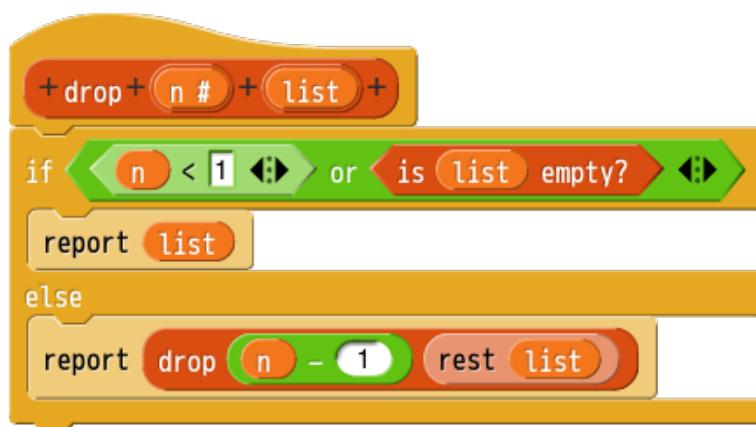
Haskell 言語にはリストの先頭から n 個の要素を取り出す `take` と、リストから先頭の n 個の要素を取り除いたリストを返す `drop` があります。以下のような動作になります。



定義です。`take` では先頭の要素に n が 0 になるまで次の要素を追加することを再帰を使って繰り返します。 n が 0 の時と引数のリストが空の時は空リストを返します。



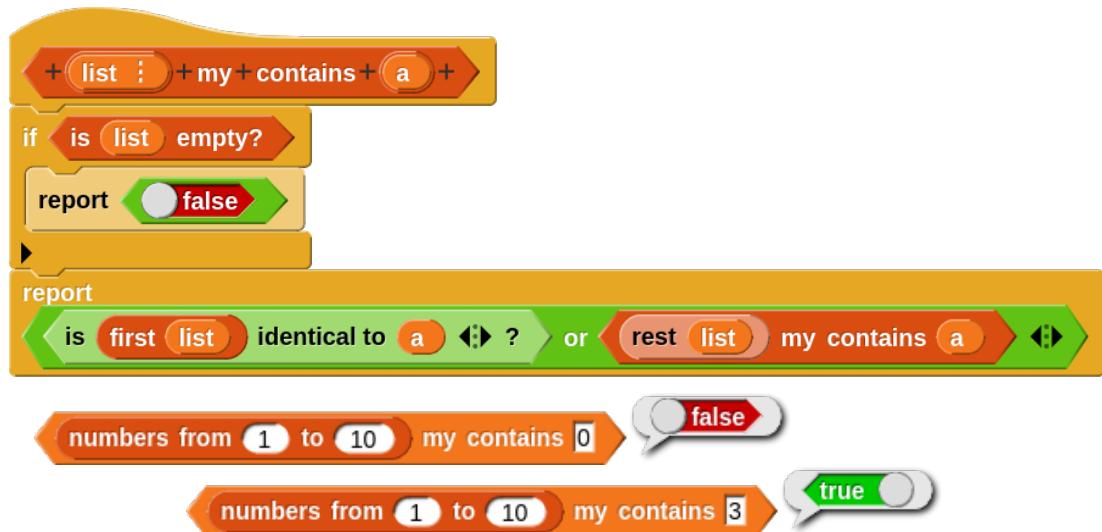
`drop` では n の値が 0 になるまで n の値を -1 しながら先頭以降のリストに対して再帰を繰り返します。 n が 0 の時に返すのは引数であるリスト、つまり求めるリストです。引数であるリストが空の場合は空リストを返すことになります。



1.2.5 my contains

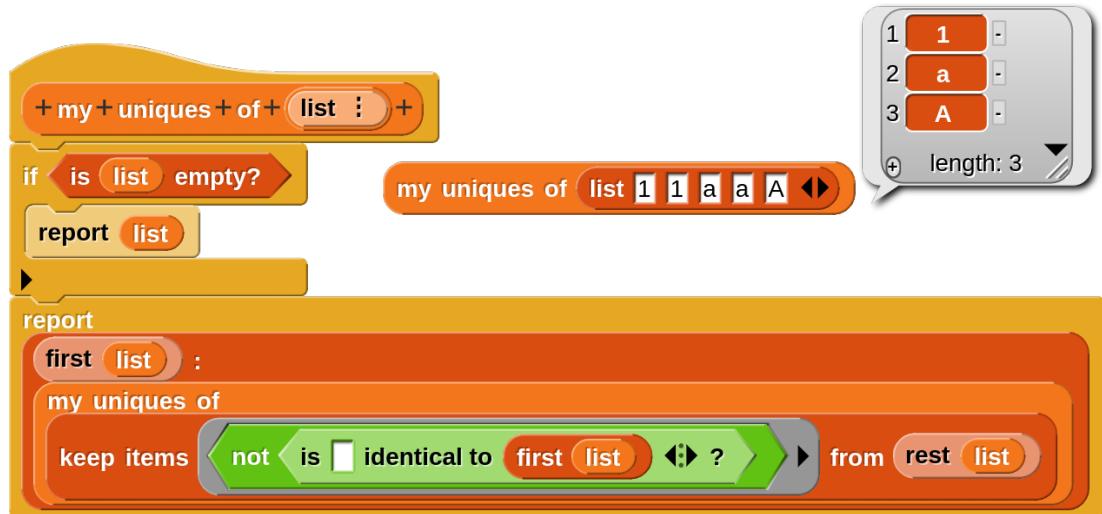
リストの中に指定の要素が存在するかを求める contains ブロックを作ります。

リストの先頭が指定の要素ならば true を返します。そうでないならば、残りのリストに対して同じ操作を繰り返します。



1.2.6 my uniques

リストから重複を取り除く **uniques ▾ of** を再帰呼び出しで定義してみます。大文字小文字を区別するようにしています。

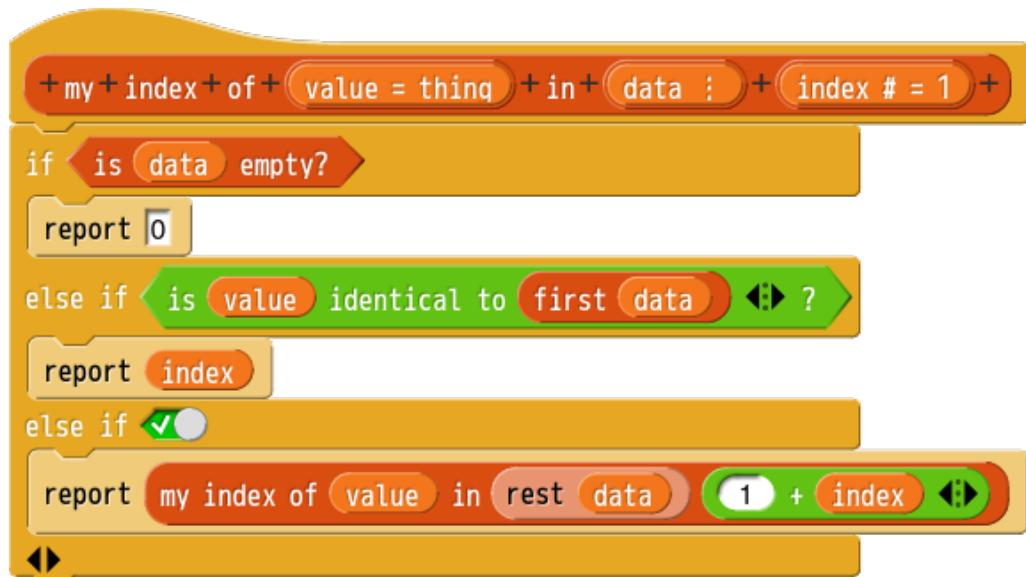


keep を使って先頭の要素と同じでないものを集めることを再帰的に行っています。

因みに、**not [is [] identical to [first [list :]]]** を
not [mod [first [list :]] = 0] にして、**numbers from [2] to [100]** を引
数として実行すると 100 までの素数列が求められます。

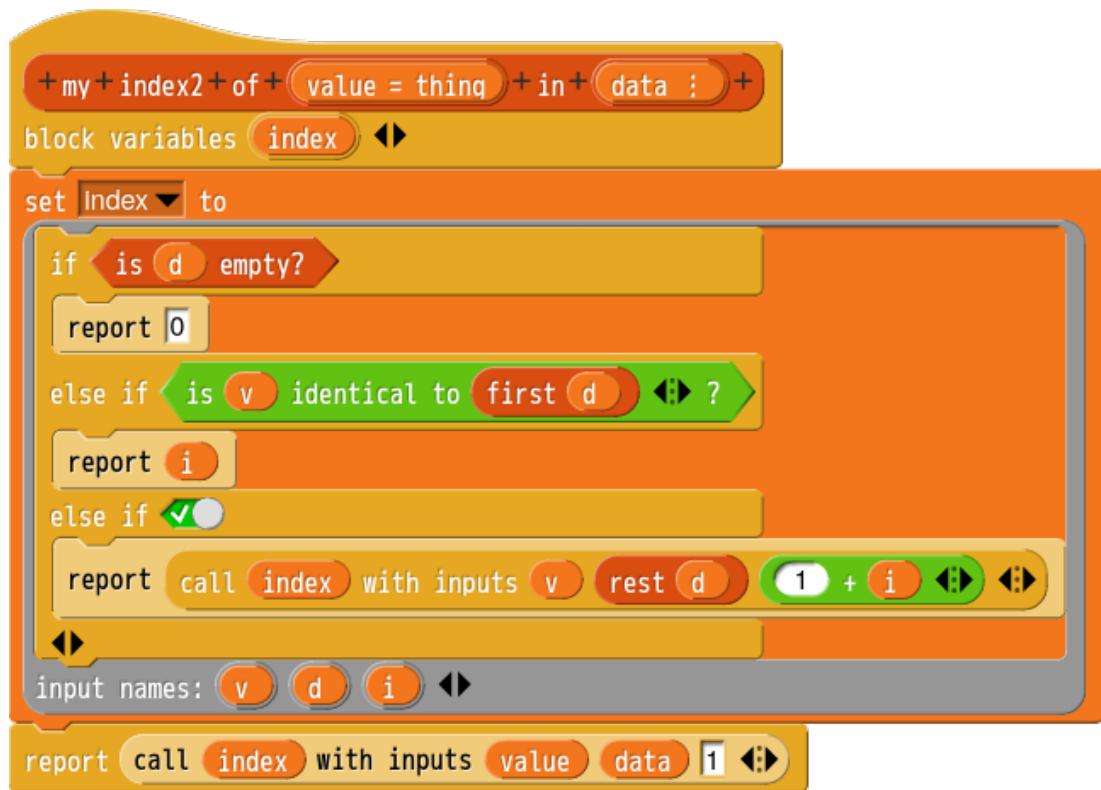
1.2.7 my index of () in ()

`index of [thing] in [list]` の大文字小文字を区別する版を再帰呼び出しで作ってみます。インデックス値を +1 しながら走査する必要があるので値を渡していきます。



`my index of [A] in [split aazz11000AA by letter ▾ 1] [10]`

次のように局所定義ブロックにすると、プリミティブブロックと同じかたちになります。



`my index2 of [A] in [split aazz11000AA by letter ▾ 1] [10]`

1.2.8 リスト要素の巡回

要素にリストを含むリストに対して length を使用すると、内部のリストの分はカウントしません。



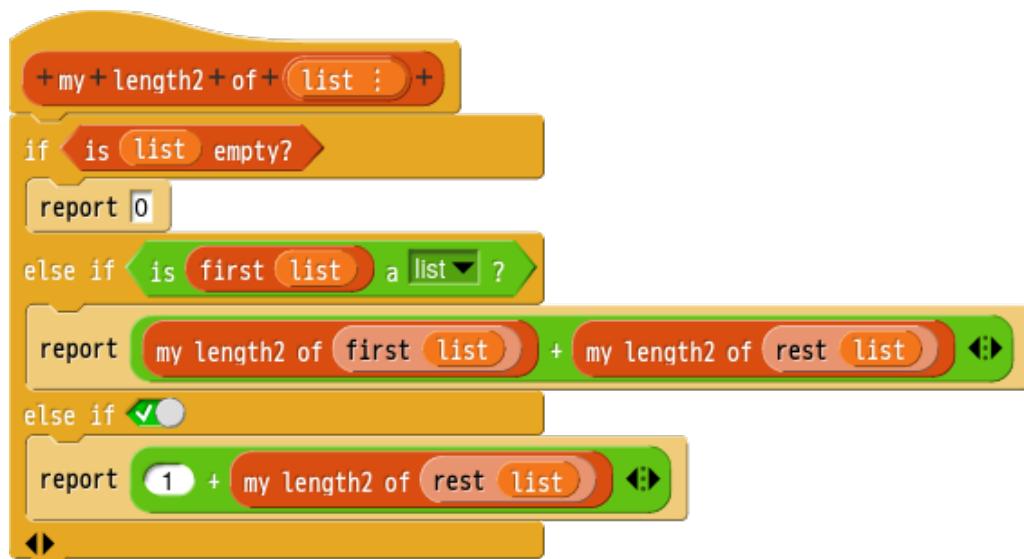
これは my length も同様です。



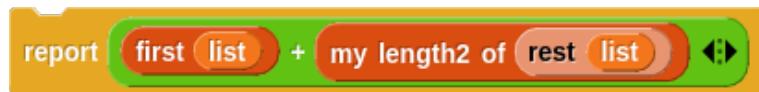
flatten ▾ of 後に length でもできますが、再帰を使って内部の要素に対してもアクセスしてみます。

処理の内容は次のようになります。

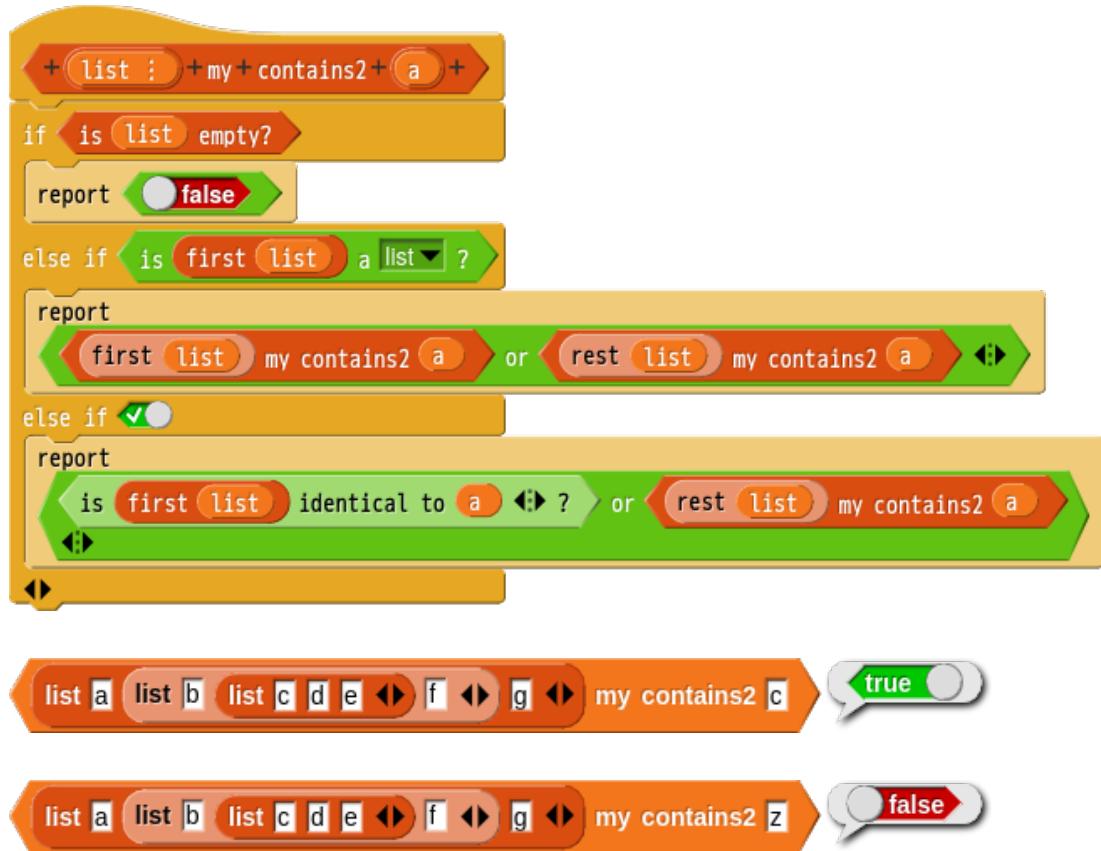
- もしリストが空ならば 0 をリポートする。
- もし先頭の要素がリストならば、そのリストに my length2 をしたものと残りに対して my length2 をしたものを加える。
- そうじゃなかったら、残りに対して my length2 をしたものに 1 を加える。



最後の report ブロックで 1 を加えるのではなく、要素の値を加えるようにすると合計を求ることができます。その場合のブロック名は sum of のようなものになると思いますが。



my length2 ブロックを応用すると my contains2 ブロックを作成することができます。true か false かを扱うので演算子は「or」を使用します。なお、is identical to ブロックの代わりに = ブロックを使用すると、マニュアル XI. Metaprogramming A. Reading a block 内の callers of ブロックで使用されている deep contains ブロックになります。



「and」ブロックでは左側のスロットから順にテストして、false ならば残りのスロットのテストは行いません。それに対して、「or」ブロックでは左側のスロットから順にテストして、true ならば残りのスロットのテストは行いません。



そのため、リストの先頭からテストしていくって、指定の要素が見つかればリストの残りはテストせずにそこで true を返して終了になります。



1.2.9 指定の要素に対する delete と replace

リストからある要素を取り除いたリストを求めるには `keep` を使えばできます。しかし、リストの要素がリストの場合はその内部までは対応しません。

```

keep items [not [index = 2?]
from [list [2] [3] list [1] [2] [9] [2]]]

```

my length2 を応用した再帰版 delete です。

```

+delete+ [a] + of + [list :]
if [is [list] [empty?]]
report [list]
else if [is [first [list] a] [list] ?]
report [delete [a] [of] [first [list]] : [delete [a] [of] [rest [list]]]]
else if [is [first [list]] [identical to] [a] ?]
report [delete [a] [of] [rest [list]]]
else if [checkmark?]
report [first [list] : [delete [a] [of] [rest [list]]]]
end

```

```

delete [2] [of] [list [2] [3] list [1] [2] [9] [2]]

```

1	3
1	1
2	
3	9

length: 1
length: 3

リストを含まないリストの要素の入れ替えは map を使えばできますが、次のように内部のリストまで 2 を 7 に入れ替えることはできません。

5	A	B
1	7	
2	3	
3	1	2
4	9	
5	7	

```
map if [ = 2 ] then [ 7 ] else [ ] over list [ 2 3 ] list [ 1 2 ] [ 9 2 ]
```

指定の要素だった場合、それをコピーしないでリストの残りを続行すれば delete になりますが、置き換える要素をコピーすれば replace になります。

```
+ replace + old + with + new + of + list : +
if is list empty?
report list
else if is first list a list? [
    report replace old with new of first list :
    report replace old with new of rest list :
]
else if is first list identical to old? [
    report new : replace old with new of rest list
]
else if [
    report first list : replace old with new of rest list
]

```

5	A	B
1	7	
2	3	
3	1	7
4	9	
5	7	

```
replace 2 with 7 of list [ 2 3 ] list [ 1 2 ] [ 9 2 ]
```

1.3 = と identical

二つの値が同じかどうかを調べる ですが、

true や true

true

を同値として扱うと不都合な場

合があります。

その場合に使えるのが、 is [] identical to [] ? です。

false

false

上記は両入力スロットの値についてテストしましたが、リストに対する場合はリストの在り処が同じかどうかのテストをするようです。次は要素値は同じですが、別々に存在するリストです。

false

x と a は同じリストを参照しています。

true

false

リストの要素を変える場合は元のリストを修正するのではなく、新しくリストを作成してそれを指すようにするようです。a は元のリストを指したままなので false になります。

リストに関しても値の同値性だけをチェックするブロックを作ってみます。

「identical」ではなく「==」としてみました。

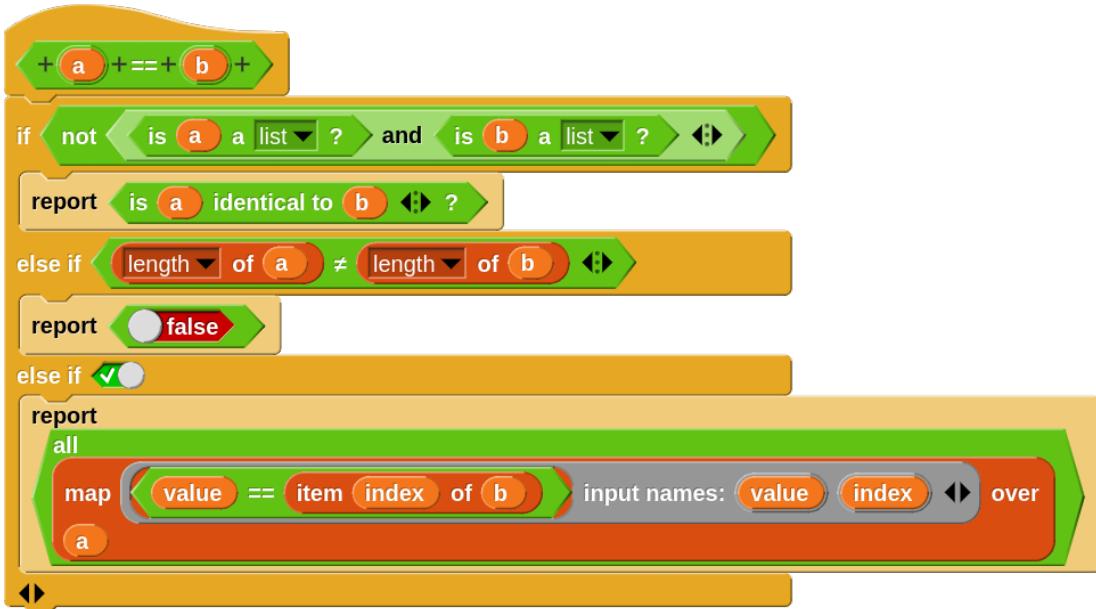
false false

true

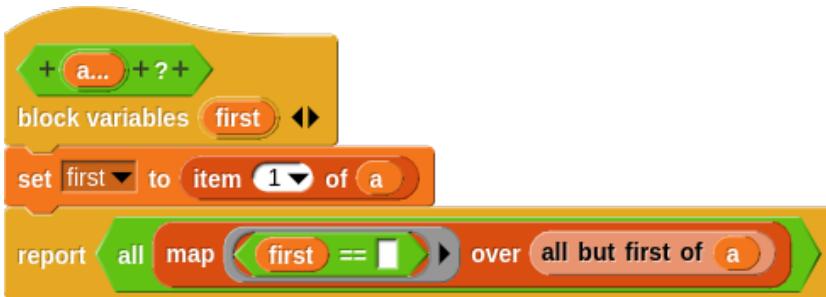
false

false

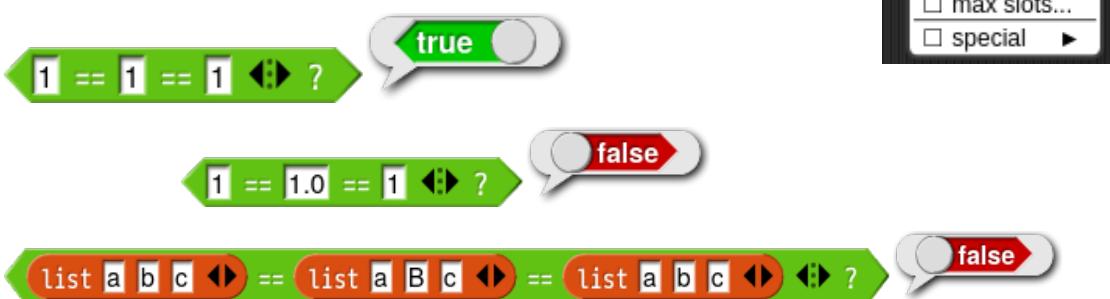
スクリプトです。a と b は Any type 型です。リストの要素にリストを含むものに対処するため再帰呼び出しを使用しています。map を使うとすべての要素をテストすることになります。なお、all は の右端の三角マークの部分に map をドロップしたものです



`is () identical to ()` では 入力スロットを追加できます。 を使って次のようにすると、同じことができます。a を Any type 型 Multiple inputs (value is list of inputs) にします。

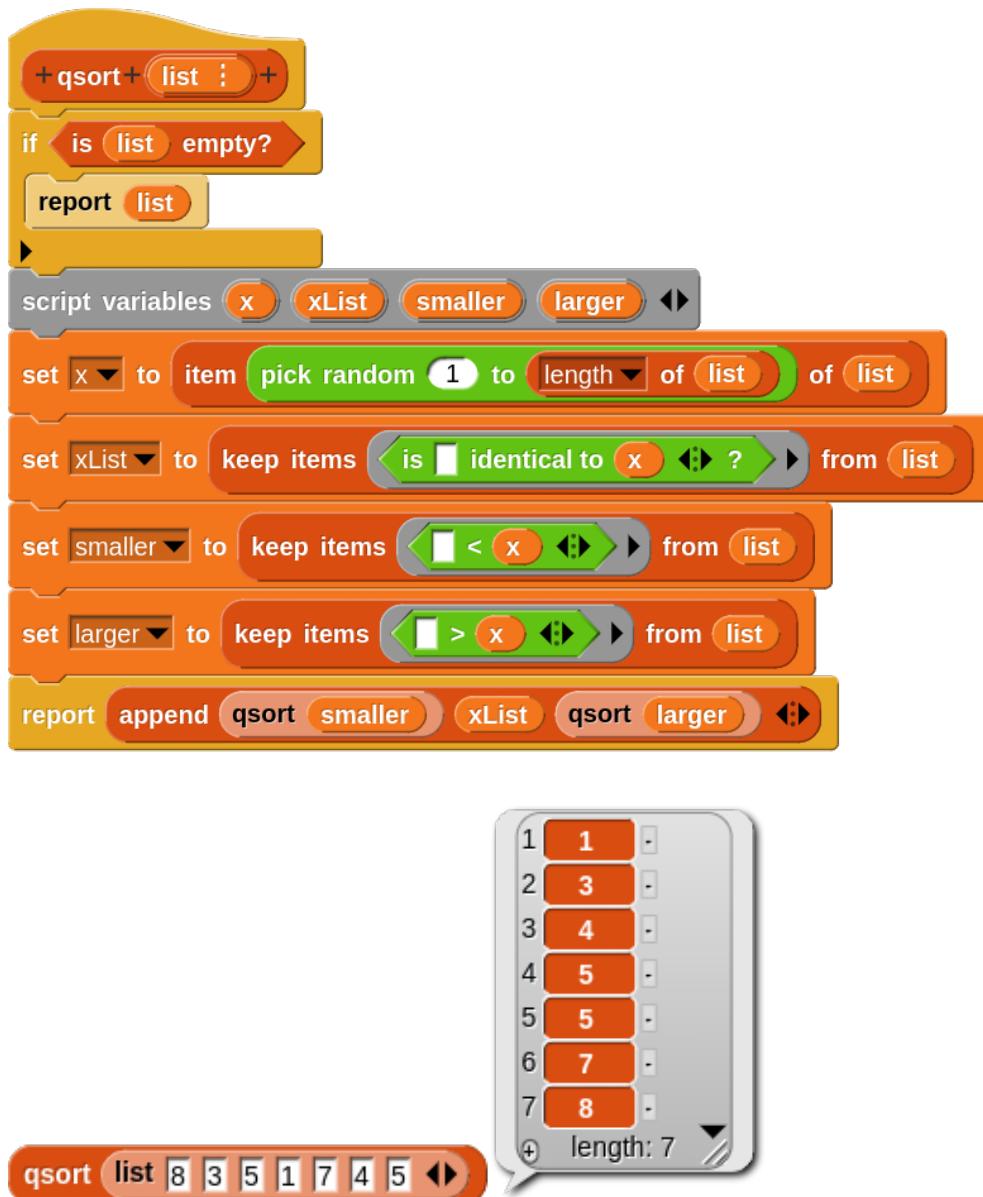


変数の設定で、入力スロットを増やす時に間に挿入する文字列 separator を `==` に、入力スロット数 0 の場合の文字列 collapse を `all ==` に、初期値としての入力スロット数 initial slots を 2 にします。



1.3.1 クイックソート（整列 / 並べ替え）

クイックソートのアルゴリズムは有名でよく題材として扱われています。リストの中から任意の値を選び、それよりも小さい値のグループ、その値、大きい値のグループに振り分ければ選択された値の位置付けができます。この操作を小さい値のグループ、大きい値のグループに対して再帰的に繰り返していくば最終的に並べ替えが完了します。任意の値の選び方として random ブロックを使いましたが、先頭の値でも構いません。Snap! には keep ブロックがあるので、リスト要素の入れ替えなどに煩わされず、アルゴリズムをそのまま表したように割と分かりやすいスクリプトが作れます。

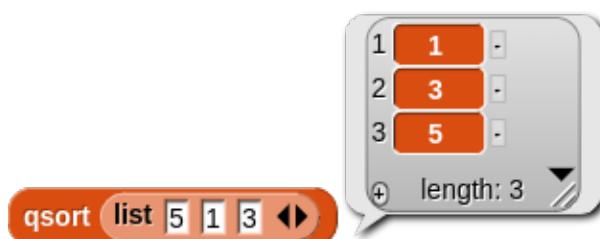


このように自分自身を複数参照することを多重再帰と言います。

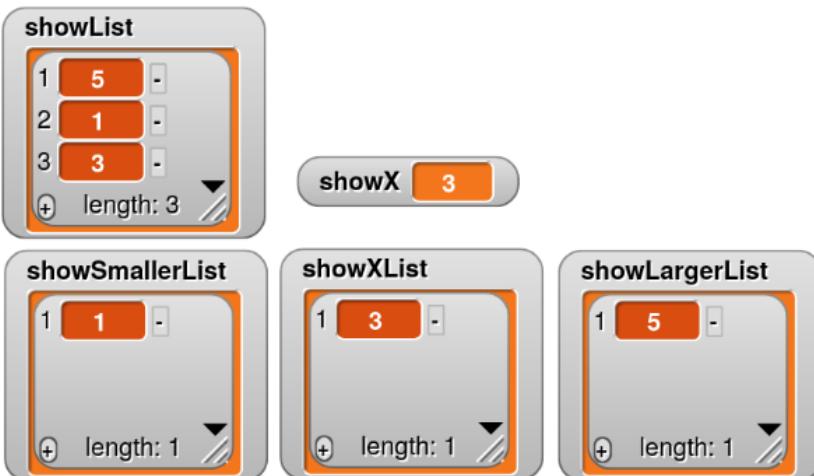
次のように showList, showX, showXList, showSmallerList, showLargerList のグローバル変数を作成し、リストを通して値を表示すると操作の様子が見られます。



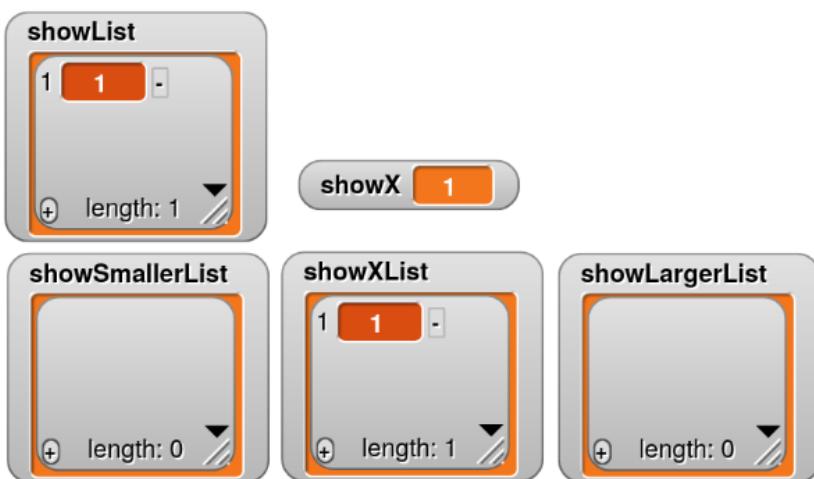
リストの値表示のたびに pause all になります。▶ をクリックして続行してください。



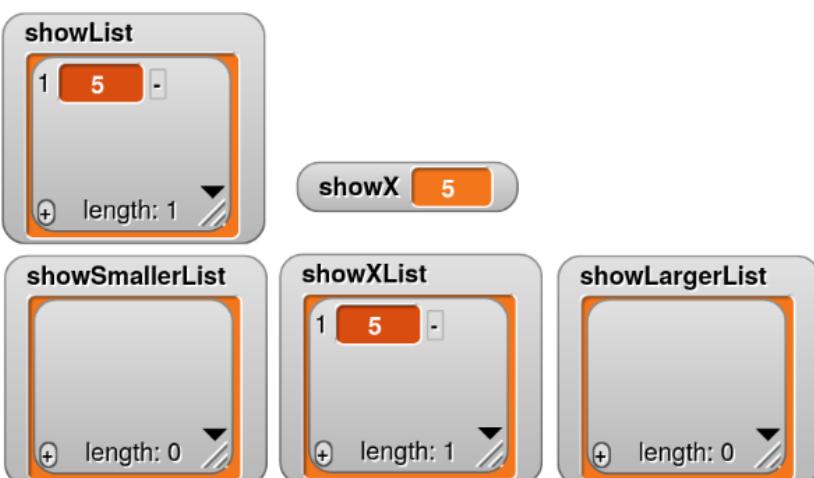
最初に選択された値が 3 だった場合です。



3 より小さい値のグループ処理



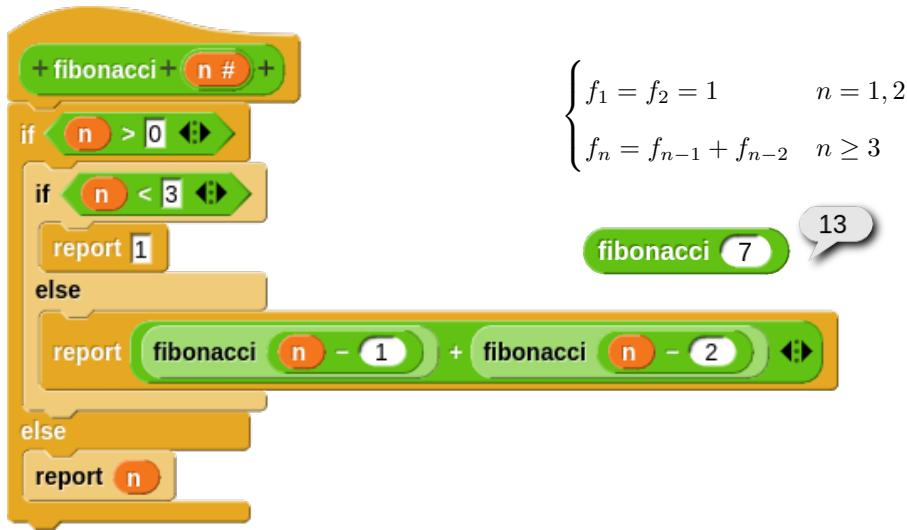
3 より大きい値のグループ処理



この場合要素数は 1 でしたが、それぞれのグループに対して再帰的に処理されます。

1.3.2 フィボナッチ数列

再帰の例としてよく示されるフィボナッチ数列です。

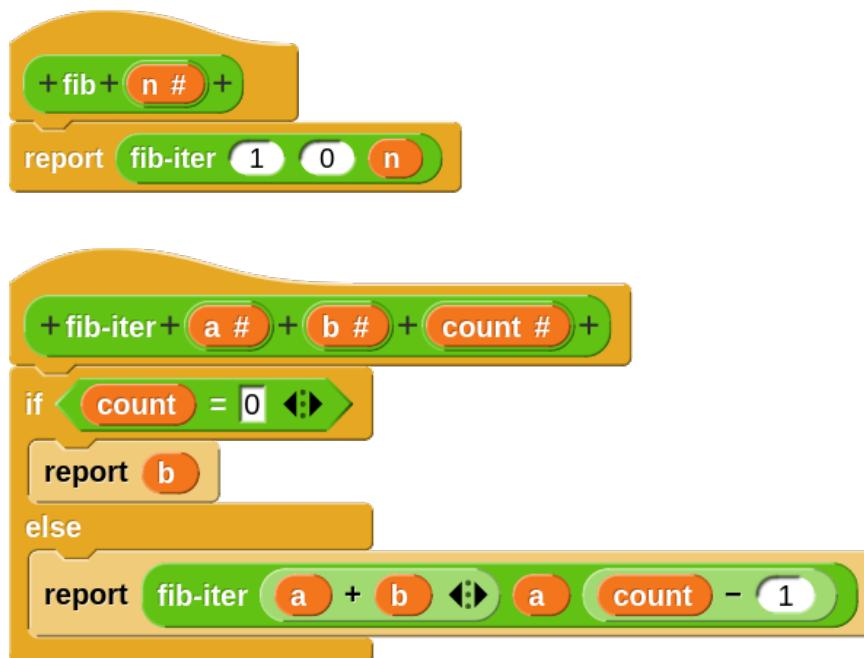


これは $(n - 1)$ と $(n - 2)$ を引数にして 2 度再帰呼び出ししています（多重再帰）。そのため、 n が大きくなると時間がかかるてしまいます。

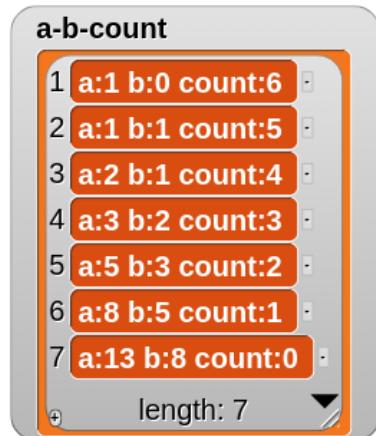
例えば $\text{fib}(6)$ を求める場合は、右のようになりますが、 $\text{fib}(6)$ で必要とする $\text{fib}(4)$ は $\text{fib}(5)$ で処理済みで、 $\text{fib}(5)$ で必要とする $\text{fib}(3)$ は $\text{fib}(4)$ で処理済み … ということで、処理済みのものはその値を渡してやれば済むのでその分の再帰呼び出しの必要がなくなります。

$$\begin{aligned}
 \text{fib}(6) &= \text{fib}(5) + \text{fib}(4) \\
 \text{fib}(5) &= \text{fib}(4) + \text{fib}(3) \\
 \text{fib}(4) &= \text{fib}(3) + \text{fib}(2) \\
 \text{fib}(3) &= \text{fib}(2) + \text{fib}(1) \\
 \text{fib}(2) &= 1 \\
 \text{fib}(1) &= 1
 \end{aligned}$$

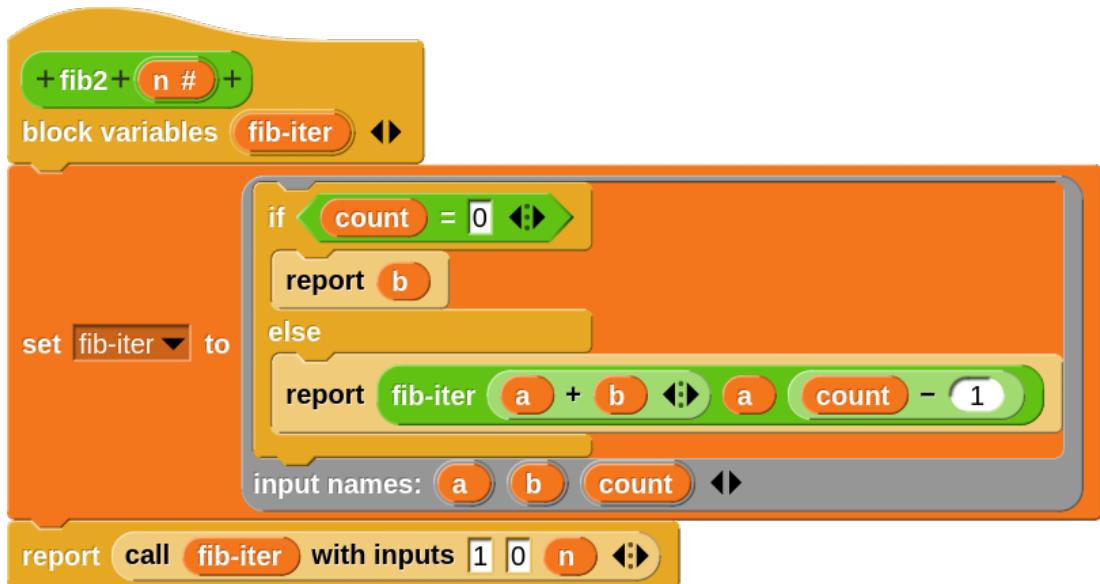
SICP の非公式日本語版翻訳改訂版 真鍋宏史氏訳 の 39 ページに反復プロセス版が載っています。前二項の値を渡すことで余分な再帰呼び出しを避けています。



次のようにブロックを追加して a, b, count の値を表示させると動作が分かります。

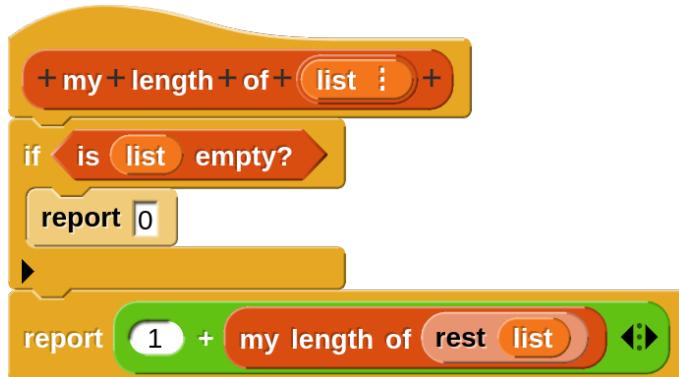


`fib-iter` はここでしか使わないので、本体内部で変数にセットすると局所定義ブロックにすることができます。



1.3.3 末尾再帰

5 ページで my length を扱いました。



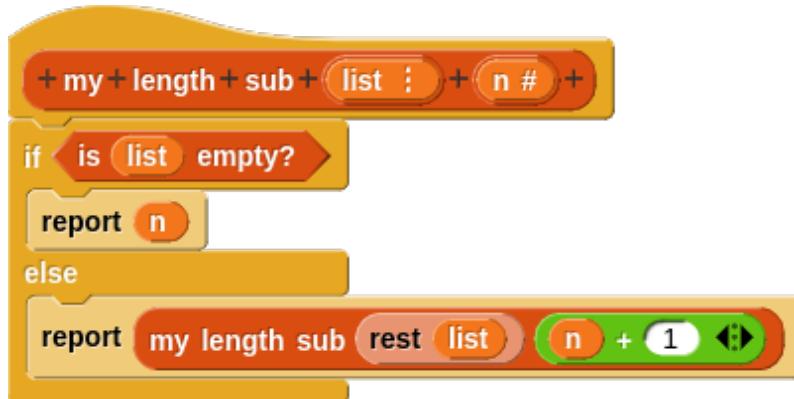
この定義ブロックでは `report [1 + my length of rest list]` で、計算式に再帰呼出しが含まれていて、再帰呼出しによる値が確定しないと計算することができません。リストが空になると確定した 0 の値を使って順々に計算した値を戻しながら一番最初のところまで戻って、ようやく値 3 を得ることになります。my length of (1 2 3) を L(1 2 3) と表してみます。

$$L(1 \ 2 \ 3)$$

$$\begin{aligned}
& 1 + L(2 \ 3) \\
& 1 + L(3) \\
& 1 + L() \\
& 1 + 0 \\
& 1 + 1 \\
& 1 + 2 \\
& 3
\end{aligned}$$

これに対して、次のようにすると再帰呼出しただけを行うという形にすることができます。

引数 ($n + 1$) を渡していくことでカウントしています。

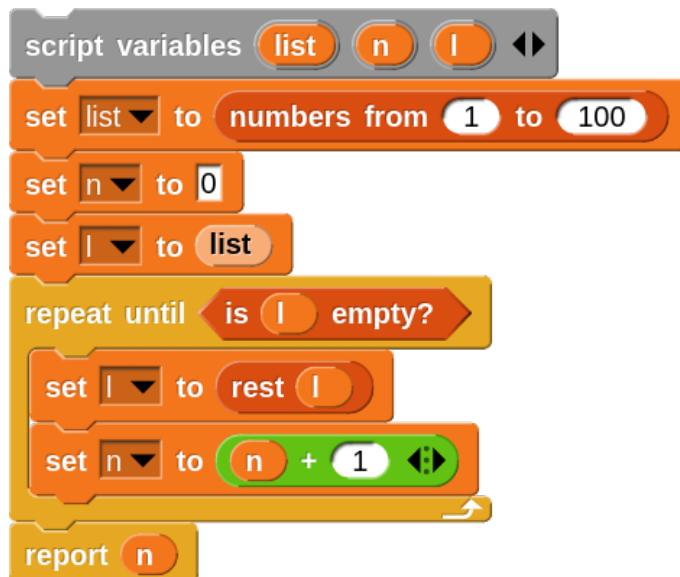


これを呼び出す本体定義は次のようにになります。引数 n の値を 0 にすることで、カウンターの値を初期化しています。



```
my length3 of (1 2 3)
  my length sub (1 2 3)(0)
    my length sub (2 3)(1)
      my length sub (3)(2)
        my length sub ()(3)
          3
          3
          3
          3
```

このように、一番最後の再帰呼出しの返り値がそのまま定義ブロックの値になり、再帰呼び出しから戻る時は単に値をそのまま渡すだけです。このような処理の最後を単独の再帰呼び出しにする形を末尾再帰といいます。末尾再帰のスクリプトは再帰を使わない反復のスクリプトに変換することができます。



Scheme や Haskell などでは、末尾再帰はループに最適化されるので高速になりますが、Snap! ではさほど変わらないようなので末尾再起にこだわる必要もないようです。

2 高階関数

関数の引数や戻り値に関数を指定できるものを高階関数と言います。リスト操作に使用する map, keep, find, combine ブロックは入力スロットにリングがあり、引数に関数型ブロックを指定する高階関数型のブロックです。

2.1 高階関数型ブロックの基本

半径を入力して、円の面積をリポートする関数型ブロックです。



たとえば、`円の面積 [2] + [5] [list 円の面積 [1] 円の面積 [2]]` のように入力に関数型ブロックを使用しても、それは結果としての値を使用しているだけで高階関数型とは言えません。つまり、それぞれ `[12.56 + [5]] [list 3.14 12.56]` の意味になります。

map のような高階関数型ブロックの場合は、リスト要素の処理方法（スクリプトブロック）を指定するという意味になります。



リストを半径とする球の体積を求めます。



リストを半径とする球の表面積を求めます。

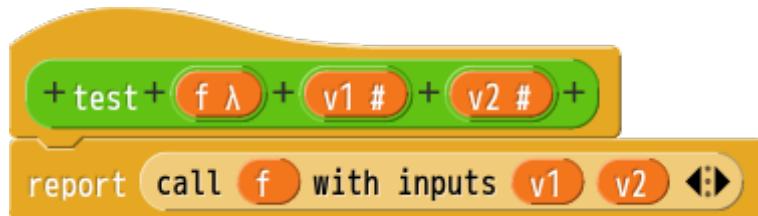


map を二重にするとこんな使い方もできません。

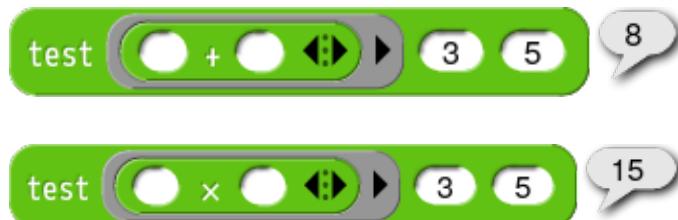


Snap! のユーザー定義ブロックでは高階関数型のものを作成することができます。入力スロットでスクリプトブロックを受け取ることができますし、スクリプトブロックを ringify リングで囲つてやればそのスクリプトブロック自体を戻り値としてリポートすることができます。

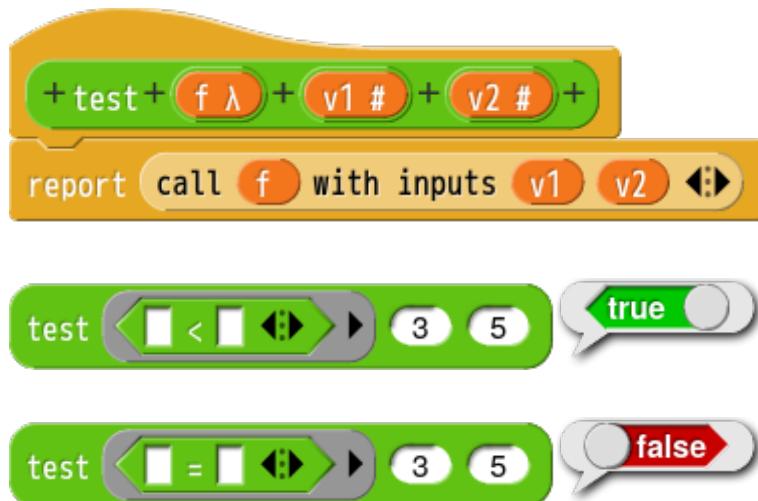
次のブロック定義 test は二つの引数を必要とする関数型ブロックを実行して値を返すものです。入力 f は Reporter 型です。v1 と v2 の入力は Number 型です。関数型ブロックの実行は call ブロックを使用します。これが高階関数型の定義ブロックの基本となります。



入力スロット f に関数型ブロックを入れて処理を指定します。



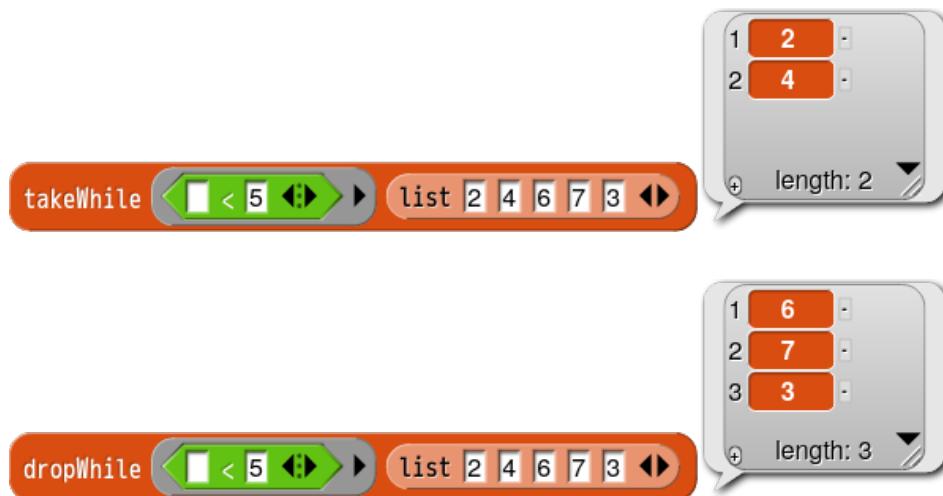
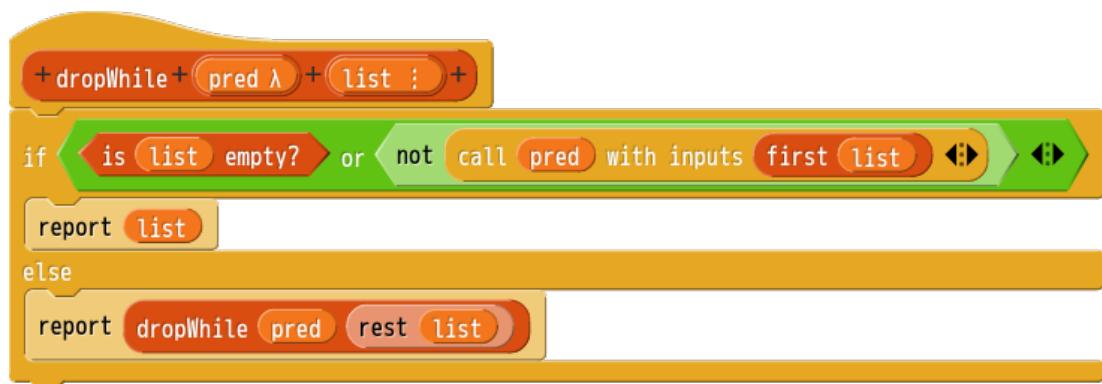
入力 f を Predicate 型にすると、次のように変更されます。(ブロック定義自体の見た目は同じですが)



高階関数型として入力に使用するタイプは Reporter, Any(unevaluated), Predicate, Boolean(unevaluated) が利用できます。実は、Any type や Boolean(T/F) でも入力を ringify してやれば同じ機能になります。

2.2 高階関数型の take と drop

8 ページで要素の個数を指定する take と drop を定義しました。高階関数型ブロックの例として、リストの先頭から条件に一致する要素だけを take や drop するブロック takeWhile と dropWhile を作成してみます。不一致の要素が見つかった時点で操作は終了です。条件をチェックするブロックを受け取る変数 pred は Predicate 型です。



2.3 操作を指定するリストの巡回

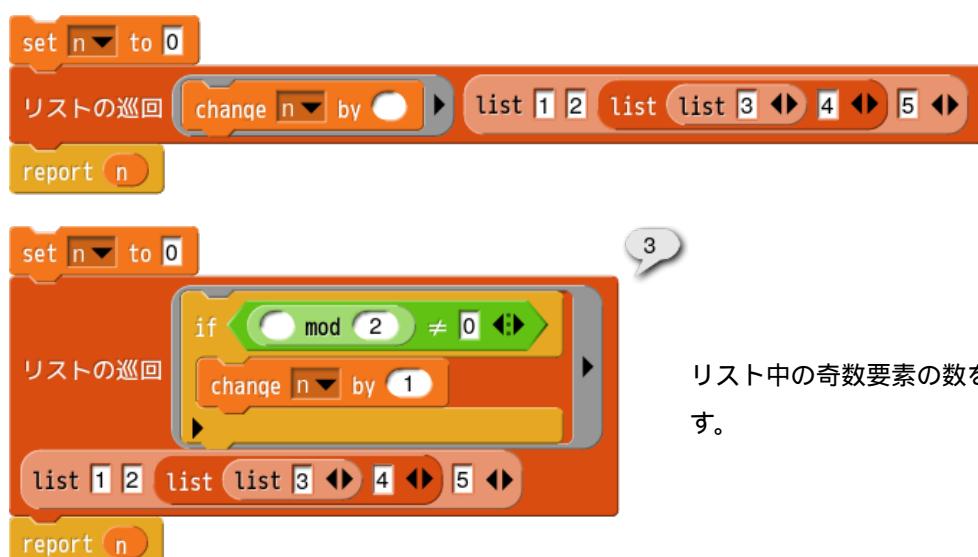
11ページで「リスト要素の巡回」を扱いました。引数で操作を指定すれば同じ定義ブロックでいろいろな用途に使えます。定義ブロック自体は Command 型で、引数 proc は Command(inline)型です。proc は引数を一つ使用します。



リストの要素数を求めます。引数としてリストの要素が用意されますが、[change (n) by (1)] と (1) でふさがっているので要素は使用されずに 1 でのカウントになります。

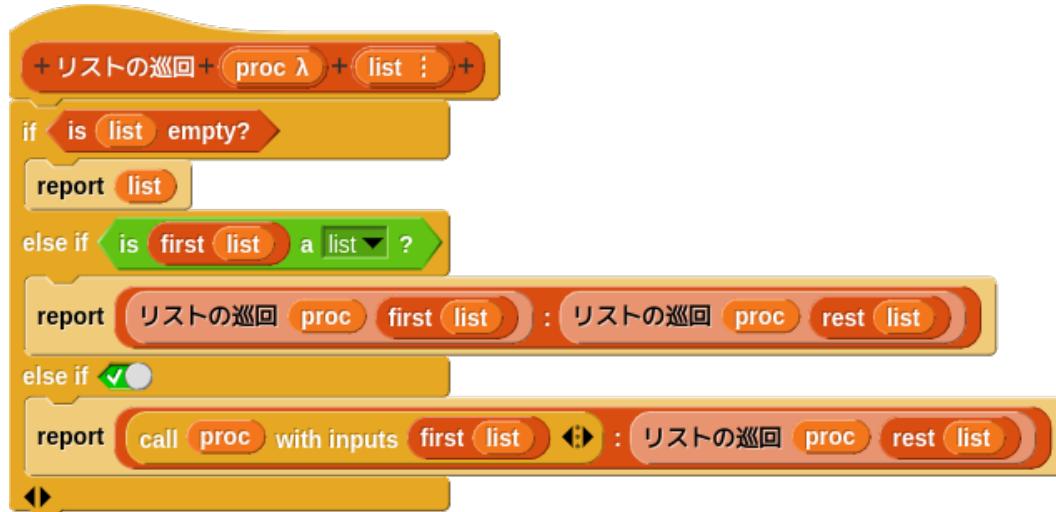


リストの要素の値の合計値を求めます。上とは違い [change (n) by ()] と引数のスロットにリストの要素が入り加算されます。

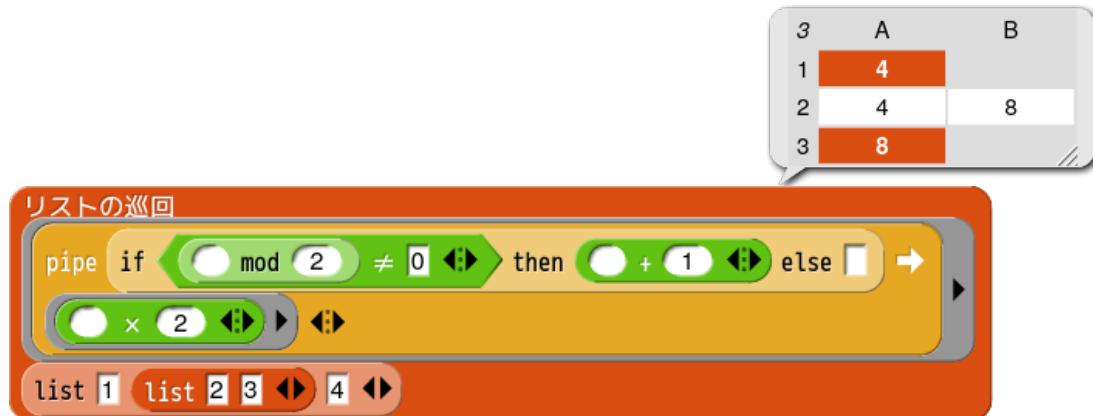


リスト中の奇数要素の数を求めます。

リポーター版です。引数 proc は Reporter 型です。



意味のある例ではありませんが、要素が奇数の時は 1 を加えます。そして各要素を 2 倍します。



2.4 foldl, foldr

Haskell 言語には foldl と foldr というリスト操作用関数があります。

これは、二つの引数をとる関数 proc (変数型は Reporter) と、初期値 init と list の合計 3つを引数として取る関数です。初期値 init と item (list の先頭要素) の二つの値を引数として proc が何らかの処理をします。得られた値を新たな init とします。その init と item (list の次の要素) を引数として proc を実行 ... ということを list の終わりまで行います。init の値が最終値になります。foldl はリストを左側から順に操作し、foldr はリストを右側から順に操作するものです。

foldl から見ていきます。



操作内容は、
のようになります。

フォーマルパラメータを使用すると次のようにになります。



フォーマルパラメータの順序は右下の表のようになります。 (#1, #2 から名前の変更をしています)

foldl

init	+	item	値
0	+	1	1
1	+	2	3
3	+	3	6
6			6

The Scratch script shows the step-by-step execution of foldl using formal parameters. It starts with '+ foldl + proc λ + init + list : +' followed by an if block: 'if is list empty? [report init]'. Then it enters an else block: 'report foldl proc call proc with inputs init first list :: rest list'.

非再帰版だとこうなります。

The Scratch script shows the non-recursive version of foldl. It uses a for each loop: 'for each item in list [set init to call proc with inputs init item :: report init]'

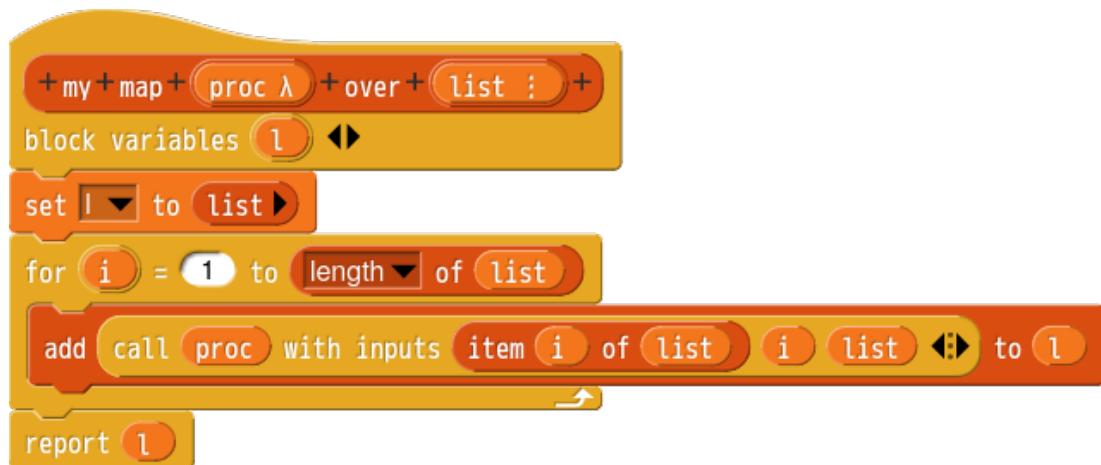
次のようにすると、リストの要素の値は使用しないで要素数 length を求めることになります。



次のようにすると文字列の二進数（1010）を十進数に変換します。



map ブロックを再帰呼び出しを使用しないで作成してみます。引数 proc は Reporter 型です。プリミティブのもののように value, index, list 値を利用可です。



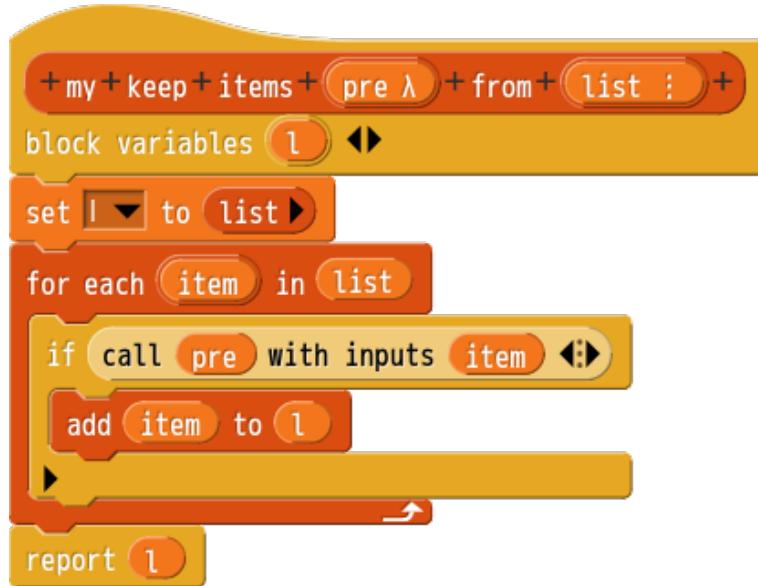
再帰呼び出しを使用して作成してみます。 value, index, list 値は利用できません。



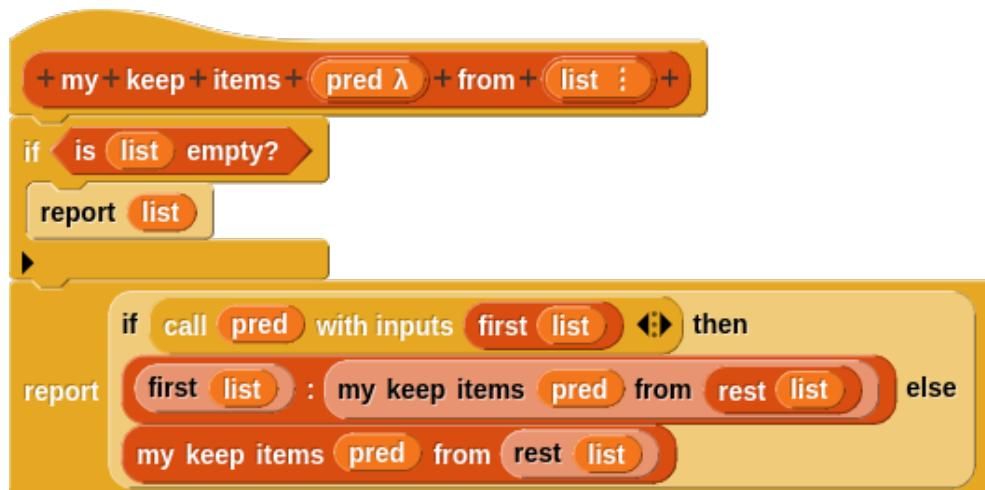
foldl 版です。



keep ブロックを再帰呼び出しを使用しないで作成してみます。引数 pred は、Predicate 型です。



再帰呼び出しを使用して作成してみます。



foldl 版です。



foldr です。



操作内容は、
のようになります。

フォーマルパラメータを使用すると次のようにになります。



フォーマルパラメータの順序は右下の表のとおり、foldl とは違う item, init の順になります。

The image shows two Scratch scripts side-by-side. The left script uses a recursive approach with a proc block and if-else logic. The right script is a table showing the state of variables during the iteration:

item	+	init	値
3	+	0	3
2	+	3	5
1	+	5	5
		6	6

非再帰版だとうなります。

The image shows a Scratch script using a for loop to implement foldr. It starts with a proc block, followed by a for loop with variable i, length of list, and 1. Inside the loop, it sets init to the result of calling the proc with item i and init as inputs. Finally, it reports init.

次のようにすると最大値を求めることができます。

The image shows a Scratch script using foldr to find the maximum value in a list. The parameters are: foldr, followed by an if block (item > init), then then item else init, then the text "input names: item init", and finally a light blue -999. Below it is a list of numbers: 8, 3, 12, 10, 5.

foldr を使っても foldl と同じようなことができます。

The image shows two Scratch scripts demonstrating how to implement foldr using map and keep.

The first script uses a map-like approach:

```
+ my + foldr + map + proc λ + over + list : +  
report  
foldr  
call proc with inputs item : init input names: item init  
list ▶ list
```

The second script uses a keep-like approach:

```
+ my + foldr + keep + items + pred λ + from + list : +  
report  
foldr  
if call pred with inputs item : then item : init else init  
input names: item init  
list ▶ list
```

foldr がリストを右側から操作することを利用した append です。

The image shows a Scratch script demonstrating the implementation of foldr append.

The script uses a list variable to store the accumulated result:

```
+ my + foldr + append + list1 : + list2 : +  
report foldr item : init input names: item init  
list2 list1
```

A list variable is shown on the stage:

1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
+	length: 6

The script also includes a my foldr append function:

```
my foldr append numbers from 1 to 3 numbers from 4 to 6
```

foldl で作成する場合には、リストを逆順にする操作が必要になります。

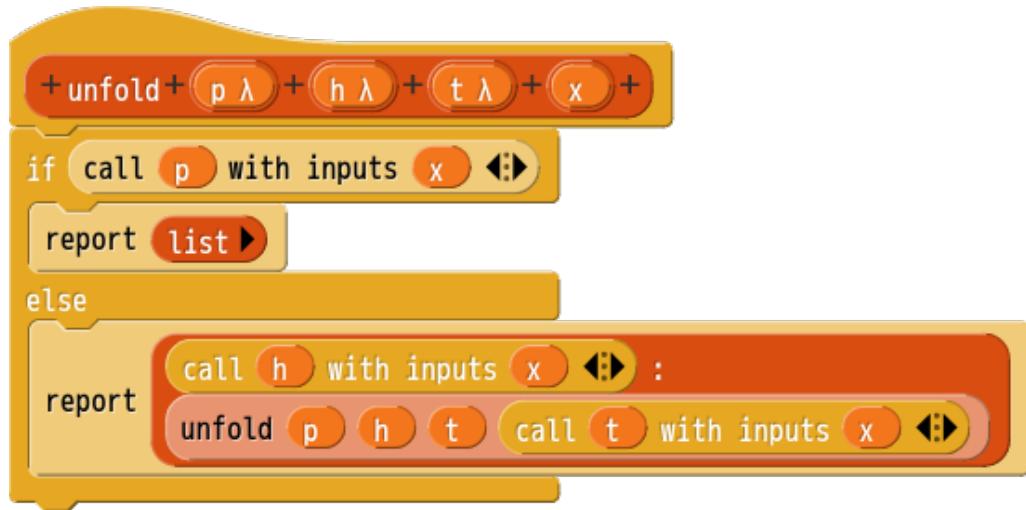
The image shows a Scratch script demonstrating the implementation of foldl append.

The script uses a foldl-like approach with a reverse operation:

```
+ my + foldl + append + list1 : + list2 : +  
report  
foldl item : init input names: init item  
list2 reverse of list1
```

2.5 unfold

fold は、リストに対して操作を行い値を求めるものでした。逆に、ある値に操作を加えてリストを作成するのが unfold です。



p は、Predicate 型で処理（再帰呼び出し）の終了条件を指定するものです。h は、指定された値 x に操作を加えてリストの要素となる値を取り出す Reporter 型のブロックです。t は、次の要素を求めるために x を処理するための Reporter 型ブロックです。unfold はリストの要素を左から並べていきます。p, h, t はそれぞれ関数型のブロックなので、unfold は高階関数型のブロックです。

二進数をリストで表したものから十進数に変換するには、foldl を使用して次のようにできます。

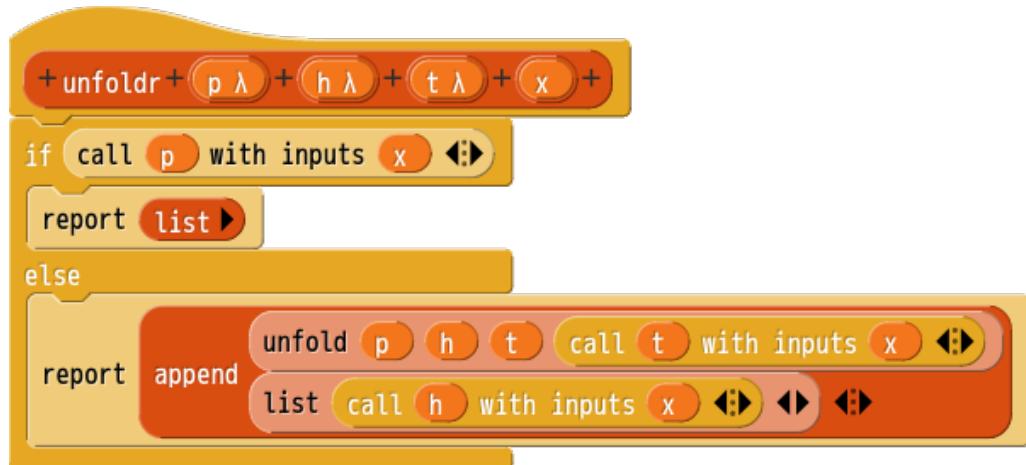


逆の操作は unfold を使用すると、次のようにできます。

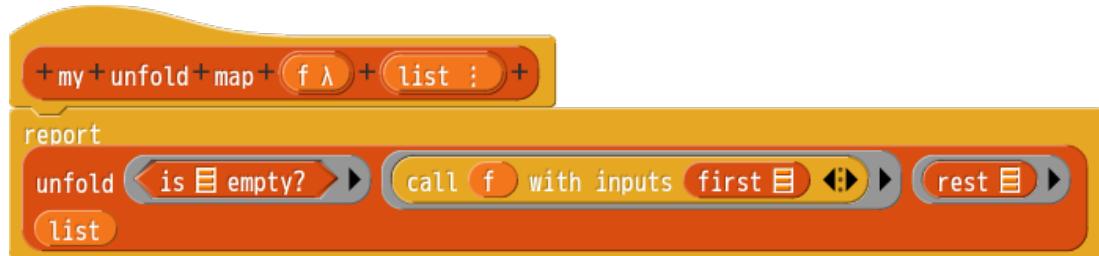


値を 2 で割り切ると商と余りが求められます。余りが最下位桁の値になります。商は次の桁を求めるための値になります。この操作を商が 0 になるまで行います。リストは逆順で作られるので reverse する必要があります。

リストの要素を右から並べていく unfoldr を作成するならば、次のようにになります。



unfold を利用して map を作成することもできます。



2.6 カリー化

複数個の引数が必要な関数を、一つの引数だけ受け取って処理をすることを連ねて行うやり方があります。そのように 1 引数の関数化することをカリー化と言います。カリー化された関数は関数を返す高階関数です。

ある文字を文字列に加えるには、join ブロックを使って次のようにできます。



カリー化したブロック join-c は入力スロットから文字列を受け取り ringify されたブロックを返します。そのブロックは実行されると加える文字を引数として受け取り、結果として合成された文字列を返します。



リポーター ブロックを実行するには call ブロックを使用しますが、call ブロックにはリングが装備されています。そこに ringify されたブロックを渡されると次のようになります。



join-c ブロック部分を右クリックして unringify する必要があります。

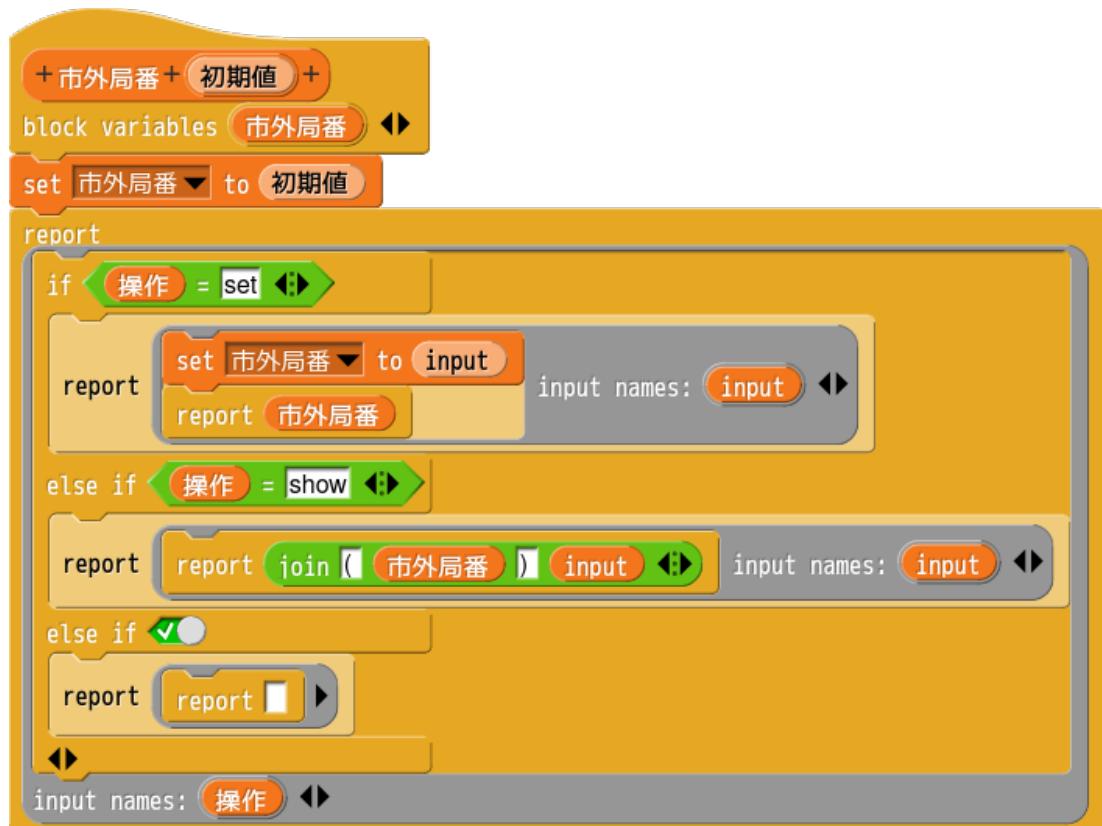


set 東京(03) ▾ to join-c (03) のようにすると、部分適用することもできます。



変数「東京 (03)」のように引数を含めて閉じ込められた関数（関数を返す高階関数）は「1234-5678」のように外側から与えられた引数にアクセスすることができます。このような環境をクロージャーと言います。

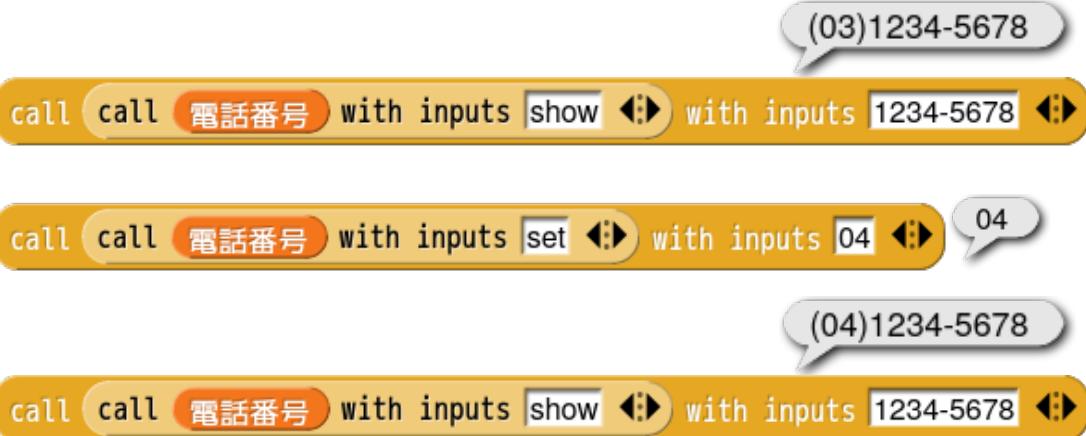
次のようにすると、クロージャー内のローカル変数「市外局番」に対して変更ができます。
 report ブロックの中に操作に応じてそれぞれに report ブロックがあります。report ブロックが返すのは ringify されたブロックなので、これを実行するには二重の call ブロックが必要です。



変数「電話番号」をクロージャーにします。

set [電話番号] to [市外局番 03]

そうすると、「電話番号」を操作することができるようになります。



「市外局番」は外部から set ブロックで変更することができないので、安全な仕組みになります。

応用すると、キューやスタック、辞書などのデータ構造を作成することができます。

キューは待ち行列です。データの格納（push）は列の後尾から、取り出し（pop）は列の先頭からになります。先頭データの参照（get）、キューが空かどうか（empty?）、キューのサイズ（size）の機能を加えます。



変数「キュー」をクロージャーにします。

set [キュー v] to [キューデータ構造 list]

call [call [キュー] with inputs [push]] with inputs [1]

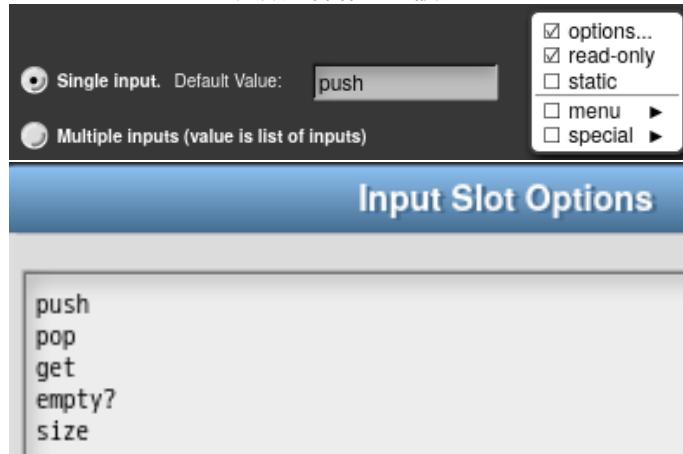
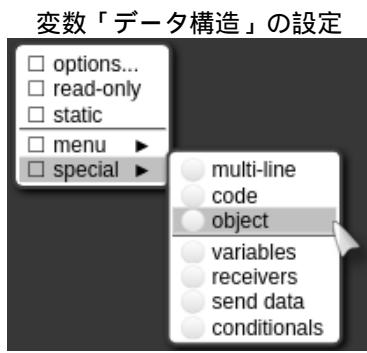
call call キュー with inputs push <: with inputs 2 <: 2

call call キュー with inputs pop <: with inputs 1 <: 1

操作用ブロックを作成します。操作は options...(push, pop, get, empty?, size)、read-only で指定するようにします。Default value は push です。変数「データ構造」を special -> object に設定し、キューデータ構造やスタックデータ構造を持つ変数を指定して使えるようにします。



変数「操作」の設定



set キュー ▼ to キューデータ構造 list ►

コレクション キュー push ▼ 1 1

コレクション キュー push ▼ 2 2

コレクション キュー push ▼ 3 3

三番目の入力スロットは空になっていますが、値を入れたとしても使用されません。

コレクション キュー pop ▼ 1 1

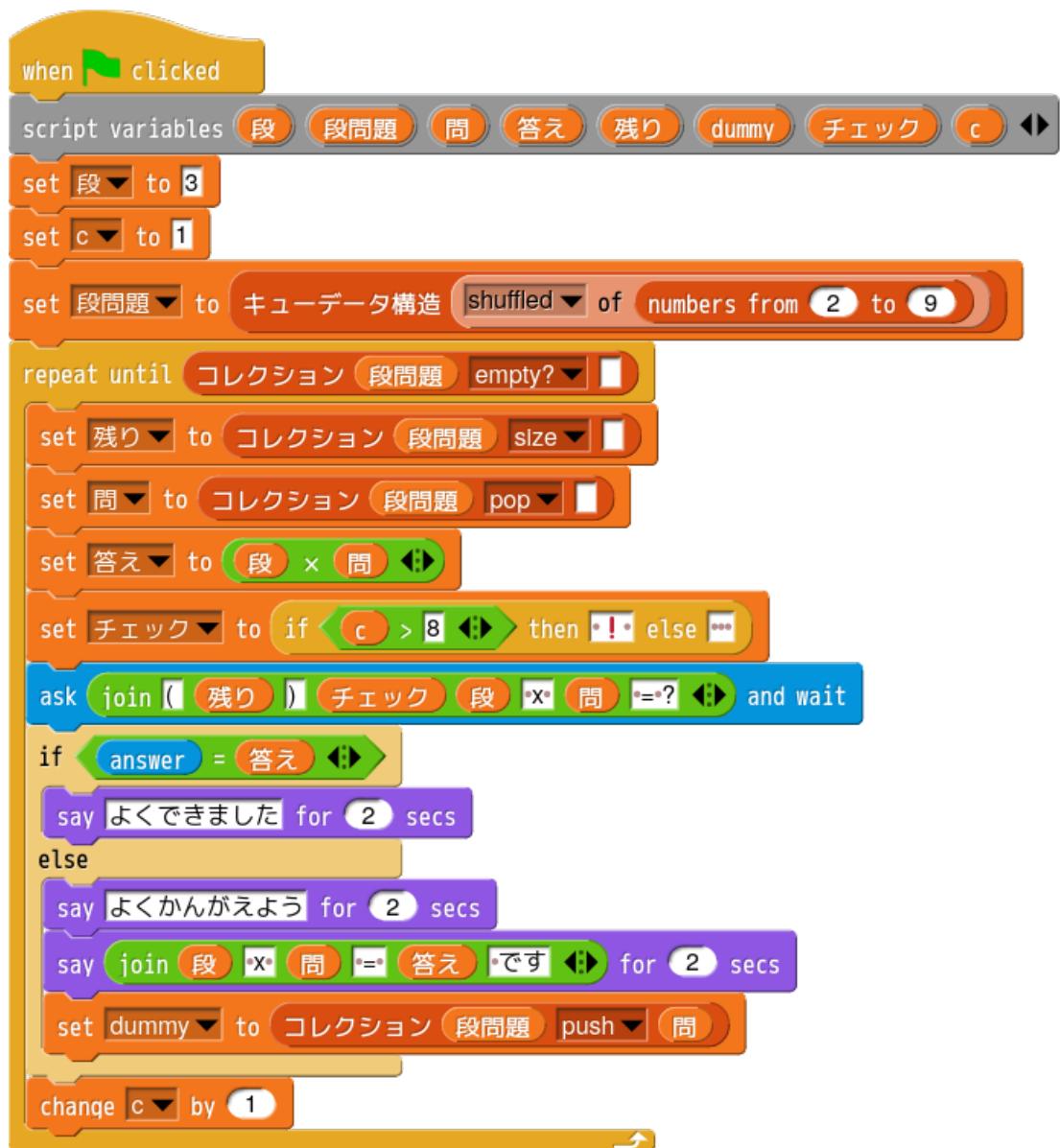
コレクション キュー pop ▼ 2 2

コレクション キュー pop □ 3

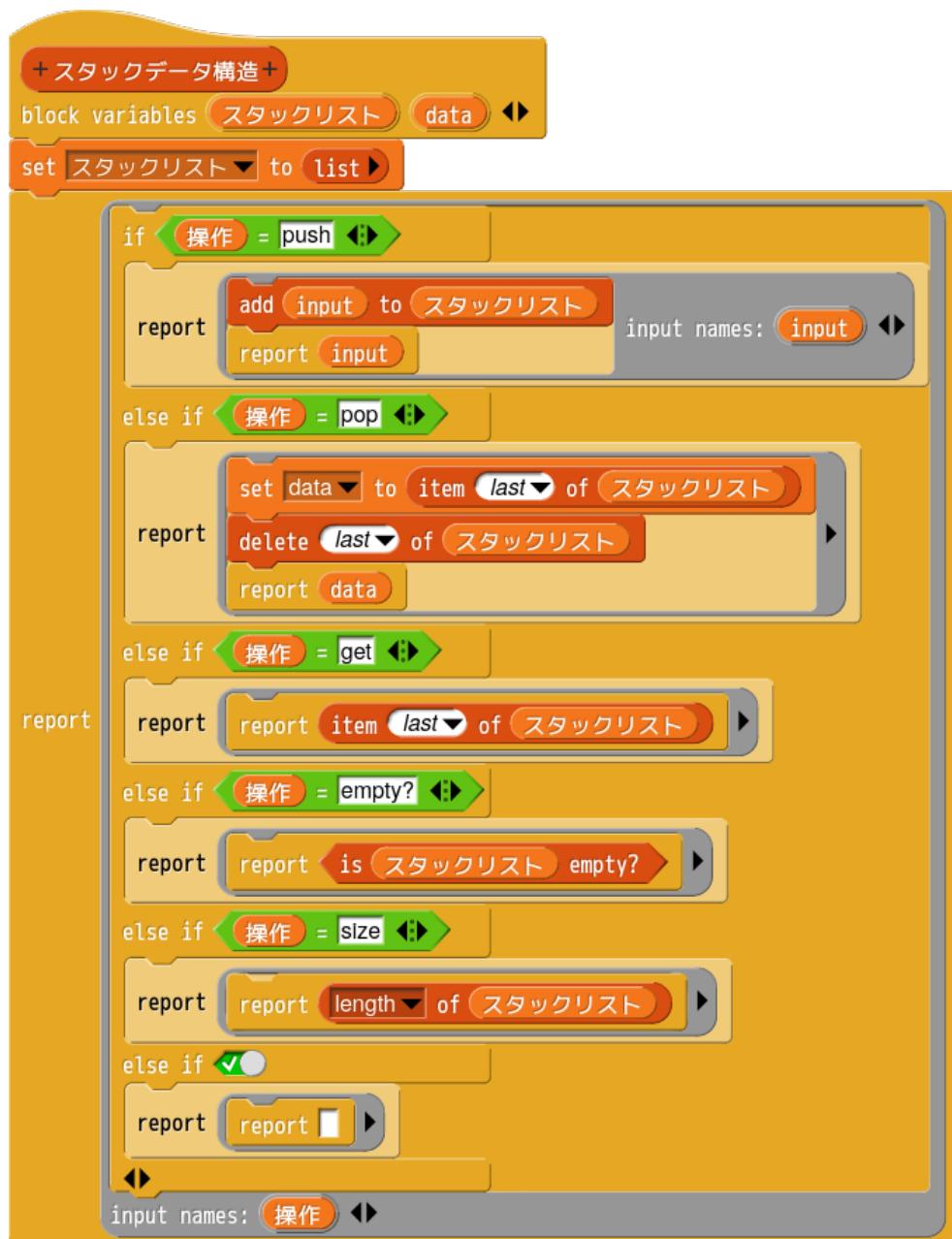
コレクション キュー pop □

コレクション キュー empty? □ true

キューを使って九九のドリルを作ってみます。2 ~ 9 の問題をシャフルしてばらばらの順番にします。シャフルしなければ昇順になりますし、リバース又は 9 ~ 2 にすれば降順の問題になります。問題をキューにセットします。「pop した時に正解できなければその問をキューに push する」をキューが空になるまで繰り返します。その段をクリアしないと終わりません。間違えた問には「!」を付けます。



スタックはデータを積み上げるイメージで、取り出しあは積み上げたデータのトップからになります。使用できる機能はキューと同じにしています。



set [スタック] to [スタックデータ構造]

コレクション [スタック] push [1] 1

コレクション [スタック] push [2] 2

コレクション [スタック] push [3] 3

三番目の入力スロットは空になっていますが、値を入れたとしても使用されません。



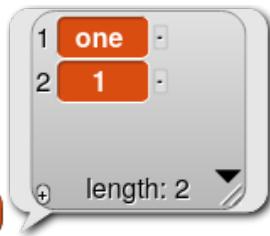
辞書は、キーとデータが対になったものを格納します。連想リストという言い方もあります。検索と削除はキーの値を指定して行います。

紙面の都合で、操作用の定義ブロックを先に示します。変数「操作」は options... (set, find, delete), read-only で指定するようにします。Default value は find です。変数「データ構造」を special -> object に設定し、辞書データ構造を持つ変数を指定して使えるようにします。

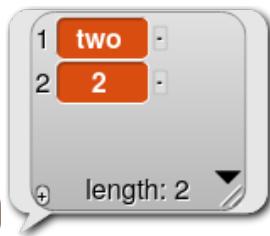




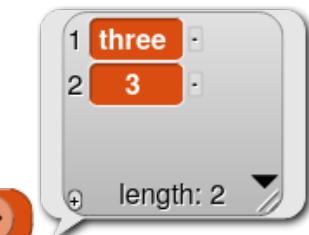
set 辞書 ▾ to 辞書データ構造 list ►



辞書 辞書 set ▾ list one 1 ◀▶



辞書 辞書 set ▾ list two 2 ◀▶



辞書 辞書 set ▾ list three 3 ◀▶

辞書 辞書 find ▾ two 2



辞書 辞書 delete ▾ two

辞書 辞書 find ▾ two

キュー、スタック、辞書の使用例として「逆ポーランド記法計算」を示します。

[参考文献]

『プログラミング言語 AWK』 第2版 発行：オライリー・ジャパン

Alfred V. Aho

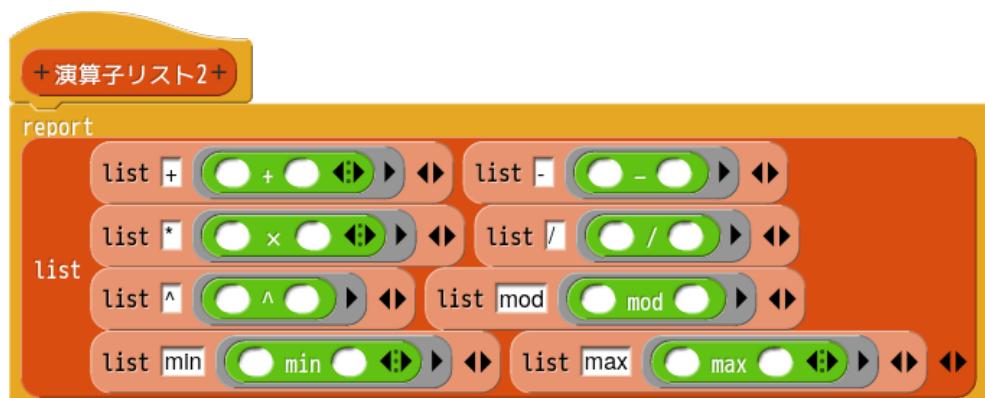
Brian W. Kernighan 著 千住治郎 訳

Peter J. Weinberger

一般的な「中置記法」による計算式 $(1 + 2) \times 3$ は「逆ポーランド記法」（「後置記法」）で記述すると、 $1\ 2\ +\ 3\ \times$ になります。カッコを必要としません。要素が数値の時はスタックに積み、演算子の時は必要な個数の数値をスタックから取り出して、演算の結果をスタックに積みます。この操作を式の終わりまで繰り返すと演算結果がスタック上に求められます。（キーボードには「 \times 」がないので「 $*$ 」を使用します。）「変数 = 」でスタックから変数に、「変数」で値がスタックに置かれます。変数の管理は辞書を使用し、初期値として PI を登録しています。



演算子テーブル設定用の辞書リストです。指定できるのは入力スロットが二つのものだけです。演算子をキーとして検索するとそれを実行するための演算ブロックが得られます。



本体の定義です。紙面の都合で機能限定版です。後で示す foldl 版のような機能を持たせることもできます。

+ 逆ポーランド記法計算 + list : +

block variables 要素 演算 n1 n2 スタック 計算式 演算子テーブル
変数テーブル data dummy ◀▶

```

set [計算式] to [キューデータ構造 list]
set [スタック] to [スタックデータ構造]
set [演算子テーブル] to [辞書データ構造 演算子リスト2]
set [変数テーブル] to [辞書データ構造 list list PI 3.14 ▶▶ ▶▶]
repeat until [コレクション [計算式] empty?]
  set [要素] to [コレクション [計算式] pop]
  if [要素] ≠ []
    if [is [要素] a number?]
      set [dummy] to [コレクション [スタック] push [要素]]
    else
      set [data] to [辞書 变数テーブル find [要素]]
      if [data] ≠ []
        set [dummy] to [コレクション [スタック] push [data]]
      else
        if [letter [last of [要素]] = =]
          set [dummy] to
            [辞書 变数テーブル set]
            [list join first split [要素] by =]
            [コレクション [スタック] pop]
        else
          set [演算] to [辞書 演算子テーブル find [要素]]
          set [n2] to [コレクション [スタック] pop]
          set [n1] to [コレクション [スタック] pop]
          if [演算] ≠ = and [is [n2] a number?] and [is [n1] a number?]
            set [dummy] to
              [コレクション [スタック] push]
              [call [演算] with inputs n1 n2]
          else
            report
            if [演算] = = then [join 演算子エラー [要素] else 引数不足エラー]
    end
  end
end
set [n1] to [コレクション [スタック] pop]
if [コレクション [スタック] empty?]
  report n1
else
  report 引数過多エラー
  
```

`foldl` を使用すると、その仕様をキュー や スタックの機能として利用することができます。
`foldl` に与えられたリストからはキュー のように要素が供給されます。`init` は演算の結果で更新されるのですが、これをスタックのように使用して、数値や数値を取り出して得た演算結果を積んでいきます。

FORTH 言語の DUP、SWAP、OVER、ROT 機能を追加し、1 引数の演算もできるようにしています。ただし、細かいエラー処理はできません。辞書リストにはスタック処理用の辞書、引数 1 用の辞書、引数 2 用の辞書、変数用の辞書のリストがセットされます。



SWAP はスタックトップから一番目と二番目を入れ替えます。

逆ポーランド記法計算foldl list 2 3 SWAP - ◀▶ 1

DUP はスタックトップの値をコピーします。

逆ポーランド記法計算foldl list 2 DUP + ◀▶ 4

OVER はスタック二番目の値をコピーします。 3 4 コピー

逆ポーランド記法計算foldl list 3 4 over + * ◀▶ 21

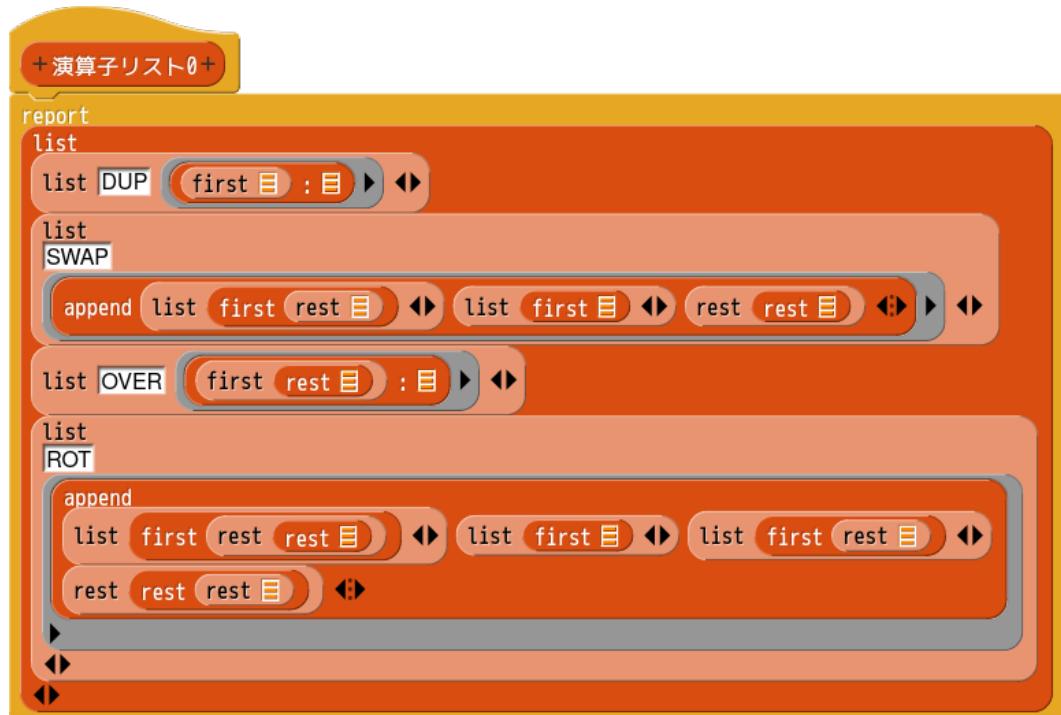
3 × 4 + 3 ◀▶ ◀▶ 21 の意味を持ちます。

ROT はスタックトップ 3 の要素を循環して入れ替えます。 3 ← 4 ← 5 移動

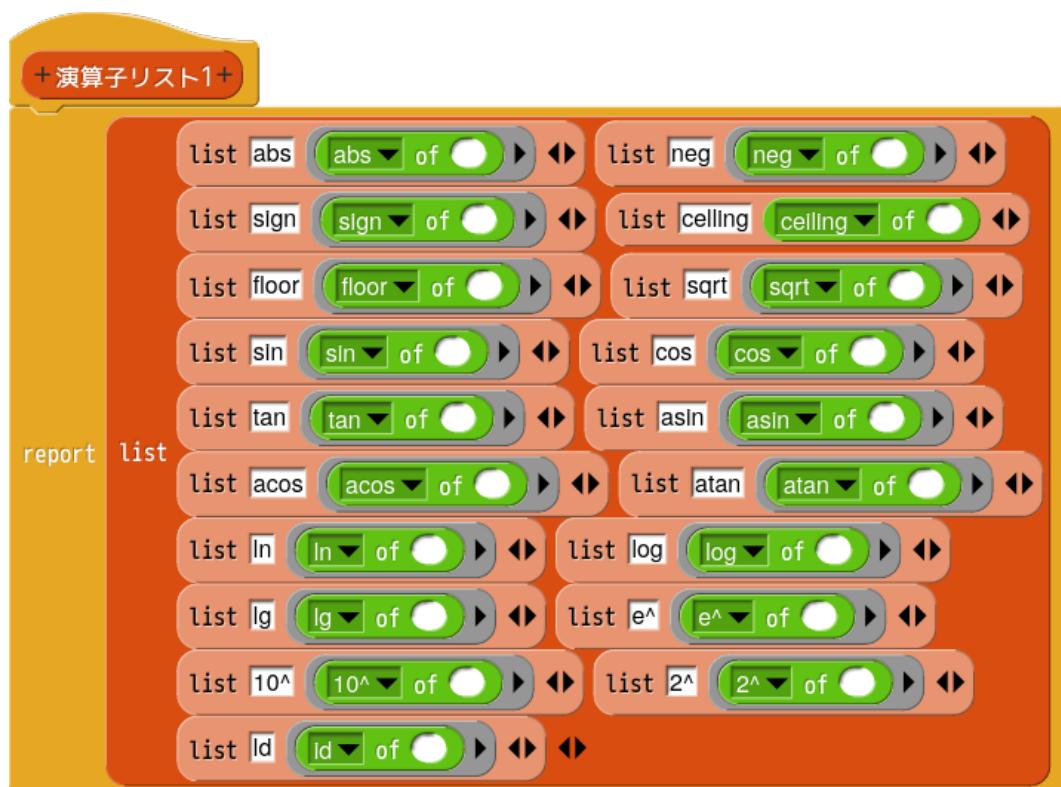
逆ポーランド記法計算foldl list 3 4 5 ROT - * ◀▶ 8

4 × 5 - 3 ◀▶ 8 の意味を持ちます。

スタック演算用辞書設定ブロックです。



1引数演算用辞書設定ブロックです。



foldl に指定する計算処理を行うブロックです。

+ func + スタック : + 要素 + 辞書 : +

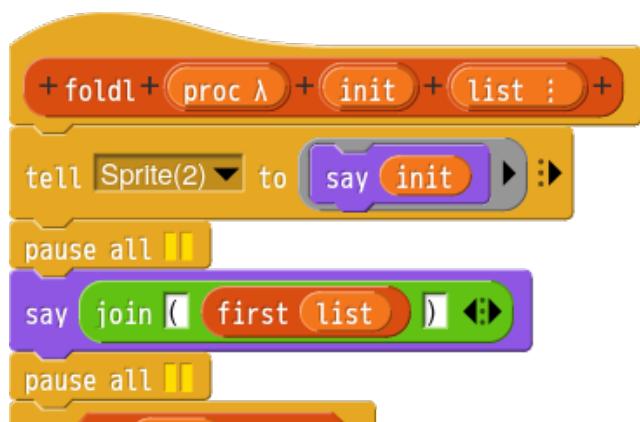
block variables n1 n2 演算0 演算1 演算2 data dummy ◀▶

```

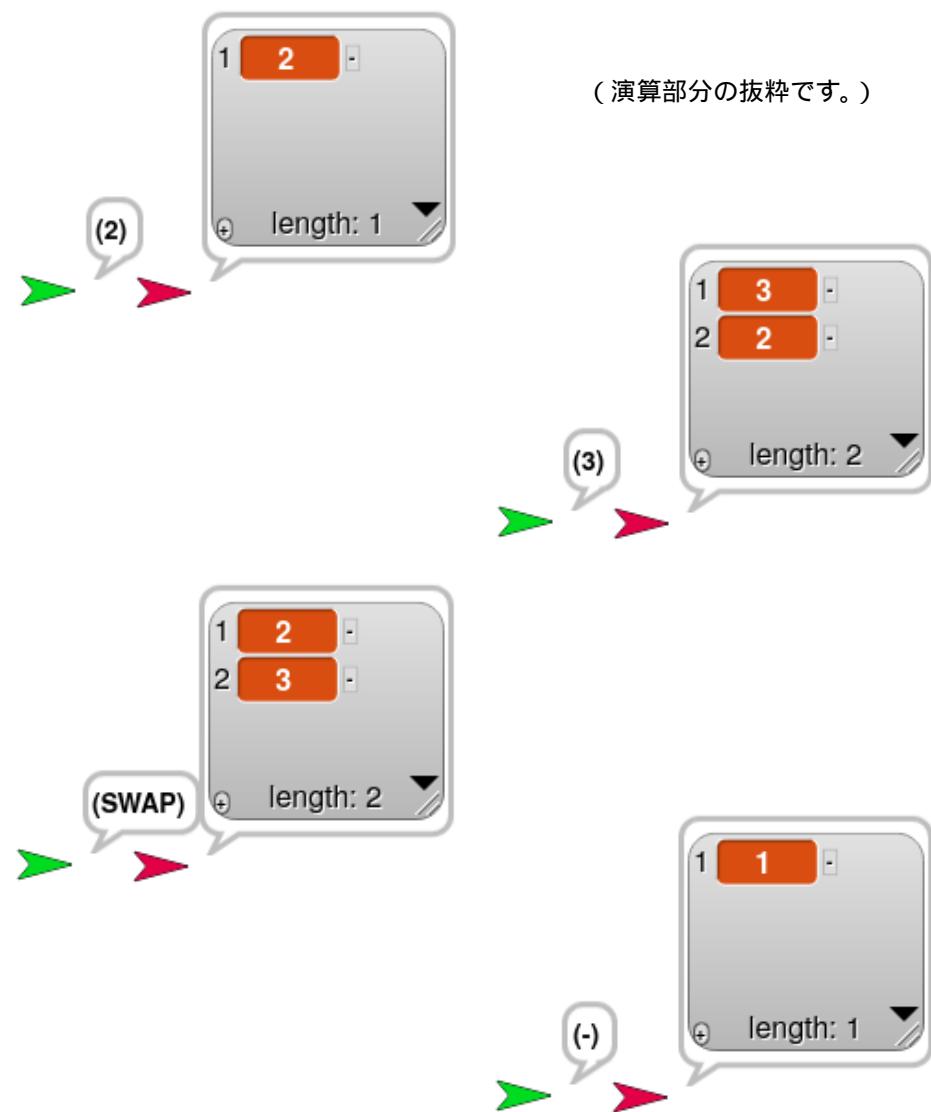
if 要素 = []
  report スタック
else
  if is 要素 a number ?
    report 要素 : スタック
  else
    set 演算0 to 辞書 item 1 of 辞書 find 要素
    if 演算0 ≠ []
      report call 演算0 with inputs スタック
    else
      set 演算1 to 辞書 item 2 of 辞書 find 要素
      if 演算1 ≠ []
        set n1 to first スタック
        report call 演算1 with inputs n1 : rest スタック
      else
        set 演算2 to 辞書 item 3 of 辞書 find 要素
        if 演算2 ≠ []
          set n2 to first rest スタック
          set n1 to first rest
          report call 演算2 with inputs n1 n2 : rest rest スタック
        else
          set data to 辞書 item 4 of 辞書 find 要素
          if data ≠ []
            report data : スタック
          else
            if letter last of 要素 = =
              report 「変数=」なら変数登録処理
              set dummy to
                辞書 item 4 of 辞書 set
                list join first split 要素 by = first スタック
              report rest スタック
            else
              report エラー : スタック

```

Sprite(2) を追加して、次のように foldl 定義に say を挿入すると、処理中の式の要素やスタックとして使用している init の様子が見られます。式の実行は Sprite 側から行います。



逆ポーランド記法計算 foldl list 2 3 SWAP - <>



索引

- : ブロック, 4
- all, 16
- collapse, 16
- deep contains, 12
- delete, 13
- drop, 8
- dropWhile, 26
- factorial, 3
- first ブロック, 4
- identical, 15
- initial slots, 16
- keep, 9, 13, 17, 31
- map, 14, 16, 30
- multiple inputs, 16
- qsort, 17
- replace, 14
- rest ブロック, 4
- separator, 16
- take, 8
- takeWhile, 26
- unfold, 34
- unique, 9
- 階乗, 3
- カリー化, 36
- 逆ポーランド記法, 45
- キュー, 38
- クイックソート, 17
- クロージャー, 36
- 高階関数, 24
- 再帰呼び出し, 3
- 辞書, 42
- スタック, 41
- 素数, 9
- 多重再帰, 17, 20
- ハノイの塔, 3
- フィボナッチ数列, 20
- 部分適用, 36
- 末尾再帰, 22
- リスト要素の巡回, 11, 27