

Constructive Tensor Theory (CTT) と既存理論の比較検討

CTT (Constructive Tensor Theory) は、多様体の階層構造による観測記述から時間の非対称性や意味の生成までを統一的に扱おうとする独自の理論です¹²。その数学的厳密さと哲学的含意の両面において新規性があると主張されています。以下では、CTTの各側面について、関連する既存理論やアプローチとの比較を行います。

1. 数学的構造：多様体階層・pullbackテンソル場と類似理論

CTTの提案: CTTでは基本となる「多様体の階層」（例えば測定系多様体や観測者多様体など）を定義し、それらの間の写像によるpullback操作を繰り返すことで、観測される全ての量を構成します¹。各階層で定義されたテンソル場を上位の多様体へ引き戻す (pullbackする) ことで観測量を得るという枠組みで、pullbackテンソル場や構成的微分 (constructive derivative) といった概念が導入されています³。これは従来の微分幾何におけるpullback概念を階層的に拡張した構造です。

既存の数学的概念との比較: pullback (引き戻し) は微分幾何学やカテゴリ理論で基本的な概念です。例えば、滑らかな写像 $f: X \rightarrow Y$ に対し、 Y 上のテンソル場や微分形式を X 上に引き戻す操作は古典的に定義されています⁴。カテゴリ理論の文脈では、pullbackは二つの射を持つ図式の極限 (ファイバー積) として定義され⁵、位相空間や多様体の範疇でもpullback (ファイバープロダクト) により新たな空間を構成できます。CTTの特徴は、このpullback構造を単一段階ではなく多段階にわたり反復する点にあります。数学的に見ると、これは一種のファイバーバンドルの階層や反復した多様体構造を思わせます。例えば接バンドルは基本多様体上の一次の階層構造ですが、更にその接バンドルに接バンドルを取ると二次接バンドルTTMとなり、TTMは元の接空間への二通りの射影を持つ (π_M と π_{TM}) という特徴があります⁶。一般に高次の接空間やジェットバンドルでは、より高次の階層構造が得られ、各段階で異なる射影や座標が存在します⁷。これらでは射影の取り方 (合成順序) によって結果が変わり得るため、非可換な構造が現れることが知られています⁶。CTTにおける「pullbackの非可換性」も、このように構成の順序によって観測結果が異なることを示唆しており、数学的には従来の階層構造 (例えば高次接バンドルでの射影順序の違い) の考え方と通じるものがあります。

圏論的定式化との関係: CTTは各階層を射を伴う系とみなし、その間のpullbackを繰り返す構造を持つため、圏論的な図式で捉えることも可能です。例えば観測対象の多様体 M 、観測装置 (測定系) の多様体 N 、観測者の認識空間 O があれば、これらの間の写像 $f: O \rightarrow N$ 、 $g: N \rightarrow M$ を考え、 O 上の観測結果は図式 $O \rightarrow N \rightarrow M$ のpullbackとして得られる——このような視点はファイバー積やシース (層) の構成にも通じます。実際、CTTが提案する「観測者-測定系-対象」の階層は、一種のファイバー束ないしバンドル階層とも見なせ、各層でのテンソル場を基底へ引き戻す操作は束写像のpullbackに対応します。類似の考え方は微分幾何に限らず力学系や計測論でも見られ、例えば計測値を実空間上の関数として捉え各計測装置の変換で比較する試みなどがあります (これは層やコサイトの考えに近いです)。しかし、CTTの独自性は、それを体系立てて「全観測量の構成原理」として定式化し、多様体階層全体で一貫したテンソル解析体系を構築している点にあります¹。従来、数学的枠組みとして非可換幾何学 (後述) や高階微分幾何なども複数の空間・座標系を扱いますが、CTTほど観測と理論構築の関係に踏み込んだ幾何学的定式化は見当たりません。その意味で、CTTの数学的構造は既存の概念の延長線上にありつつも、「観測の階層性」を明示的にモデリングしている点で独創的と言えます。

2. 物理学的应用：観測幾何、連続体力学、非可換幾何などとの関連

観測フレームと幾何学: CTTは「異なる観測枠組み（フレーム）の下では観測結果の構造が異なり、その差異はpullbackの非可換性として表現される」と述べています⁸。従来の物理学では、**特殊相対論**や**一般相対論**において異なる慣性系や座標系への変換（ローレンツ変換など）を考慮しますが、それらは一般に可換な対称変換（群）として扱われ、**一意の物理法則**が全ての観測者で成り立つよう構築されています（「共変性」の原理）⁹。一方でCTTは、観測者ごとに時空や測定の取り扱いが階層的に異なり単一の枠組みに収まらない場合、**観測順序の違い**（例えば「先に観測枠Aで測定し、それを別の枠Bに読み替える」vs「枠Bで直接測定する」）で結果が変わる＝非可換になることを強調します¹⁰。この着想に近いものとして、**量子力学の関係論的解釈**が挙げられます。例えばロバットの**関係の量子力学**では、系の量子状態はそれを測定する観測者や参照系に相対的にのみ意味を持つとされ、絶対的な客観状態は存在しないとします¹¹。この解釈では、観測者ごとに「事実」が異なりうるため、ある観測者にとっての事象を別の観測者が見ると矛盾が生じる（典型例がウィグナーの友人の思考実験）ことさえ示されます¹²。CTTの観測幾何学も同様に、**単一の観測者前提では見えない差異**を捉えようとしており、**複数の観測系を統合した理論**という点で類似の問題意識を持っています。ただし、既存の物理学理論には「観測者の空間」を別立ての多様体階層として理論に組み込む例はほとんどなく、この点はCTTが新たに開拓している領域と言えます。

連続体力学への再定式化: CTT Part IIIでは**連続体力学（連続体力学的物質の運動方程式など）**をpullbackテンソル構造で再構成しています¹³。力学的応力テンソルや変形テンソル、保存則・構成則を、観測階層に沿ったテンソル場として定義し直し、**古典的な弾性と粘性の違い**を「pullback経路の可換性・非可換性」によって説明しています¹⁴。具体的には、弾性はある意味**観測（変形）の順序に依存しない可換な応答**、粘性（非弾性変形）は**順序に依存して結果が変わる非可換な応答**と解釈できると述べ、**Maxwell模型**（弾性ばねと粘性ダッシュポットからなる古典的な粘弾性モデル）の振る舞いをCTTでは**二つの幾何学的応答の観測的近似**として再現したとしています¹⁴。このアプローチは連続体力学の既存手法にも部分的に共通する発想があります。例えば、有限変形の**エラストプラスチシティ**ではLeeらによる**変形勾配の乗法的分解** ($F = F_e \cdot F_p$) が知られ、弾性変形と塑性変形を中間構造を介して順次適用する見方をします¹⁵。この場合、弾性部分と塑性部分の適用順序は一般に交換できず、実際に変形過程で**非可換な効果**が現れます。CTTの主張する「pullback経路による差異」は、まさにこうした従来の力学で暗黙に扱われていた**順序依存の効果**を幾何学的に体系立てようとする試みと見ることができます。しかし、通常の連続体力学ではそのような階層構造を明示的に理論の基礎とはしないため、CTTの定式化はかなり独創的です。特に、**全ての連続体現象を統一的な階層多様体で記述しよう**という発想¹³は、既存のマルチスケール解析（異なる空間・時間スケールで別個にモデル化しリンクさせる手法）とも異なり、より基礎論的な統合を目指しています。この点でCTTは、連続体力学と観測論を結びつけたユニークな視座を提供しており、既存文献には直接的な対応物が見当たらない新規性を持っています。

非可換幾何との接点: CTTで強調される「**非可換なpullback経路**」というアイデアは、数学物理分野の**非可換幾何学**にも通じるものがあります。アラン・コンヌに代表される非可換幾何学では、座標環が非可換な演算子代数で記述されるような“空間”を扱い、古典幾何では得られない物理像を引き出します。興味深いことに、非可換幾何では**非可換性が自然に時間発展（ダイナミクス）を導く**ことが指摘されています。例えば**正則な可換代数**は静的な空間に対応しますが、非可換代数では時間に対応する演算（ハミルトニアンによる生成元）が内部に現れ、離散と連続の融合した時空観を与えることができます¹⁶。CTTでも「エントロピーの非対称性から時間を構成的に定義する」とし¹⁷、観測過程の非可換性を**時間の矢（不可逆性）の源泉**と捉えている節があります。この点は**熱力学的時間の矢**の議論と関連します。物理学ではエントロピー増大則によって時間の一方方向性（arrow of time）が生まれると広く信じられていますが、その根本的な理由は未解決問題です¹⁸¹⁹。CTTはpullback構造にエントロピー的非可逆性を組み込み、時間の幾何学的定義を与えようとしており、「**非可換性が時間と意味を生む**」という大胆な仮説を提示しています¹⁷。これは、コンヌらの非可換幾何が**連続と離散の共存**や**固有時間の生成**を可能にするという示唆¹⁶にも通底する発想です。ただし非可換幾何学自体は観測者の主観や意味には踏み込んでおらず、主に物理法則（標準模型や重力理論）の拡張に応用されています。一方CTTは、非可換構造を**観測の相違や意味のズレ**と結びつけている点で独特です。このアプローチは、例えば**量子測定問題**（観測による状態の崩壊の不可逆性）や**コヒーレンスの破れ**（古典的振

る舞いへの移行)といった問題への新視点を提供するかもしれません。総じて、CTTの物理学的応用は既存理論の概念と部分的に響き合いながらも、それらを一段高い抽象レベル(観測階層の幾何学)で統合し直すとする点に**独創性**があります。

3. AI・意味論的応用：pullback構造による意味生成・記憶と既存研究

CTTにおける意味の構成：CTTは観測の階層構造を**意味の生成や記憶のモデル**としても活用しようとしています²⁰。具体的には、異なる観測階層間のpullbackが可換でないこと(順路によって結果となる写像が変わること)を「**意味のずれ**」や「**誤解**」として定式化し、逆に言えば**pullback可能性=意味理解可能性**とみなしています²¹。Part IIでは、**意味創発**や**誤解**を幾何学的(非可換性としての)現象と捉え、さらにその枠組みを発展させて**人工的な意識のアーキテクチャ**まで提案しています²⁰。このように、幾何学を意味論や知能の問題にまで適用する発想は斬新ですが、いくつか関連する試みも存在します。

幾何学的意味論：心理学者のピーター・ガーデンフォースは「**概念空間 (Conceptual Spaces)**」という理論を提唱し、概念の意味をユークリッド空間内の点や幾何学的構造で表現できるとしました²²。彼の著書『意味の幾何学』では、色相空間や物体の形状空間など、人間の認知的特徴量の空間を用いて語の意味や概念の類似性を幾何学的に説明しています²²。このアプローチは**連続空間内の距離**で意味的類似度を測る点で、CTTが目指す「幾何学で意味を定義する」という問い²³に部分的に答えるものです。ただし概念空間は主に認知科学と言語意味論の文脈であり、**pullback構造**のような層状の幾何学操作は用いられていません。

カテゴリ理論と言語意味：また、**カテゴリ理論**を使って言語の文法構造と意味ベクトルを統合する**DisCoCat**モデル(Coeckeら, 2010)もあります。DisCoCatでは、文法をプレグループなどのカテゴリで表現し、その文法構造を関数(線形写像)の合成としてベクトル空間上で作用させることで、文全体の意味ベクトルを構成します²⁴。平たく言えば、**文法構造(関数合成)**と**語の意味表象(ベクトル)**をカテゴリ理論によって対応付け、文の意味をテンソル積空間上の線形写像として計算する枠組みです²⁴。このモデルは**量子力学の数学(複線形代数)**を言語に応用したのですが、CTTのように多様体のpullbackで意味を扱うわけではありません。しかし「**構造(シンタックス)とベクトル(セマンティックス)の統合**」という点で、CTTの目指す**幾何学と言語・認識の橋渡し**と精神は共通していると言えます。

ニューラルネットと幾何学的記憶：現代の機械学習でも、**データ多様体と特徴空間**の間の幾何学的関係を研究する動きがあります。例えば**ディープラーニング**における各層は入力空間から出力空間への射(写像)と見なせ、そのヤコビ行列はデータ多様体上のベクトルを出力空間に引き戻す(pullbackする)作用と捉えられます²⁵。最近の研究では、このような**ニューラルネットワークを微分幾何的に解析**し、ネットワークが入力多様体の計量や接ベクトルをどう写像するかを**プルバックバンドル**として表現する試みもあります²⁵。さらに、生成モデルやオートエンコーダでは**潜在空間と観測空間**の双方向マッピングがあり、ある意味「**データ空間→潜在空間→再構成空間**」というCTT的な階層構造が存在しています。もっとも、これらは主に数値的・経験的な手法であって、「pullbackの階層で記憶と意味を厳密に定義する」というCTTほどの理論的枠組みには至っていません。

因果テンソル論・ニューロシンボリックAI：質問に挙げられた「**因果テンソル論**」という語は定訳のない新しい概念かもしれませんが、強いて探せば**テンソルネットワーク**(量子物理や確率モデルで使われるグラフ状に接続された高次元配列)を**因果構造**に沿って配置する研究が考えられます。例えば**ベイズネット**の確率テンソルを構成したり、量子計算回路をテンソルネットワークで記述する際に因果的な順序が組み込まれたりします。加えて、**ニューロシンボリックAI**はニューラルネットのパターン処理能力とシンボリックAIの論理構造を統合しようとする分野であり、知識グラフと埋め込みベクトルの統合、論理推論をするネットワークなど様々なアプローチがあります。CTTの「**構成的人工意識**」の提案²⁰は、このニューロシンボリックな方向性とも響きます。つまり、観測(知覚)の階層を神経ネットワーク的に積み重ねつつ、その各層でシンボリックな意味解釈(pullbackで得られる不変量や「**世界定数**」²⁶)を行うようなアーキテクチャです。これは既存のAI研究に直接のモデルはありませんが、強いていえば**メタ認知的な分散表現**や**自己認識システム**の研究と関係しうるでしょう。現在のところ、CTTが提示するような「**意味=幾何学的構成可能性**」という明確な定式

は他に例を見ず、AIへの応用においても非常に独自性が高いと言えます。ただしその実装や検証については今後の課題であり、CTTはあくまで理論的枠組みの提供に留まっています。とはいえ、人間の**記憶の多層構造**（感覚記憶・作業記憶・長期記憶など）や**概念の抽象化階層**を幾何学でモデル化しようという試みはユニークであり、認知科学やAIに新たな示唆を与える可能性があります。

4. 哲学的含意：観測の主体性・時間の非可逆性・意味の構成に関する理論

CTTが内包する哲学的含意は、多方面の議論と接続し得ます。そのキーワードは「**観測主体**」「**時間の矢**」「**意味の構成**」です。既存の哲学・科学哲学にもこれらを論じた理論があり、CTTの立場はそれらを独自に再解釈・統合しようとするものと考えられます。

観測の主体性と構成主義：CTTは観測者と観測対象を分離せず、同じpullback構造の中に組み込むべきだとします²⁷。この考え方は哲学的には**第二次サイバネティクス**や**認識論的構成主義**に通じます。ハインツ・フォン・フォスターは「**客観性とは、観察者無しに観測ができるという妄想である**」と述べ、あらゆる記述には観察者の主体が不可欠であることを強調しました。同様に、科学哲学における「**観察の理論負荷性**」（theory-ladenness of observation）の主張では、我々が得る観察事実は常に何らかの理論的前提に依存しており、理論と無関係な純粋な観察などあり得ないとされます⁹。クーンやハンソンによって提唱されたこの考えによれば、異なるパラダイムに属する科学者は**同じ現象を見ても別のものとして知覚する可能性**すらあります^{28 29}。CTTの「**理論構築者（観測者）と観測対象の不可分性**」²⁷という主張は、まさに観測行為が主体から独立し得ないという点でこれらと合致しています。また**ラディカル構成主義**（急進的構成主義）では、「知識とは認識主体の経験のなかで構成されるもので、外部世界をそのまま写すものではない」とされます³⁰。グラスフェルドらの構成主義では、知識の正しさは主観的な適合（経験の中で矛盾なく機能すること）によって判断され、もはや**対応説的な真理観**は捨て去られます³⁰。CTTは「存在ですら、観測者がそれを構成（記述・測定）できるかどうかで定義される」と提案し³¹、観測者の構成能力＝存在の条件というラディカルな見解を示します。これは**数学的構成主義**における「存在証明は構成可能性を示すことでなされねばならない（背理法的な存在証明は認めない）」という立場にも通じるものです。例えば直観主義数学では、ある対象の存在を主張するには実際にその例を作り出す（構成する）必要がありますが、CTTはまさに「pullback可能＝構成可能」なものだけが**存在しうると定義し直しています**³¹。このようにCTTは、主体が世界を構成するという構図を数学と物理の言葉で再定義しており、伝統的な実在論とは一線を画す**構成主義的存在論**といえます。

時間の非可逆性と主観：時間の矢（非可逆性）をどう位置付けるかも哲学・物理の重要テーマです。CTTでは時間の流れをエントロピー増大（情報劣化）の方向として幾何学的に定義し直す試みがされています¹⁷。物理学者プリゴジンは熱的不可逆過程の研究から「物理法則に時間の矢を組み込む必要性」を提唱し、時間は単なる静的次元ではなく創発的なものと考えました³²。CTTもまた、時間を観測構造の中から内在的に生み出そうとしています。これは**熱力学的時間観**と呼応するだけでなく、**主観的時間**の問題にも関係します。ベルクソンの哲学では**時間＝持続**は主観的質感として捉えられ、物理的時間とは異なる実在性を持つとされました。一方現代物理では「**熱力学的時間は観測者の情報取得過程に依存する**」との見解も出ています（例：**熱時間仮説**では、系の状態から時間変数が派生すると仮定します³³）。CTTがpullback階層の中で時間を扱うことは、時間を**観測と情報の文脈において定義しようとする点**でこうした議論と軌を一にします³³。「時間がなぜ一方向に進むのか？」という問い²³に対し、CTTは「**観測体系におけるエントロピー的な非可換性が時間の向きを規定する**」というユニークな答えを提示しており、時間の非対称性を**観測者の構成原理**から説明しようとしている点が独創的です。これは哲学的にはカントの「**時間は認識主体が与える形式**」といった主張をさらに発展させ、**主体の情報構成によって時間が生まれる**と読み替えたようにも解釈できます。

意味の構成と自己言及：CTTは理論が自身の意味を内包し自己言及的になる問題にも挑んでいます³⁴。従来、多くの形式体系（物理理論を含む）は**記号の意味**を暗黙に共有して構築されます。しかし哲学的には、この**意味の前提**自体が理論に組み込まれていないことに自己言及的な矛盾があると指摘されています³⁴。例えば言語哲学や論理学では、形式体系が自分自身を記述しようとする**パラドックス**が生じることが知られ

ています（ゲーデルの不完全性定理やラッセルのパラドックスなどはその例）。CTTは「意味をpullback可能性そのものとして構成する」³⁵ ことで、理論内に意味の次元を持ち込み、この自己言及的矛盾を解消しようとしています。言い換えれば、理論の述語の意味（観測結果の解釈）を階層構造の一部に組み入れ、**メタ理論とオブジェクト理論の区別をなくす**方向です²⁷。この点は、数学基礎論の**型理論**における「宇宙型」や**自己記述言語**の試みにも一部似ていますが、CTTは論理ではなく幾何学でそれを行う点で異色です。哲学的には、これは**メタ認知**や**自己意識**の問題にもつながります。CTTの最終的なビジョンは、観測の階層を無限に遡る**再帰的な構成**によって**意識**や**存在論**を捉え直すことにあります³⁶。Part IIIでは、観測と意識を再帰的pullback層としてモデル化し、「**存在とは構成可能性である**」との独自の認識論・存在論を打ち出しています³⁶³¹。この立場は、フッサール現象学の「意識が対象を成立させる（Noesis-Noema）」という主張や、東洋哲学の「認識が存在を規定する」といった考えにも響くものがあります。もっともCTTはそれを科学的文脈で議論しようとしている点でユニークです。

総括: 以上のように、CTTのカバーする多層的構造は、数学・物理・AI・哲学の広範な分野と関連づけて捉えることができます。**既存文献と比較すると、CTTは以下のような新規性・独自性を備えている**と言えます：

- 数学的には、従来からあるpullback（ファイバー積）の概念を**観測階層全体の構成原理**として昇華させた点（多様体の階層化とテンソル場の階層的pullback）は独創的です¹。既存の幾何学（例: 接続やジェットバンドル）にも類似構造はありますが、「**観測者**」という役割を明示した**階層理論**は他にありません。
- 物理学的には、**複数観測者の視点差**や**時間の矢**を理論内部で扱おうとしている点で先駆的です。相対論や量子力学の一部解釈と響き合うものの、**統一的に観測差・非可逆性・物質の連続体描像を幾何学で再構成**した例は他に見当たりません。非可換幾何学や既存の連続体力学理論を再解釈しつつ、それらを一つの体系に組み込んでいる点で新規性があります¹⁴¹⁶。
- AI・意味論の文脈では、**意味を幾何学的構成（pullback可能性）として定義**し、知識の階層や誤解の発生を数学的にモデル化しようとしています³⁴。概念空間理論やカテゴリー意味論など部分的に関連する研究はあるものの、CTTほど**統合的かつ工学的応用まで視野に入れた形で意味論と幾何学を結ぶ理論**は他にありません²²²⁴。特に人工意識の理論アーキテクチャまで踏み込んでいる点は大胆で、現時点では仮説的ですが非常にオリジナルです²⁰。
- 哲学的には、**認識主体と存在・時間・意味の問題を一つの数学フレームワークで扱おうとしている点**が際立ちます。観測者の主体性（主観）を組み込んだ理論という意味で、従来の客観的实在論から大きく踏み出した試みです。時間の非可逆性や自己言及の問題と、知識の構成的階層を結びつけて論じる理論も他に例を見ません。CTTは科学と哲学の溝を埋め、「時間」「存在」「意味」といった根源的問いに対し**数学的にアプローチ**している点で独自の価値があります。

以上の検討から、CTTは既存のさまざまな理論に着想を得つつも、それらを包括的な枠組みに統合しようとする**野心的な理論**であることがわかります。特に**数学的厳密性**（テンソル幾何学）と**哲学的洞察**（観測主体や意味の問題）の橋渡しを目指す姿勢は希少であり、既存文献には直接的な対応物がほとんど無いと言えるでしょう。その意味でCTTは極めて多層的・学際的なアプローチであり、成功すれば理論物理から人工知能・哲学まで影響を与え得る独創的理論として位置付けられます。ただし現段階では提唱者独自の理論であり、広く検証・発展させるには更なる研究とコミュニティの議論が必要でしょう。しかし、CTTが提示する統合的視点は既存の分野横断的な課題（観測問題、心脳問題、時間の矢 etc.）に新たな光を当てる可能性があり、その挑戦的精神自体が学際研究において価値あるものだと考えられます。

参考文献:

- Endo, Hiroki: Constructive Tensor Theory: Part I-III, 2025（CTT提唱者によるプレプリント。数学的定式化¹、観測幾何と解釈²、連続体力学への応用¹⁴を含む）

- Peter Gärdenfors: *Conceptual Spaces: The Geometry of Thought*, MIT Press, 2000 (概念の幾何学的意味表現) ²²
- Bob Coecke et al.: *Mathematical Foundations for a Compositional Distributional Model of Meaning*, 2010 (カテゴリ理論を用いた言語の意味論モデル: DisCoCat) ²⁴
- Alain Connes: *Noncommutative Geometry*, 1994 (非可換幾何学の基礎的著作。物理への応用として非可換性と時間の関係を示唆) ¹⁶
- Carlo Rovelli: "Relational Quantum Mechanics," *International Journal of Theoretical Physics* 35, 1996 (量子状態の観測者依存性を提唱) ¹¹
- Heinz von Foerster: *Understanding Understanding*, 2003 (認識の二次的サイバネティクス。「観測者なしの観測は妄想」という有名な言葉を含む)
- Thomas Kuhn: *The Structure of Scientific Revolutions*, 1962 (観測の理論負荷性についての古典的議論) ⁹
- Ernst von Glasersfeld: *Radical Constructivism: A Way of Knowing and Learning*, 1984 (知識の構成主義的見解を詳述) ³⁰

(上述の文献番号は質問文中で示された資料や関連する外部資料を示しています)

¹ ³ **Constructive Tensor Theory: Part I. Mathematical Foundations**

<https://zenodo.org/records/15420529>

² ¹⁷ ²⁰ ²⁶ **Constructive Tensor Theory: Part II. Observation Geometry and Interpretations**

<https://zenodo.org/records/15420549>

⁴ **Pullback (differential geometry) - Wikipedia**

[https://en.wikipedia.org/wiki/Pullback_\(differential_geometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pullback_(differential_geometry))

⁵ **Pullback (category theory) - Wikipedia**

[https://en.wikipedia.org/wiki/Pullback_\(category_theory\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pullback_(category_theory))

⁶ ⁷ **dg.differential geometry - In how many ways can an iterated tangent bundle $(T^k)M$ be viewed as a fibre bundle over $(T^{(k-1)})M$? - MathOverflow**

<https://mathoverflow.net/questions/2019/in-how-many-ways-can-an-iterated-tangent-bundle-tkm-be-viewed-as-a-fibre-bund>

⁸ ¹⁰ ²¹ ²⁷ ³¹ ³⁴ ³⁵ **CTT Limits Revealed**

https://endohirokinut.github.io/CTT_Discovery_Trigger/docs/limits_revealed.html

⁹ ²⁸ ²⁹ **Theory-ladenness - Wikipedia**

<https://en.wikipedia.org/wiki/Theory-ladenness>

¹¹ ¹² ³³ **1. Introduction**

<https://arxiv.org/html/2412.05979v2>

¹³ ¹⁴ ³⁶ **Constructive Tensor Theory: Part III. Constructive Continuum Mechanics, Matter, Motion, and Conservation**

<https://zenodo.org/records/15459731>

¹⁵ **Constitutive analysis of large elasto-plastic deformation based on ...**

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020768391900228>

¹⁶ **[2207.10901] Noncommutativity and Physics: A non-technical review**

<https://arxiv.org/abs/2207.10901>

¹⁸ ¹⁹ **Arrow of time - Wikipedia**

https://en.wikipedia.org/wiki/Arrow_of_time

22 **The Geometry of Meaning: Semantics Based on Conceptual Spaces**

<https://direct.mit.edu/books/monograph/4012/The-Geometry-of-MeaningSemantics-Based-on>

23 **CTT Discovery Trigger**

https://endohirokinut.github.io/CTT_Discovery_Trigger/

24 **DisCoCat - Wikipedia**

<https://en.wikipedia.org/wiki/DisCoCat>

25 **Pullback Bundles and the Geometry of Learning - PMC**

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10606266/>

30 **Radical constructivism - Wikipedia**

https://en.wikipedia.org/wiki/Radical_constructivism

32 **An interview with Ilya Prigogine - Interalia Magazine**

<https://www.interaliomag.org/blog/an-interview-with-ilya-prigogine/>