

ドミノで作る計算機

動機

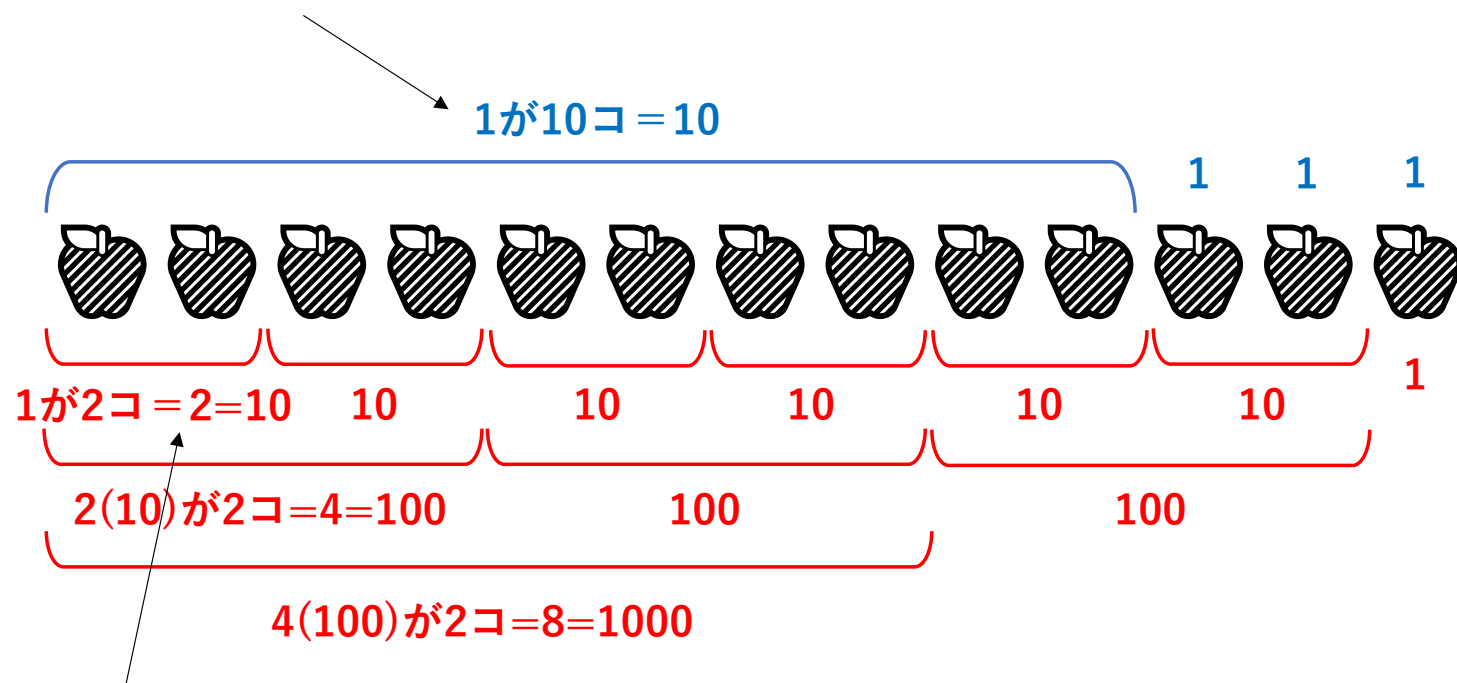
Youtubeで海外で行われた実験を知り、しかもそれでは失敗していたので自分で成功させてみたいと思ったため。

コンピュータをハードのレベルで自作してみたいと思っていたため。

2進数と論理演算

普段私たちが使用しているのは、**10**のべき乗($1(=10^0), 10, 100, 1000, \dots$)ごとに繰り上がる**10進数**ですが、この**10**(基数といいます)を**2**に変えた**2進数**でも数を表現することができます。

1が**10**コ集まれば繰り上がって10



10進数で 13

2進数で 1101
(イチイチゼロイチ)

1が**2**コ集まれば繰り上がるので"10"(イチゼロ)

2進数と論理演算

10進数 2進数

0	0	8	1000	16	10000	24	11000
1	1	9	1001	17	10001	25	11001
2	10	10	1010	18	10010	26	11010
3	11	11	1011	19	10011	27	11011
4	100	12	1100	20	10100	28	11100
5	101	13	1101	21	10101	29	11101
6	110	14	1110	22	10110	30	11110
7	111	15	1111	23	10111	31	11111
						32	100000

このように2進数は「0」と「1」の2つの文字(数字)で表しますが、それぞれ「OFF」と「ON」に対応させることができ(デジタルな)機械との相性が良いので、コンピュータの内部で使われています。

2進数と論理演算

ただ、筆算でも機械にそのまま計算させるのは**まだ難しい**。

そこで更に単純な組み合わせの演算(入力(計算する値)と出力(答え)の組み合わせ)を考えます。

AND演算(論理積)

$$X = A \text{ AND } B$$

A	B	X
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



OR演算(論理和)

$$X = A \text{ OR } B$$

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



NOT演算(否定,反転)

$$X = \text{NOT } A$$

A	X
0	1
1	0



XOR演算(排他的論理和)

$$X = A \text{ XOR } B$$

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

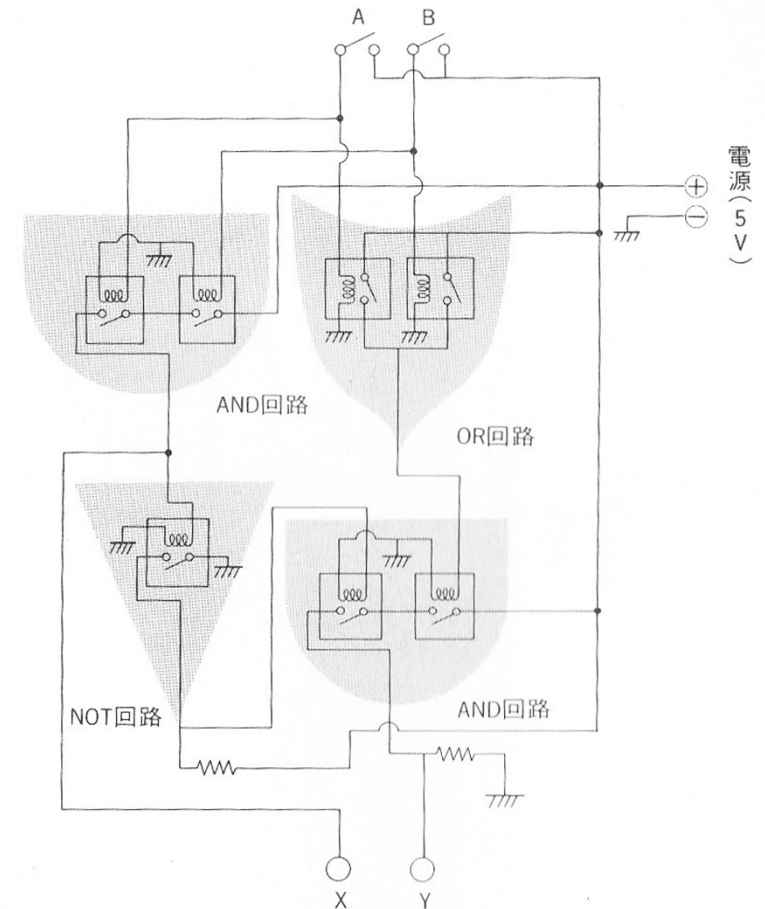
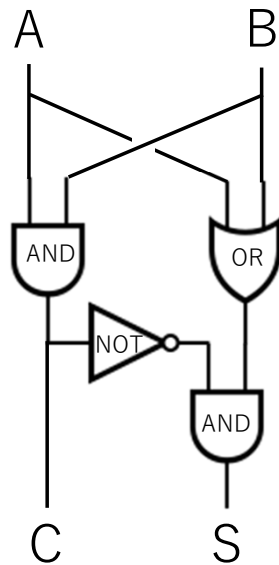


$$\begin{aligned} A \text{ XOR } B \\ = (A \text{ OR } B) \text{ AND NOT}(A \text{ AND } B) \end{aligned}$$

2進数と論理演算

論理演算を使って**1桁どうしの足し算**を計算する回路(**半加算器**)を作ります。

入力		出力	
A	B	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0



1桁目

$$S = A \text{ XOR } B$$

$$= (A \text{ OR } B) \text{ AND NOT}(A \text{ AND } B)$$

2桁目(=繰り上がり)

$$C = A \text{ AND } B$$

リレースイッチを使用した半加算器の電子回路図
(『電子立国日本の自叙伝』(相田洋,NHK出版)),下,P112

2進数と論理演算

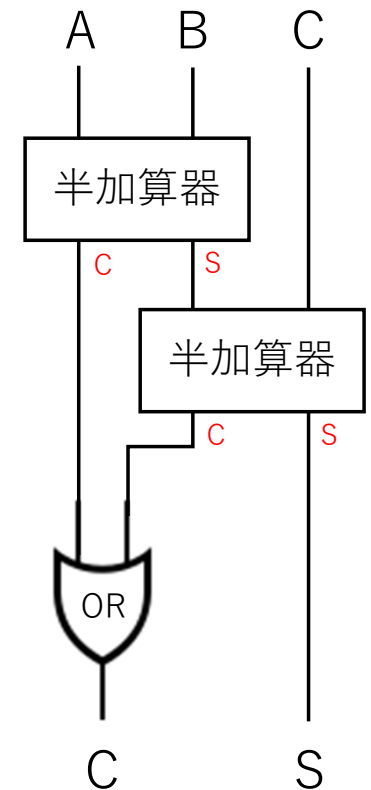
実際に筆算するときには、2つの数を足して更に一つ下の桁からの繰り上がりも足す必要があります。

$$\begin{array}{r} 1011 \\ + 1001 \\ \hline 1100 \end{array}$$

1(繰り上がり)+1+0 = 10

この繰り上がりに対応するために半加算器2つとOR回路を用いて全加算器を作ります。

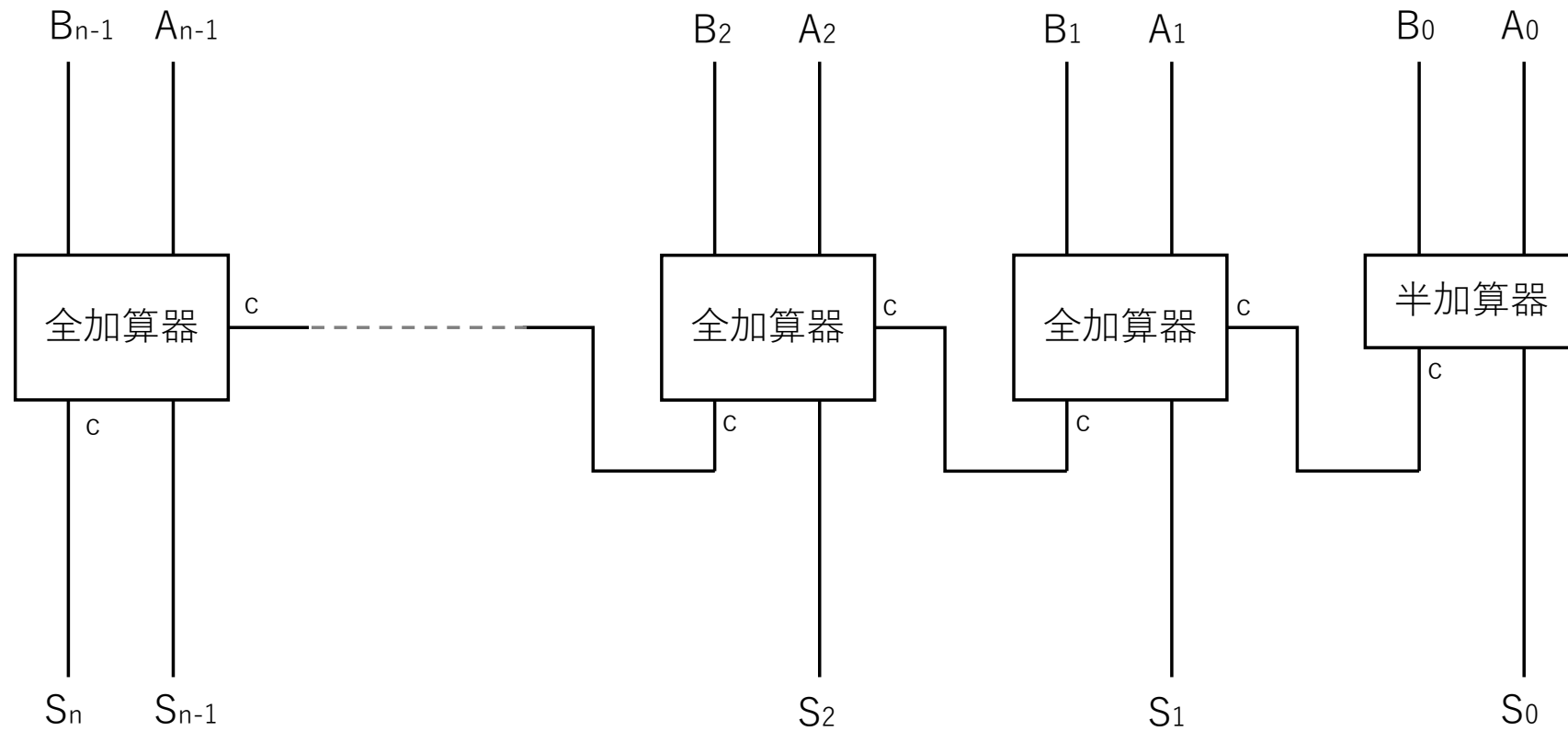
入力			出力	
A	B	C	C	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1



出力のCを次の桁を計算する全加算器のCにつなぐことで繰り上がりも含めて計算することができます。

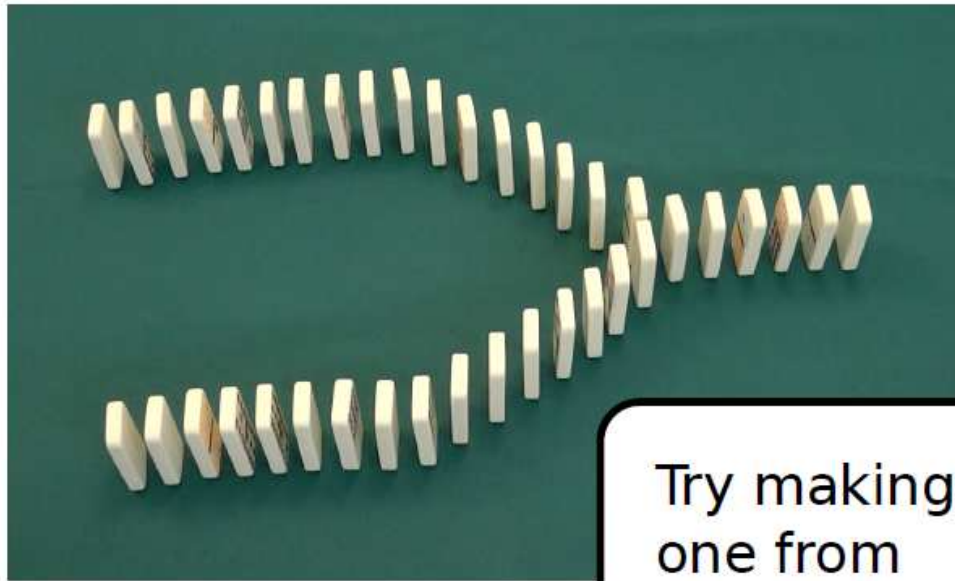
2進数と論理演算

全加算器を並列につないでn桁同士の足し算をする回路を作ります。
このシステムは筆算と同じ方法になっています。

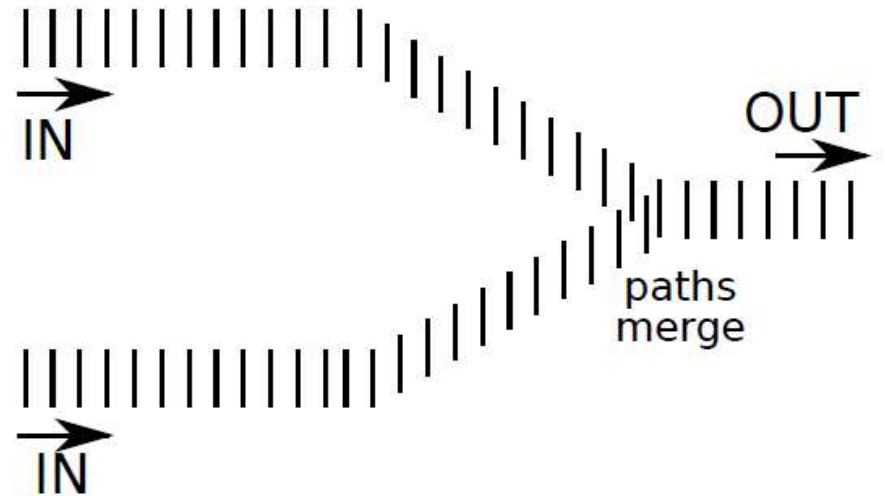


ドミノでどのように計算するのか？

OR回路



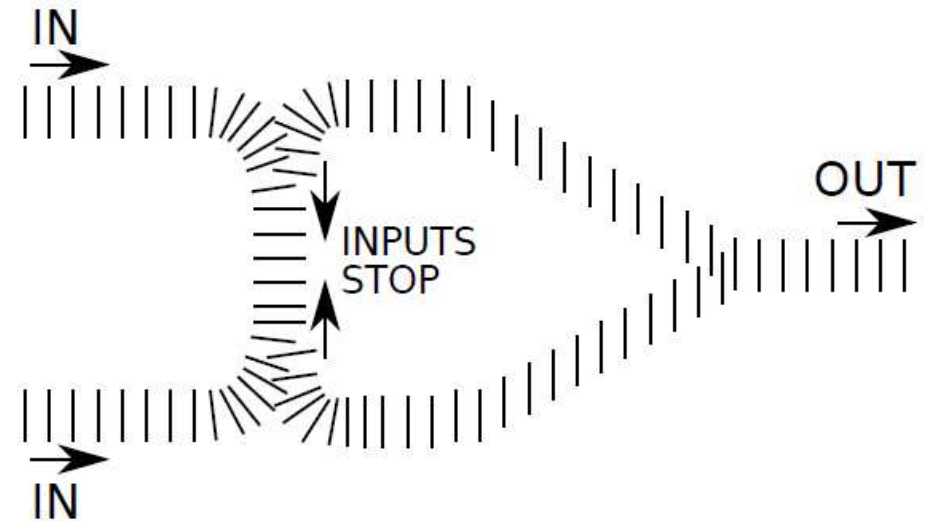
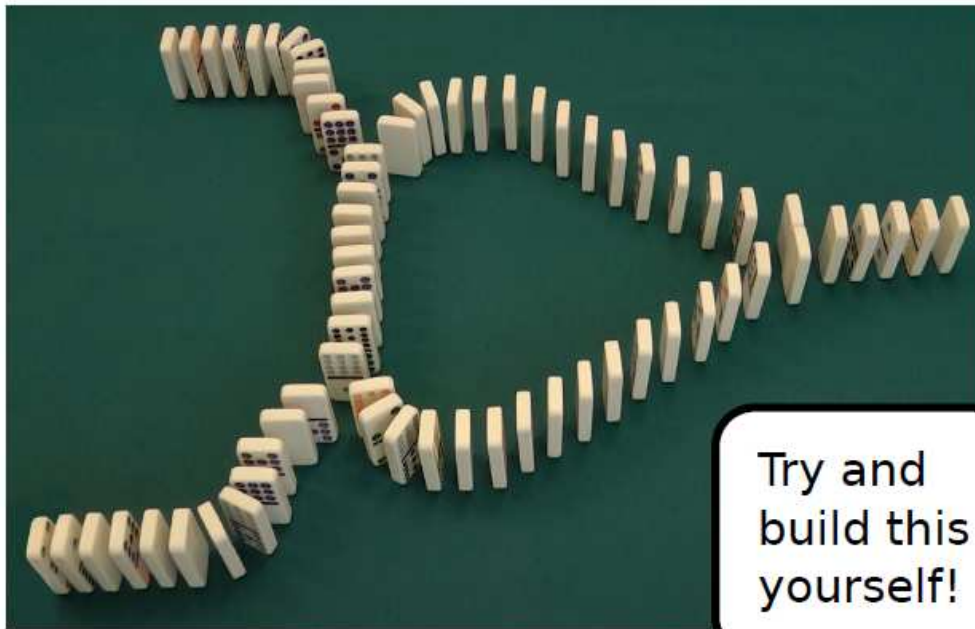
Try making
one from
dominoes!



DOMINO COMPUTER WORKSHEETS(<http://think-maths.co.uk/>)より

ドミノでどのように計算するのか？

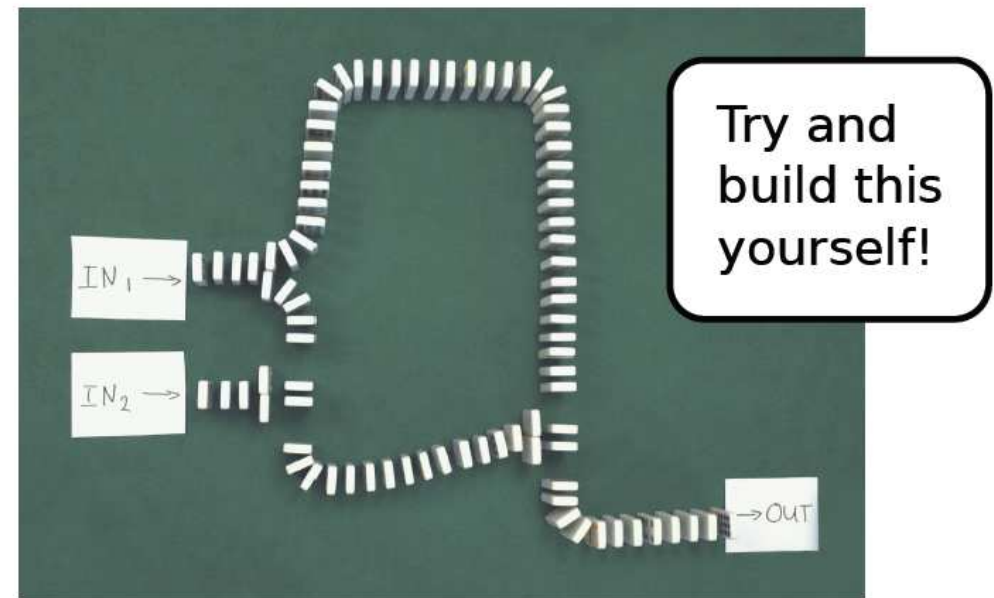
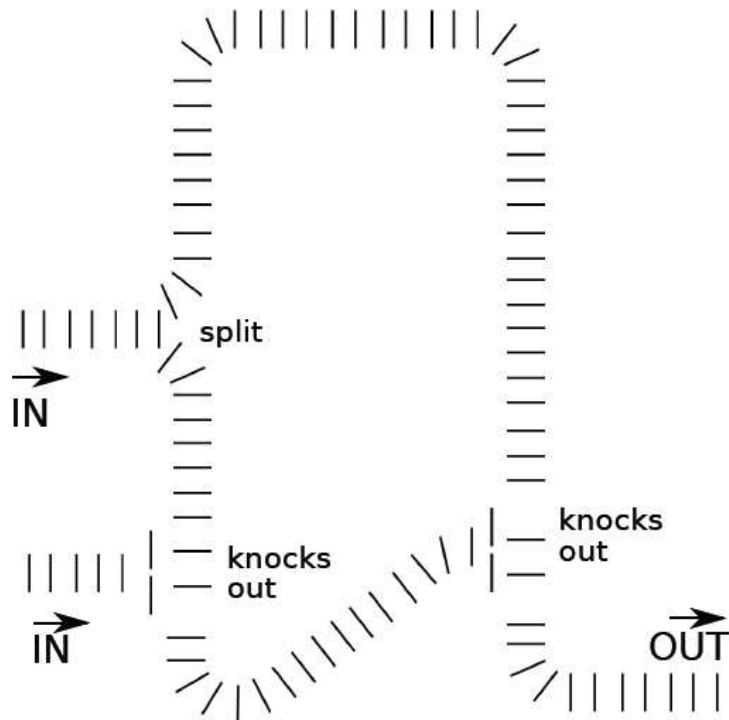
XOR回路



DOMINO COMPUTER WORKSHEETS(<http://think-maths.co.uk/>)より

ドミノでどのように計算するのか？

AND回路



DOMINO COMPUTER WORKSHEETS(<http://think-maths.co.uk/>)より

ドミノでどのように計算するのか？

結果は

9+3=30(もちろん間違い)

となってしまった。



The 10,000 Domino Computer(2014)

(https://www.youtube.com/watch?v=OpLU__bhu2w)より

なぜ失敗してしまったのか？

可能性①「並べる精度が悪かった」
改善するには…

丁寧に並べる。ドミノの並べ方をきちんと決めて誰が並べても同じになるようにする。(詳しくは後述)

可能性②「仕組みが良くなかった」
改善するには…

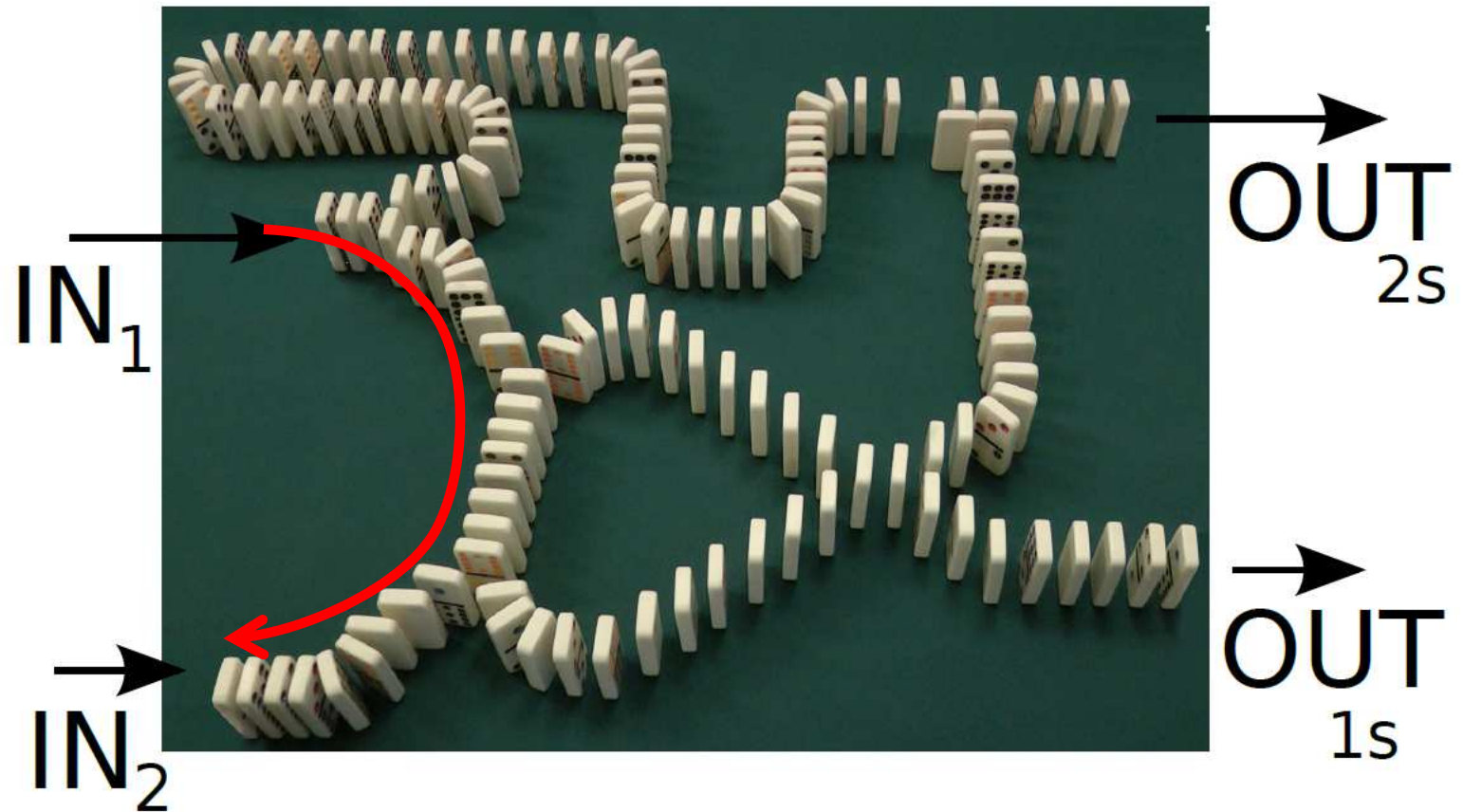
現場で並べ始める前にルートを決める。より精度の良い新たな並べ方を考える。時間調整を精密に行う。

ドミノでどのように計算するのか？

動画で使われている半加算器の仕組みについて…

IN2からドミノが倒れないうちにIN1からドミノが倒れ始めると**逆流**してしまう。

そのままさかのぼって倒れると倒れてはいけない部分が倒れる可能性がある。

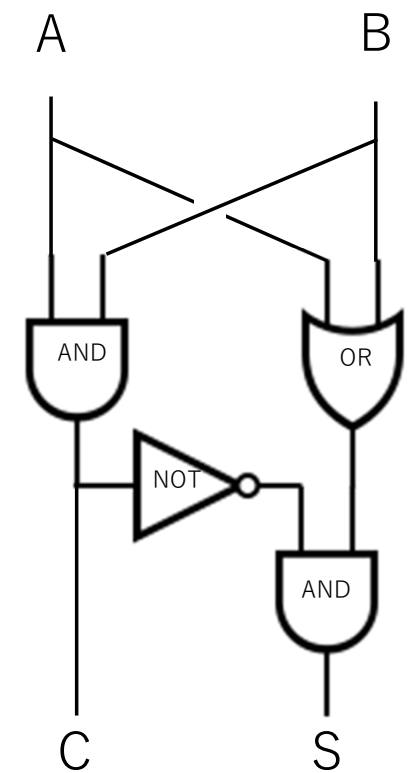
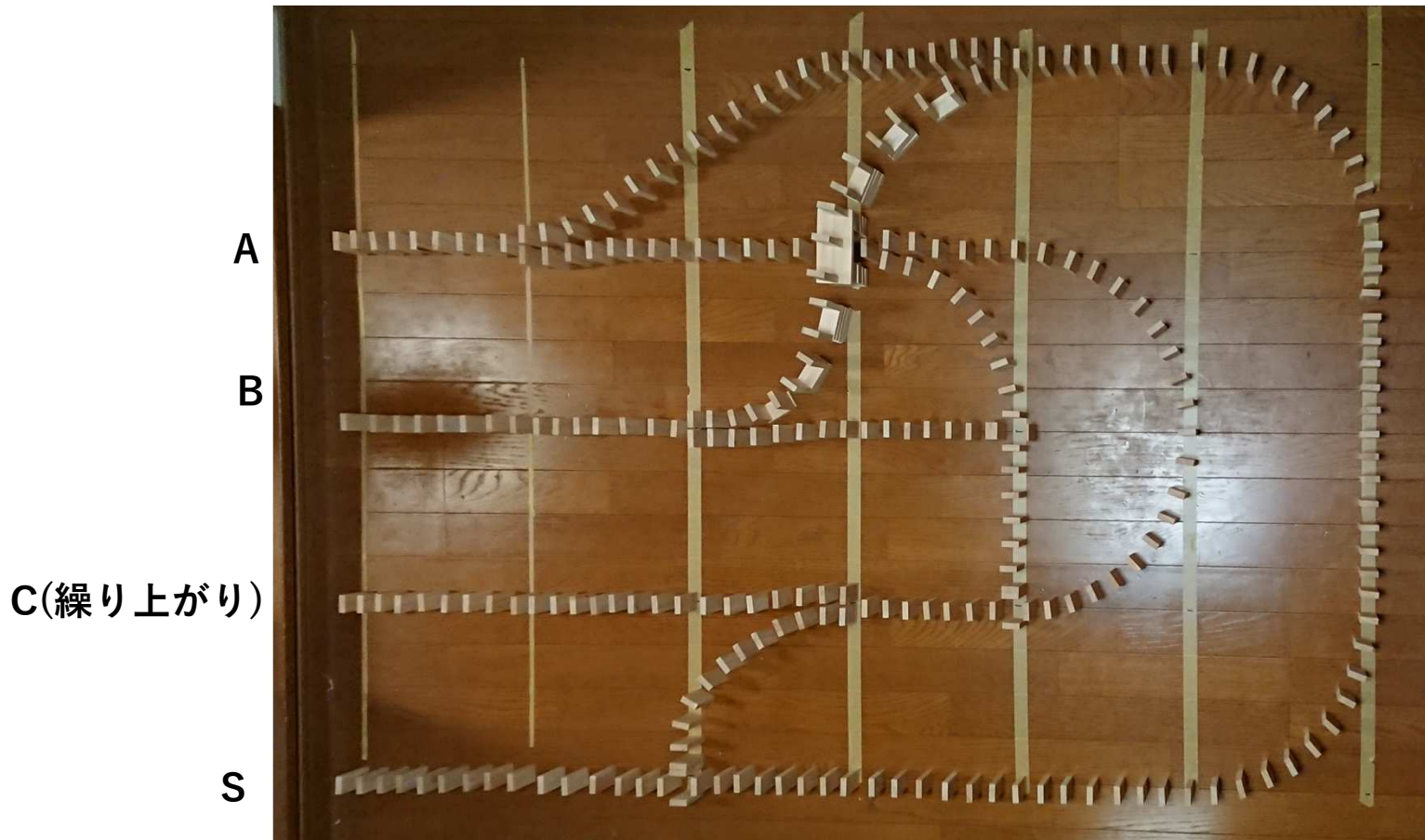


DOMINO COMPUTER WORKSHEETS(<http://think-maths.co.uk/>)より

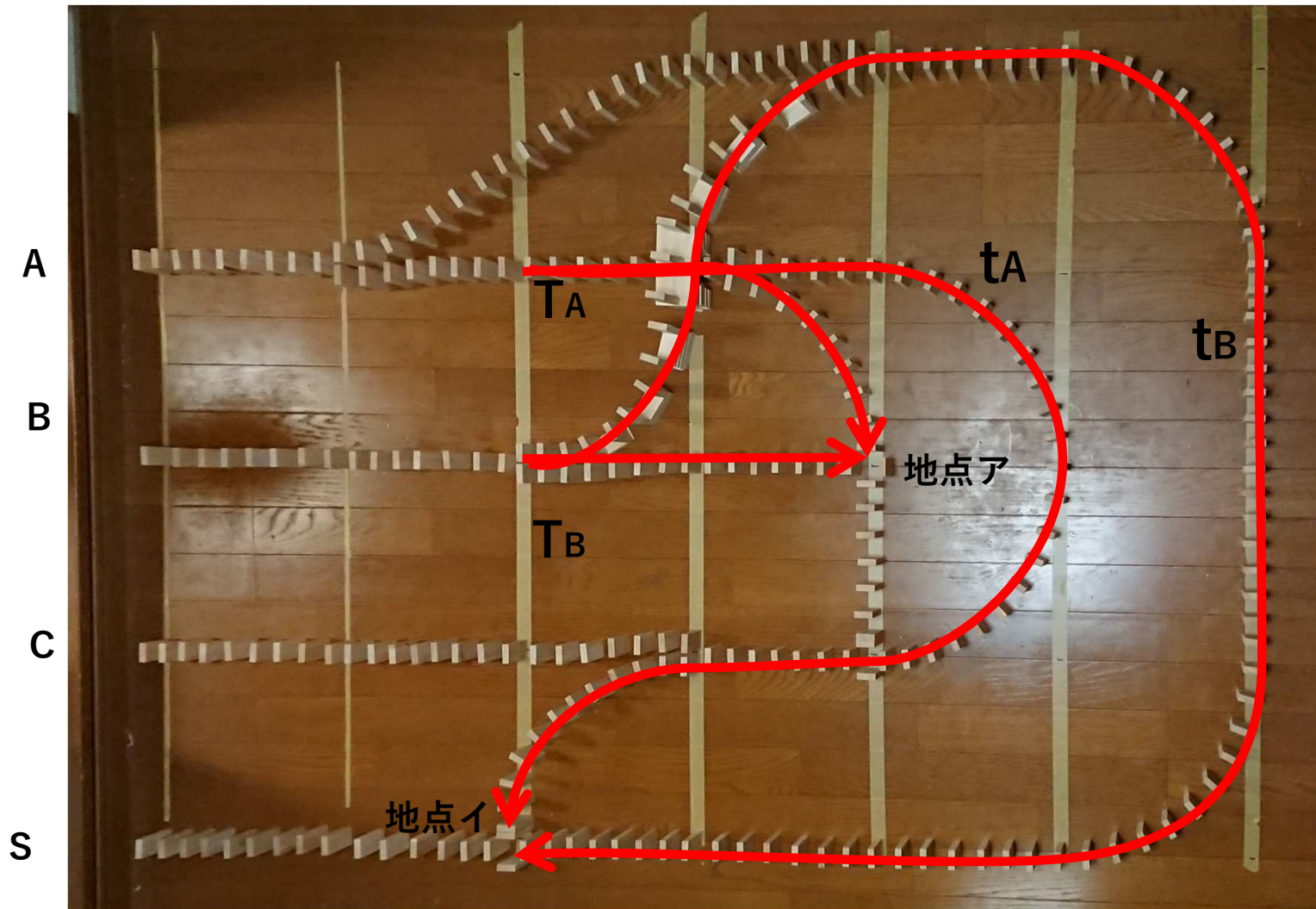
ドミノでどのように計算するのか？

逆流する部分が無いように新たに半加算器を設計しました。

また30cm角(タイルの大きさ)を基本として並べやすくなるような設計にしました。



ドミノでどのように計算するのか？



地点アについて

先にBが倒れないといけない
→ $T_B < T_A$

地点イについて

先にAの方が倒れないといけない
→ $T_A + t_A < T_B + t_B$

合わせて

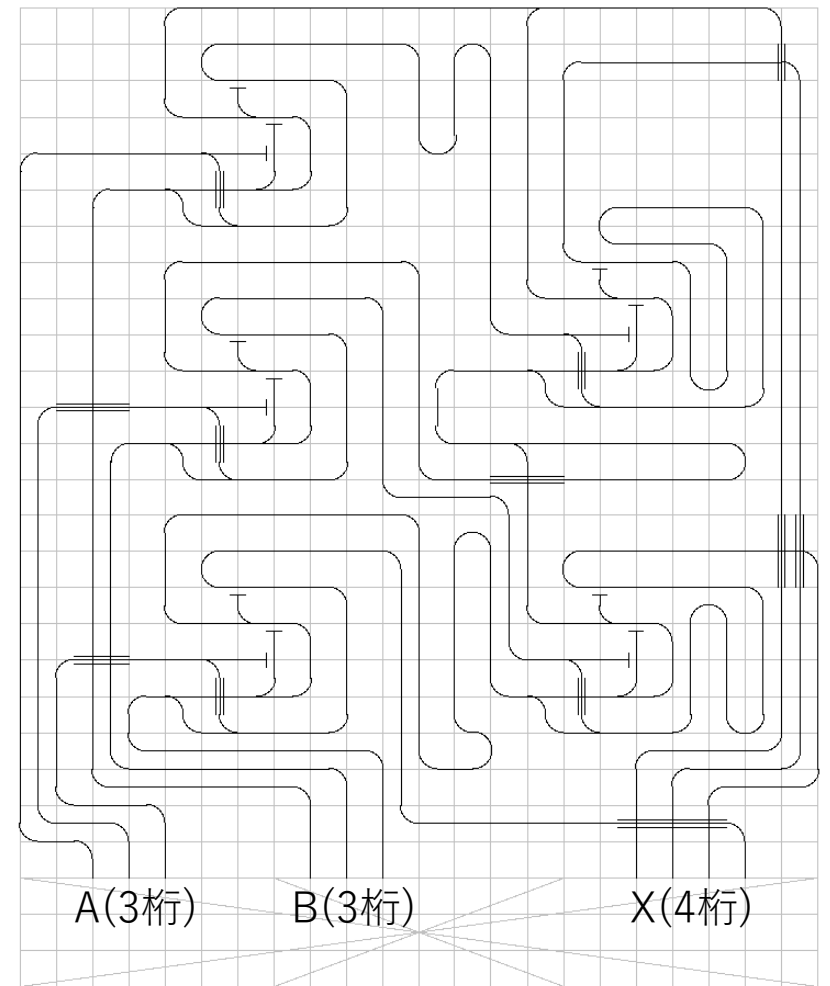
$T_B < T_A < T_B + t_B - t_A$
となり、Bが到着してから
 $t_B - t_A$ までにAが到着しない
といけない

ドミノでどのように計算するのか？

事前に会場の広さを計って、当日(9/9)までに設計図を引きました。
3桁同士の足し算(0+0~7+7)が可能です。



会場：浜田市世界こども美術館 第4展示室
広さ：約7m×8.5m



ドミノ計算機の性能

性能 2進数の3桁同士の足し算
(0+0~7+7)ができる

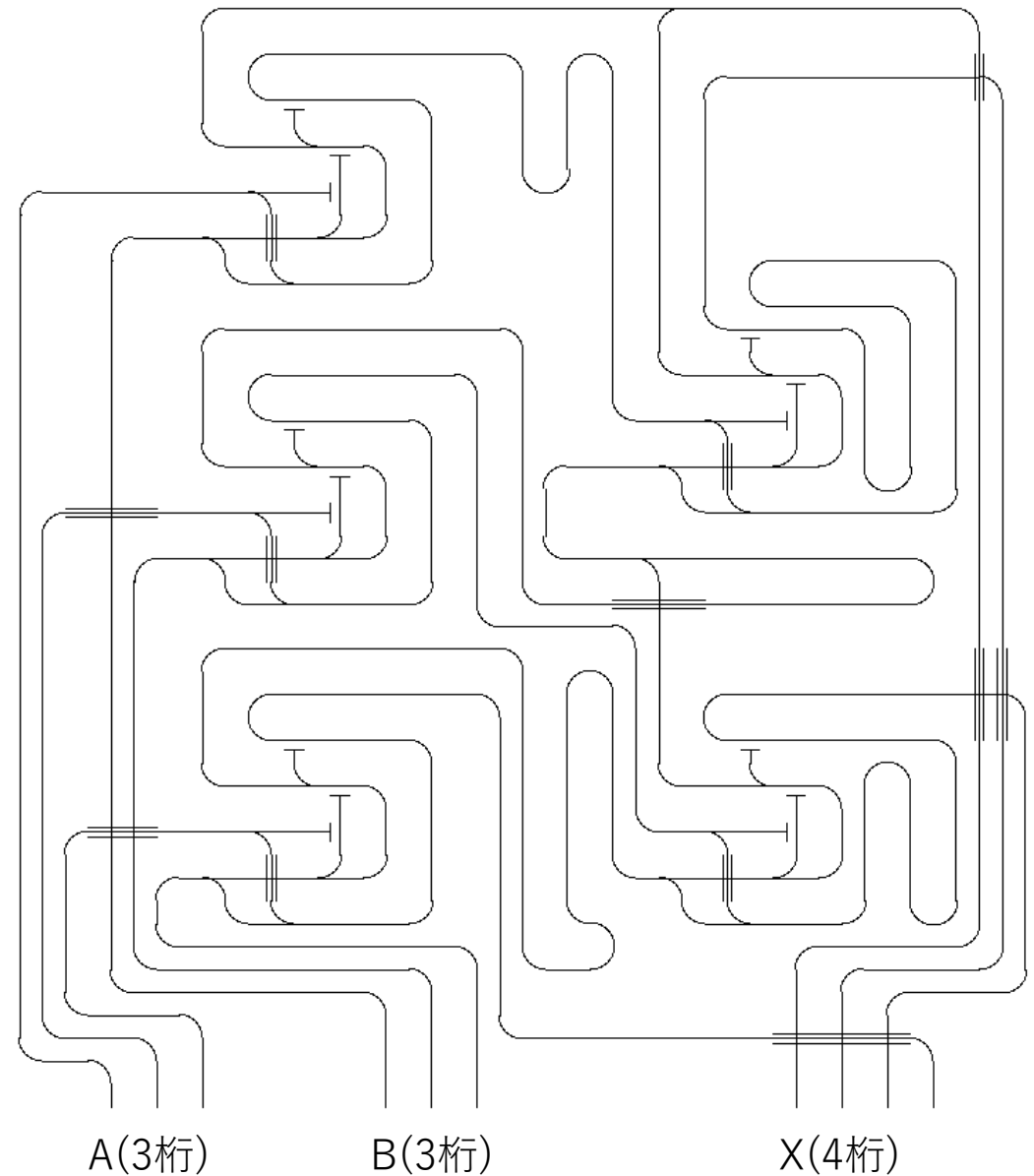
面積 53.46m²(約100万~10億倍)

ドミノの数 約5300コ

総延長 約165m

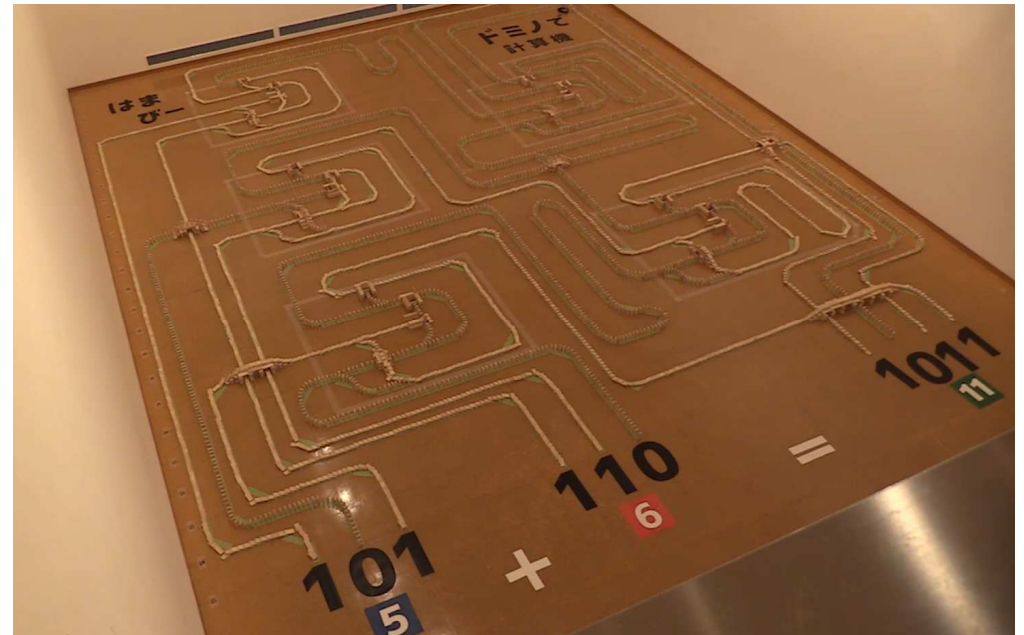
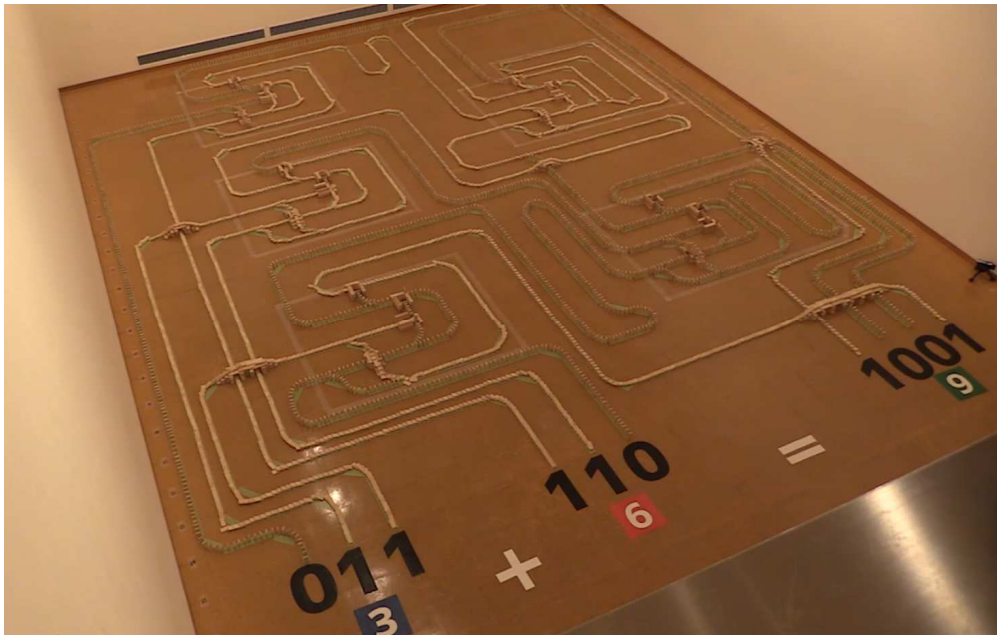
周波数 約16Hz

消費エネルギー 約250W



結果

実験を含めて11回行った結果、 $3 + 6 = 9$ と $5 + 6 = 11$ をそれぞれ1回ずつ計算することに成功した。



今後の展望

もっと大規模で複雑な計算をしてみたい。

ドミノ以外でも、ループ・ゴールドバーグ・マシン、ビリヤード、サイフォン、Minecraft、カニなどで考案(一部実現)されている。

あるSF小説(「円」(劉慈欣))で手旗信号で計算を行う描写があったので、三密を避けソーシャルディスタンスが推奨される現在、丁度いいのではないかと考えている。