膜の分割と結合による並列分子計算の方式*

5P－01

長谷川好功　榊原康文†

東京電機大学理工学部情報科学科‡

1 はじめに

最近，新しい計算パラダイムとして注目されているDNAコンピューティング[3]において，膜を用いた計算は，P Systemsと呼ばれる[1]．P Systemsは，G.Paunによって形式言語理論のモデルとして1998年に提唱された非常に新しい並列計算の考え方[3]である．本研究では，膜を用いる計算モデルにおいて，「結合」という新しい操作を提案し，その有効性の検証をする．そして，その並列性を有効に活用し，NP完全問題であるSATを解くアルゴリズムを構築する．さらに計算機上でシミュレーションを行い，アルゴリズムの有効性と問題点を考察する．

2 P Systems

P Systemsは，膜と反応規則によって構成される．膜が，階層化された状態を初期状態とし，反応規則によって並列に計算を行う．また，各膜が溶解したり，分裂したりすることでも計算を行う．

2.1 膜の構造

膜の基本的な構造は，一番外側に溶解することのないskin膜と呼ばれる膜があり，その内部に階層的に膜が構成されている(図1)．各々の膜には，反応規則が定められている．1つの反応が同時に，かつそれぞれの膜で独立に起こることにより，並列に計算が行えることになる[2]．

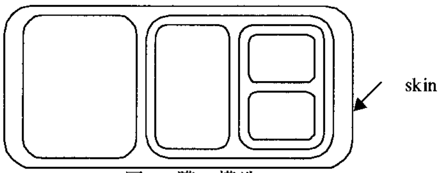


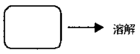
図1．膜の構造

2.2 反応規則

本研究で用いる反応規則を以下に示す．

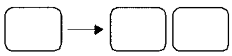
・**溶解**(dissolve)

膜が，溶解することによって，膜内部の記号が膜外部に溶け出す．



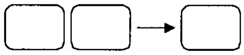
・**分裂**(divide)

分裂は，同じ膜の複製をするときに用いる．



・**結合**(merge)

本研究で，新たに提案する反応規則で，2つの膜が，結合して1つの膜になる．膜内部の記号は，マージされる．



3 膜計算を用いたSATの解法

3.1 準備

SAT(satisfiability of propositional formulas in the conjunctive normal form)とは，連言標準形で与えられたブール式において，式の値が真となる変数の割り当てが存在するのかを問う問題である．連言標準形は，以下のように定義される．

リテラルy_iをブール変数x，あるいはその否定$\neg x$とするとき，節(clause)$C_i(1 \leqq i \leqq m)$は，

$C_i = y_1 \vee y_2 \vee \cdots \vee y_n$

という形で与えられる．よって，連言標準形αは，

$\alpha = C_1 \wedge C_2 \wedge \cdots \wedge C_m$

という形になる．本研究では，次の例を用いて説明を行う．

$\alpha = (x_1 \vee x_2) \wedge (\neg x_2) \wedge (\neg x_2 \vee x_3)$ …①

式①では，例えば割り当て$x_1=1, x_2=0, x_3=1$は，式を真にする．

次に，すべての膜が，膜の中に共通に持つ規則を定義する．

・**膜内の規則**

同じ変数の肯定と否定の組み合わせは，矛盾が生じるので，膜を溶解させる．

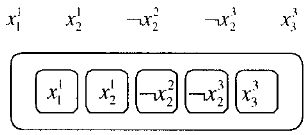
$$x_i^m \neg x_i^n \rightarrow dissolve$$

3.2 解法の提案

式①の例を用いて，提案する解法を説明する．

・**ステップ0**

式①の節$C_1=x_1 \vee \neg x_2, C_2=\neg x_2, C_3=x_2 \vee x_3$内の各リテラルに対して，所属する節の番号を右肩に付加する．そして，各リテラルを1つずつ包む膜を用意する．最後に一番外側のskin膜を用意する．



---

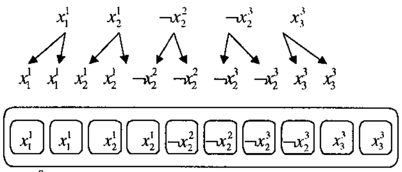
*A method of parallel molecular computing by dividing and merging membranes

† Takanori Hasegawa, Yasubumi Sakakibara

‡ Department of Information Sciences, Tokyo Denki University

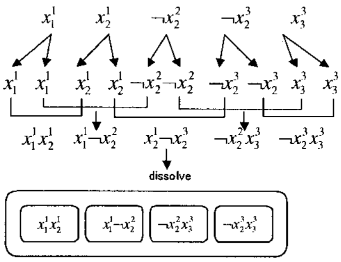
・ステップ1

分裂規則を用いて，0個以上の複製を作成する．
(以下の例では，1個の複製を作成している)



・ステップ2

任意に選んだ2つの膜に対して，結合規則を適用する．このとき，結合した膜に対して，膜内の規則が当てはまるものは，その規則が適用され，膜は溶解する．

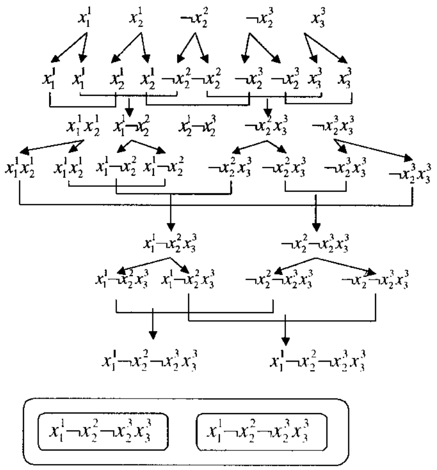


・ステップ3

skin膜以外の膜の状態が，以下の条件になるまでステップ1とステップ2を繰り返す：

・すべての膜の内部状態が同じである

停止した時，各節C_iの中の少なくとも1つの異なるリテラルを含んでいる膜が残っていれば，充足可能である．逆に，膜が，1つも残っていなければ充足不可能と判定する．



本研究の例では，$x_1^1\neg x_2^2\neg x_2^3x_3^3$ が残っているので充足可能であると判定できる．

4 シミュレーション実験と結果

計算機上で，提案を行った解法のシミュレーションを行った．与えた例として，式①と，充足不可能な例として，

$$\beta=(x_1\vee\neg x_2\vee x_3)\wedge(x_2\vee x_3)\wedge(\neg x_1\vee x_3)\wedge\neg x_3\cdots②$$

を考える．分裂数を2個～5個まで変えて，シミュレーションした結果を以下に示す．表は，分裂数を固定にした場合と，分裂数の最大値を与え，その範囲内で可変に分裂させた場合における判定の間違い数を示している．計測は，それぞれ30回行っている．

表1．式①の結果

分裂数	固定	可変
2	7	18
3	1	16
4	0	9
5	0	8

表2．式②の結果

分裂数	固定	可変
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0

5 考察

充足可能な例である式①に対しては，固定分裂，可変分裂ともに分裂数を増やしていけば，確実に不正解数が減っている．固定分裂の時は，分裂数を増やしていけば，組み合わせが増えていくため，正解が得られる確率が高くなる．一方，式②に関しては，充足不可能であるため，分裂と結合を繰り返していく上で，いつかは膜が，矛盾するリテラルを含んで溶解してしまうので，確実に正解が得られることになる．

6 今後の課題

今回行ったシミュレーション実験では，ステップごとに計算を進めている．しかし本来は，分裂と結合を連続時間で自由に行わせるべきであるので，そのような条件の下で再度実験を行いたい．

参考文献

[1] Gheorghe Paun, P Systems with Active Membranes: Attacking NP Complete Problems, CDMTCS Research Report Series, 1999.

[2] Gheorghe Paun, Computing with Membranes (P Systems): Twenty Six Research Topics, CDMTCS Research Report Series, 2000.

[3] 数理科学, No.445, P46-47, JULY 2000.