

インタラクションのアーカイヴとその計算論的分析

Archiving Interaction and Computational Analysis

久保田晃弘 平川紀道 堂園翔矢

概要

本稿では、インタラクティヴ・アートにおけるインタラクションを、技術的なフィードバックだけでなく、主客の境界を再編成する美的体験として捉え直す。三上晴子の『Eye-Tracking Informatics』を対象に、カッチャ・クワステックの理論的枠組みを出发点とした分析、インタラクションの可視化と鑑賞、機械学習を用いた定量的分析、圈論による図式化を試みることで、インタラクションの分析と保存に向けた「生成するアーカイヴ」のための方法論を提案する。

1 インタラクション分析のための理論的基盤

インタラクティヴ・メディア・アートにおける「インタラクション」は、技術的フィードバックだけでなく、感覚・知覚・時間経験を通じて主体と客体の境界を搅乱し、再編成する美的体験である。カッチャ・クワステックが2013年に著した『Aesthetics of Interaction in Digital Art』[1]は、メディア・アートにおけるインタラクションの美学を体系的に整理した、初の包括的研究書である。クワステックはテクノロジー中心の枠組みではなく、相互作用のプロセスと鑑賞者の美的経験を基盤に、インタラクティヴ・アートの構造と意味を再定義した。

クワステックは、インタラクションを分析するための6つの軸を提示した。

1. インタラクティビティとインタラクション
2. アクター
3. 空間
4. 時間
5. 経験のモード
6. 物質性と解釈可能性

インタラクティヴィティはアーティストが作品に設定した相互作用の潜在的 possibility であり、技術的・構造的側面に属する。一方、インタラクションは鑑賞者の行為によって実際に立ち上がる動的なプロセスで、作品の形態（ゲシュタルト）は鑑賞者の参与によって初めて具現化する。この生成過程こそがインタラクティヴ・アートの美学の核心である。

アクターは、

1. 潜在的プロセスを設計するアーティスト
2. 身体的活動を通じて作品を成立させる鑑賞者
3. 独自のプロセス性を持つ技術システム

である。インタラクションはこれら三者の連関によって生じ、物理空間とデータ空間の重ね合わせによって構成される。時間構造の観点からは、プリセットされた素材を用いる「データ集中型」とリアルタイムで生成される「プロセス集中型」に分類でき、後者においては日常的時間から切り離された「実験室時間」が成立する。これは、加速・反復・変形可能な芸術的時間であり、没入的経験を生み出す基準となる。

さらにクワステックは、インタラクティヴ・アートを「提言 (proposition)」と「実現 (realization)」の関係から捉える。アーティストが設置した潜在的構造が提言であり、それが鑑賞者の行為によって現実化するとき、美的対象としての形態と現前性を獲得する。提言と実現のあいだに生じるギャップと相互作用が、インタラクティヴ・アートの分析が向かうべき領域である。鑑賞者の活動は、

1. システムの仕組みを探る「実験的探求」
2. それを利用した「表現的創造」
3. 作品の意味や物語を構築する「構築的理解」
4. 他者やシステムとの「コミュニケーション」

という 4 つのモードで整理できる。

クワステックが特に重視しているのが、没入状態としての「フロー (flow)」と、内省的理解としての「美的距離 (reflection)」の往還である。フローは行為と意識が作品と一体化し、時間や自己の感覚が消失した状態である。これに対し、美的距離はフローを中断し、自身の行動やシステムを意識的に捉え直す省察の契機となる。美的経験は、この両極の間を往還するプロセスである。さらに作品の「物質性」はハードウェアやアルゴリズムだけでなく、身

体の動きや感情的雰囲気も含み、これらが作品の「解釈可能性」と多層的に結びつく。

2 三上晴子《Eye-Tracking Informatics》の作品分析

この理論枠組みを、三上晴子の《Eye-Tracking Informatics (ETI)》[2][3][4]に適用する。三上は「視ることを視る」という提言を、視線検出装置とリアルタイム映像生成アルゴリズムによって実装した。鑑賞者は自身の視線を「乗り物」のように操縦し、空間内に仮想構造体を描き出すことで、作品の形態を生成する能動的パフォーマーとなる。視線によるドローリングや、赤と青の神経的構造体のリアルタイム生成は、身体的行為と認知的内省を結びつけ、フローと美的距離を往還する美的体験を形成する。

さらに《ETI》は、技術システムそのものが自律的アクターとして振る舞い、物理空間と情報空間の融合を通じて作品空間を生成する。展示形式は可変であり、二人用と一人用のヴァージョンでは相互視線による異なる関係性が生まれる。システムはブラックボックス的性質を持ち、その不透明性が鑑賞者を魅惑し、探求を誘発する。視線検出装置や椅子などの物理インターフェースも、単なる操作機器ではなく身体的拘束感を与える要素として美学的に機能している。

《ETI》は、視覚的・感覚的体験を通じて自己の知覚プロセスを可視化する「内省の装置」であり、クワステックの理論における「提言」と「実現」の関係を体現する作品である。鑑賞行為そのものが作品の成立条件となり、アルゴリズムとフィードバック・ループを介して知覚・身体・時間を結び直す。こうして《ETI》は、現前性と遂行可能性を結合する自己言及的装置として、インタラクティヴ・アートの典型を提示する。

3 《ETI》におけるインタラクションの計算論的分析

クワステックの定性的枠組みを踏まえ、より実践的かつ計算論的な観点で《ETI》のインタラクションのアーカイヴ化を探究する。

クワステックの枠組みによる分析を踏まえて、より実践的かつ計算論的な観点で《ETI》のインタラクションの分析とアーカイヴ化の方法論を探求する[7][8][9][10][11]。インタラクションを具現化するために取得した視線の動きを、測定・再生・分類・モデル化し得る具体的対象とすることで、それらを個別に記録・分析・保存するだけでなく、機械学習による集合的なパターン分析やパラメトリックなインタラクション実験、代理的インタラクションに

による非リアルタイム鑑賞の導入を試みる。

3.1 インタラクションのデータ取得とその内容

分析の対象とするデータは、NTT インターコミュニケーション・センター [ICC] および、 \sqrt{K} Contemporary で行なわれた《ETI》の展示で取得した、匿名の体験データである。

- **ICC (2020):** 770 例 [5]
- **\sqrt{K} Contemporary (2023):** 416 例 [6]

記録内容：各回 5 分間の体験ごとに約 15,000 点のサンプルが取得され、以下の情報が記録されている。

- 各表示フレームのタイムスタンプ
- スクリーン上での視線の動き（2 次元座標）
- 生成された仮想構造体の骨格（3 次元座標）

3.2 インタラクションの計算論的分析

分析は、大きく以下の 4 ステップで進めた [12]。

1. 個別データの可視化と特徴解析
2. 機械学習によるデータ全体の分布と傾向の把握
3. 分類結果をもとにした個別データの詳細解析
4. インタラクション実験のための環境構築

3.2.1 個別データの可視化

まず初めに、取得した各データの健全性を確認し、その内容を質的に観察するために、視線の動きと、それに基づいて生成された仮想構造体の骨格を可視化する専用ソフトウェアを開発した。

3.2.2 個別データの分析による特徴解析

次にいくつかのサンプルを選んで、視線の動きの速度や加速度を求め、軌跡だけでは捉えにくい視線の特徴を浮かび上がらせる。さらに視線の速度や加速度の変化と、その時に生成された3次元構造物の形状を対応させることで、視線の動きと仮想構造物の構造の関連を把握する。

3.2.3 仮説的なモードの抽出

個別データの分析から、鑑賞者の視線運動にはいくつかの仮説的な「モード（特徴的な運動様式）」が存在する可能性が見いだされた[12]。代表的なモードとして、以下の4つがある。

1. グライディングモード：視線があまり動かず、仮想空間内を滑走していくモード。
2. ターンモード：視線が細かく動き、くるくると縮れた構造をとるモード。
3. 探索モード：仮想空間内を視線が散策するモード。
4. 追跡（逃避）モード：生成された構造体を追いかけたり避けたりするモード。

これらのモードは、鑑賞者が自らの視線で「運転する」あるいは「描く」といった美的経験と直接結びついている。同時に、各々のインタラクションがユニークでありながらも、認識可能なパターンに分類され得ることを示している。これは、鑑賞者とシステムが「複雑でありながらも共鳴的な関係」を形成していることの現れでもある。

3.2.4 機械学習によるデータ全体の分布と傾向の把握

ICCで取得された770例のデータセット全体の傾向を把握し、インタラクションの多様性とそこに内在する構造を明らかにするために、教師なし機械学習による解析を行なった。

1. **VAE（変分オートエンコーダー）の利用**：入力データの潜在的特徴を学習し、そこから新しいデータを確率的に再構成できる生成モデルを用いる。
2. **体験の地図（Latent Space Mapping）**：視線データと3次元構造体の座標データを2次元の潜在空間に圧縮し、データ全体の分布構造を可視化する。体験の全体像とその位置づけを俯瞰する。
3. **典型例と特殊例の抽出**：潜在空間の密集領域を「典型例」、周辺の散在領域を「特殊

例」として分類し、それぞれに対応する視線パターンや構造体の形状的特徴を分析する。

4. **機械のためのビジュアリゼーション手法の提案**：VAE に加え、大規模画像認識モデルである VGG-16 と次元削減手法 UMAP を組み合わせ、座標データを RGB 画像へと変換する可視化手法を提案した。機械が分類しやすい特徴空間を構築する [13]。

クワステックが提示した、質的で個人的な記述に基づく分析から、定量的・集合的な「美的データ」分析への移行は、インタラクティヴ・アートの受容研究における新たなパラダイムシフトを示している。VAE を用いた分析は、単に鑑賞行為を計算するだけでなく、インタラクションの形態と質を多次元的に分類・可視化する。従来の方法論が自己観察やインタビューを通じて、主観的経験の記述を試みたのに対し、本研究は、美的行動のデータセットから内在的パターンや構造を抽出し、経験の生成メカニズムそのものを記述することを目指している。

VAE は統計的な記述を生み出すにとどまらず、潜在空間に集合的経験の「形状 (form)」を生成する。これは、データ駆動型の現象学とも呼ぶべき新たな作品分析の形態であり、個々の観察者の視点では捉えきれない、多数の鑑賞者に共通する受容の形状=構造を明らかにする。それは、集合的なインタラクションの抽象的肖像であると同時に、他者の行為を通して作品を再体験する「アーカイヴ鑑賞 (archival spectatorship)」の新形態でもある。鑑賞者は、他者のインタラクションの多様性と共通性を認識することで、《ETI》の核心にある「相互的で継続的なプロセス」としての芸術構造に気づく。

3.2.5 分類結果をもとにした個別データの詳細解析

定性的に整理したインタラクションのモードを定量的に捉えるため、各視線データから「Fixation」「Saccade」「Smooth Pursuit」「PSO (Post Saccadic Oscillation)」という 4 つの眼球運動モードを抽出し、体験の進行に伴う時間的変化を個別に分析した。これらの運動モードは、視知覚の基本的メカニズムであると同時に、鑑賞者が作品とどのような関係を結び、どのように関与しているかを可視化する美的指標として利用できる。

1. **Fixation (固視)**：視線が特定の一点に留まり、対象を詳細に知覚している状態。対象の情報の多くはこの固視中に取得される。
2. **Saccade (サッカード)**：注視点を次の位置へ素早く移動させる際の急速な眼球運動。視線が跳躍的に移動するため、この間はほとんど知覚処理が行なわれない。
3. **Smooth Pursuit (滑動性追従運動)**：動いている対象を追いかけるときに生じる、

滑らかで連続的な眼球運動。対象の速度や方向に合わせて視線が追従する。

4. **PSO (サッカード後振動)** : サッカード終了直後に生じる微小な眼球の振動現象。急速な眼球運動によって生じた慣性や、眼筋の制御調整に起因する微細な揺れが数十ミリ秒程度続く。固視状態へ移行する前段階。

3.2.6 インタラクション実験のための環境構築

上記の分析作業と並行して、「視ることを観る」という《ETI》のインタラクション部分だけを再構築し、その「形式的本質」に迫るための実験装置《Proto-ETI》を制作した [14]。

1. **構造エミュレーター** : 《Proto-ETI》は、視線検出デバイスやマウス入力、および過去の記録データから、仮想構造体の骨格のみを生成する。オリジナルの《ETI》が有していた作家独自の雰囲気やムードを取り除き、インタラクションの中立的なメカニズムだけを取り出す。
2. **パラメトリック実験** : 《ETI》のインタラクションを規定するパラメーターを UI によってリアルタイムに設定・変更する。視線の動きや生まれる構造の変化を体系的に実験する。
3. **フィードバックループの検証** : 鑑賞者からの構造体の見え方が、どのようにして鑑賞者の視線の動きにフィードバックするか、という関係性を分析する。
4. **インタラクションの鑑賞** : 任意のインタラクションデータを呼び出して何度でもリプレイできるので、没入体験に「美的距離」を導入し、批判的分析を行う。

《Proto-ETI》は、記録されたインタラクションを再生可能にすることで、受動的なデータを動的で観察可能な出来事に変換する。鑑賞者は、インスタレーションを体験した当時とは異なるモードで、自身あるいは他者の視線によって生成された仮想的構造体を、時間かけて観察することができる。さらに、インタラクションのパラメータを変更することで、制作者がシステムに埋め込んだ「提言」の意図を再構成し、別の文脈で再解釈することが可能となる。

この新しい鑑賞の形態は、クワステックが指摘した「代理的インタラクション (vicarious interaction)」を技術的に媒介し、拡張したものである。生の参加者を観察する代わりに、アーカイヴの鑑賞者は、データから生成された「ゴースト」としての他者の痕跡を観察する。この観察行為は内省的であり、同時に分析的でもある。それは、かつての「フロー」状態に新たな「美的距離」を与え、没入と省察のあいだにある緊張を解きほぐすプロセスでもある。

インタラクションの再生は、過去の行為の単なる反復ではない。再生は、過去のプロセスを新しい文脈で再提示し、異なる理解と感覚の生成を促す。こうして鑑賞者は、自らの知覚とオリジナル作品の意味の双方を変容させていく。《ETI》が視線をイメージへと変換したのに対し、《Proto-ETI》のアーカイヴは、その視線＝イメージの記録を新たな観察可能なパフォーマンスへと転換する。アーカイヴの鑑賞者が過去のインタラクションを見つめるとき、彼らは過去の経験の「反映」を見る。それは、オリジナルには存在しなかった仕方で分離され、反復可能であり、分析的に扱える変容した反映である。

インタラクションを鑑賞するという行為は、インタラクティヴ・アート作品に新たな意味の層を付与し、最初の創造から時間が経過した後もなお、意味を生成し続ける持続的な美的運動として成長する。

4 インタラクションの図式化

定量的・実験的な分析を存在論的理解へ結びつけるため、圏論 (Category Theory) を用いた図式表現を試みる [16]。インタラクションの本質は、対象 (オブジェクト) そのものではなく、それらの関係性 (射) にある。

こうした定量的・実験的な分析を、インタラクションの存在論的理解へと結びつけるために、本研究では数学の「圏論 (Category Theory)」を用いたインタラクションの図式表現を試みる [15][16]。通常、インタラクションを分析する際には、人文学の領域では自然言語による記述が、理工学の領域では数式的表現が用いられる。しかし、圏論の図式という抽象的な記法は、両者を架橋する分野横断的な共通言語 (lingua franca) として機能しうる。この抽象言語を媒介として、行為・知覚・応答の関係性に着目しながら、インタラクションの根本構造を再記述し、その普遍的な枠組みを探ることを作業仮説とする。

1. **対象から射へ**：圏論は、ものごとを「対象 (オブジェクト)」からではなく、それらの関係を表す「射 (モーフィズム)」から見ようとする。
2. **インタラクションの本質**：インタラクションは、スクリーンに投影されたイメージや、鑑賞者の知覚や行動の中ではなく、それらの間 (圏における射) に存在している。
3. **射の分解**：インタラクションの場を、アーベル圏の射の分解の図式で記述することで、人間側 (鑑賞者) の過程と装置側 (作品システム) の過程を分離できる。鑑賞者の出力 (視線) が装置の入力となり、装置の出力 (生成映像) が鑑賞者の入力になる。
 - (a) **鑑賞者**：視覚入力という要因を内的イメージによって拡大し、視線の移動として

出力する。

- (b) **作品システム**：視線検出データを要因として、それをアルゴリズム的に拡大してスクリーンに投影する。

この図の図式でインタラクションの構造を表すことで、インタラクションの本質がスクリーン上に映し出される映像や体験者の個別的な行為そのものにあるのではなく、両者を結びつける中間領域、すなわちインターフェイスに存在していることを明示できる。インタラクションの骨格を、この図式で記述できれば、《ETI》だけでなく、さまざまなインタラクティヴ・アート作品のインタラクションを比較検討し、その共通部分を抽出する道が開ける。図の図式を共通言語として、インタラクションに関する、より深い議論を行っていきたい。

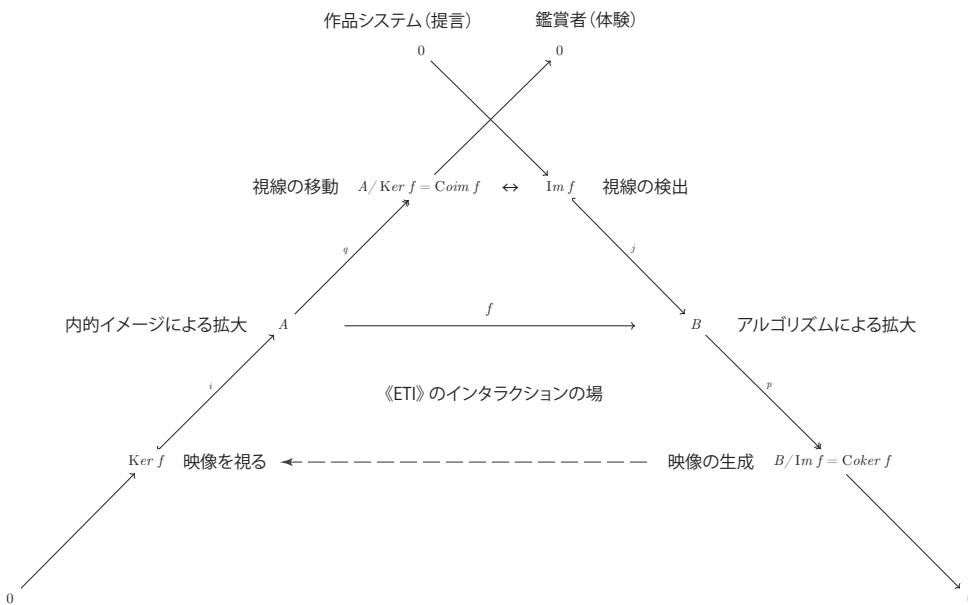


図1 インタラクションをアーベル圏の図式でモデル化する。アーベル圏は、加法的構造があり、核と余核が常に存在し、すべての射が像と余像により分解できる圏である。分解された射を鑑賞者と作品システムとみなすと、《ETI》のインタラクションは、① 視覚入力という要因を内的イメージによって拡大し、視線の移動として出力する過程（鑑賞者）と、② 視線検出データを要因として、それをアルゴリズム的に拡大してスクリーンに投影する過程（作品システム）の2つに分けることができる。それらを繋ぐ部分に、インタラクションの本質がある。

図2は、図1のインタラクションの内部構造を図解したものである。スクリーン映像からの入力が内的イメージによって拡大し、そのイメージが核となって視線の動きが生まれる。作品システムはこの視線の動きを検出し、それをアルゴリズム的に拡大することで映像を生成する。

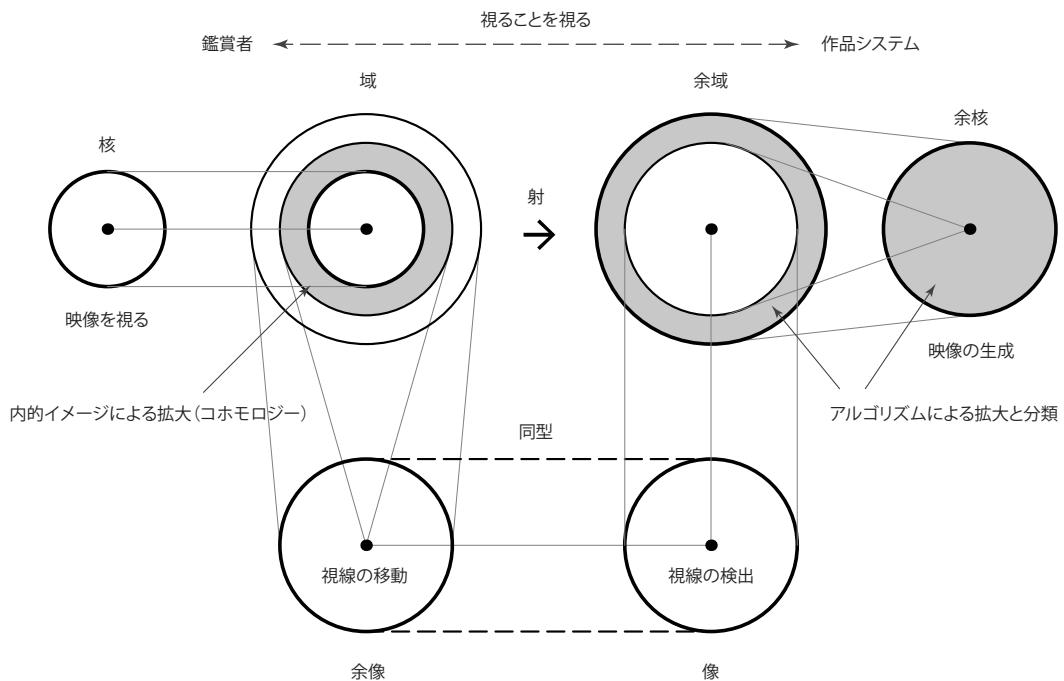


図2 図1のインタラクションの内部構造を図解する。スクリーン映像からの入力が内的イメージによって拡大し、そのイメージが核となって視線の動きが生まれる。作品システムはこの視線の動きを検出し、それをアルゴリズム的に拡大することで映像を生成する(2つの拡大部分をグレーで示している)。核と余核は、ものごとの入口と出口という、インターフェイスの役割を果たす。射の内部では、余像と像が一致することで、入ってきたものごとが消滅し、そこから続く新しいものごとが生まれる。同心円の中心(黒い点)は零対象、すなわち関係のないものごとに相当する。

5 インタラクションのアーカイヴ

インタラクションは、アートワークをその都度生み出す「プロセスそのもの」である。《ETI》は、鑑賞者の視線とシステムのアルゴリズムが構成するフィードバック・ループを通じて、

「視ることを観る」という経験を生み出し、毎回異なる動きや形態、音響が立ち現れる。インタラクションは作品の存在論的基盤であると同時に、分析可能な動的システムでもある。

インタラクションをデータとして記録・分析する目的は、インタラクティヴ・アート作品への理解と批評を深化させることだけでなく、体験データとその分析結果を体系化し、客観的で再利用可能なモデルに変換することで、インタラクションの「生成するアーカイヴ」を構築することにある。アーカイヴ化されたインタラクション・データは、それ自体が分析や鑑賞の対象となるだけでなく、作品システムによって再び活性化され、システムと鑑賞者のあいだに潜む振る舞いを再生成することができる。

集合的に具体化されたインタラクションは、作品の「同一性」を定義し、将来の技術環境における再制作や再展示の指針となる。それは、はかない個々の経験を文化的記憶として定着させ、次の世代に体験と鑑賞の機会を開き、そこから学び、さらに創造するための基盤を形成する。インタラクティヴ・アート作品は、保存すべき静的な遺物ではなく、常に変化し続ける生きた存在であり、その生命はインタラクションという生成プロセスを通して更新され続ける。

付録 1：《Proto-ETI》によるパラメトリック実験

《Proto-ETI》を用いて、パラメータとインタラクションの相関を体感する実験を行った^{*1}。設定、変更できるパラメータには以下のものがある。

- Frame Rate：表示速度
- Sphere Size：表示される球のサイズ
- Gaze Point Sensitivity：x, y 各軸方向の視線の動きに対する感度
- Eye Point Segment Number：視点の位置（現在表示しているセグメントから逆順にカウント。Eye Point と Eye Target の中点に視点を置く）
- Eye Target Segment Number：視点の向き（画面中央のセグメント番号）

今回は、以下の 5 種類のパラメータ・セットで実験を行った（表 1）。

各パラメータ・セットの特徴は以下の通りである。

^{*1} 実験協力：佐野楽人・中村羽菜・菅澤ゆづき・盛尾悠介

表 1 実験に使用したパラメータ・セット

| Name | Frame Rate | Sphere Size | Gaze Point Sensitivity | | Eye Point Seg. Num. | Eye Target Seg. Num. |
|----------|------------|-------------|------------------------|----------|---------------------|----------------------|
| | | | x | y | | |
| Original | 60 | 0.215327 | 0.15388 | 0.1275 | 10 | 8 |
| Quick | 60 | 0.249077 | 0.755643 | 0.456836 | 100 | 1 |
| Delay | 60 | 0.204316 | 0.15388 | 0.1275 | 400 | 40 |
| Snake | 60 | 0.249077 | 0.05216 | 0.049495 | 1000 | 400 |
| Slow | 6 → 30 | 0.301396 | 0.296311 | 0.517924 | 60 | 4 |

- Original : 《ETI》で用いられているパラメータ。
- Quick : セグメントの一番先を観る。視線に対する感度を高くする。
- Delay : やや後ろの方から観る。視線感度はオリジナルと同じ。
- Snake : かなり後ろの方から観る。視線に対する感度を低くする。
- Slow : 速度を遅くする。少し後ろの方から観る。視線感度は（特に y 軸を）高くする。

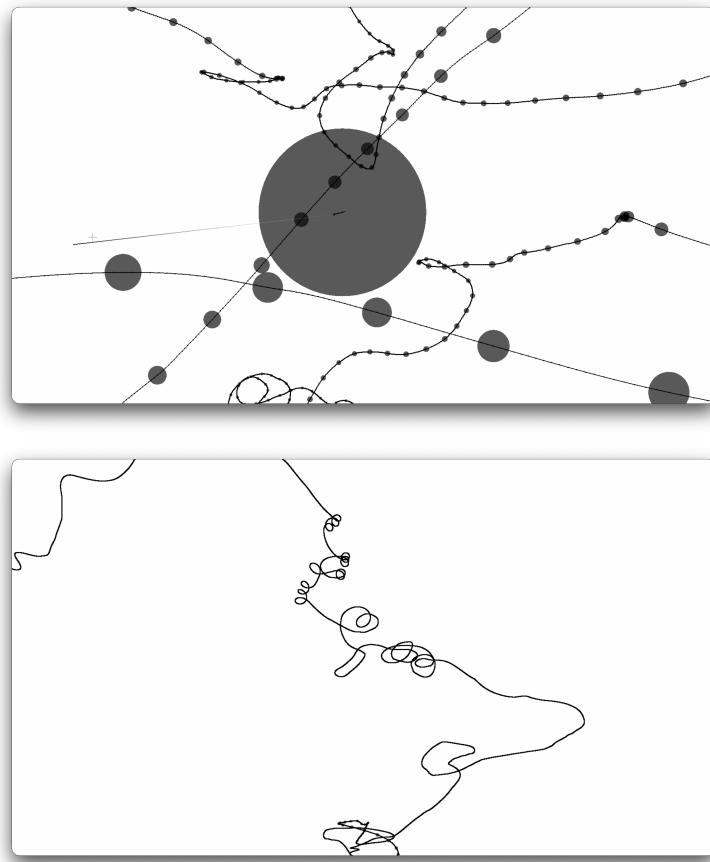


図 3 《Proto-ETI》のスクリーンショット（上：体験モード 下：鑑賞モード）

付録 2：インタラクション論のためのアーベル圏

アーベル圏 (Abelian category) はホモロジー代数の基礎であり、「完全性 (exactness)」の概念を中心に、関係の成立条件を厳密に扱うための豊かな枠組みを提供する。ここで用いられる「核」「余核」「像」「余像」や「射の分解」、そして「短完全列」は、関係・差異・同一性がどのように構成されるかを抽象的に示す図式として機能する。

アーベル圏

アーベル圏は、次のような性質を持つ加法圏 (additive category) である。

- すべての射が核 (kernel) と余核 (cokernel) を持つ。
- すべてのモノ射 (monomorphism) とエピ射 (epimorphism) は、それぞれ核や余核として現れる。
- すべての短完全列 (short exact sequence) が定義できる。

核と余核

射 $f : A \rightarrow B$ の核 $\ker(f)$ は、次の図式を与える射であり、

$$\ker(f) \xrightarrow{\iota} A$$

次の条件を満たす。

$$f \circ \iota = 0$$

さらに、任意の $g : X \rightarrow A$ が $f \circ g = 0$ を満たすとき、一意的に $g = \iota \circ h$ と因子化できる射 $h : X \rightarrow \ker(f)$ が存在する。ここで h は媒介射 (mediating morphism) であり、任意の「 f によって消去される射」が必ず核を経由することを保証する。核は、 f が潰す情報

(A の中で B に写らない部分) を抽出する。図式的には「関係の内部で消滅する部分」を意味する。

余核 $\text{coker}(f)$ は、次の図式を与える射

$$B \xrightarrow{\pi} \text{coker}(f)$$

であり、次の条件

$$\pi \circ f = 0$$

を満たす。

さらに、任意の射 $h : B \rightarrow Y$ が $h \circ f = 0$ を満たすとき、一意的に $h = k \circ \pi$ と因子化できる射 $k : \text{coker}(f) \rightarrow Y$ が存在する。 k も媒介射であり、「 f を通過した後に生じる外的構造」が、余核を経由して普遍的に延長されることを保証する。余核は、 f が作用した後に外部に残る痕跡を抽出する構造である。図式的には、核が表す内部的消滅に対して、「関係の外部的な拡張・散逸」を意味する。

核と余核は双対関係にあり、内部側の核は「関係の前→内部の要因」であり、外部側の余核は「関係の後→外部の痕跡」に対応している。

像と余像

アーベル圏では、像 (image) と余像 (coimage) は、核と余核を通じて次のように定義される。

$$\text{im}(f) := \ker(\text{coker}(f)), \quad \text{coim}(f) := \text{coker}(\ker(f))$$

像は f が作用した結果として外部へ現れる有効部分（余核を取った後に残る構造）であり、余像は f が定義された時点で既に内部に準備されていた有効部分（核を除いた後に残る構造）である。

余像から像へ向かう変換は、生成から受容へと至る出来事の方向性を示し、両者は完全性の下で同型となる。

射の分解

アーベル圏において、任意の射 $f: A \rightarrow B$ は、次のように三つの射に分解できる。

$$A \xrightarrow{e} \text{coim}(f) \xrightarrow{\bar{f}} \text{im}(f) \xrightarrow{m} B$$

ここで、 $e: A \rightarrow \text{coim}(f)$ はエピ射（全射）であり、 $m: \text{im}(f) \rightarrow B$ はモノ射（単射）となる。また、 $\bar{f}: \text{coim}(f) \rightarrow \text{im}(f)$ はアーベル圏では 同型（isomorphism）になる。つまり f は必ず「余像から像へ」という 2 段階の構造に分解できる。

この分解は単なる形式的操作ではなく、関係（射）を生成の側面（余像）と受容の側面（像）の二つに分離できることを意味している。余像は、まだ外部化されていない能動的な有効性を示し、像は、外部化した受動的構造を示す。両者は同型射 \bar{f} によって可逆的に結びつき、受容は生成の鏡像として成立する。この鏡像対称性が、アーベル圏における構造的調和であり、その背後には「整合的世界像」を支える抽象的原理が存在する。すなわち、核・余核・像・余像の体系は、「関係がどのように成立し」「何を内部で消滅させ」「何を外部へ立ち上げ」「どのように再び調和へと回帰するか」を形式的に記述するモデルである。

短完全列

余像と像が同型であるということは、「生成された構造」と「受容された構造」が矛盾なく対応し、出来事が破れなく閉じていることを意味する。この整合性の最小単位を示す図式が

$$0 \rightarrow A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \rightarrow 0$$

で表される短完全列（short exact sequence）である。短完全列であるとは

$$\text{im}(f) = \ker(g)$$

が成立し、 f がモノ射であり g がエピ射であることを意味する。つまり A から B の内部へ持ち込まれたものごとが、 C に移行するときに一切失われたり余分に増えたりせず、 B の

中に存在する A 由来の部分と C に現れる構造が完全に一致していることを意味する。ここで両端の 0 は、それぞれ始対象と終対象であり、短完全列の中で変化の起点と終点を与える参照軸となる。これにより「内部（要因・意図）から外部（結果・行為）への移行が破れなく行われ、世界が一つの出来事として完結する」という整合性（完全性）が保証される。

コホモロジーの導入

しかし、現実の出来事においては、生成と受容が常に完全に一致するわけではない。このとき、

$$\text{Im}(f) \neq \ker(g)$$

となり、短完全列の完全性が破れてしまう。その破れを測る構造が、コホモロジーである。

$$H = \ker(g)/\text{Im}(f)$$

コホモロジー H は、生成されたものが受容されなかった非顯在部分、すなわち、対象 A の内部に存在する、まだ外に現れていない「可能な構造」としての潜在性（potentiality）と、対象 B において実際に外へ現れたものとしての現実性（actuality）の差異（ズレ）を数理的に抽出する。

このズレは、世界の理解がまだ閉じてなく、整合性が欠けていることを示している。そのとき認識主体は、ズレを埋め直すために新しい説明（追加の構造） H を仮説として導入し、この仮説によって、可能性（余像）と現実性（像）を再び対応させようとする。この整合性を回復するための、仮説生成の運動がアブダクション（仮説的推論）である。

アーベル圏の図式によるインタラクションの描写

以上のように、アーベル圏における核・余核・像・余像、そしてコホモロジーは、「出来事がどのように始まり、いかに安定し、いかに不完全へと傾き、いかに終息していくか」という生成と変容のプロセス的存在論を、射による関係の構造として記述するモデルとなる。

射 $f : A \rightarrow B$ は、2つの短完全列に分解可能であり、それは単なる写像ではなく、 A の余

像が B の像へと転じ、構造が出来事として成立する運動を表す。すなわち f は、動的過程の完了した形=痕跡である。ここで問われるのは、「いかなるときに『出来事が起きた』と言えるのか」である。「出来事が起きた」と言えるのは、入力 A の可能性と出力 B の現実性が矛盾なく結ばれ、過程全体が整合的に閉じた流れを形成するときである。このとき、

- 核：外部に現れない内的要因
- 余像：行為として外化する表出
- 像：観測可能な行為の効果
- 余核：その効果が環境に残す痕跡

となり、これは出来事が矛盾なく行われ、関係が破綻なく結ばれている状態を表す。

しかし現実の出来事は、常に何らかの破れやズレを含む。内的要因（核）が外的行為（余像）を説明しきれないとき、その差異を補うために導入されるのがコホモロジーである。コホモロジーとは、外的因果では捉えきれない内在的契機を顕在化し、それを構造に組み込むことで系を拡張し、新たな分類軸を導入する装置である。

この「短完全列+コホモロジー」の図式は、インタラクティヴ・アートの相互作用を記述する上でも有効である。通常のインタラクションでは、入力（意図）と出力（応答）は整合し、局所平衡=認知的安定が保たれる。しかしインタラクティヴ・アートの場合、鑑賞者の行為と作品の反応は必ずしも一致しない。この不一致、すなわち $\text{Im}(f) \neq \text{ker}(g)$ によって生じるコホモロジー的残差（予期せぬ応答・揺らぎ・遅延など）が、創造的経験の契機となる。

コホモロジーは、鑑賞者の意図と作品の応答のあいだに立ち上がる、非同期的かつ非可逆的な余白であり、そこに知覚・解釈・思考の新たな運動が生まれる。鑑賞者がそのズレを感じ、行為を更新するとき、経験は循環しつづけ、新たな世界像が生成される。整合的応答（完全列）と創造的破れ（コホモロジー）とのあいだの非自明な運動に、インタラクティヴ・アートの本質がある。

参考文献

- [1] Katja Kwastek, *Aesthetics of Interaction in Digital Art*, The MIT Press, 2013.
- [2] 馬定延、渡邊朋也〔編〕『SEIKO MIKAMI 三上晴子 記録と記憶』NTT 出版, 2019.
- [3] 三上晴子《Eye-Tracking Informatics》(2011) <https://www.ycam.jp/archive/works/eye-tracking-informatics/> (2025年12月3日アクセス)
- [4] 三上晴子《Eye-Tracking Informatics Version 1.1》—YCAMとの共同研究成果展, 2019. <https://aac.tamabi.ac.jp/research/reports/2019/1394.html> (2025年12月3日アクセス)
- [5] 三上晴子《Eye-Tracking Informatics》[2011/19] (2019) <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/eye-tracking-informatics-2/> (2025年12月3日アクセス)
- [6] 三上晴子《Eye-Tracking Informatics》特別展示, \sqrt{K} Contemporary, 2023. https://root-k.jp/exhibitions/seiko-mikami_eye-tracking-informatics/
- [7] 馬定延、久保田晃弘「メディアアートのための生成するアーカイブ試論（前編）」『多摩美術大学研究紀要』vol.31, 2017, pp.94-98.
- [8] 馬定延、久保田晃弘「メディアアートのための生成するアーカイブ試論（中編）」『多摩美術大学研究紀要』vol.32, 2018, pp.65-76.
- [9] 平川紀道、渡邊朋也、馬定延、久保田晃弘「メディアアートのための生成するアーカイブ試論（後編）」『多摩美術大学研究紀要』vol.33, 2019, pp.71-79.
- [10] 久保田晃弘、馬定延、渡邊朋也「メディアアートと生成するアーカイブ」『軌跡』vol.1, 2020, pp.10-31.
- [11] 久保田晃弘、石山星亜良「インターラクションのアーカイブ—三上晴子のインターラクティブ作品の存在論」『軌跡』vol.2, 2021, pp.17-27.
- [12] 久保田晃弘「メディアアートにおけるインターラクションの分析方法—三上晴子《Eye-Tracking Informatics》を事例として」『軌跡』vol.3, 2021, pp.25-37.
- [13] 堂園翔矢、久保田晃弘「機械のためのビジュアリゼーションによるインターラクション分析」『多摩美術大学研究紀要』vol.38, 2024, pp.89-101.
- [14] 久保田晃弘、平川紀道、堂園翔矢「インターラクションのアーカイブ」『軌跡』vol.4, 2022, pp.38-45.
- [15] 堀裕和「自然知能：基本概念と実現手法」『人工知能』33巻5号, 2018, pp.545-552.
- [16] 久保田晃弘「圈の図式からみた芸術の理論：穴・コホモロジー・アブダクション」『現代思想』48巻9号, 2020, pp.180-201.