

不均衡最適輸送を用いた意味変化検出

岸野稜¹, 山際宏明¹, 永田亮^{2,5}, 横井祥^{3,4,5}, 下平英寿^{1,5}

¹京都大学, ²甲南大学, ³東北大学, ⁴国立国語研究所, ⁵理化学研究所

背景：時代経過で単語の意味は変化する

- 時代により単語の意味は変わる場合がある
 - 旧→新の間で、語義の消失・出現がある
 - *record* : [記録]→[記録], [音楽], [偉業]
- 単語の意味が変化したかどうか、どれだけ変化したかどの語義の使用頻度が増減したかを同定したい
 - 言語学の分析において有用

意味変化検出の設定

- s_i, t_j : 対象単語を含む文脈で旧, 新コーパスに属するもの
- u_i, v_j : 対象単語の s_i, t_j に関する埋め込みを言語モデルから取得

年代	使用事例
1810–1860	<p>... in all the records [記録] of sorrow.</p> <p>... in the record [記録] of any age or cour</p> <p>... the historic records [記録] of Christianity...</p>
1960–2010	<p>... this is the record [記録] of my life.</p> <p>... single-season record [偉業] held by</p> <p>The record [音楽] labels' new service...</p>

旧事例 $s_1, \dots, s_i, \dots, s_{100}$

↓
record の旧埋め込み u_i

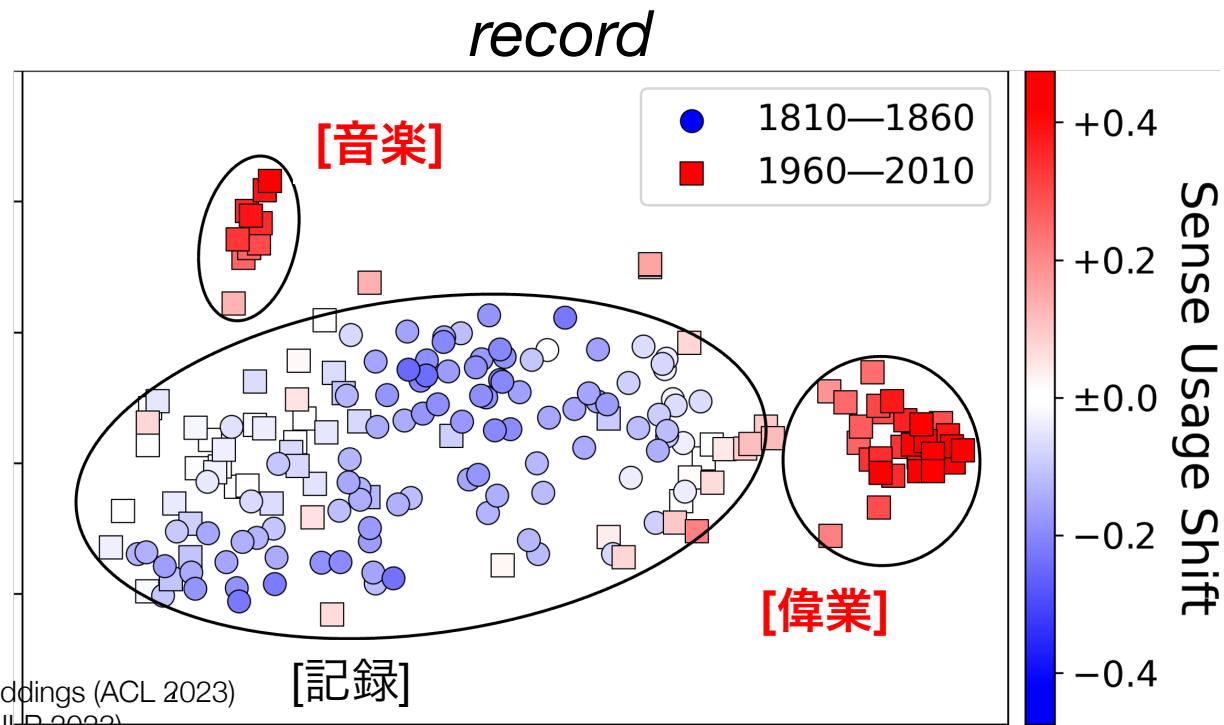
新事例 $t_1, \dots, t_j, \dots, t_{100}$

↓
record の新埋め込み v_j

DWUG [Schlechtweg+ 2021]
データセットにおける
record の例

事例ごとの変化に注目する

- 新旧の埋め込み $\{u_i\}, \{v_j\}$ を比較して単語ごとの変化を定量化できる
[Aida+ 2023] [Nagata+ 2023] [Giulianelli+ 2020][Periti+ 2022]
- 事例ごとの変化について定量的に評価したものはない
 - どの事例の語義の使用頻度が増加/減少したかを同定したい
 - 個々の事例に対して“変化率”を割り当てたい
 - *record*: [記録] → [記録], [音楽], [偉業]



Aida&Bollegala Unsupervised Semantic Variation Prediction using the Distribution of Sibling Embeddings (ACL 2023)

Nagata+ Variance Matters: Detecting Semantic Differences without Corpus/Word Alignment (EMNLP 2023)

Giulianelli+ Analysing Lexical Semantic Change with Contextualised Word Representations (ACL 2020)

Periti+ What is Done is Done: an Incremental Approach to Semantic Shift Detection (Lchange 2022)

最適輸送は意味変化を十分に捉えきれない

- 最適輸送 (OT) : 確率分布を比較するツール
 - 旧埋め込み u_i は重み a_i , 新埋め込み v_j は重み b_j をもつ : $\sum a_i = \sum b_j = 1$
 - C_{ij} : u_i から v_j へ重みを移動させるコスト
 - u_i から v_j へ輸送する重みの量 T_{ij} を最適化

T は事例間のアラインメントを与える

定式化 :

輸送コスト

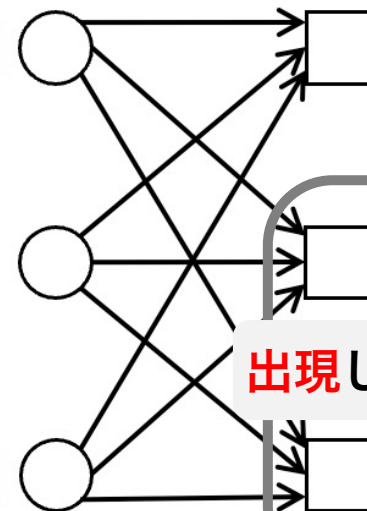
$$\begin{aligned} \min_{T \geq 0} & \sum_{i,j} T_{ij} C_{ij} \\ \text{s. t.} & \mathbf{T} \mathbf{1}_n = \mathbf{a}, \mathbf{T}^\top \mathbf{1}_m = \mathbf{b} \end{aligned}$$

重みの過不足を許容しない

... in all the
records [記録]
of sorrow...

... in the
record [記録]
of any...

... the historic
records [記録]
of Christianity...



... this is the
record [記録]
of my life...

... single-season
record [偉業]
held by

出現した語義への輸送がある

...
record [音楽]
labels' new service..

提案：不均衡最適輸送による意味変化検出

- 不均衡最適輸送 (UOT)：重みの過不足を許容する
 - 旧埋め込み u_i は重み a_i , 新埋め込み v_j は重み b_j をもつ： $\sum a_i = \sum b_j = 1$
 - C_{ij} ： u_i から v_j へ重みを移動させるコスト
 - u_i から v_j へ輸送する重みの量 T_{ij} を最適化

T は事例間のアラインメントを与える

定式化：

$$\min_{T \geq 0} \sum_{i,j} T_{ij} C_{ij} + \lambda \|T \mathbf{1}_n - \mathbf{a}\|^2 + \lambda \|T^T \mathbf{1}_m - \mathbf{b}\|^2$$

輸送コスト

重みの過不足によるコスト

... in all the **records** [記録] of sorrow...

... in the **record** [記録] of any...

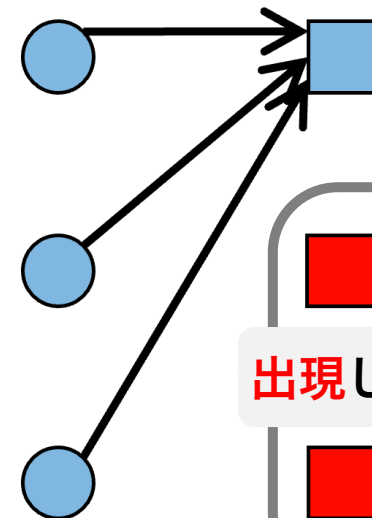
... the historic **records** [記録] of Christianity...

... this is the **record** [記録] of my life...

... single-season **record** [偉業] held by

出現した語義への輸送がない

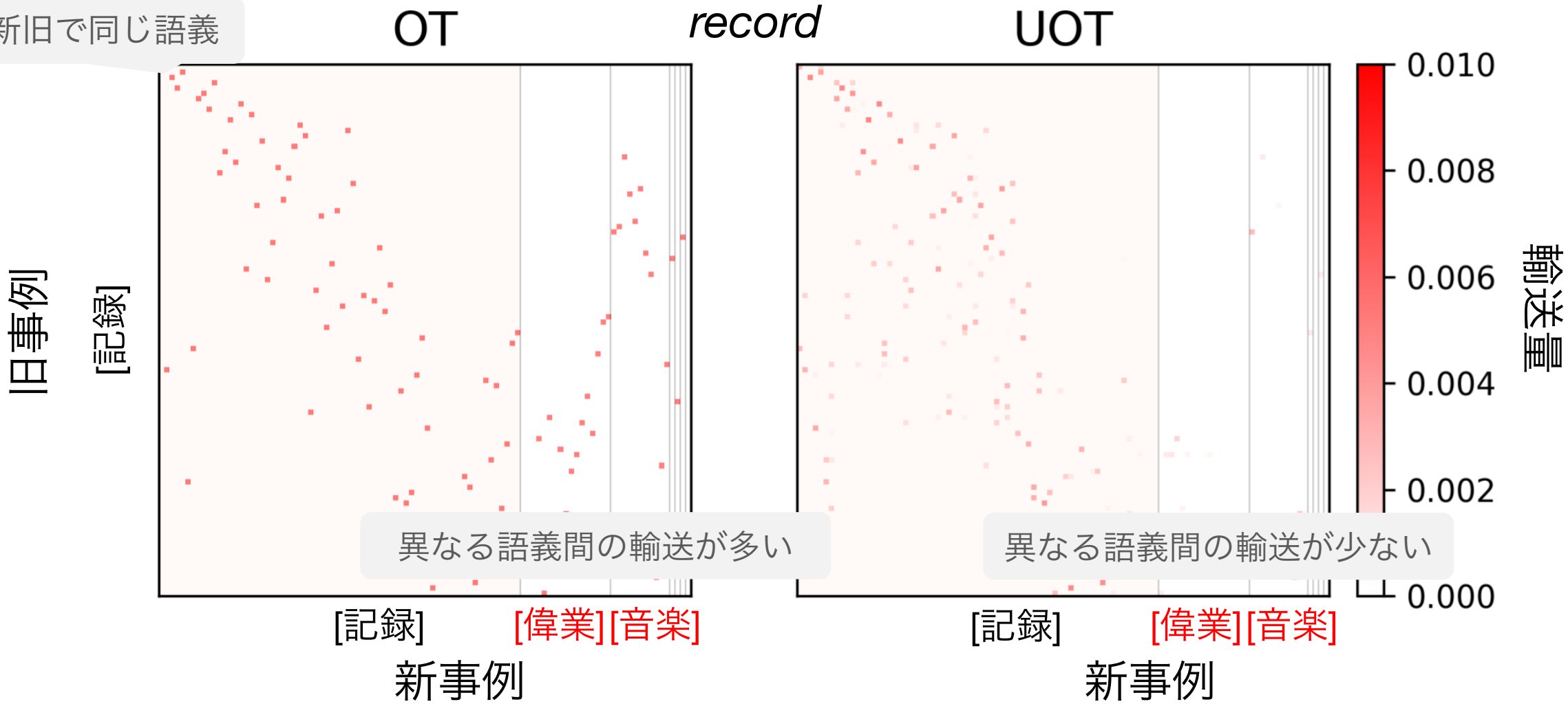
... the **record** [音楽] labels' new service...



OT と UOT の輸送行列の比較

- UOT は異なる語義間での輸送が少ない→意味の**消失出現**を捉えられる

薄赤：新旧で同じ語義



提案：Sense Usage Shift

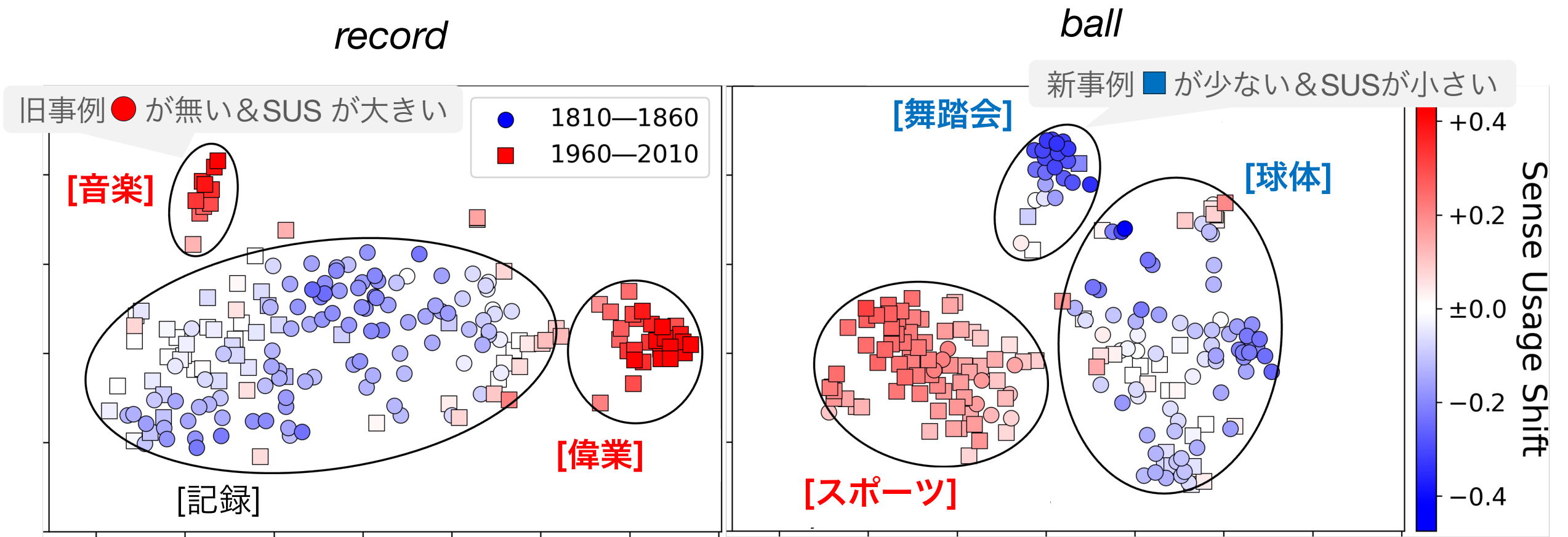
- 不均衡最適輸送で意味変化をモデル化する
 - 旧埋め込み \mathbf{u}_i は重み a_i , 新埋め込み \mathbf{v}_j は重み b_j をもつ： $\sum a_i = \sum b_j = 1$
 - C_{ij} ： \mathbf{u}_i から \mathbf{v}_j へ重みを移動させるコスト
 - \mathbf{u}_i から \mathbf{v}_j へ輸送する重みの量 T_{ij} を最適化

- **Sense Usage Shift**：重みの**過不足**で事例ごとの変化を定量化する

$$\text{SUS}(\mathbf{u}_i) = - \left(a_i - \sum_j T_{ij} \right) / a_i, \quad \text{SUS}(\mathbf{v}_j) = \left(b_j - \sum_i T_{ij} \right) / b_j$$

定性評価：SUS を用いた意味変化の可視化

- SUS は各事例の語義の使用頻度の変化を表す
 - *record, ball* の旧, 新の埋め込みを t-SNE で可視化



定性評価：SUS の上位下位の事例

	年代	事例	語義	SUS
	1960–2010	So did Sire Records ...	音楽	0.47
record	Top 3 1960–2010	... a team with the third-worst record ...	偉業	0.45
	1960–2010	... the AMCU single-season record ...	偉業	0.45
	Bottom 3 1810–1860	... interpretations of the Mosaic record ...	記録	-0.23
	1810–1860	... the records of a professed revelation...	記録	-0.24
	1810–1860	... the record of whose wisdom is included in...	記録	-0.25
	1960–2010	... by teaching Wagner a palm ball .	スポーツ	0.31
ball	Top 3 1960–2010	... flip the ball to a trailing halfback...	スポーツ	0.27
	1960–2010	... a safety pass, and if he gets the ball ...	スポーツ	0.27
	Bottom 3 1810–1860	I now began to attend balls ...	舞踏会	-0.34
	1810–1860	It is a masked ball ...	舞踏会	-0.34
	1810–1860	... keep up the ball of conversation...	球体	-0.42

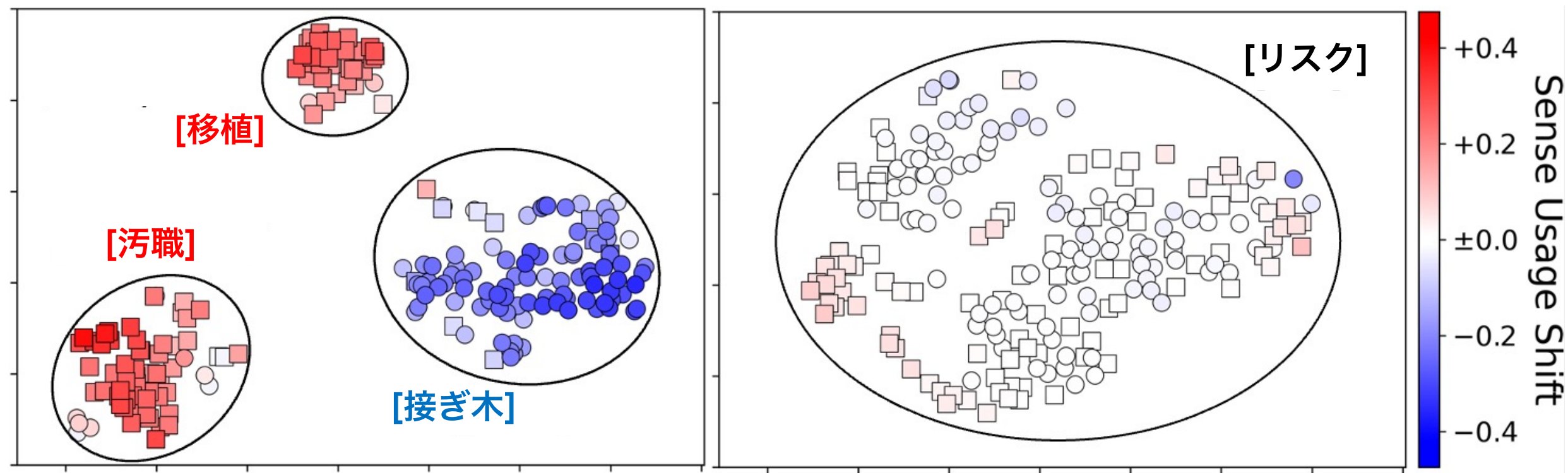
定性評価：SUS を用いた意味変化の可視化

- SUS は各事例の語義の使用頻度の変化を表す
 - *graft*, *risk* の旧, 新の埋め込みを t-SNE で可視化

DWUG 上で意味変化していない

graft

risk



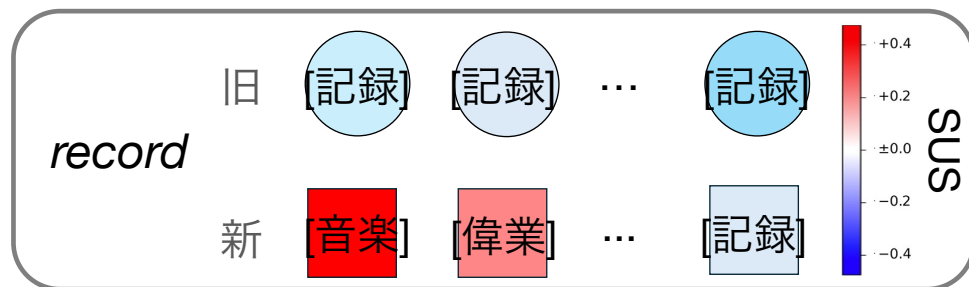
定量評価の概要

ベースラインの手法

- ①, ②, ③とそれぞれの gold score との相関を計算 → SUS > 密度比を確認
 - DWUG での各語義の新旧での使用頻度の違いから, 変化度の gold score を定義

事例ごとに意味変化を定量化:

①各事例の語義での使用頻度の変化



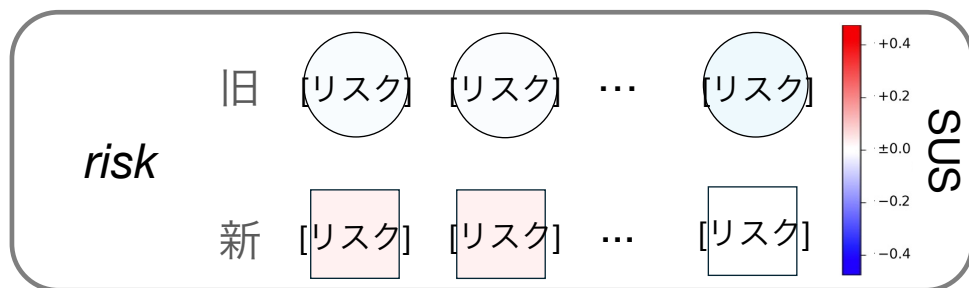
→
新旧の SUS を集約
(平均の差, 分散の比)

record 変化 **大**

⋮

⋮

⋮



→

risk 変化 **小**

まとめ

- 単語の事例ごとに意味変化を定量化した
 - 不均衡最適輸送から得られるアラインメントの過不足を利用した
 - Sense Usage Shift (SUS) という量を提案し、各事例の語義での使用頻度の変化を定量化した
- 単語ごとに意味変化を定量化した
 - SUS を新旧の事例にわたり集約し、単語の意味変化を定量化した
- SUS の有効性を、評価実験を通して確認した
 - 密度比という一般的な手法と比較した

まとめ

- 単語の事例ごとに意味変化を定量化した
 - 不均衡最適輸送から得られるアラインメントの過不足を利用した
 - Sense Usage Shift (SUS) という量を提案し、各事例の語義での使用頻度の変化を定量化した
- 単語ごとに意味変化を定量化した
 - SUS を新旧の事例にわたり集約し、単語の意味変化を定量化した
- SUS の有効性を、評価実験を通して確認した
 - 密度比という一般的な手法と比較した