

2014年度 卒業論文

ラテアートのミルクの動きを
再現した描画手法の提案

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンス ゲームイノベーション プロジェクト

学籍番号 M0111484

武藤 泉

2014年度 卒業論文概要

論文題目

ラテアートのミルクの動きを
再現した描画手法の提案

メディア学部

学籍番号：M0111484

氏名

武藤 泉

指導
教員

渡辺 大地 講師

キーワード

ラテアート、フリーポアラテアート、ピックアート、
流体、格子法、ペンタブレット

近年、ラテアートの流行は徐々に広まっている。ラテアートはコーヒーの表面に細かく泡立てた温かいミルクを注ぎ、絵を描いていくアートである。しかし、一方でラテアートを行うには高い機材や、優れた技術が必要となってくる。また、練習に必要となってくるコーヒーは失敗のたびに消費してしまうためコストが多くかかってしまう。そこでコンピュータグラフィックスによるラテアートのデジタル化である。近年のコンピュータグラフィックスの技術向上は著しく進化し、ラテアートのような複雑で表現が難解なものも、水、炎、煙といった現象を表現するのに用いられる流体シミュレーションにより再現が可能となってきた。そのためラテアートをデジタルで再現することが可能であれば有用である。

本研究では、流体によるマーブリング模様の描画シミュレーション手法を参考とする、コーヒーやミルクを用いてデザインをする流体を用いた、よりリアルなラテアートの再現手法を提案する。また、先行研究にはないペンタブレットの要素を取り入れ、よりリアルな動作でラテアートの流体シミュレーションを行った。

結果、本手法により現実に近いミルクの流れ方を流体で表現することができた。また、入力デバイスをペンタブレットにすることにより、操作性も現実のピッチャーでミルクを入れる動きにすることによって本当にミルクを流しているかのような体験ができた。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第2章	ラテアートの概要	3
2.1	ラテアートの特徴	3
2.2	ラテアートの製作工程	6
第3章	ラテアートシミュレーションの提案手法	9
3.1	提案手法の概要	9
3.2	粒子によるミルクの表現方法	10
3.3	ミルクの流れの表現	10
3.4	ペンタブレット入力による表現	12
3.5	移流項の計算	13
3.6	流速の補間	14
3.7	圧力項の計算	14
3.8	圧力項の離散化	15
3.9	粘性拡散項の計算	16
3.10	連立一次方程式の計算	16
3.11	ミルクの流れる表現	17
3.12	粒子のレンダリング手法	17
第4章	検証と評価	18
4.1	操作手順と出力結果	18
4.2	試用したユーザーからの評価	22
第5章	まとめ	24
	謝辞	25
	参考文献	26

目 次

2.1	フリーポアラテアートの作法を用いたラテアートの例（リーフ）	4
2.2	フリーポアラテアートの作法を用いたラテアートの例（ハート）	4
2.3	クレマの例	5
2.4	ピックアートの例	6
2.5	リーフの製作工程 その1	7
2.6	リーフの製作工程 その2	8
2.7	リーフの製作工程 その3	8
2.8	リーフの製作工程 その4	8
3.1	ミルクの粒子の詳細図	10
3.2	2次元のスタッガード格子	11
3.3	実際に使用したペンタレット	12
4.1	実装したシステムの基本画面	19
4.2	ミルクを流している例 その1	20
4.3	ミルクを流している例 その2	20
4.4	ミルクを流している例 その3	20
4.5	ミルクを流している例 その4	20
4.6	実際にミルクを流している様子	21
4.7	ピックアートで描いた例	22

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、ラテアート [1] の流行は徐々に広まっている。ラテアートはコーヒーの表面に細かく泡立てた温かいミルクを注ぎ、絵を描いていくアートである。最近では Twitter[2] といったソーシャルネットワーキングサイトや、ニコニコ動画 [3] や YouTube[4] といった動画投稿サイトに自分で作ったラテアートの写真や、製作工程を撮影した動画を投稿し、作品についての意見や感想を述べたりする。また、コーヒーコーディネーター検定 [5] とよぶ資格が存在し、先ほどの教室ではこうした資格も取るために学ぶことも可能である。しかし、一方でラテアートを行うには高い機材や、優れた技術が必要となってくる。また、練習に必要なコーヒーは失敗のたびに消費してしまうためコストが多くかかってしまう。本研究では、デジタル化によりコスト削減を行えることに着目した。近年のコンピュータグラフィックスの技術向上は著しく進化し、ラテアートのような複雑で表現が難解なものも、水、炎、煙といった現象を表現するのに用いられる流体シミュレーションにより再現が可能となってきた。そのためラテアートをデジタルで再現することが可能であれば有用である。そこでコンピュータグラフィックスによるラテアートのデジタル化である

デジタル化したラテアートについて、Chen ら [6] の研究では流体シミュレーション [7][8] を用いてラテアートを描画しており、現実のラテアートとほとんど同じも

のをデジタルで再現することが可能である。この研究で特徴的なのはモバイルデバイスを用いたことにより、タッチ機能を使った直感的な操作でラテアートを作ることができることである。また、デジタル上で表現していることで何度でもラテアートを作ることが可能である。そのため、コーヒーやミルクといった材料の消費も必要ない。また他の既存手法に、森永乳業からリリースされているモバイルデバイスによるラテアートを模したペイントツール [9] がある。このペイントツールもタッチ操作を用いてラテアートを行うことが可能である。

しかし、Chen らの研究ではモバイルデバイスによるタッチ機能での再現なので、これでは現実に近い動作でラテアートを描く感覚は得られず、出力結果も実際のラテアートを再現できていない。また、森永乳業のペイントツールも出力結果が実際のラテアートのように表現することができていない。

本研究では、流体によるマーブリング模様の描画シミュレーション [10][11] を参考に、コーヒーやミルクを用いてデザインをする流体を用いたよりリアルなラテアートの再現を目的とした。また、Chen らの研究ではタッチ機能を用いた手法であったが、本研究ではタッチ操作の代わりにペンタブレットの要素を取り入れ、よりリアルな動作でラテアートの流体シミュレーションを行った。

結果、本手法により現実に近いミルクの流れ方を流体で表現することができた。また、入力デバイスをペンタブレットにすることにより、操作性も現実のピッチャーでミルクを入れる動きにすることによって本当にミルクを流しているかのような体験ができた。

1.2 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成する。2 章でラテアートの概要や特徴、製作工程について述べる。3 章で本研究の提案手法を述べ、4 章では検証とその評価を行い、5 章でまとめと今後の展望を述べる。

第 2 章

ラテアートの概要

ラテアートとは、コーヒーを用いてデザインされるアートのことである。そのラテアートの歴史は古いもので 1980 年頃からアメリカでは流行し出している。本章ではラテアートの特徴やその製作工程を説明する。

2.1 ラテアートの特徴

ラテアートはコーヒーの表面に細かく泡立てた温かいミルクを注ぎ、絵を描いていくアートである。また、ラテアートの描く手法としてフリーポアラテアートとピックアートの大きく 2 種類に分かれている [12]。

まずはフリーポアラテアートについて説明する。ここで図 2.1、図 2.2 はそれぞれ葉っぱとハートをモチーフにしたラテアートの絵を示す。フリーポアラテアートとは、ミルクを流す段階で絵を描いていく作法である。この手法でよくみられる葉っぱやハートの絵が描かれているラテアートにはこの作法が用いられる。



図 2.1: フリーポアラテアートの作法を用いたラテアートの例（リーフ）



図 2.2: フリーポアラテアートの作法を用いたラテアートの例（ハート）

ラテアートを作る上で重要なのが、クレマ [13] と呼ばれるきめ細かい泡のことである。ここで図 2.3 はクレマの例を示す。ミルクを入れることによりクレマの層が徐々に上へ押し出される。この時ミルクは下のコーヒーの層と混ざりきったところで、クレマとミルクが混ざり合いラテアートのような模様を描くことができる。また、このクレマの量によってはラテアートの出来が異なってくる。フリー

ポアラテアートはミルクを流しこみながら絵を描いていく。なので、クレマを図2.3よりも極端に量が違くとラテアートの出来は違ってくる。



図 2.3: クレマの例

次にピックアートについて説明する。ラテアートにはいくつかの手法があるが、このピックアートはフリーポアラテアートと同様によく使われる手法である。ピックアートとは、カップにミルクを注ぎきった後にラテアートピックといった先の尖った針状の物で表面をなぞりながら絵を描いていく手法である。図2.4のようにピックの先にチョコや周りのコーヒーをつけ、それを表面になぞることにより、フリーポアラテアートではできない細かな表現が可能となる。また、表面に注いだミルクの模様をピックでなぞることによって小さいハートなどを作ることができる。



図 2.4: ピックアートの例

2.2 ラテアートの製作工程

ラテアートは人によって細かい部分で多少の手法の違いは出てくるが、それぞれの絵の主な製作工程はどれも同様である。また、今回は例としてフリーポアラテアートの手法で作るリーフの製作工程 [14] を紹介する。本節に記載してある内容を必ずしも全て守るようなことはしなくても構わない。

図 2.5 から図 2.8 はリーフの製作工程を図で表したものである。図 2.5 のように注ぎはじめでは、クレマを壊さないように 2~3cm ほどの高さから静かに注ぐ。2~3cm の高さから注ぐためには、カップを大きく傾ける必要がある。高い位置から注ぐと、対流によってクレマがミルクと混ぜ合うことになるので、コントラストが付きにくくなる。また、注いだ時にまきこまれる空気が口当たりの悪い泡を形成してしまう。このことを理解した上で、クレマのやや強すぎる風味をマイルドにし、エアのまきこみも抑えて口当たりの良いフォームにする方法も存在する。また、ミルクが表面全体に広がってしまう場合がある。これは、空気量が多いか、

スピンのできていないため軽いフォームができてしまうことが原因であることが多い。

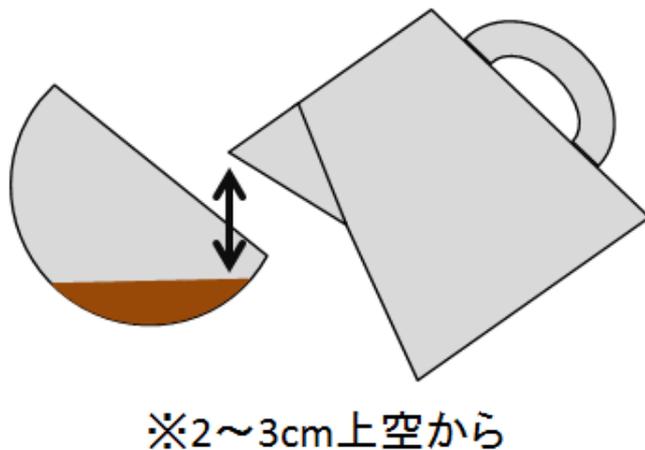
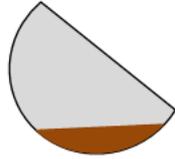


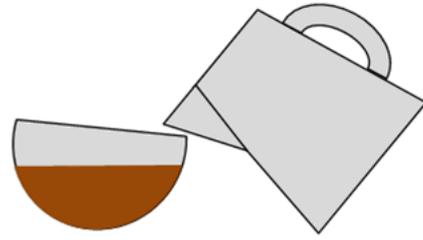
図 2.5: リーフの製作工程 その1

ラテアートをするためにはミルクを表面に浮かせなくてはならない。ミルクが表面に浮くには、大きく2つの要素がある。第一の要素は、ミルクの比重である。軽いほど浮きやすく、重いほど沈みやすくなる。もっともバランスがよいのは、クレマと同じ比重で、コシのあるなめらかなクレマには同様のミルクでないといけない。第二の要素は、ピッチャーとエスプレッソとの距離である。ふたつの距離が離れているほど加速度が加わり、ミルクの落下速度が速くなるため沈みやすくなる。図 2.6 はカップの傾き具合と流し始めた直後のコーヒーの表面の様子を示し、図 2.7 はミルクの注ぎ方を示す。図 2.6 のカップの傾きのまま注ぎ、ミルクが表面に浮き上がってきたところで、図 2.7 ピッチャーを左右に小さく振りながら注ぐ。そのまま振り幅を徐々に狭めていきながら手前に引いていき、左右に広がった絵を作る。以下の図 2.8 はその後のピッチャーの動かし方を示しており、ピッチャーを少し持ち上げた後に、ゆっくりと奥へ移動させることにより、注がれた方向へ

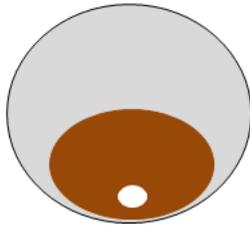
ミルクがずれ、リーフの模様になる。



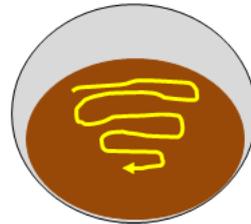
※同じ角度で傾けたまま



カップの傾きを徐々に戻していき、注ぎ口を5mm間隔まで近づける



※小さなミルクの点が見えるまで



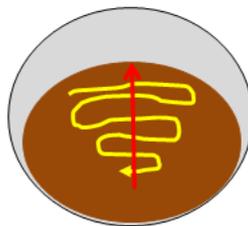
黄色線のように左右均等にミルクを注ぐ

図 2.6: リーフの製作工程 その2

図 2.7: リーフの製作工程 その3



ピッチャーをゆっくりと奥へ移動させる



赤色線のように中央をまっすぐ切る

図 2.8: リーフの製作工程 その4

第 3 章

ラテアートシミュレーションの提案 手法

3.1 提案手法の概要

本節では、第 2 章で説明したラテアートの製作工程を模範した提案手法を以下の項目順に説明する。

- 粒子によるミルクの表現方法
- ペンタブレット入力による表現方法
- 格子法を用いたミルクの流れの表現方法

本研究ではミルクが底のコーヒーと混ざった状態を前提に、ラテアートをするために必要なカップをペンタブレットのペンに見立て、ラテアートのシミュレートしていくことを目的とした。また、カップの傾きや前方向からの視点はなく、常にカップの表面を真上から見下ろした状態を想定した。これはデジタル上で x, y 平面座標系を基準に表現した。ミルクの表現は傾けたペンの先から流れるようにし、そのまま傾けた方向へとミルクが動き出すようになっている。この時、粒子は傾けた角度が (20°) から (60°) の間でのみ追加した。

3.2 粒子によるミルクの表現方法

本手法では、ラテアートのミルクを小さな白い粒子の集合体で表現した。ここで図 3.1 はミルクの粒子の詳細を図にして表したものである。粒子は描画した範囲内に一度に追加される数をペンの傾き具合によって決める。描画された粒子郡を連続で表示させることによってミルクに近い表現を可能にした。

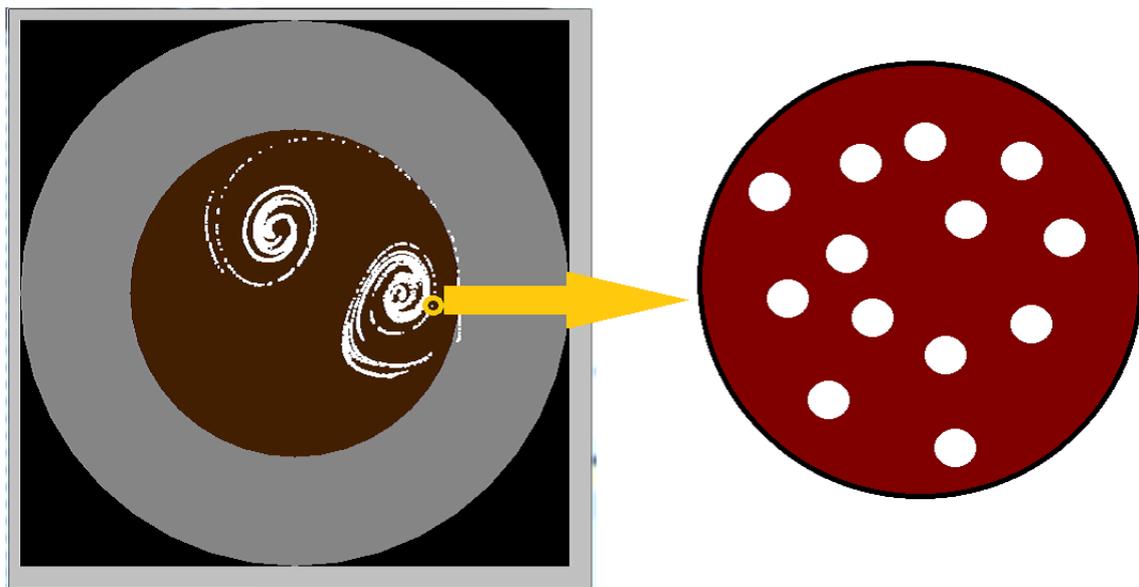


図 3.1: ミルクの粒子の詳細図

粒子は一度に追加する最大個数、粒子を追加する領域の最大半径を定数で定め、その領域内に乱数で決められたランダム位置に描画した。ペンタブレット上で検知したペンの位置を取得し、傾き度合いによって決められた粒子の個数分描画した。

3.3 ミルクの流れの表現

本手法は安東 [10] によるマーブル模様の表現手法で紹介されている Fedkiew ら [15] の流体の基礎計算モデルを参考にし、注がれるミルクを小さな粒子を多く描画し、その集合体を流体力学を用いて動かす事によって表現している。今回は流体力学の格子法 [16][17] と呼ばれる手法を用いて実装をした。格子法とは、シミュ

レーションをするものに対して空間を格子状に分割し、各格子点や格子領域を用いて物理量を離散化し、支配方程式にて数値計算で解く手法である。本手法ではコーヒーカップのコーヒーの部分格子状のグリッドで離散化し、各格子の中心に圧力点を置き、流速を格子面に設置することで粒子を動かす。これをスタッガード格子とよぶ。図 3.2 はスタッガード格子を図で表したものである。ここで赤矢印を垂直方向の流速、青矢印を水平方向成分の流速、黄色い円状の物を圧力点とする。

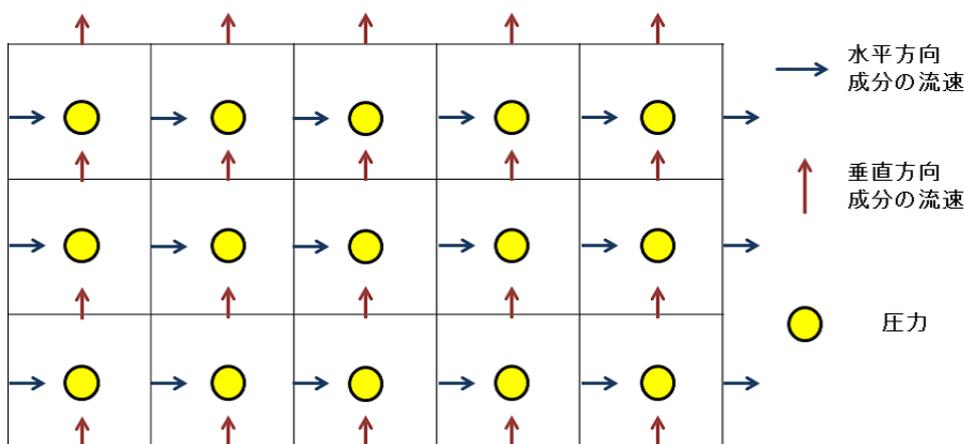


図 3.2: 2次元のスタッガード格子

さらに、高速にシミュレーションできることから、近年の映像コンテンツやゲームコンテンツの制作にて水、炎、煙といった人間の手によって作るには難解な表現のものを制作するのに用いることが増えてきている。こうした特徴から本手法で考慮するコーヒー上のミルクの流れの動きを表現するのに適していると考え、格子法を用いることにする。

粒子の動きを扱う方程式として以下の式 (3.1) 式 (3.2) がある。式 (3.1) は粒子の動きを方程式で表すナビエ・ストークス方程式 [18] であり、式 (3.2) は質量保存則を表す連続の式である。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{p} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (3.2)$$

ここで \mathbf{u} 、 p 、 ρ 、 ν 、 \mathbf{f} はそれぞれ流速、圧力、密度、粘性、外力を示す。式 (3.1) の左辺の $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ は流速の時間変化を表し、右辺の $(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$ は移流項を、 $\frac{1}{\rho}\nabla p$ は圧力項を、 $\nu\nabla^2\mathbf{u}$ は粘性項を、 \mathbf{f} は外力項を表す。そして、それぞれの力を解いた後に、最終的に全ての和を求めることによって解く。本手法では安東による格子法を用いた美しいマーブル模様の生成方法 [10] を参考にしているが、それには粘性項の部分が省かれているため、粘性項を追加しよりミルクに似た表現を再現した。

3.4 ペンタブレット入力による表現

ユーザーがコンピュータ上でミルクを流す際に現実のラテアートを模倣する要素としてペンタブレットを入力機器として使用した。図 3.3 は実際に使用したペンタブレットである。

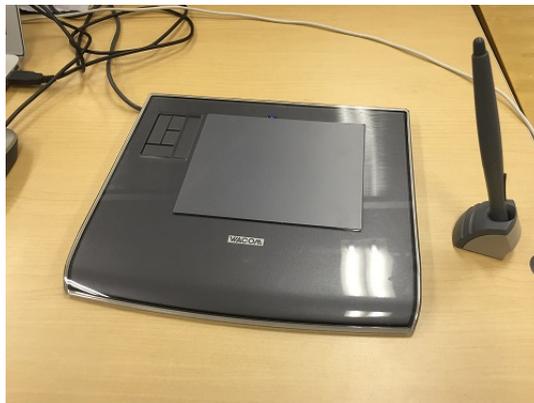


図 3.3: 実際に使用したペンタブレット

ペンタブレットにはペンをタブレットから離している状態でもペンの情報を検知することが可能である。ペンから検知される情報はペンタブレットの機種にもよるが、今回使用したモデルは筆圧、ペンの傾き度合い、傾けた方向の検知が可能である。本手法ではこの筆圧、ペンの傾き度合い、傾けた方向を検知し、傾け

た方向へ傾いた度合いの量のミルクが流れるように実装した。また、筆圧によって粒子を消す量を調節することが可能である。

まずはフリーポアモードでの計算について述べる。ペンの傾く方向を外力に与えることにより粒子へ与える外力がペンの傾く方向へとなる。それを示したものが式 (3.3) である。

$$\mathbf{f} = m\mathbf{d}. \quad (3.3)$$

ここでミルクの速度係数 m 、ペンの方向ベクトル \mathbf{d} を示す。

3.5 移流項の計算

本節は安東らの手法を参考に $-(\mathbf{u} \cdot \nabla)$ 移流項の計算を示す。ここで t 時間における水平方向と垂直方向の流速を式 (3.4) で示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u}(x, y, t) = -\mathbf{u}(x, y, t) \left(\hat{\mathbf{x}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{u}(x, y, t) + \hat{\mathbf{y}} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{u}(x, y, t) \right). \quad (3.4)$$

ここで (x, y) は空間位置、 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ は (x, y) 方向の単位ベクトルを示す。この式を、前進差分を使って離散化 [19] したものが式 (3.5) である。

$$-\mathbf{u}(x, y, t) \left(\frac{\mathbf{u}(x + \Delta x, y, t) - \mathbf{u}(x, y, t)}{\Delta x} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \frac{\mathbf{u}(x, y + \Delta y, t) - \mathbf{u}(x, y, t)}{\Delta y} \cdot \hat{\mathbf{y}} \right) = \frac{\mathbf{u}(x, y, t + \Delta t) - \mathbf{u}(x, y, t)}{\Delta t} \quad (3.5)$$

各項についてまとめたものが、式 (3.6) となる。

$$\mathbf{u}(x, y, t) \left(1 - \frac{\mathbf{u}(x + \Delta x, y, t) - \mathbf{u}(x, y, t)}{\Delta x} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \frac{\mathbf{u}(x, y + \Delta y, t) - \mathbf{u}(x, y, t)}{\Delta y} \cdot \hat{\mathbf{y}} \right) = \mathbf{u}(x, y, t + \Delta t) \quad (3.6)$$

3.6 流速の補間

流速を補間するには、まず MAC[20] 格子上座標系での位置 $\mathbf{p} = (x, y)$ を、それぞれの流速成分の座標系の原点が一致するように、セルの幅の半分だけ位置をずらすことにより補間する。求めたい流速点のまわりの 4 つの離散点の流速をそれぞれ $\mathbf{u}(i, j), \mathbf{u}(i, j+1), \mathbf{u}(i+1, j+1), \mathbf{u}(i+1, j)$ とする。ここで、 i, j をそれぞれ 0 から始まる整数値とすると、 $i = \lfloor \frac{x}{\Delta x} \rfloor, j = \lfloor \frac{y}{\Delta x} \rfloor$ で求める。 x, y は流速成分の座標系の位置である。 $x^* = x/\Delta x - i, y^* = y/\Delta x - j$ と座標変換したとき、ある位置での流速 $\mathbf{u}(x, y)$ の双線形補間は式 (3.7) で求める。

$$\mathbf{u}(x, y) = \begin{bmatrix} (1-x^*)(1-y^*) \\ (1-x^*)y^* \\ x^*(1-y^*) \\ x^*y^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{i,j} \\ \mathbf{u}_{i,j+1} \\ \mathbf{u}_{i+1,j} \\ \mathbf{u}_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.7 圧力項の計算

本節は安東らの手法を参考に圧力項の計算を示す。圧力項を考慮した流速を式 (3.8) で求める。

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla \mathbf{p}. \quad (3.8)$$

ここで \mathbf{u}^* は移流項のみを計算した流速である。さらに式 (3.8) の両辺の発散させ、非圧縮条件により $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ なので式 (3.9) が求まる。

$$\frac{\Delta t}{\rho} \nabla^2 \mathbf{p} = \nabla \cdot \mathbf{u}^*. \quad (3.9)$$

最終的に式 (3.9) が満たされる圧力分布 \mathbf{p} を解くことにより、流速場 $\mathbf{u}(t+1)$ を求める。この式 (3.9) をポアソン方程式 [21] とよぶ。

3.8 圧力項の離散化

MAC 格子で離散化を得るには物理量の平均がセルの範囲で釣り合うように両辺をセルの領域 $V = (\Delta x)^2$ によって積分する。それを式 (3.10) で表す。

$$\frac{1}{V} \int_V \frac{\Delta t}{\rho} \nabla^2 \mathbf{p} = \frac{1}{V} \int_V \nabla \cdot \mathbf{u}^*. \quad (3.10)$$

式 (3.10) の両辺に発散定理を適用することにより、式 (3.11) の境界積分となる。

$$\frac{1}{V} \oint_V \frac{\Delta t}{\rho} \nabla \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{V} \oint_V \mathbf{u}^* \cdot \mathbf{n}. \quad (3.11)$$

ここで本研究の境界条件はコーヒカップの内側の縁部分とする。セルが境界と接している場合、ミルクの粒子に与える圧力、流速の力を強制的に 0 にする。これをディリクレ条件とよぶ。この条件のもと、圧力の微分に前方差分 $\nabla p = \frac{(p_{i+1} - p_i)}{\Delta x}$ を適用させ、式 (3.11) を離散化した式 (3.12) が求まる。

$$\frac{1}{V} \sum_k \frac{\Delta t}{\rho} F_k \Delta x \left(\frac{\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{i,j}}{\Delta x} \right) = \frac{1}{V} \sum_k \Delta x D_k F_k \mathbf{u}_k. \quad (3.12)$$

ここで、それぞれの係数は以下のとおりとなる。

- F_k : セル (i, j) の周囲 4 セルのブーリアン値。流体セルなら 1 を、壁セルなら 0 となる。
- D_k : セル (i, j) の周囲 4 セルのベクトル成分が + か - かを示す。よって、この場合 1 または -1 となる。
- $\mathbf{p}_{i,j}$: セル (i, j) の圧力値である。
- \mathbf{p}_k : セル (i, j) の周囲 4 セルの圧力値である。
- \mathbf{u}_k : セル (i, j) に隣接する周囲 4 セルの流速値である。

3.9 粘性拡散項の計算

ミルクは永遠に流れ続けはしないので、粘性を考慮することにより流速を制御することによってより現実的なミルクの動きに近づく。しかし、安東による手法では粘性項を考慮していないため、藤沢 [22] による流体を用いた雲の描画手法を参考に粘性項を追加した。まずは粘性 v をセルの面積 Δx^2 で割り、 Δt をかけて求める。その計算方法を式 (3.13) で表す。

$$v = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2}. \quad (3.13)$$

ここで v は流速地点の周囲のセルから流速地点に拡散してくる流速を示し、 D は拡散係数を示す。 v を式 (3.14) に代入し、粘性を考慮した流速を求める。これにより、粘性を持った流速が生まれ、粒子の流れにブレーキがかかる。

$$\mathbf{u}_{i,j} = \frac{\mathbf{u}_{i,j} + v(\mathbf{u}_{i-1,j} + \mathbf{u}_{i+1,j} + \mathbf{u}_{i,j-1} + \mathbf{u}_{i,j+1})}{1 + 4v}. \quad (3.14)$$

ここで $\mathbf{u}_{i,j}$ は移流する前の流速を示す。

3.10 連立一次方程式の計算

本節では安東らの手法を参考に圧力項の離散式 (3.12) と粘性拡散項の式 (3.14) を反復法の一つであるガウス・ザイデル法 [23] を用いて圧力値 $\mathbf{p}_{i,j}$ と粘性を考慮した流速 $\mathbf{u}_{i,j}$ を求める。ガウス・ザイデル法用いた圧力値を計算するには式 (3.15) で示す。流速についても同じように求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{i,j}^{k+1} = & \left(\sum_n F_n \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} \right)^{-1} \left(\sum_{n=1,2} F_n \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} \mathbf{p}_n^k \right. \\ & \left. + \sum_{n=3,4} F_n \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} \mathbf{p}_n^{k+1} - \sum_n F_n \frac{D_n u_n}{\Delta x} \right). \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.11 ミルクの流れる表現

本節ではミルクを流した後の模様の表現手法を説明する。本手法では、ミルクがマーブル模様を描くように粒子が流れる。ここでミルクを4次精度ルンゲ=クッタ法 [24][25] を用いることにより実現した。ルンゲ=クッタ法を使った移流は、1次精度よりも高度な精度で、セミ・ラグランジュ移流のバックトレースの精度向上にも適用できる。高精度の移流になると誤差が軽減され到着点へと近づけることが可能になる。4次精度ルンゲ=クッタ法を用いた粒子の更新は、式 (3.16) ~ 式 (3.20) で示す。

$$\mathbf{p}_{t+\Delta t} = \mathbf{p}_t + \frac{\Delta t}{6}(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4), \quad (3.16)$$

$$\mathbf{k}_1 = \mathbf{u}(\mathbf{p}_t), \quad (3.17)$$

$$\mathbf{k}_2 = \mathbf{u}\left(\mathbf{p}_t + \frac{1}{2}\Delta t\mathbf{k}_1\right), \quad (3.18)$$

$$\mathbf{k}_3 = \mathbf{u}\left(\mathbf{p}_t + \frac{1}{2}\Delta t\mathbf{k}_2\right), \quad (3.19)$$

$$\mathbf{k}_4 = \mathbf{u}(\mathbf{p}_t + \Delta t\mathbf{k}_3). \quad (3.20)$$

ここで時刻 t における粒子の位置を \mathbf{p} 、その地点での流速を $\mathbf{u}(\mathbf{p}t)$ とする。

3.12 粒子のレンダリング手法

本手法では、シミュレート結果を出力させるためにグラフィックツールキットである FKSystem[26] を用いて粒子を描画する。粒子の形状は円で表しており、大きさは半径7ピクセルとする。RGB値はミルクを表現するため白になるようにする。

第 4 章

検証と評価

本節では、提案手法で実装を行ったシステムを用いて、提案手法による粒子によるミルクの表現、ミルクの流れる表現が実現できているかを検証した。そのためにシステムの操作や入出力方法を示す。また、提案手法での実現度を評価・検証するため、現実のラテアートとの比較に関する評価・検証をした。また、実装にはグラフィックスツールキットである FKSystem、WACOM 社の Intuos3GraphicsTablet を使用した。実装を行った環境は表 4.1 の通りである。

表 4.1: 実行環境

OS	Windows7 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-3667U CPU @ 2.00GHz 2.0GHz
GPU	Intel(R) HD Graphics 4000
ビデオメモリ	1696MB
メインメモリ	8GB

4.1 操作手順と出力結果

本手法ではペンタブレットを用いており、ペンタブレットのペンをミルクを注ぐピッチャーに見立てシミュレートしていく。また、本システムにはフリーポアラテアートモードとピックアートモードの二つのモードを実装している。これに

よってフリーポアラテアートでミルクを流していくか、ピックアートで流したミルクに線を描いていくかを使い分けて操作することが可能である。その基本画面が図 4.1 である。

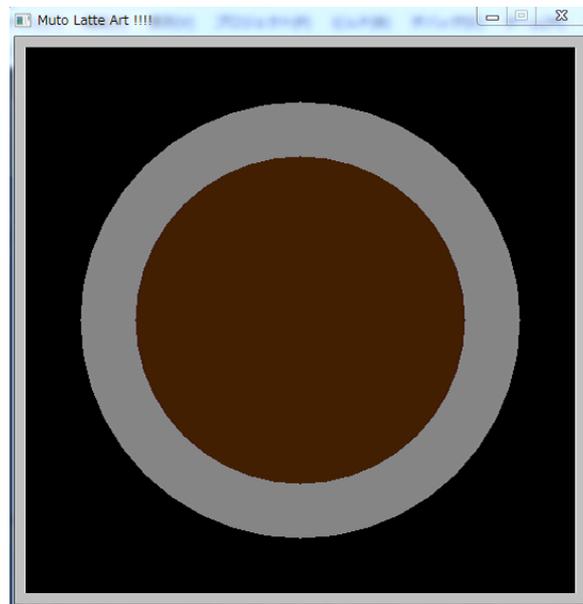


図 4.1: 実装したシステムの基本画面

まずはモードの変更方法についてである。モードの変更はキーボードの C キーを押すことによってモードが切り替わるようになる。以下では、それぞれのモードについてと操作説明を示す。フリーポアラテアートモードでは、ペンタブレットを用いてミルクを流していきながらラテアートを制作する。ミルクの流し方は、ペンをペンタブレットの上で傾かせることによって流すことができる。この時、ペンの傾きが約 25° ~ 60° の範囲で傾くことによって自動的にミルクを流していく。また、ペンはペンタブレットから離している状態でも傾きを検知するため、空中でカップを動かしているかのように操作することが可能である。実際のミルクの流し方でリーフを描いた様子を図 4.2 から図 4.5 で示し、シミュレーション上でミルクを流している様子を図 4.6 で示す。図 4.2 のように最初はペンを左右に振りながらミルクを流し込む。この時徐々に流す方向とは逆へとペンを動かしていく。そして図 4.3 のところまでミルクを流し終わると、次は流したミルクの中央部分を切

るようにペンをなぞる。すると図 4.4 のようになり、最後まで書き終えたればリーフの絵を描くことが可能である。

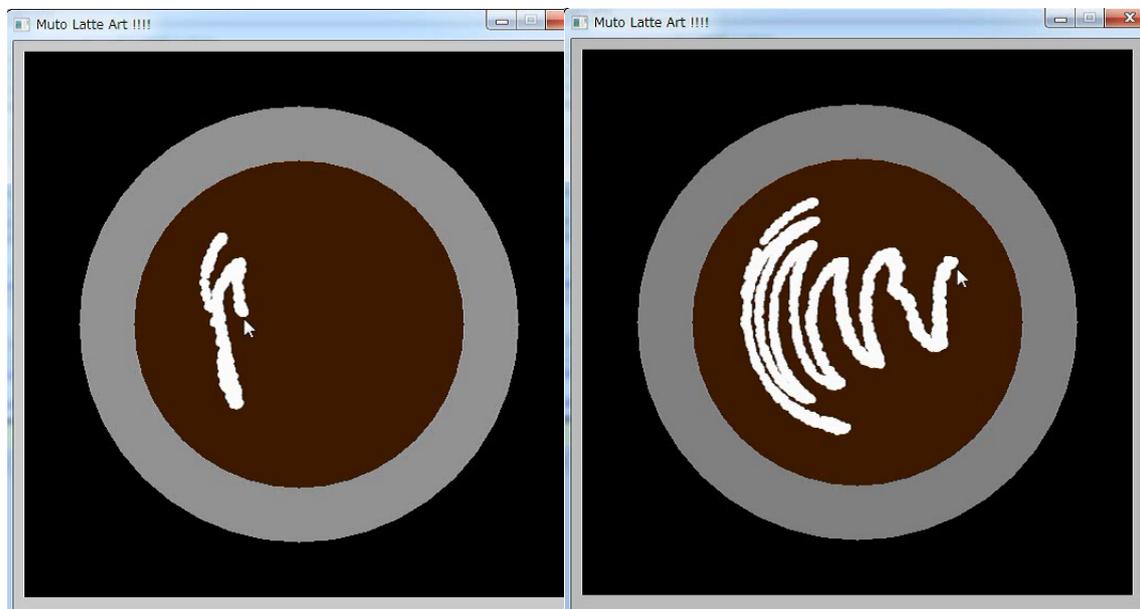


図 4.2: ミルクを流している例 その 1

図 4.3: ミルクを流している例 その 2

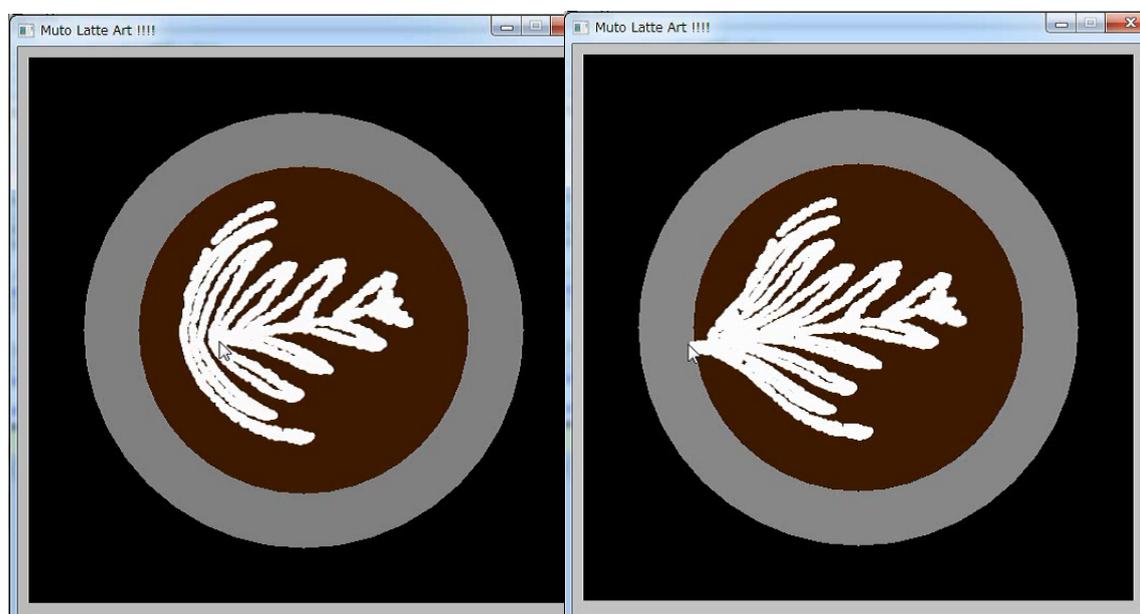


図 4.4: ミルクを流している例 その 3

図 4.5: ミルクを流している例 その 4

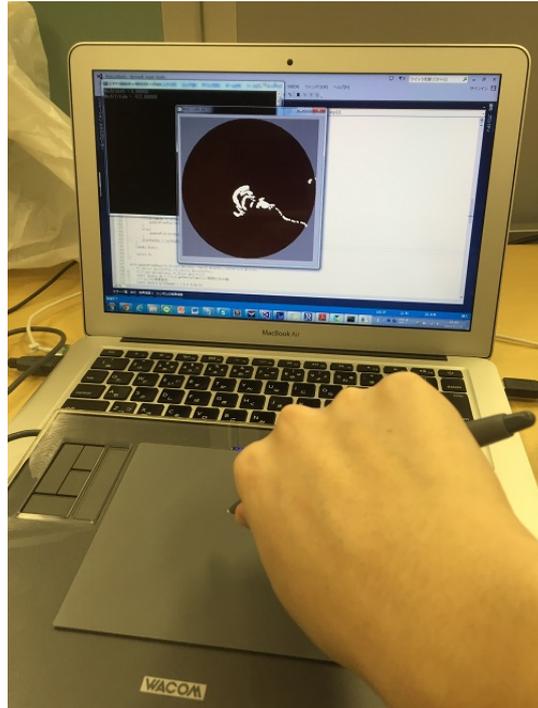


図 4.6: 実際にミルクを流している様子

次にピックアートモードの操作説明を示す。ピックアートモードではペンの筆圧によって粒子を削除することによりミルクにコーヒー色の線を描くことができる。筆圧が大きくなるにつれて粒子が消える範囲が増え、その分ミルクに太い線を描く。ユーザーは線を描きたい部分にペンでなぞることによりピックアートを行うことが可能である。図 4.7 はミルクを流した後、顔となる部分に目の輪郭と口を描いた様子である。



図 4.7: ピックアートで描いた例

4.2 試用したユーザーからの評価

本研究では提案手法を実装したシステムをラテアートが未経験の10名に実際に試用してもらった。その際に得られた意見や感想を抽出し、以下にまとめる。

- ラテアートの動画と同じ流し方で近い絵を描くことができた。
- 数回でコツを掴む事ができ、簡単にラテアートを描ける。
- 練習としてでなく、単純に楽しみながら遊べるツールである。
- ペンとカップの持ち方が違い、実際にラテアートをすると細かな違和感があった。

「近い絵がを描く事ができた」、「簡単にラテアートを描ける」、「単純に楽しみながら遊べるツール」からは、ラテアート本来の面白さが本システムによって感じることができたことがわかった。「ペンとカップの持ち方が違い、実際にラテアートをすると細かな違和感があった」からは、本システムの入力デバイスの工夫が足りなかったことによるものである。例えば、ペンを本物のミルクピッチャーに固定し、持ち手をピッチャーにすることでよりミルクを注いでいるかのように感じ取ることができる。以上の評価からミルクの動きに関しては現実に近い動きを再現できたことがわかった。

第 5 章

まとめ

本研究では、グラフィックツールキットである FKSystem やペンタブレットを利用し、大量の粒子によるミルクの表現、格子法によるミルクの流れる表現、ペンタブレットのペンの傾きによってミルクを流す表現、ペンタブレットの筆圧によるピックアートの表現を実現した。これらの表現を実現したことにより、現実的なラテアートに近いシミュレーションを制作できたといえる。

今後の展望としては、現状はカップを上から見下ろした状態でのシミュレーションなので、これを立体としてシミュレーションし、ミルクが底のコーヒーと混ざり合うところからのシミュレーションを実現することによって、今よりもさらに現実に近いピッチャーの動かし方でシミュレートできると考える。また、ピックアートの仕様を粒子の削除ではなく、実際に線を描くことによって、より表現力のある絵を描けるであろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くのご指導をしていただきました先生方に心から感謝致します。また、様々な相談に応じてくださった院生の方々、並びに GIGS のメンバー深く感謝致します。

参考文献

- [1] ラテアートについて. <http://lattexart.web.fc2.com/ratte.html>. 参照:2014-10-20.
- [2] Twitter Inc. Twitter. <https://twitter.com/>. 参照:2014-12-22.
- [3] 株式会社ニワンゴ. ニコニコ動画. <http://www.nicovideo.jp/>. 参照:2014-12-22.
- [4] YouTube LLC. Youtube. <https://www.youtube.com/>. 参照:2014-12-22.
- [5] 日本創芸学院. コーヒーコーディネーター検定講座. <http://www.happy-semi.com/cc/>. 参照:2014-11-8.
- [6] Hu Chen-Chih and Ming-Te Chi. Digital latte art. *ACM Digital Library*, 2013.
- [7] Jos Stam. Stable fluids. *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- [8] Stable fluids on enchant.js. <http://jsdo.it/tmagara/bFdq>.
- [9] 森永乳業株式会社. ポケットラテアート. <https://itunes.apple.com/jp/app/pokettorateato/id438154785?mt=8>, 2011. 参照:2014-7-14.

- [10] 安東遼一. Computer Graphics Gems JP 2012 ベクタ形式で出力可能な美しいマーブル模様の生成法. 株式会社 ボーンデジタル, 2012.
- [11] Ruyam Acar and Pierre Boulanger. Digital marbling: A multiscale fluid model. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, July 2006.
- [12] 澤田洋史 meets 低温殺菌牛乳 ミルクとラテアートのお話. <http://www.takanashi-milk.co.jp/latteart/index.html>. 参照:2014-10-10.
- [13] なんてんたってクレマ至上主義. http://www.e-espresso.net/scene_crema.html. 参照:2014-11-18.
- [14] Author:caff cuore. ラテアートの描き方. http://www.caffe-cuore.com/myweb1_011.htm. 参照:2014-10-20.
- [15] Ronald Fedkiw, Jos Stam, and Henrik Wann Jensen. Visual simulation of smoke. In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '01, pp. 15–22, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [16] 酒井康臣, 張英春, 向井信彦. 空気抵抗を考慮した粒子法と格子法による滝のシミュレーション (アニメーション, 映像表現・芸術科学フォーラム 2014). 映像情報メディア学会技術報告, 2014-3-17.
- [17] 岡芳明. 格子法と粒子法 流体力学の方程式での説明. http://www.f.waseda.jp/okay/oka/archive_public_html/Grid_Particle.pdf. 参照:2014-9-10.
- [18] 森西陽平. 非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の適切な高次精度差分. 数理解析研究所講究録 974 巻, 1996 年.
- [19] 離散化とは. <https://kotobank.jp/word/%E9%9B%A2%E6%95%A3%E5%8C%96-9735>. 参照:2014-12-16.

- [20] Andrew Selle, Ronald Fedkiw, ByungMoon Kim, Yingjie Liu, and Jarek Rossignac. An unconditionally stable maccormack method. *J. Sci. Comput.*, June 2008.
- [21] 石原大輔, 鐘井重男, 堀江知義. 整合圧力ポアソン方程式に基づくシェル流体強連成解法の開発. 日本機械学会論文集. A 編, 2006.
- [22] 藤沢誠. CG のための物理シミュレーションの基礎. 株式会社マイナビ, 2013.
- [23] 連立 1 次方程式の反復解法. <http://homepage3.nifty.com/gakuyu/suti/renritu/hanpuku/>. 参照:2014-12-22.
- [24] 三井斌友. Runge-kutta 法 —その過去、現在、未来—. 名古屋大学・人間情報学研究科, 1998.
- [25] 古川雅人, 富岡英俊, 井上雅弘. 陽的時間進行法による圧縮性ナビエ・ストークス方程式の数値解法 : 4 段階ルンゲ・クッタ法と 2 段階有理ルンゲ・クッタ法の比較. 日本機械学会論文集 and B 編, 1986.
- [26] Fine Kernel Project. Fine kernel toolkit system. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>. 参照:2014-11-27.