CCG統語解析器lightblueと自動定理証明器waniによる自然言語推論の試み

お茶の水女子大学
富田朝　大洞日音　戸次大介

人工知能学会　2025/05/30

二重過程理論 (Dual process theories)

人間の思考や推論には、**2つの異なる認知システム**が相互作用しているとする心理学・哲学における議論

(Sloman 1996, Evans & Frankish 2009, Evans & Stanovich 2013)

二重過程理論 (Dual process theories)

人間の思考や推論には、**2つの異なる認知システム**が相互作用しているとする心理学・哲学における議論

(Sloman 1996, Evans & Frankish 2009, Evans & Stanovich 2013)

System 1
高速かつ無意識的な知覚的/連想的推論を担う機構

→ 深層学習モデルによって実現

System 2
低速かつ意識的な探索的推論を担う機構

→ LLM上で実現するための方法が提案

Chain of Thought (Wei et al. 2022)
Tree of Thought (Yao et al. 2023)

LLMの探索的推論に関する課題

- LLMの探索的推論の能力は訓練データ中での問題・解答の出現頻度に強く依存している
- 出現頻度の低い問題の正解率は著しく低い

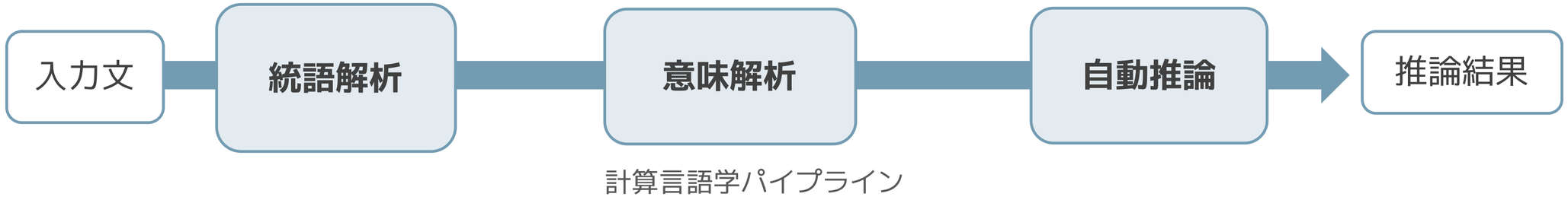
(McCoy et al. 2024)

→ LLMが探索的推論を連想的推論の一種として解こうとしている

自然言語推論への言語学的アプローチ

探索的推論は、理論言語学・数理論理学・言語哲学での「意味の理論」の一部として研究されてきた

- 言語理論のシミュレータとして計算言語学パイプラインが実装された



- 2000年代中盤以降に急速に発展している

（Bos 2008, Chatzikyriakidis and Luo 2014, Mineshima et al. 2015）

パラダイムシフトの要因 [1/2]

形式統語論

- 組合せ範疇文法（CCG）の理論的深化 (Steedman 1996)
- CCGbankの構築 (Hockenmaier & Steedman 2005)
- 高速・頑健なCCG統語解析器の登場 (Clark & Curran 2007)

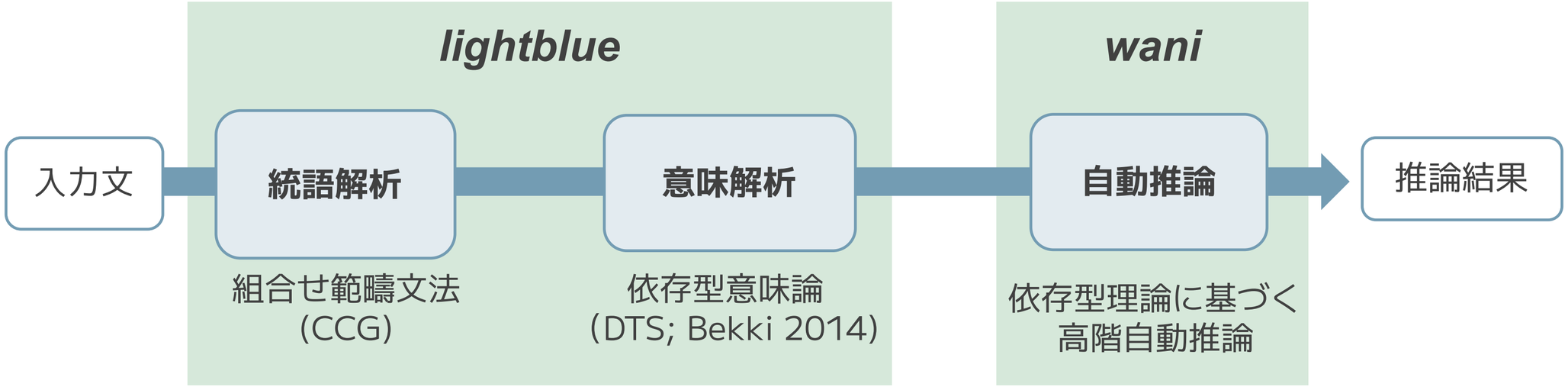
パラダイムシフトの要因 [2/2]

形式意味論

- 型理論的意味論（TTS)の登場 (Sundholm 1986, Ranta 1994)
  → モデル理論に依存しない推論が可能に
- 高階論理対応の定理証明器の発展 (Bertot and Castéran 2004)
  → 自動推論が可能に

本研究の位置付け

- 計算言語学パイプラインの最新の研究として、推論システムを提案する



- 理論背景・システム設計・評価について述べる

組合せ範疇文法（CCG; Steedman 2000）

- 統語理論である範疇文法の一種
- 辞書と組合せ規則によって統語構造を定義
- 痕跡(trace)を伴う移動操作を仮定しないため，CYK チャートパージングによる統語解析が可能

辞書

Keats	$\vdash NP$
eats	$\vdash (S \backslash NP)/NP$
apples	$\vdash NP$

CCG統語構造

$$\dfrac{\dfrac{\text{Keats}}{NP} \quad \dfrac{\dfrac{\text{eats}}{(S \backslash NP)\,/\,NP} \quad \dfrac{\text{apples}}{NP}}{S \backslash NP}\,<}{S}\,>$$

依存型意味論 (DTS; Bekki 2014, Bekki and Mineshima 2017)

- 依存型理論 (DTT; Martin-Löf 1984) に基づく自然言語の意味の理論
- 型理論的意味論 (Type Theoretical Semantics; TTS) の一つ

TTSにおけるカリー・ハワード対応

Logic	証明		命題
	M	:	$A \times B$
Type Theory	項		型

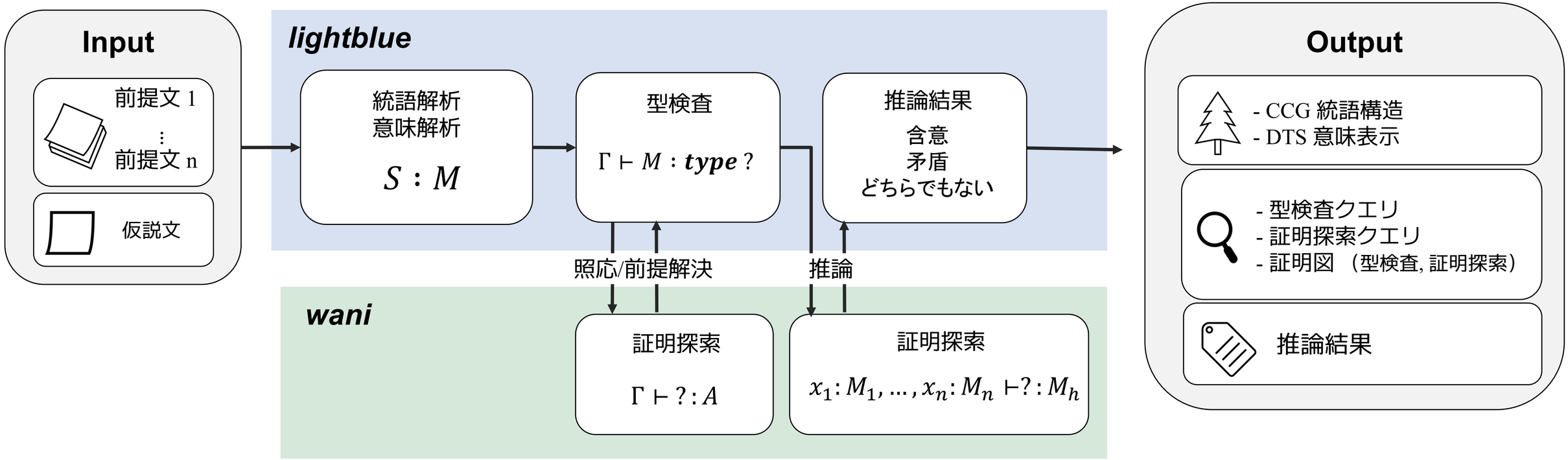
依存型意味論 (DTS; Bekki 2014, Bekki and Mineshima 2017)

DTSでは、型の中で項を参照することが可能

$$\begin{bmatrix} e : event \\ \boxed{run\ (e, taro)} \end{bmatrix}$$

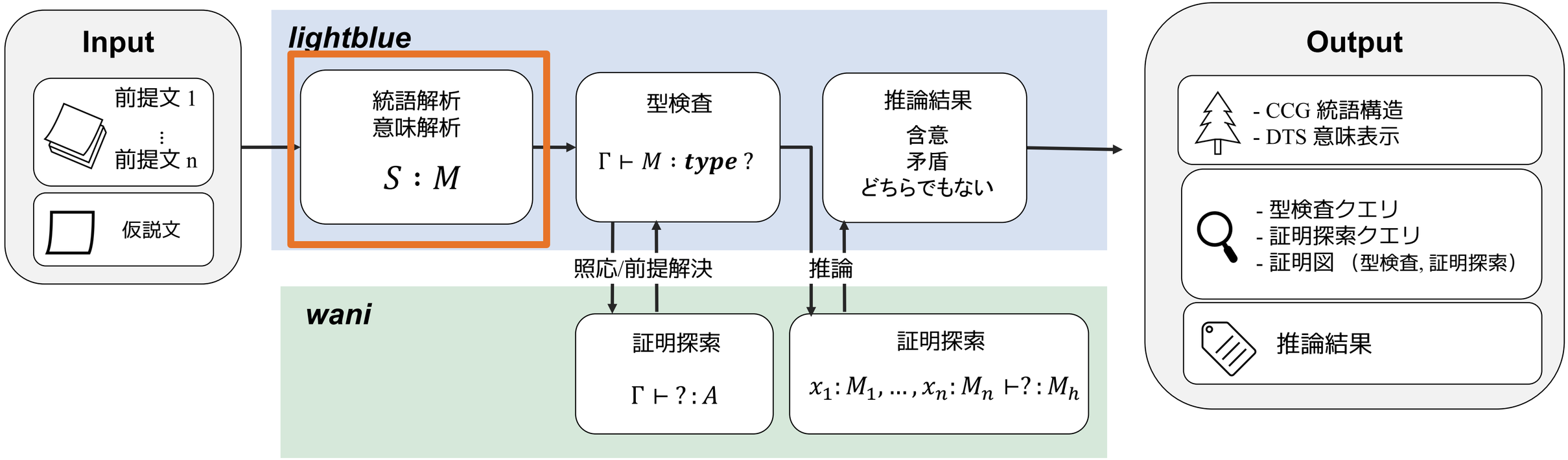
→ 先行文脈の証明を項として参照できるため、照応解決・前提解決を証明探索に帰着させて計算できる

パイプラインの全体像



S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

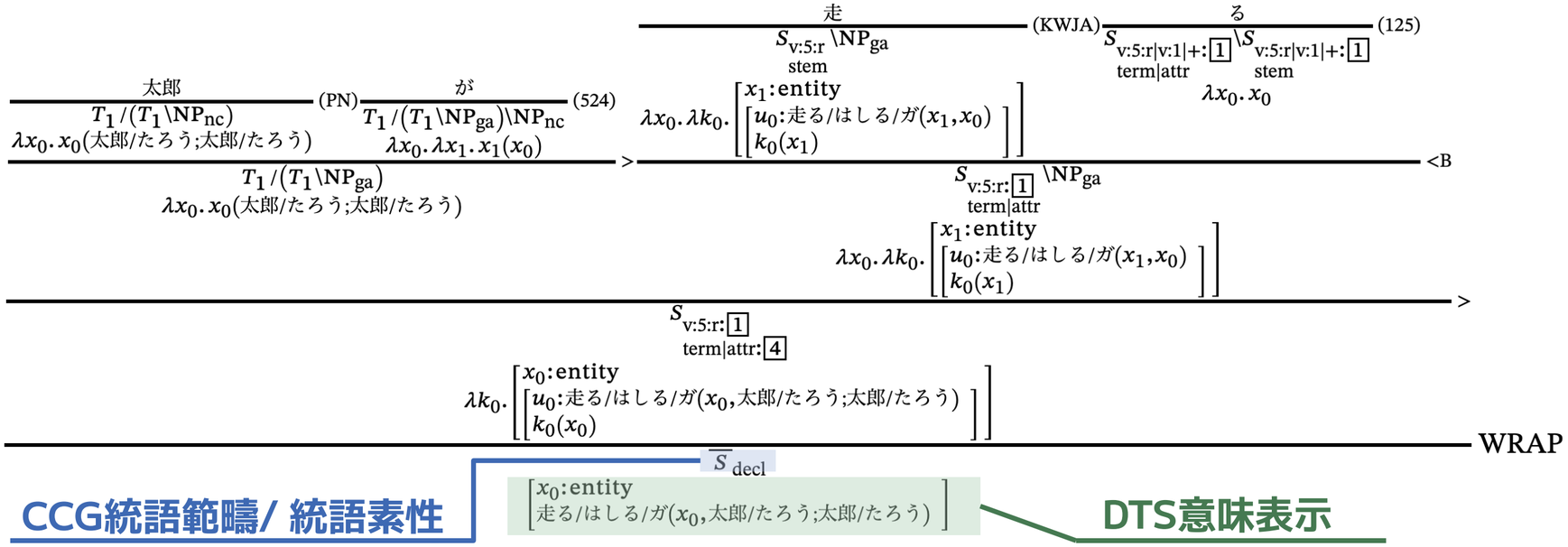
パイプラインの全体像



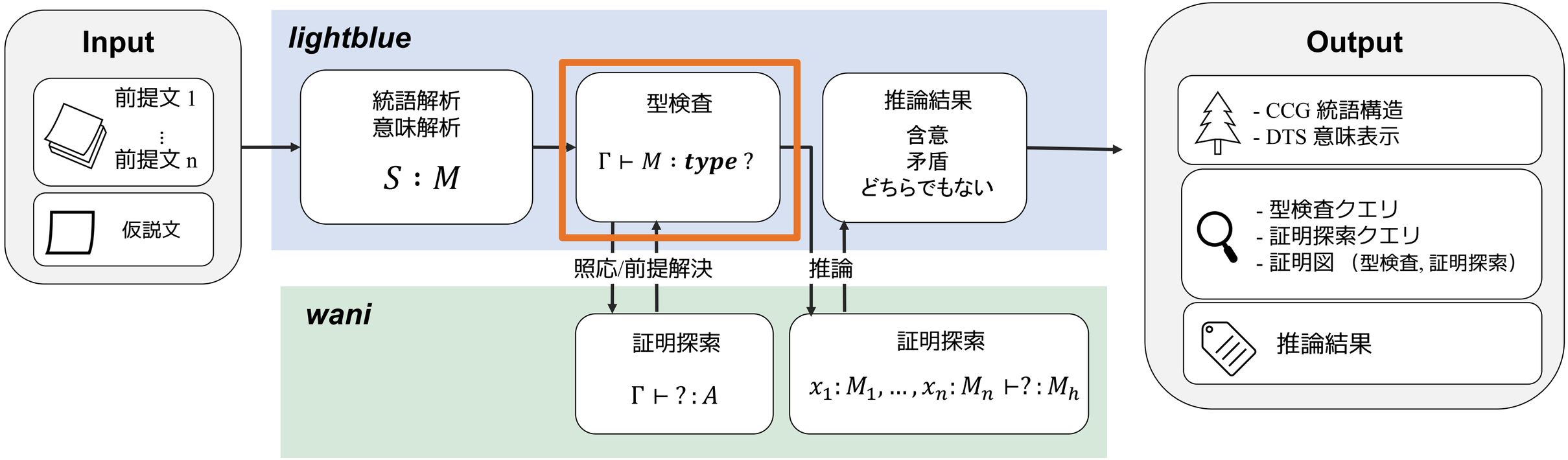
S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

統語・意味解析器lightblue

- CCGに基づく統語解析・DTSに基づく意味合成を行う
  - 詳細な統語情報を含む統語構造を出力することができる
- 意味表示が整合な型を持つか (semantic felicity conditionを満たすか) を型検査で確認することができる



パイプラインの全体像


Input
前提文 1
⋮
前提文 n
仮説文
lightblue
統語解析
意味解析
$S : M$
型検査
$\Gamma \vdash M : \boldsymbol{type}\,?$
推論結果
含意
矛盾
どちらでもない
照応/前提解決
推論
wani
証明探索
$\Gamma \vdash ? : A$
証明探索
$x_1 : M_1, \ldots, x_n : M_n \vdash ? : M_h$
Output
- CCG 統語構造
- DTS 意味表示
- 型検査クエリ
- 証明探索クエリ
- 証明図 （型検査, 証明探索）
推論結果

統語・意味解析器lightblue

- CCGに基づく統語解析・DTSに基づく意味合成を行う
  - 詳細な統語情報を含む統語構造を出力することができる
- 意味表示が整合な型を持つか (semantic felicity conditionを満たすか)を**型検査**で確認することができる

> semantic felicity condition (SFC)
>
> 文の意味表示は依存型理論における`type`という型を持つという制約

  - 意味表示のill-formednessは語彙項目における不整合を意味する

lightblueの型検査証明図

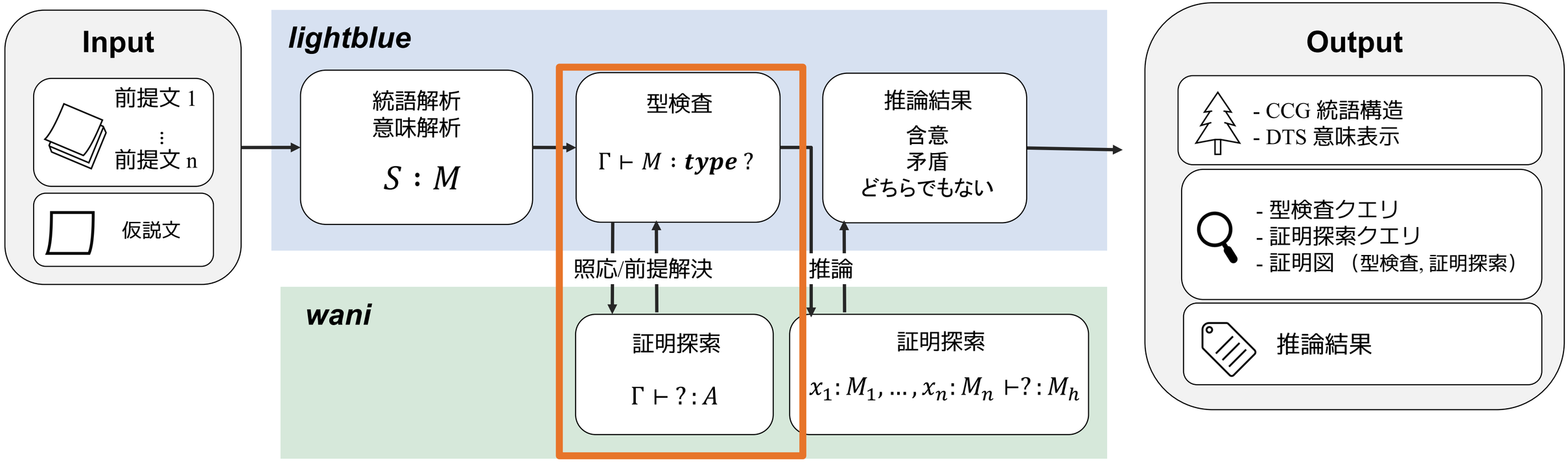
型検査クエリ

$$\vdash \begin{bmatrix} x_0 : entity \\ 走る/ガ\ (x_0, 太郎) \end{bmatrix} : type\ ?$$

証明図（型検査）

$$\dfrac{\dfrac{}{\vdash \mathrm{entity} : \mathrm{type}}\,(\{\}\mathrm{F}) \quad \dfrac{\dfrac{\dfrac{}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash 走る/はしる/ガ : (x_0 : \mathrm{entity}) \to (x_1 : \mathrm{entity}) \to \mathrm{type}}\,(\mathrm{Con}) \quad \dfrac{}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash 太郎/たろう;太郎/たろう : \mathrm{entity}}\,(\mathrm{Con})}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash 走る/はしる/ガ(太郎/たろう;太郎/たろう) : (x_0 : \mathrm{entity}) \to \mathrm{type}}\,(\Pi\mathrm{E}) \quad \dfrac{}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash s_0 : \mathrm{entity}}\,(\mathrm{Var})}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash 走る/はしる/ガ(s_0, 太郎/たろう;太郎/たろう) : \mathrm{type}}\,(\Pi\mathrm{E}) \quad \dfrac{}{s_0 : \mathrm{entity}, s_1 : 走る/はしる/ガ(s_0, 太郎/たろう;太郎/たろう) \vdash \mathrm{T} : \mathrm{type}}\,(\mathrm{TF})}{s_0 : \mathrm{entity} \vdash 走る/はしる/ガ(s_0, 太郎/たろう;太郎/たろう) : \mathrm{type}}\,(\Sigma\mathrm{F})}{\vdash \begin{bmatrix} x_0 : \mathrm{entity} \\ 走る/はしる/ガ(x_0, 太郎/たろう;太郎/たろう) \end{bmatrix} : \mathrm{type}}\,(\Sigma\mathrm{F})$$

lightblue / wani による照応・前提解決



S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

lightblue / wani による照応・前提解決

入力文：「バスが池袋に到着したが太郎は乗れなかった」

- 意味表示に未指定項が含まれる

$$\vdash \begin{bmatrix} u_o: \begin{bmatrix} u_1: \begin{bmatrix} x_0: entity \\ \begin{bmatrix} x_1: entity \\ \text{バス}(x_1, x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2: entity \\ \begin{bmatrix} u_3: \text{到着/ガニ}(x_2, \pi(u_1), \text{池袋}) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \left(u_5: \#\text{可能}\left(\text{太郎}.\lambda k_0. \begin{bmatrix} x_3: entity \\ \begin{bmatrix} u_6: \text{乗る /ガニ}(x_3, k_0, @entity) \\ \text{タ}(x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right) \rightarrow \bot \right) \end{bmatrix} : type$$

未指定項

「乗る」が取る二格名詞が同定できていない状態

lightblue / wani による照応・前提解決

入力文：「バスが池袋に到着したが太郎は乗れなかった」

- 意味表示に未指定項が含まれる

$$\vdash \begin{bmatrix} u_o: \begin{bmatrix} u_1: \begin{bmatrix} x_0: entity \\ \begin{bmatrix} x_1: entity \\ \text{バス}(x_1, x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2: entity \\ \begin{bmatrix} u_3: \text{到着/ガニ}(x_2, \pi_1 u_0, \text{池袋}) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \left(u_5: \#\text{可能} \left(\text{太郎}. \lambda k_0. \begin{bmatrix} x_3: entity \\ \begin{bmatrix} u_6: \text{乗る /ガニ}(x_3, k_0, @entity) \\ \text{タ}(x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right) \rightarrow \bot \right) \end{bmatrix} : type$$

$$\vdash \begin{bmatrix} u_o: \begin{bmatrix} u_1: \begin{bmatrix} x_0: entity \\ \begin{bmatrix} x_1: entity \\ \text{バス}(x_1, x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2: entity \\ \begin{bmatrix} u_3: \text{到着/ガニ}(x_2, \pi_1 u_0, \text{池袋}) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \left(u_5: \#\text{可能} \left(\text{太郎}. \lambda k_0. \begin{bmatrix} x_3: entity \\ \begin{bmatrix} u_6: \text{乗る /ガニ}(x_3, k_0, \pi_1 u_0) \\ \text{タ}(x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right) \rightarrow \bot \right) \end{bmatrix} : type$$

自動定理証明器waniによる証明探索

証明探索の結果得られた証明項によって未指定項を書き換える

自動定理証明器wani

- DTSの断片についての自動定理証明器
  入力：依存型理論形式の前提・帰結の命題
  出力：（証明が可能な場合）依存型理論の証明図

- 前向き推論、後ろ向き推論に分け証明探索を実現

前向き推論　：与えられた前提から導きうる内容を展開する推論
後ろ向き推論：帰結への推論規則の適用のために必要な要素を割り出す
動作を繰り返す推論、深さ優先探索を行う

前向き推論と後ろ向き推論

前向き推論

与えられた前提から導きうる内容を展開する

$$\frac{M \ : \ \begin{bmatrix} x:A \\ B \end{bmatrix}}{?:A}$$

(ΣE)規則により「? 」には$\pi_1(M)$が計算できる

後ろ向き推論

帰結への推論規則の適用のために必要な要素を割り出す動作を繰り返す

$$\frac{A:type \qquad \begin{array}{c} \overline{x:A}^{\,i} \\ \vdots \\ M:B \end{array}}{\lambda x.M : (x:A) \to B}$$

$(\Pi I), i$ 規則により$\lambda x.M : (x:A) \to B$が展開される

waniにおける制限

依存型理論における証明探索は決定不能（undecidable）

→ 証明探索に制限を設ける

1. **時間及び深さ制限**

   計算時間と後ろ向き推論の適用数についてパラメータを用意

2. **前向き推論と後ろ向き推論**

   Σ型の除去則、等号型の導入・除去則については前向き推論、その他については後ろ向き推論を採用

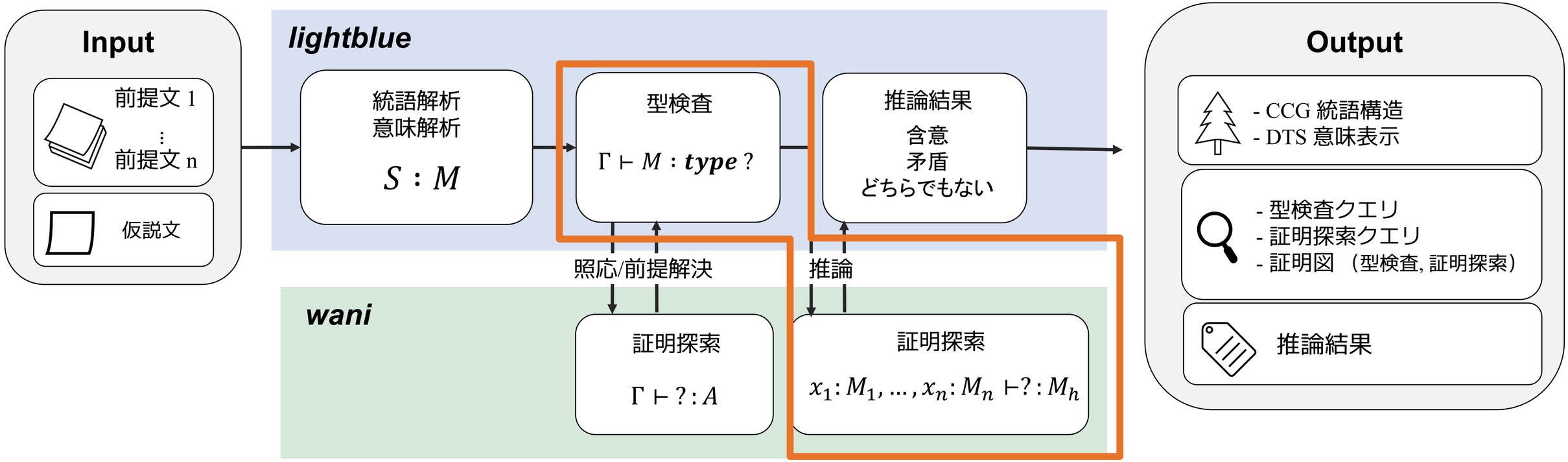
3. **一部機能の独自実装**

   Σ型の除去則、等号型の導入・除去則において独自の実装を導入

4. **枝刈り**

   一部の後ろ向き推論で枝刈りを実行

waniによる証明探索



S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

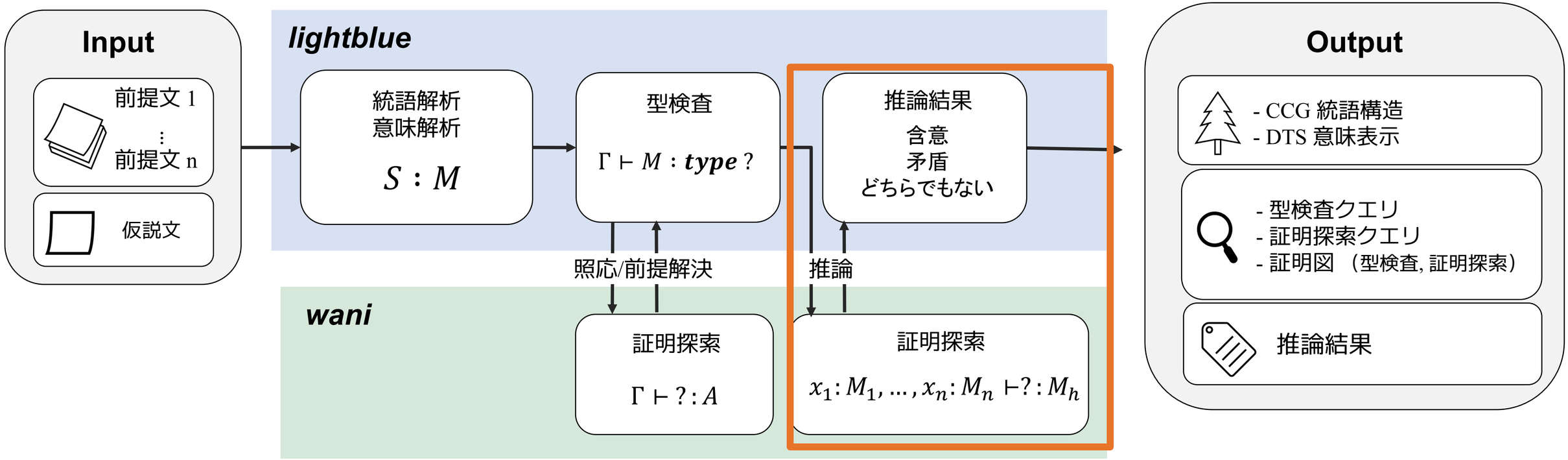
waniによる証明探索

前提文の意味表示から，**仮説文の意味表示の型**を持つ**証明項**が存在するかどうかを判定

前提文：スミスとジョーンズが打ち合わせを離れた
仮説文：スミスが打ち合わせを離れた。

$$s_0 : \begin{bmatrix} u_0 : \begin{bmatrix} u_1 : \begin{bmatrix} x_0 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} x_1 : \mathrm{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_1, x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} u_3 : \text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_2, \text{スミス/すみす}, \pi_1(u_1)) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_5 : \begin{bmatrix} x_3 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} x_4 : \mathrm{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_4, x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_5 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} u_7 : \text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_5, \text{ジョーンズ/ジョーンズ}, \pi_1(u_5)) \\ \#\text{タ}(x_5) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \vdash ? : \begin{bmatrix} u_9 : \begin{bmatrix} x_6 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} x_7 : \mathrm{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_7, x_6) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_8 : \mathrm{entity} \\ \begin{bmatrix} u_{11} : \text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_8, \text{スミス/すみす}, \pi_1(u_9)) \\ \#\text{タ}(x_8) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

waniによる証明探索と推論結果



S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

waniによる証明探索と推論結果

証明項が構築できた場合には出力として証明図を返す

仮説文の意味表示M_hの証明項が構築できた場合

→ 含意 (yes)

$\neg M_h$型の証明項が構築できた場合

→ 矛盾 (no)

いずれの証明項も構築できなかった場合

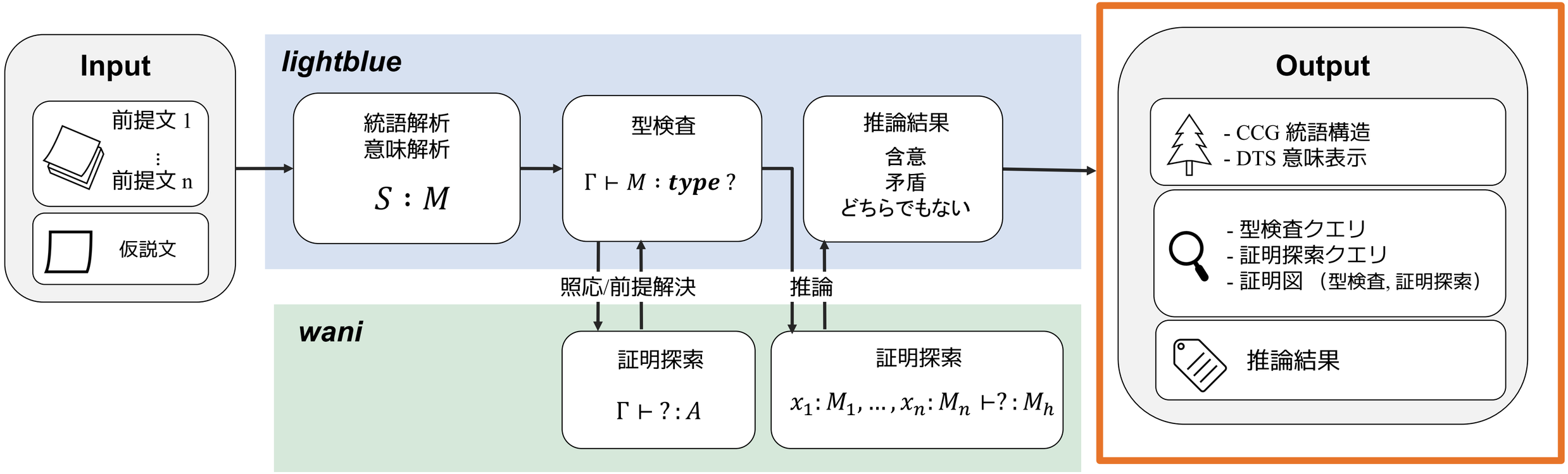
→ どちらでもない (unknown)

waniによる証明探索

$$
\begin{array}{l}
\dfrac{\dfrac{\dfrac{}{s_0:\begin{bmatrix} u_0:\begin{bmatrix} u_1:\begin{bmatrix} x_0:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_1:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_1,x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_3:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_2,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_1)) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_5:\begin{bmatrix} x_3:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_4:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_4,x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_5:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_7:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_5,\text{ジョーンズ/ジョーンズ},\pi_1(u_5)) \\ \#\text{タ}(x_5) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}}{\vdash s_0:\begin{bmatrix} u_9:\begin{bmatrix} u_{10}:\begin{bmatrix} x_6:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_7:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_7,x_6) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_8:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_{12}:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_8,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_{10})) \\ \#\text{タ}(x_8) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{14}:\begin{bmatrix} x_9:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_{10}:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_{10},x_9) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_{11}:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_{16}:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_{11},\text{ジョーンズ/ジョーンズ},\pi_1(u_{14})) \\ \#\text{タ}(x_{11}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}}\ (\text{Var})}{s_0:\begin{bmatrix} u_0:\begin{bmatrix} u_1:\begin{bmatrix} x_0:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_1:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_1,x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_3:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_2,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_1)) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_5:\begin{bmatrix} x_3:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_4:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_4,x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_5:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_7:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_5,\text{ジョーンズ/ジョーンズ},\pi_1(u_5)) \\ \#\text{タ}(x_5) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \vdash \pi_1(s_0):\begin{bmatrix} u_9:\begin{bmatrix} x_6:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_7:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_7,x_6) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_8:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_{11}:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_8,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_9)) \\ \#\text{タ}(x_8) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}}\ (\Sigma\text{E})
\end{array}
$$

$$
\dfrac{}{s_0:\begin{bmatrix} u_0:\begin{bmatrix} u_1:\begin{bmatrix} x_0:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_1:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_1,x_0) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_2:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_3:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_2,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_1)) \\ \#\text{タ}(x_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_5:\begin{bmatrix} x_3:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_4:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_4,x_3) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_5:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_7:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_5,\text{ジョーンズ/ジョーンズ},\pi_1(u_5)) \\ \#\text{タ}(x_5) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \vdash \pi_1(s_0):\begin{bmatrix} u_9:\begin{bmatrix} x_6:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} x_7:\text{entity} \\ \text{打ち合わせ/うちあわせ}(x_7,x_6) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_8:\text{entity} \\ \begin{bmatrix} u_{11}:\text{離れる/はなれる/ガヲ}(x_8,\text{スミス/すみす},\pi_1(u_9)) \\ \#\text{タ}(x_8) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix}}\ (\text{Var})
$$

lightblue / wani による照応・前提解決



S : CCG統語構造
M: DTS意味表示
A: 型
x: 項

データセット – 日本語意味論テストセットJSeM

- 含意関係のデータセット
- 英語用のテストセットFraCasの日本語訳にあたる問題や日本語独自の言語現象に対応した問題からなる
- 各文は、前提・仮説・判定（Yes, No, Unknown, Undef）などの情報を含む
- ラベルと含意関係の推論結果の一致率によって推論システムを評価する

実験結果

JSeMのVerbsセクションの36題に対して推論へ取り組み、高階論理に基づく推論システムccg2lambda (Martínez-Gómez et al. 2016) と同等の精度を達成

(松原ら　2025)

表 1　本システムの推論結果

		正解ラベル			
		Yes	No	Unk	Other
推論結果	Yes	13	0	0	0
	No	0	0	0	0
	Unk	16	0	7	0
	Other	0	0	0	0

表 2　ccg2lambda の推論結果

		正解ラベル			
		Yes	No	Unk	Other
推論結果	Yes	20	0	0	0
	No	0	0	0	0
	Unk	1	0	0	0
	Other	8	0	7	0

実験結果 – ccg2lambdaとの比較

	本システム	ccg2lambda
統語解析 - 辞書の修正	CCG (解析器：lightblue) ✓ 語彙項目の修正が容易	CCG (解析器：depccg) ⊖ 良質なツリーバンクと再学習が必要
意味解析 - 照応解析 - 整合性	DTS（解析器：lightblue） ✓ ✓ SFCによって保証される	高階論理 ✗ ✗ SFCの制約がない
定理証明	解析器：wani	解析器：Coq

エラー分析

36問のうち、不正解となった16問は以下のエラーに分類できる

1.知識に由来するエラー
2.waniの証明探索によるエラー
3.統語解析によるエラー

エラー分析 – 知識の不足

前提文：ITELは1988年から1992年までAPCOMを所有していた。
仮説文：ITELは1990年にAPCOMを所有していた。

正解ラベル：Yes
判定ラベル：Unknown

1998年と1992年の間に1990年があるという時系列に関する知識が必要

エラー分析 – waniによる証明探索

waniのDTTの推論が決定不能なため、証明探索が終わらずにtimeoutとなるエラー

---

waniの高速化が求められる

エラー分析 – 統語解析によるエラー

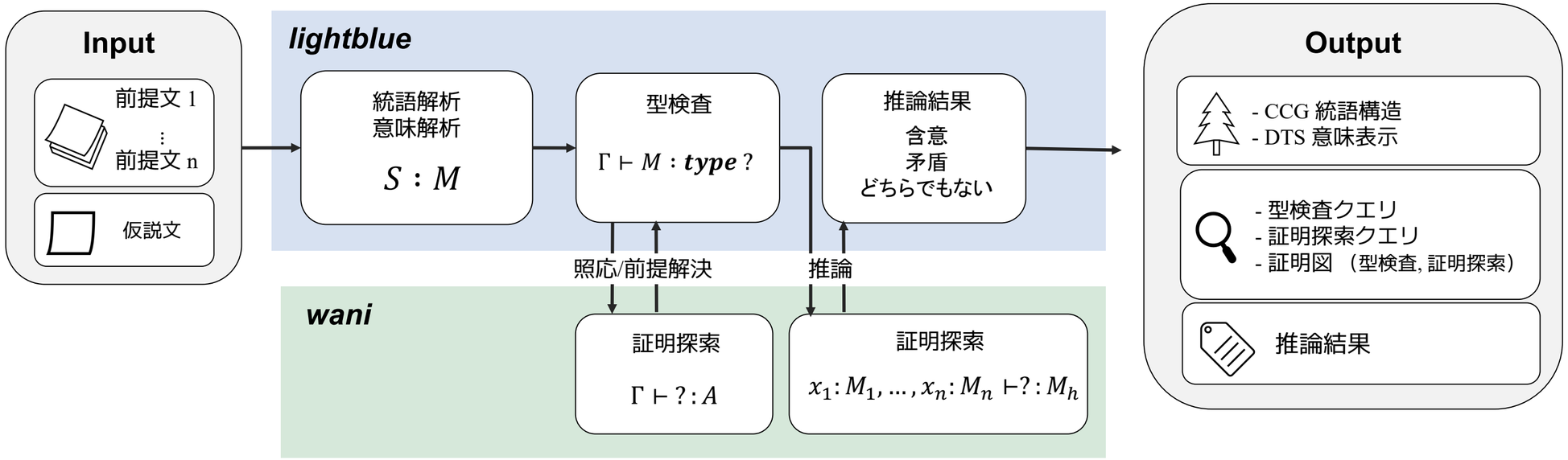
前提文：太郎は次郎から花子を紹介された。
仮説文：次郎が花子を太郎に紹介した。

正解ラベル：Yes
判定ラベル：Unknown

サ変動詞の語彙項目の項構造の分析の改善が求められる
→ 既存の項構造フィルターにサ変動詞のフィルタリングを加える必要がある

まとめ

計算言語学パイプラインの最新の研究として、推論システムを提案した



今後の展望

- 統語解析の妥当性向上
- JSeMの他セクションを用いたシステム評価の拡充
- waniの高速化