

食品産業における省人化・自動化の可能性

渡辺哲陽

(金沢大学 理工研究域 フロンティア工学系)

Contents

- 背景
- 壊れやすい物体を流体指で掴む！
- 濡れていても乾いていても高い摩擦を与えるロボットハンド
- 濡れていても乾いていても表面摩擦を変えられるロボットハンド
- 食産業におけるAI適用の可能性

食料品製造業・飲食産業の労働生産性

どちらも最下位に近い・・・



労働生産性の向上が課題・・・自動化への期待大

人手がかかる作業

中でも人手が多く必要とするのが・・・トッピング作業

課題

1. 安定して生ものをつかめない.
2. 外観問題
3. 確実性の担保



解決の糸口になりそうな技術をご紹介します！

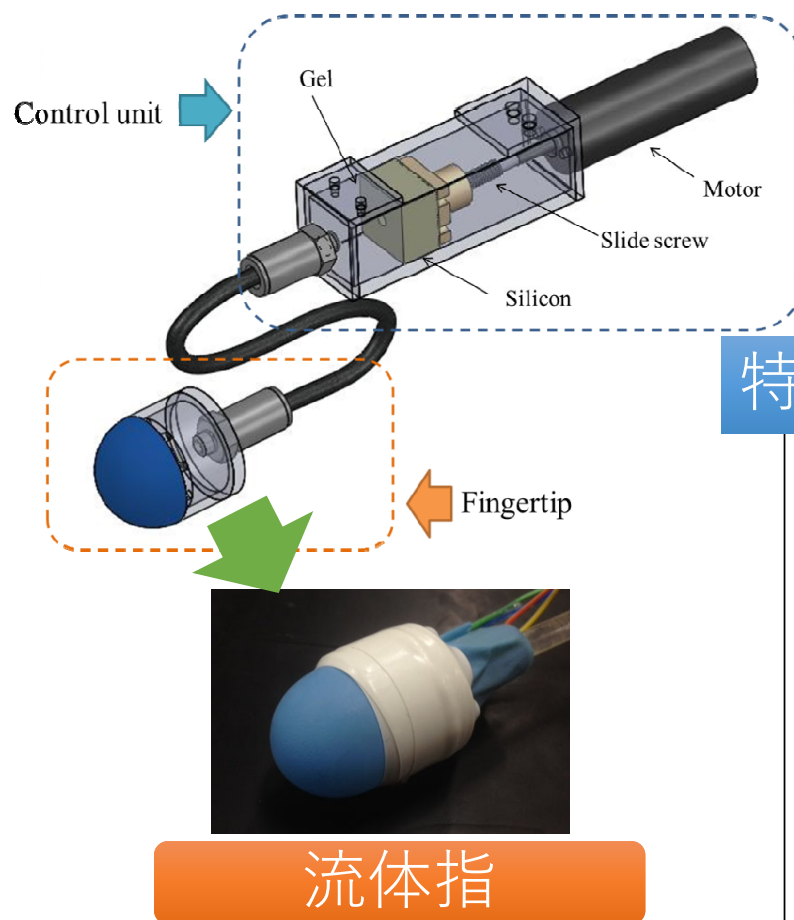
Contents

- 背景
- **壊れやすい物体を流体指で掴む！**
- 濡れていても乾いていても高い摩擦を与えるロボットハンド
- 濡れていても乾いていても表面摩擦を変えられるロボットハンド
- 食産業におけるAI適用の可能性

豆腐破壊を予測できる流体指

[IROS2013, IROS2015, CASE2016]

渡辺哲陽, 丸山量志, 内田真裕,
対象物保持法、および、当接機構,
特願2013-151087, 2013



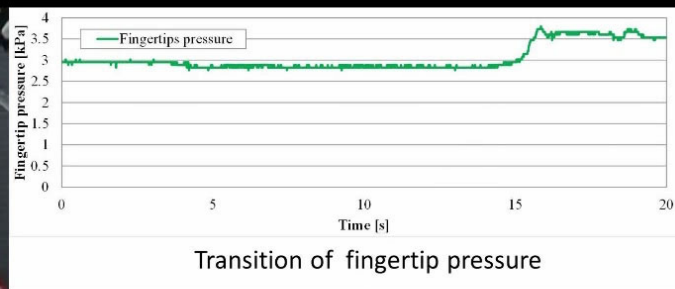
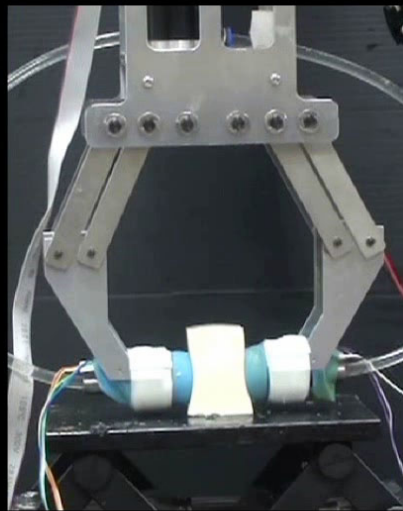
特徴

- 安全な接触
- 接触時の衝撃：小
- 対象物形状への適応
- 高摩擦
- ロバストネス
- 均一な圧力分布
- 局所 passive compliance

壊れやすい物体の把持

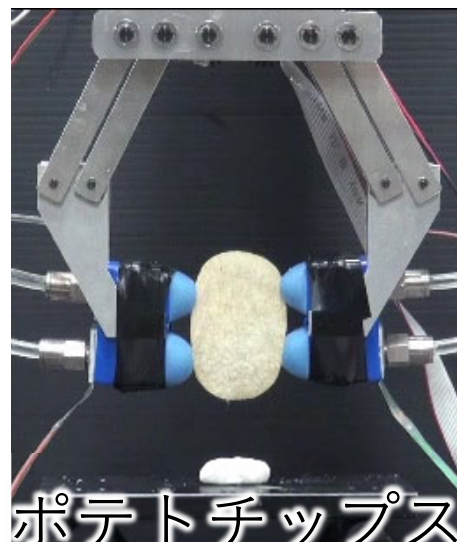
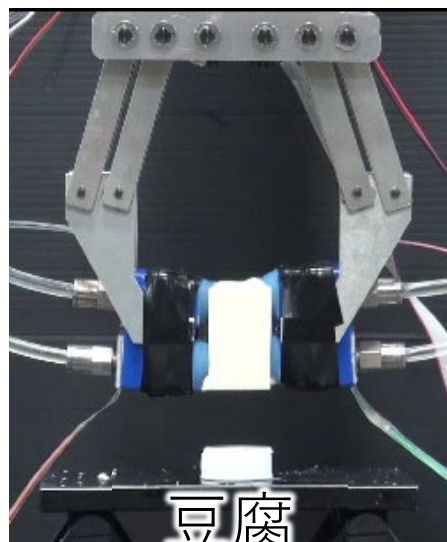
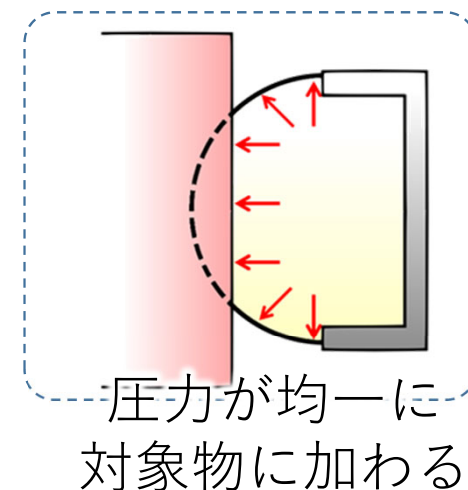
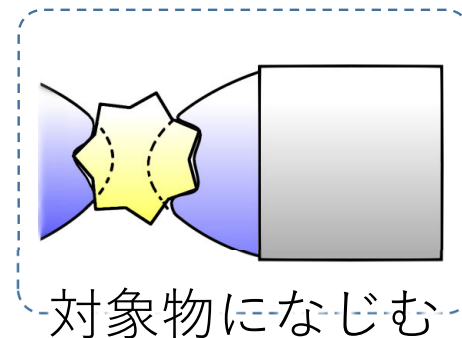
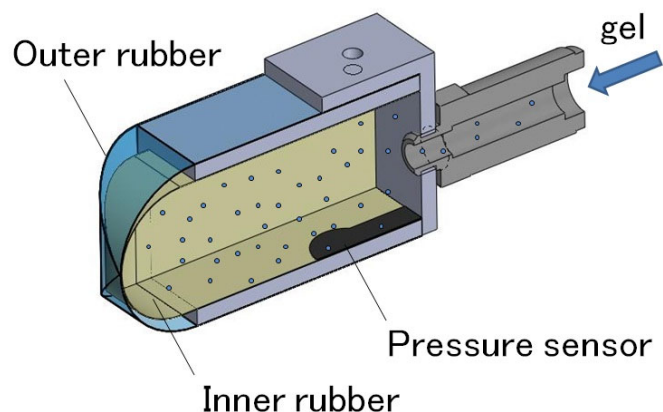
対象物：絹ごし豆腐

- (1)初期破壊を検知するまでグリップを閉じる.
- (2)初期破壊を検知した瞬間にグリップを停止させ、圧力を維持する.
- (3)接触圧力が維持されるよう制御を行いながら自動ステージにより持ち上げる.



流体指を用いた物体把持手法の提案

先行研究：流体指



物体を壊さず把持したい

↓
押し込み量どうする？

流体指を用いた物体把持手法の提案

光弾性法を用いた破壊実験

物体の**応力状態**がわかる

光源

偏光レンズ

流体指

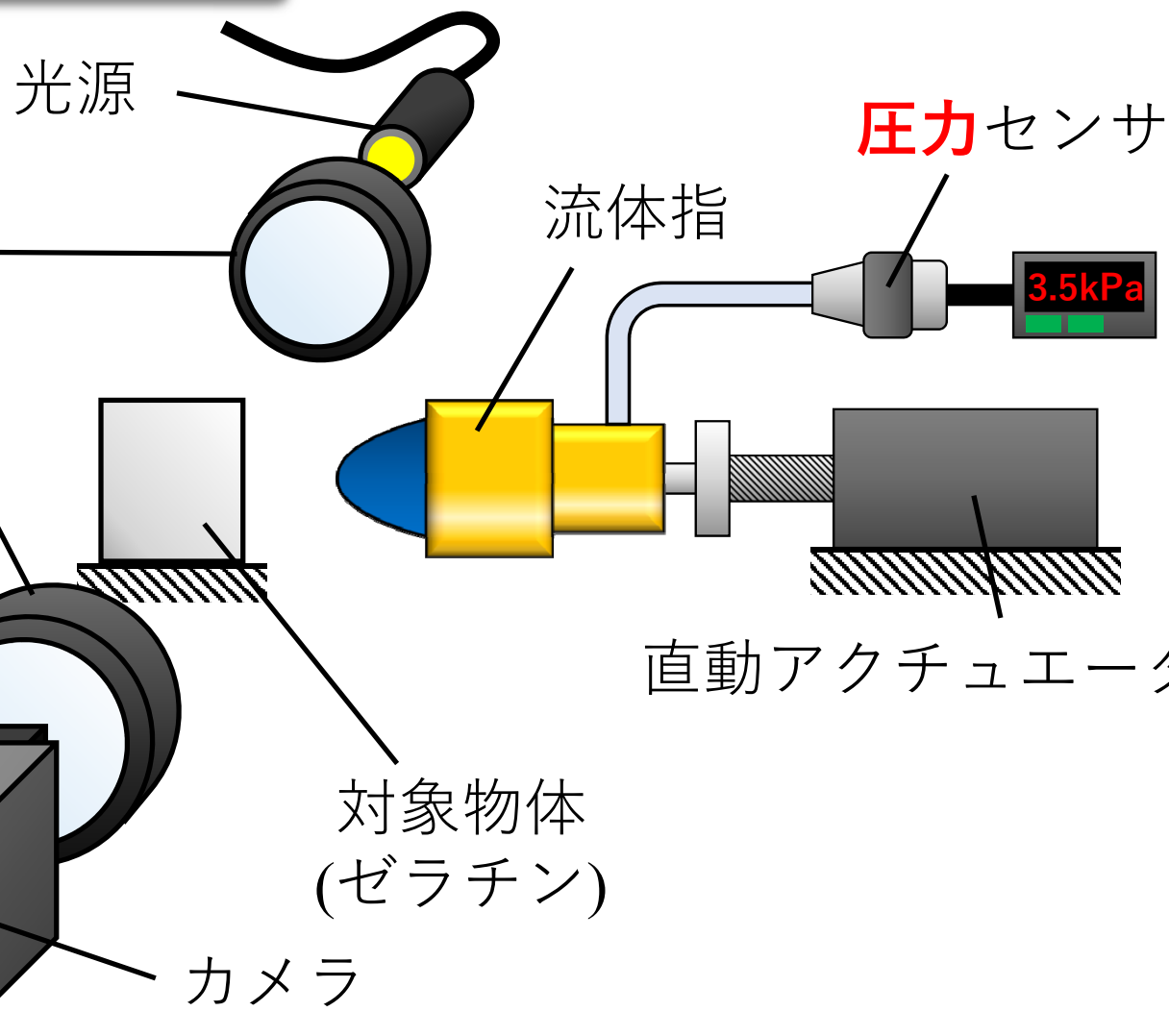
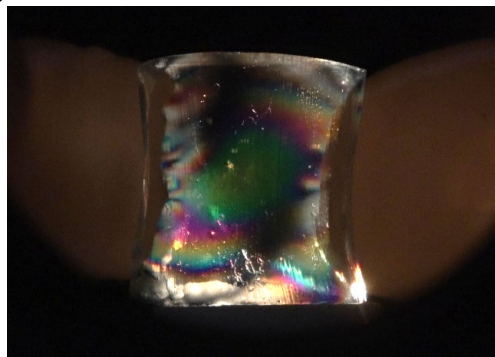
圧力 センサ

3.5kPa

直動アクチュエータ

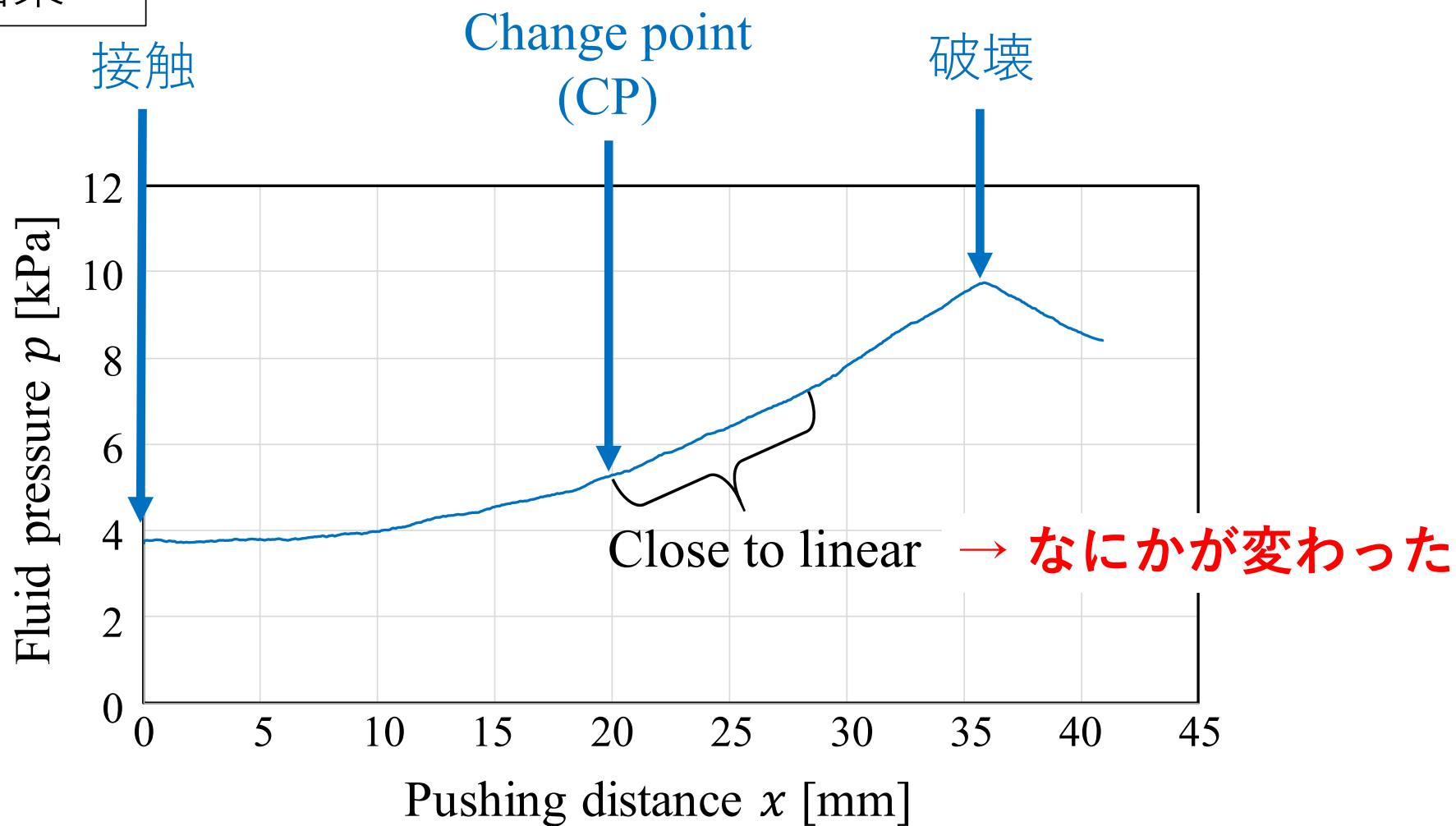
対象物体
(ゼラチン)

カメラ



流体指を用いた物体把持手法の提案

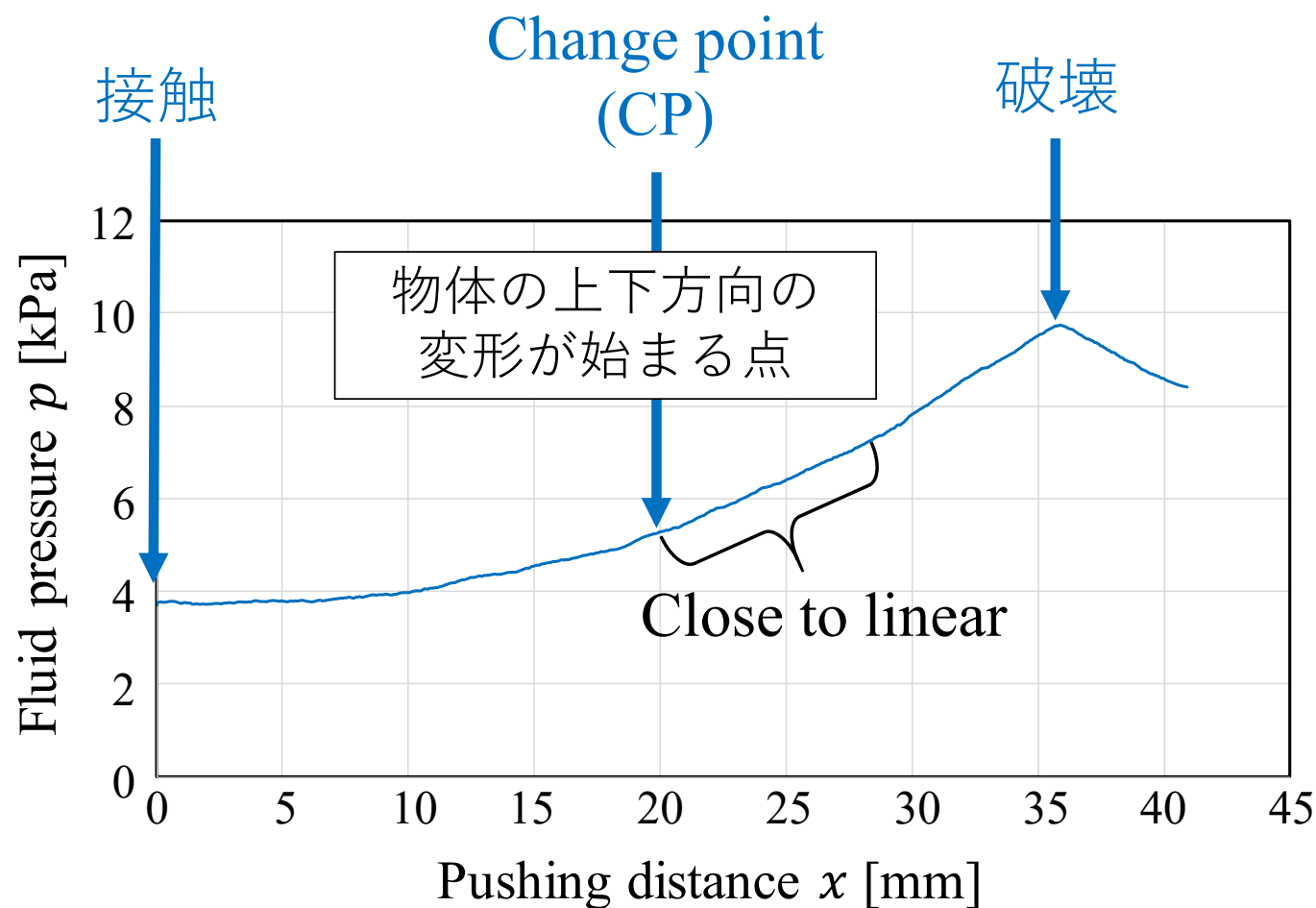
実験結果



流体指を用いた物体把持手法の提案

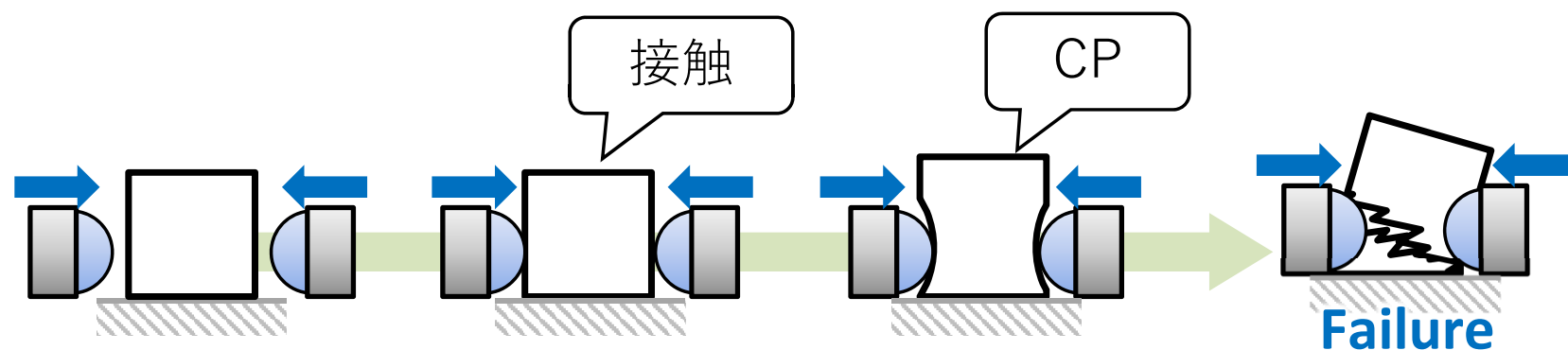
実験結果

なにが起こった？



応力状態に注目

流体指を用いた物体把持手法の提案



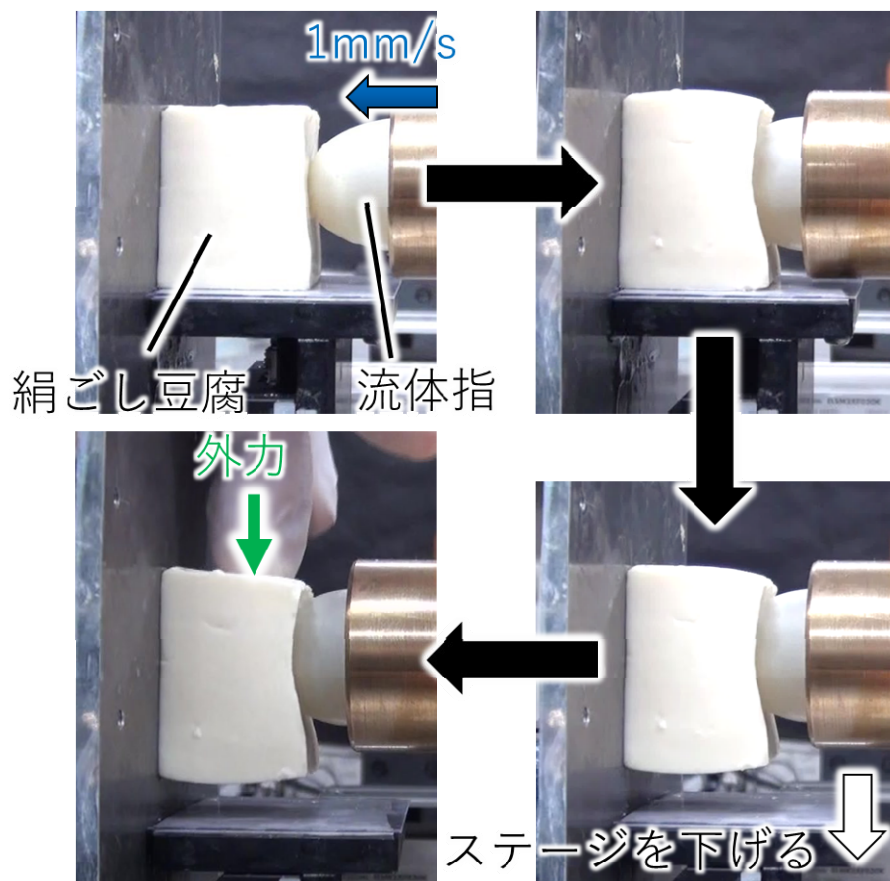
破壊までのモードとして、必ずCPが現れる



CPを検出したタイミングで把持する方法を提案する

流体指を用いた物体把持手法の提案

CPの前後で把持するとどうなる？



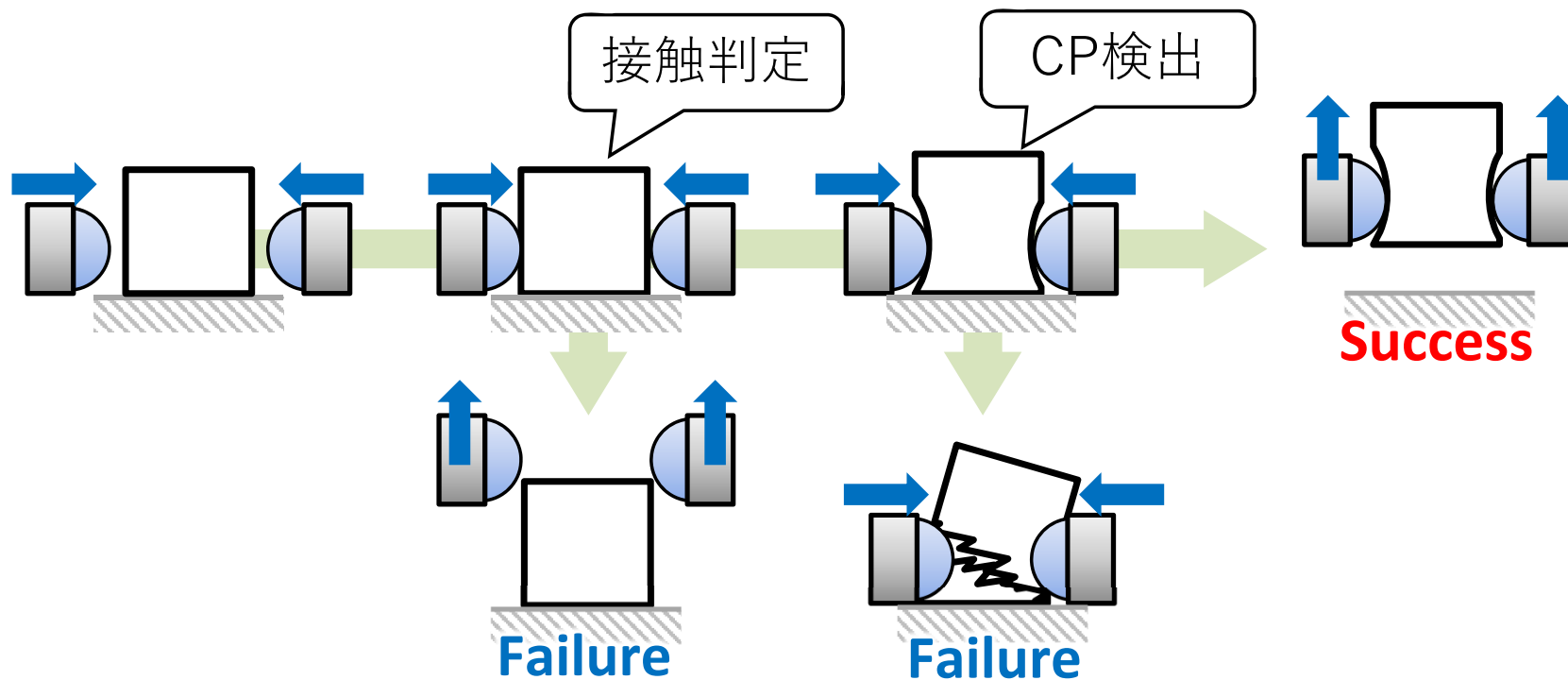
CPとの差分 [mm]	把持成功率	安定性
-8.6	0/3	-
-6.6	0/3	-
-4.6	3/3	無
-2.6	3/3	無
+0.6	3/3	有
+2.6	3/3	有

CASE 2016, "New condition for tofu stable grasping with fluid fingertips",
Toshihiro Nishimura, Yoshinori Fujihira, Ryota Adachi and Tetsuyou Watanabe

流体指を用いた物体把持手法の提案

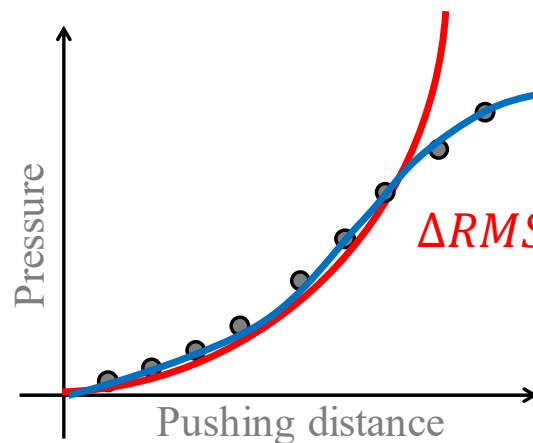
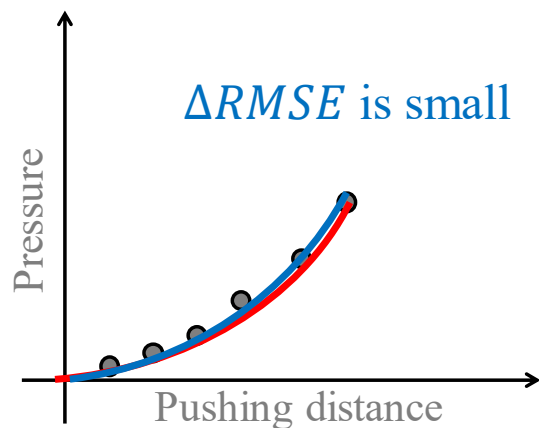
提案手法の特徴

- オンラインで接触判定&CP検出
- 流体圧のモニタリングのみで接触判定&CP検出
- 接触判定&CP検出に用いる閾値は対象物体に依らず一定
- 対象物の剛性等の事前情報が不要



流体指を用いた曲線適合度の検出

— 2次近似関数 — 3次近似関数



の平均と標準偏差
(取得)

CP検出

$$\Delta RMSE(x) > \text{閾値}$$

2次関数と3次関数で近似したときの誤差の差

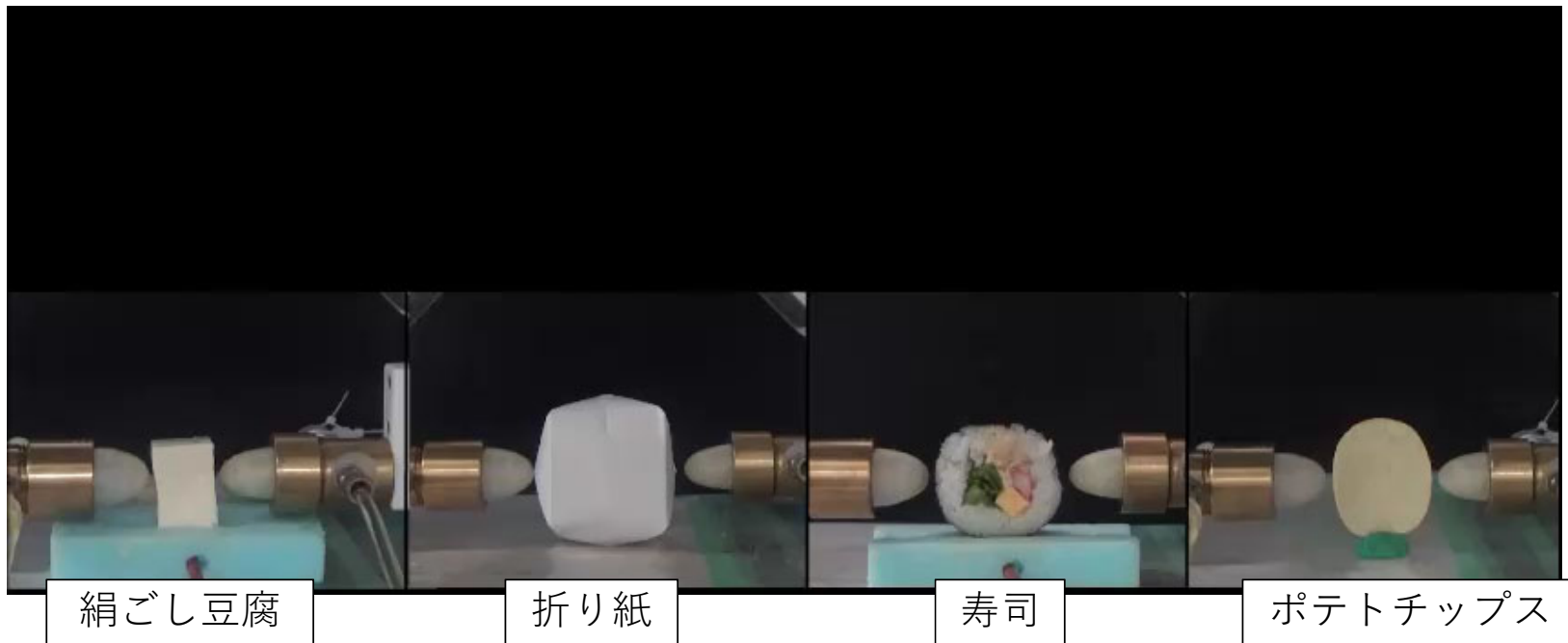
$$\Delta RMSE(x) = RMSE_2 - RMSE_3$$

圧力 p

押込み量 x

流体指を用いた柔軟物体非破壊把持手法の提案

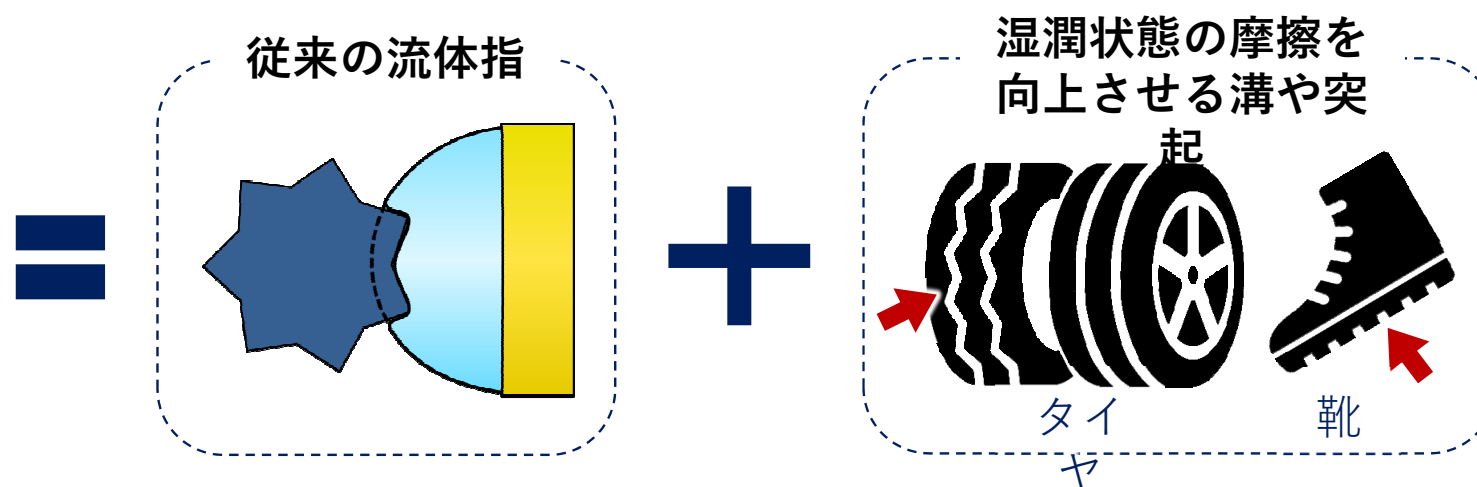
西村 斉寛, 鈴木 陽介, 辻 徳生, 渡辺 哲陽 (金沢大学)



Contents

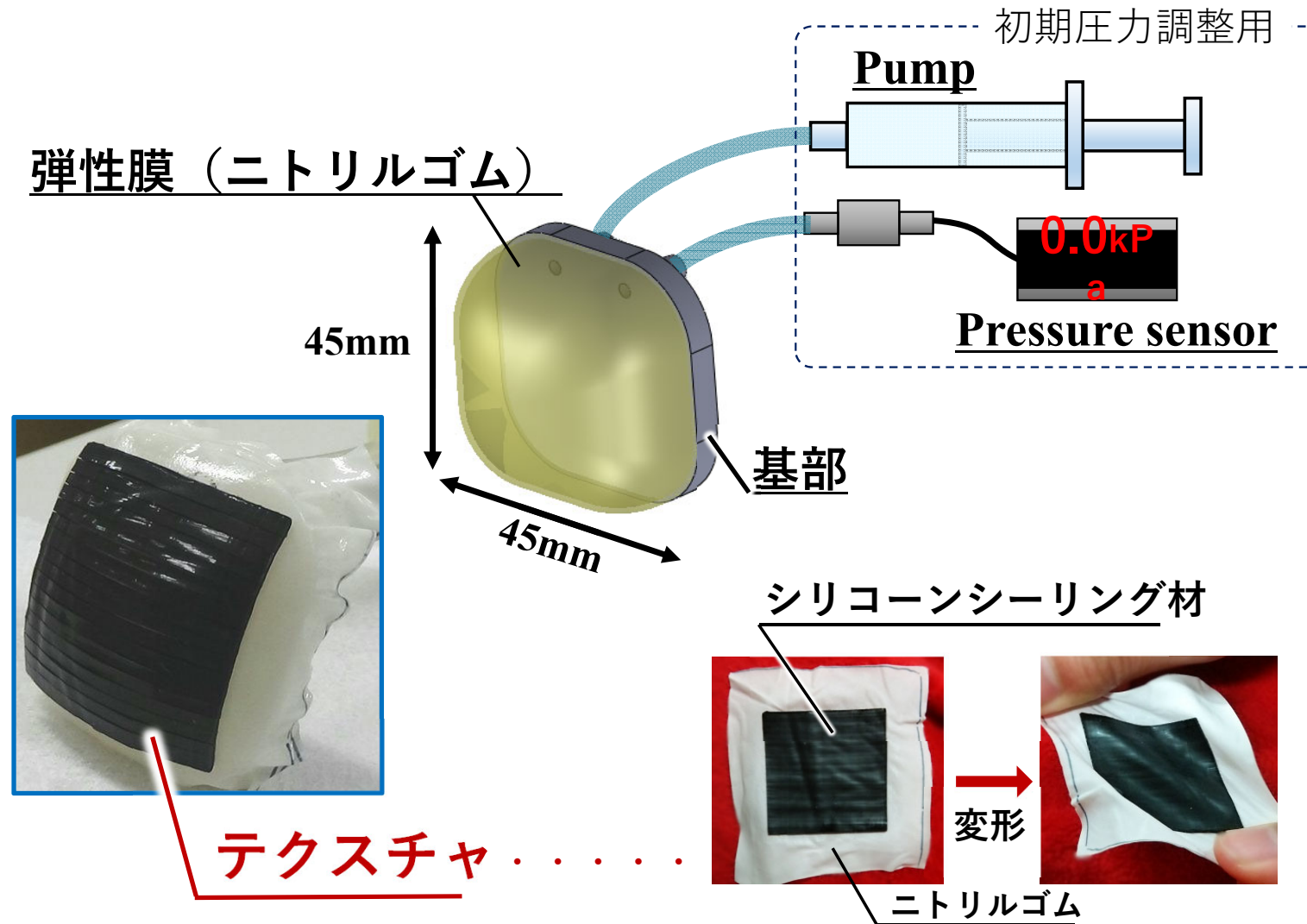
- 背景
- 壊れやすい物体を流体指で掴む！
- **濡れていても乾いていても高い摩擦を与えるロボット
ハンド**
- 濡れていても乾いていても表面摩擦を変えられるロ
ボットハンド
- 食産業におけるAI適用の可能性

物体の乾潤にかかわらず高摩擦を与えるテクスチャの開発



流体指表面に凹凸（**テクスチャ**）を設け、乾潤双方で安定した把持耐力を得られるテクスチャ形状を推定

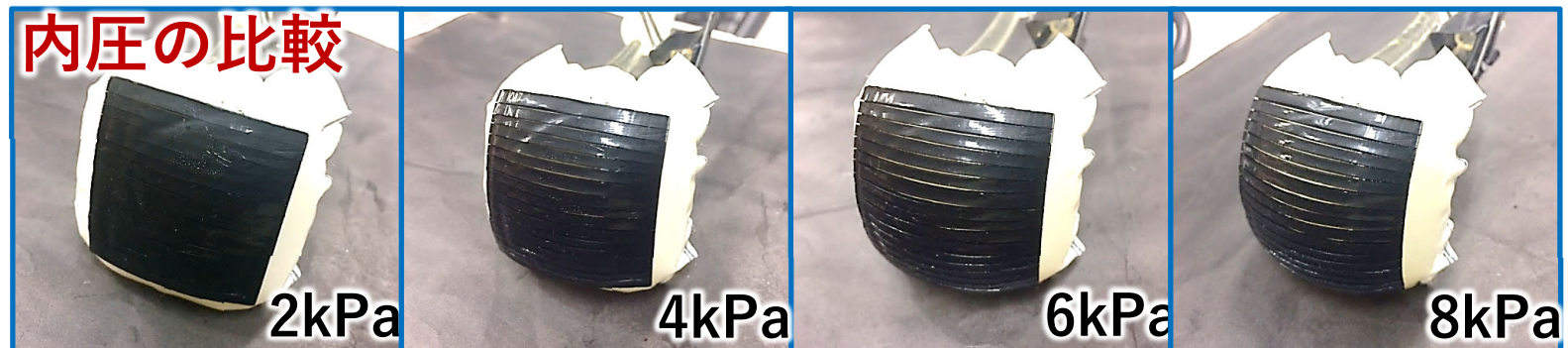
指の構造と実験方法



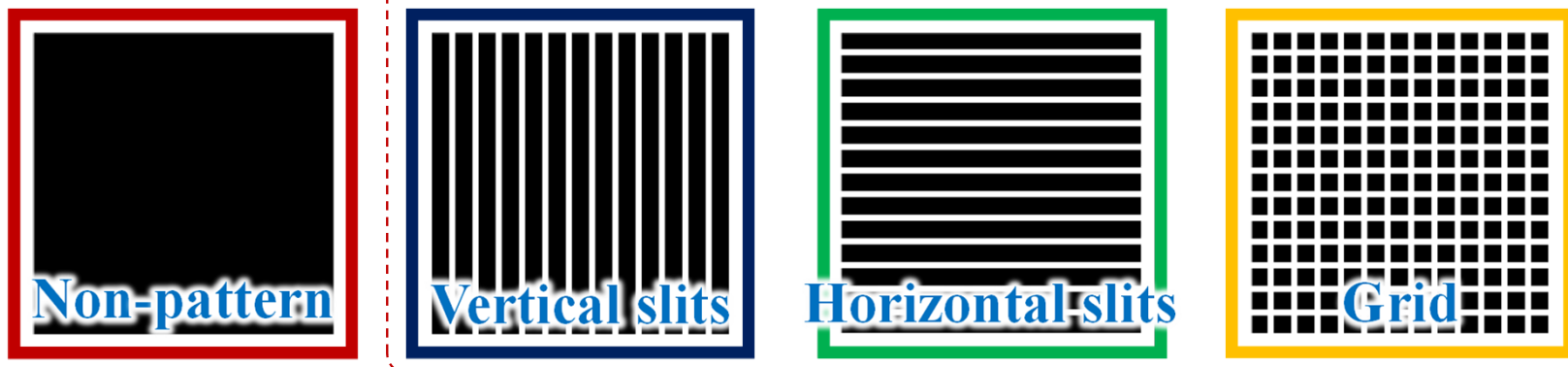
Slit pattern の検証

Slit pattern

⇒ 平面を成型し、カッターで切り込みを入れる



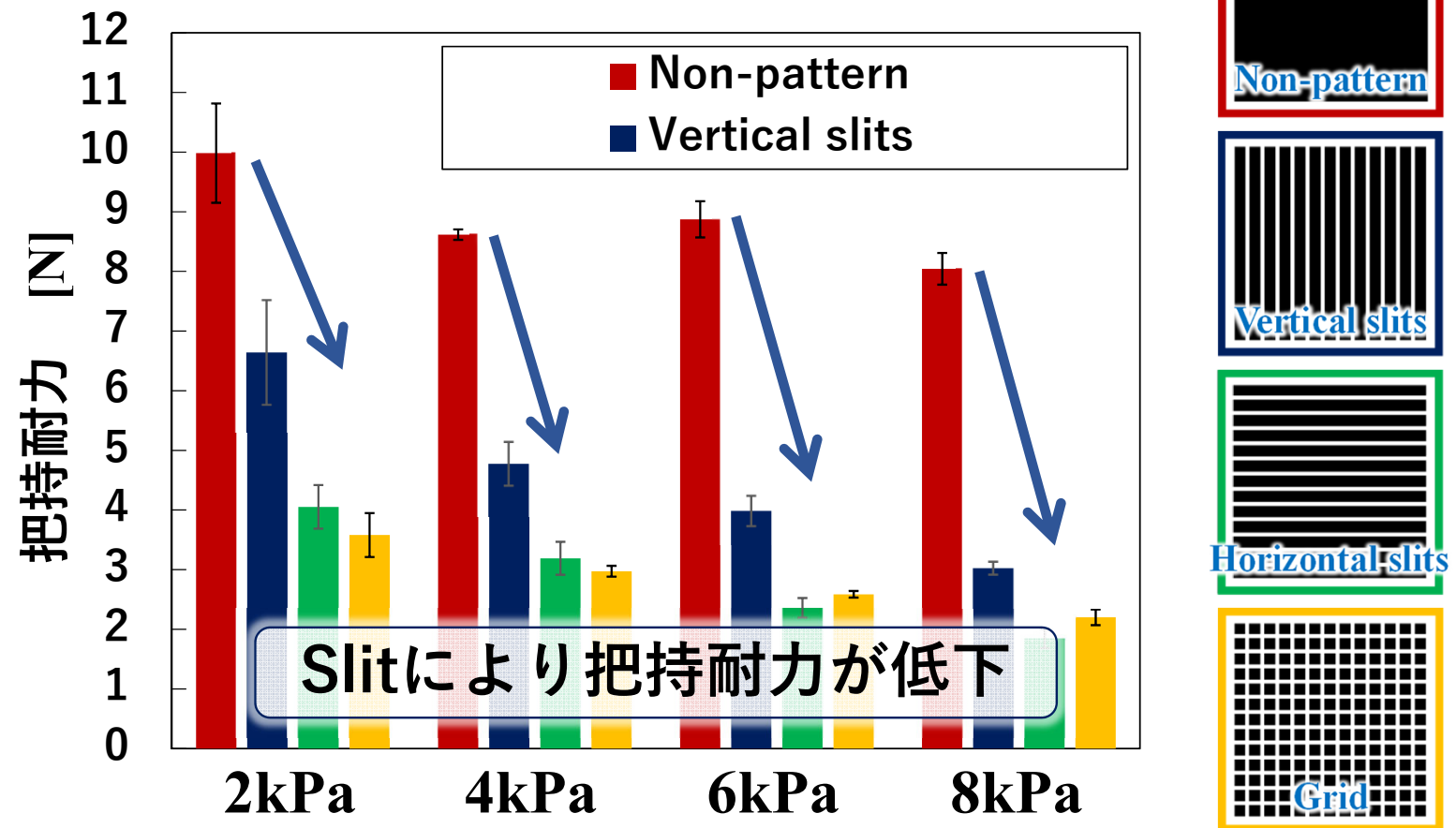
間隔 : 2mm / 深さ : 1mm



IV. Slit pattern の検証

- 実験結果

Dry

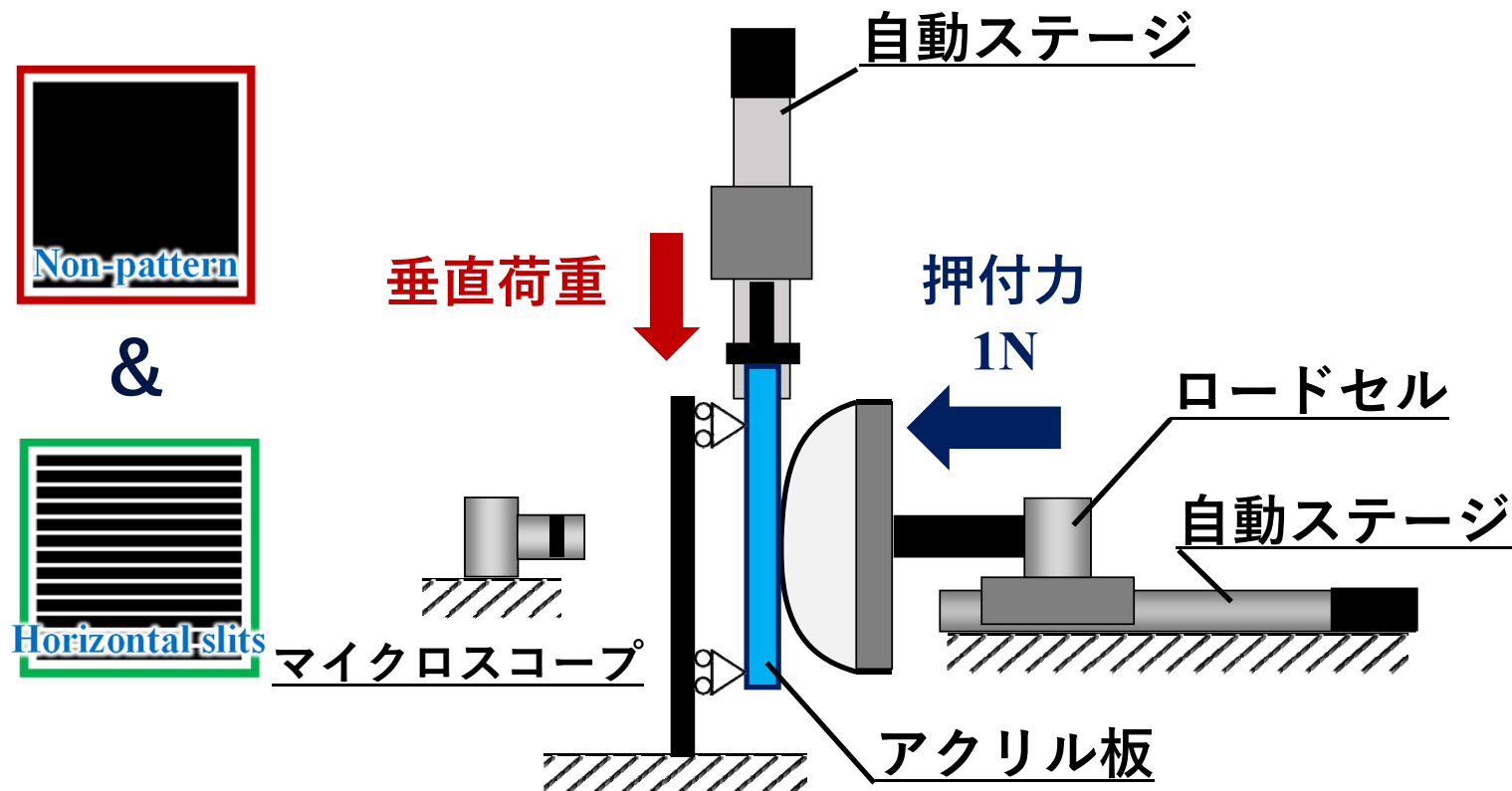


Slit pattern の検証

- 接触面の観察

把持耐力低下の要因：テクスチャの変形？

⇒ 接触面を観察してみる



IV. Slit pattern の検証

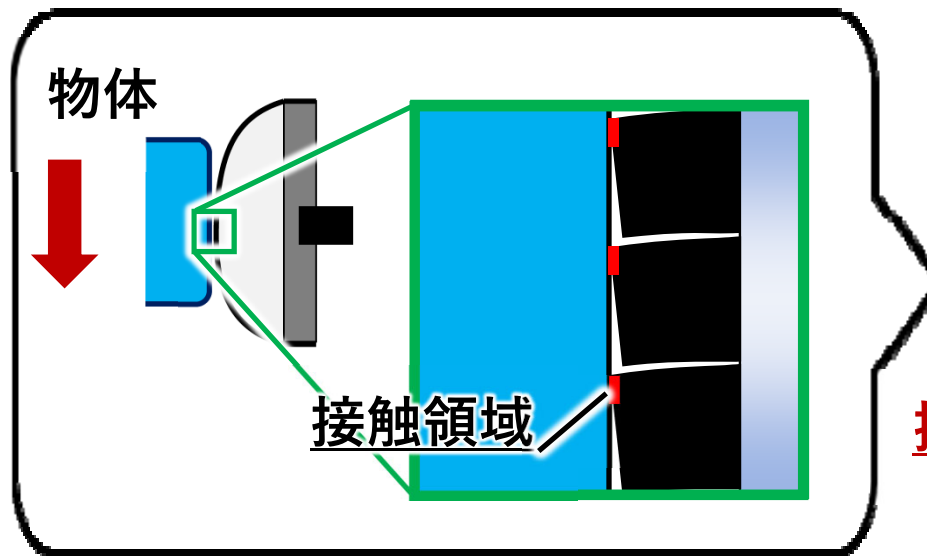
- 接触面の観察

把持耐力低下の要因：テクスチャの変形？

⇒ 接触面を観察してみる

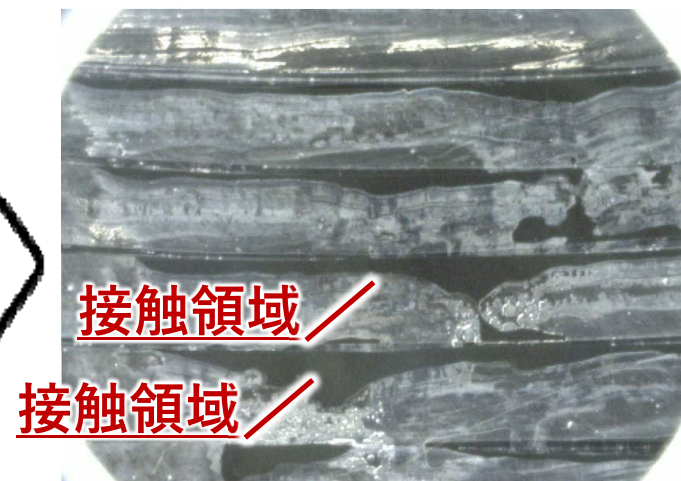
Non-pattern

：接触面積の変化なし



Horizontal slit

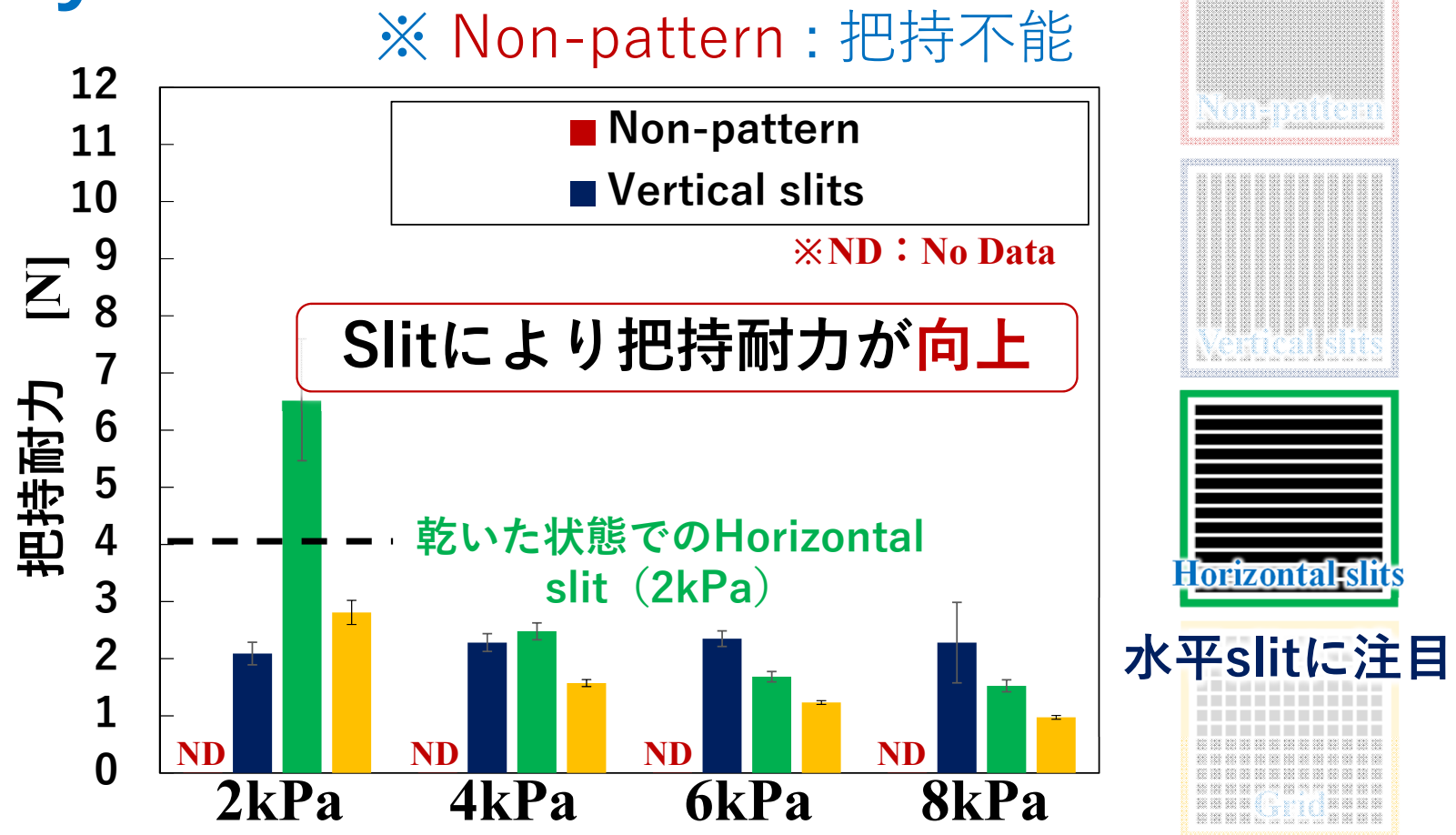
：凸部の下部が剥離



Slit pattern の検証

- 実験結果

Oily



IV. Slit pattern の検証

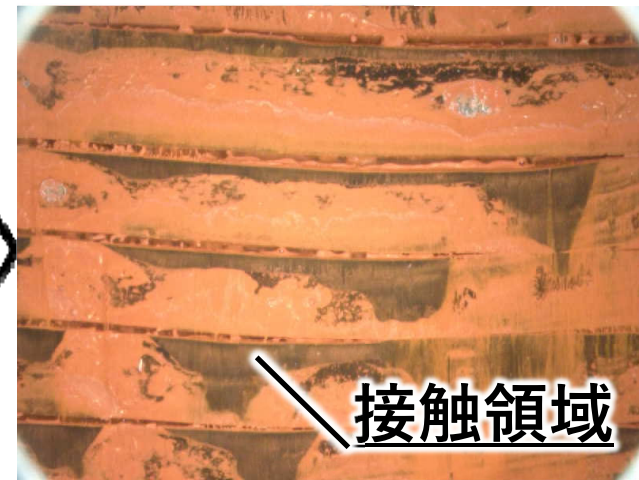
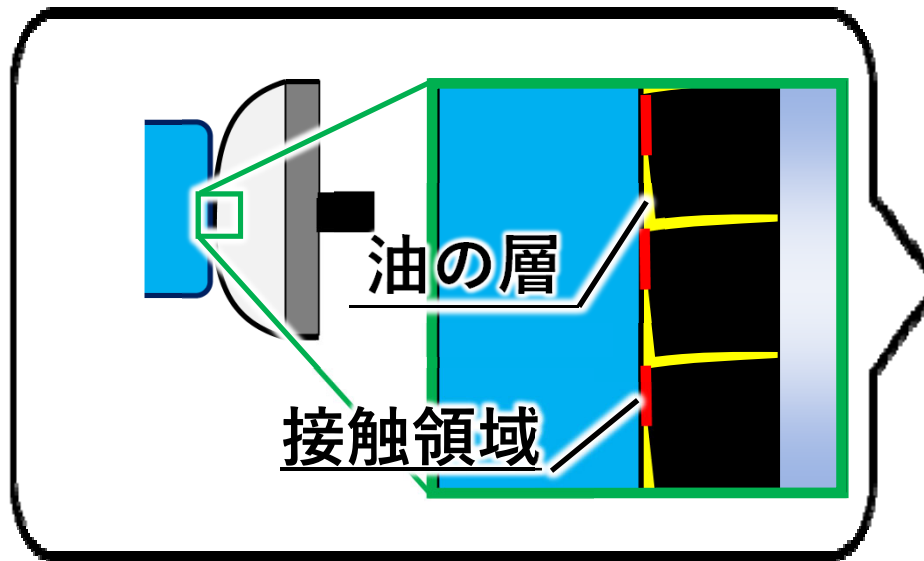
- 接触面の観察

Non-pattern

：油の層により潤滑

Horizontal slit

：凸部の上部が接触



湿潤状態における把持耐力について

EHL理論（弾性流体潤滑理論）を用いて考察

Hybrid texture



DryでGood

と



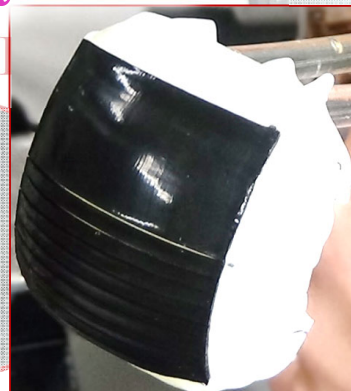
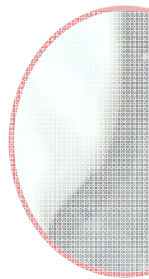
OilyでGood

をどのように組み合わせる？

Horizontal slit (Oily condition) 荷重印加後

⇒ 摩 Hybrid

Compress =



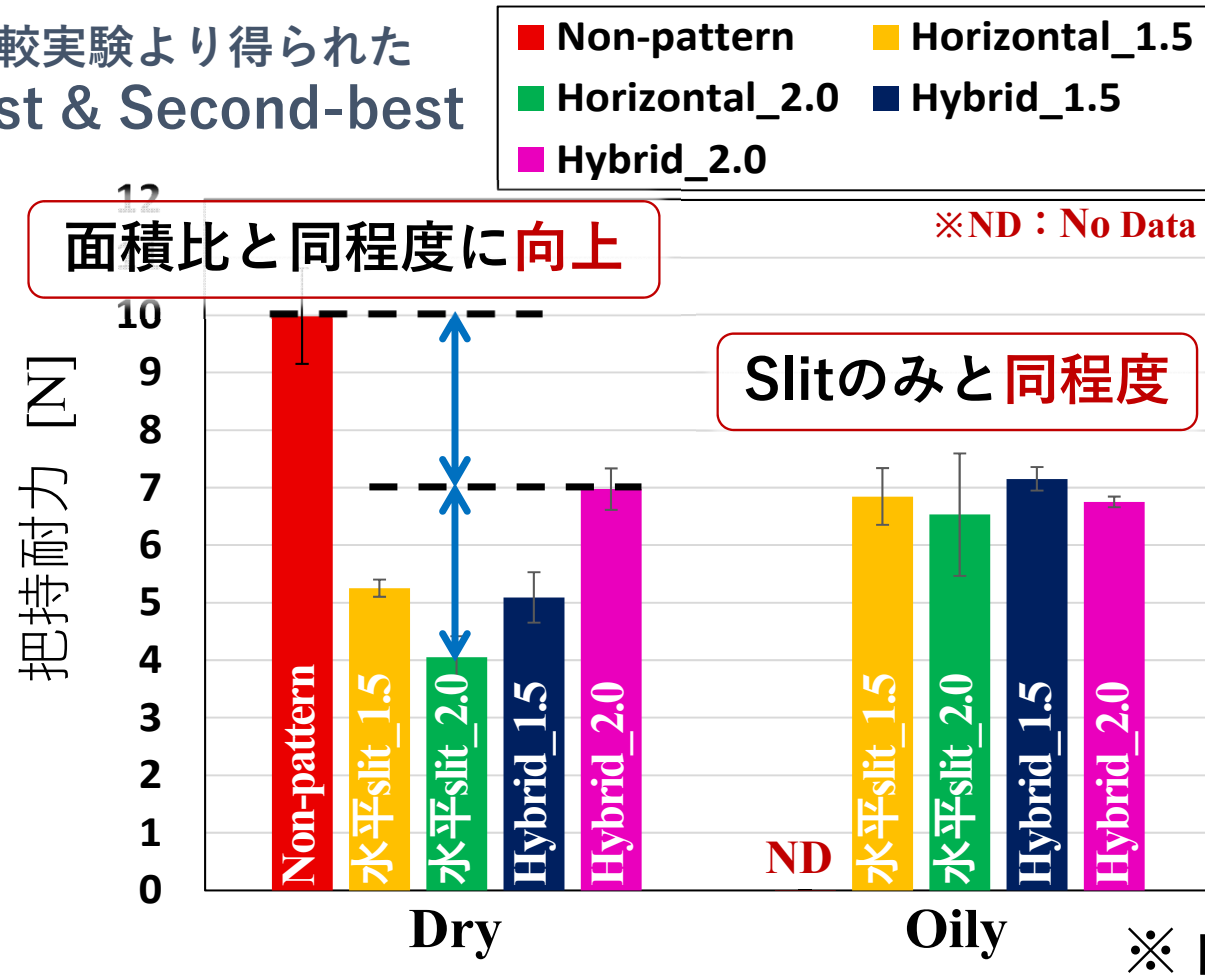
Expand = Rが拡大
⇒ 摩擦が低下

※ 等価半径Rが小 ⇒ 摩擦が大

Hybrid texture

Slit間隔 1.5mm & 2.0mm で水平のslitとHybridを比較

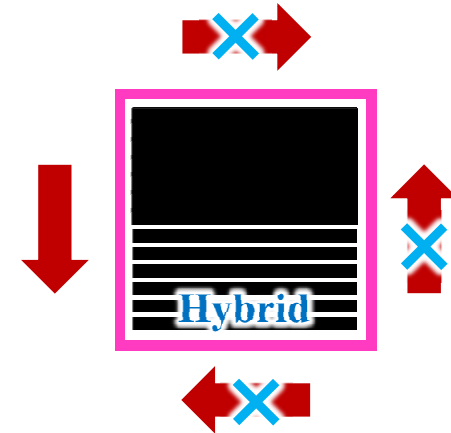
間隔の比較実験より得られた
Best & Second-best



Hybrid texture - Concentric hybrid

- Hybrid構造は乾潤双方に有効
- 対応可能な荷重は一方向に限定

⇒ 任意の方向に対応した構造が必要

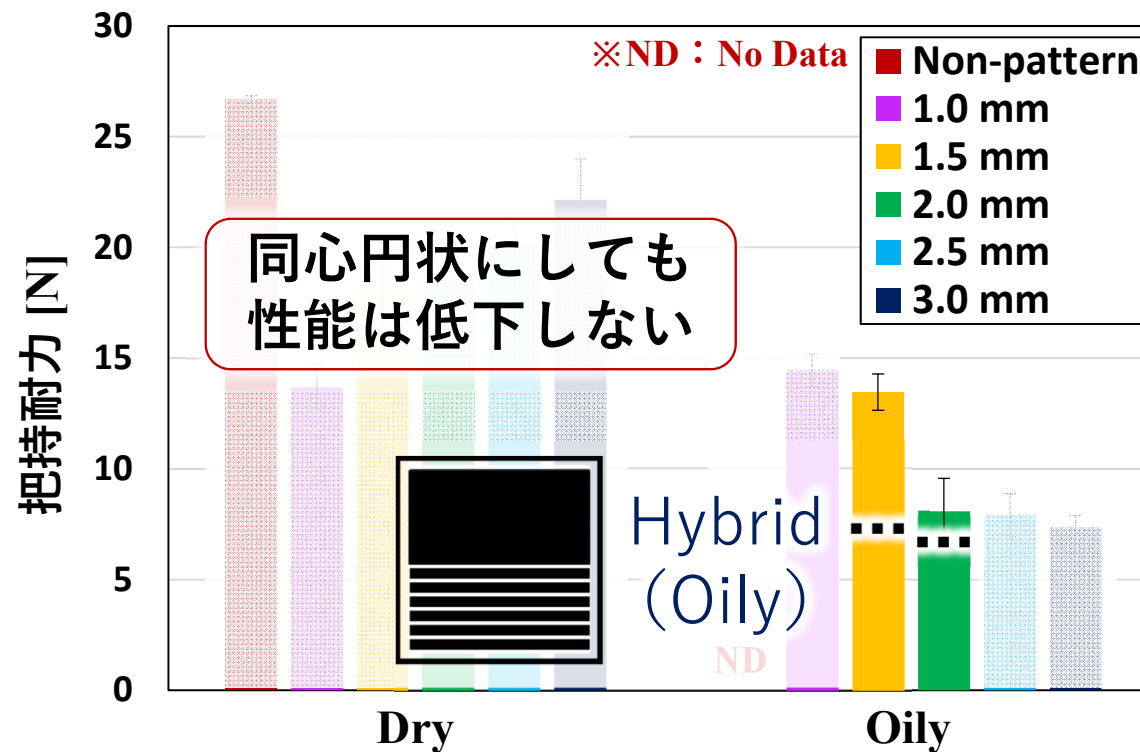


Concentric hybrid

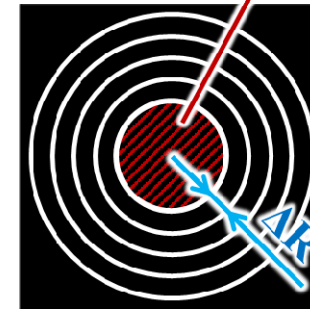


Hybrid texture - Concentric hybrid

ΔR : 1.0mm ~ 3.0mm で検証



Non-pattern (φ 15 mm)



⇒ 乾潤双方で、**任意方向**の安定把持が可能

Hybrid texture - Concentric hybrid

Grasping test

一般的な物体に対する有効性を確認

対象物



Wet(離水状態)



Dry / Oily



Dry / Oily

濡れた状態だと、従来の流体指では把持が困難

Hybrid texture - Concentric hybrid

Grasping test

※把持力 : 1N

Object	Size	Condition	1.0mm	1.5mm	2.0mm	2.5mm	3.0mm
絹ごし豆腐	35 ³ mm ³ 35g	Wet	4/4	4/4	3/4	3/4	1/4
ベアリング	Φ35mm 40g	Dry	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
		Oily	4/4	4/4	4/4	3/4	3/4
ココット	Φ52mm 43g	Dry	4/4	4/4	4/4	4/4	4/4
		Oily	4/4	4/4	4/4	4/4	3/4

- Dry . . . ΔRにかかわらず安定した把持が可能
- Wet / Oily . . . ΔRの増加に伴い成功率が低下
⇒ 実験の結果と同じ傾向
- ΔR=1.0mm, 1.5mm . . . 乾潤ともに安定

Contents

- 背景
- 壊れやすい物体を流体指で掴む！
- 濡れていても乾いていても高い摩擦を与えるロボットハンド
- **濡れていても乾いていても表面摩擦を変えられるロボットハンド**
- 食産業におけるAI適用の可能性

乾潤両状態で有効な,潤滑作用を用いた摩擦低減機構を有する柔軟指

Deformable Fingertip with Friction Reduction System
Based on Lubricating Effect for Smooth Operation
under Both Dry and Wet Conditions



K.Mizushima, Y.Suzuki, T.Tsuji, T.Watanabe
Kanazawa University, Japan

目次

- I.**  はじめに
- II.** 流体指の基本構造と潤滑機構
- III.** 潤滑機構の検証実験
- IV.** 接触表面の観察
- V.** 把持実験

I. はじめに

物体把持にはさまざまな形態がある...



表面に **柔らかさ** を持つロボットが注目される

- ・ 弾性変形により、**物体になじむ**
- ・ 硬い指に比べ**滑りにくい** ⇒ 過剰な把持力をかけない
⇒ 柔軟物、脆弱物の把持が可能

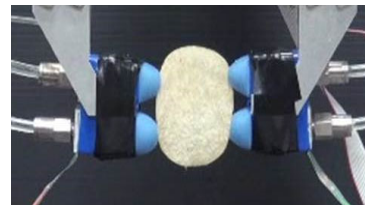
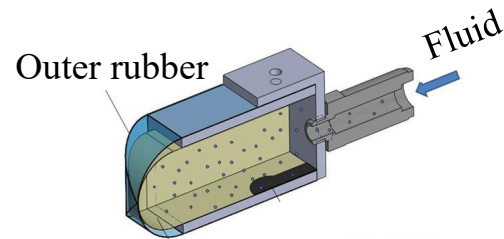
I. はじめに

柔軟な表面を持つロボット

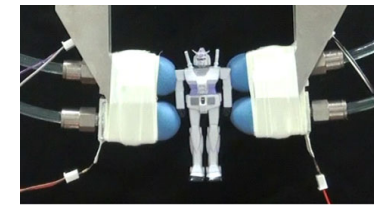
- ・ 弾性変形により、**物体になじむ**
- ・ 硬い指に比べ**滑りにくい**

流体指

⇒ より物体になじみやすく、脆弱物、複雑形状の把持が得意



▲ ポテトチップス



▲ フィギュア

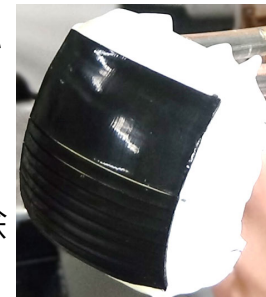
流体指 + 表面テクスチャ

物体が濡れていると、すべり落としやすい
把持力を上げると脆弱物は破壊してしまう

...

⇒ テクスチャにより濡れの影響を排除

乾潤両状態で安定把持が可能！



▲ 流体指 + テクスチャ



▲ 絹ごし豆腐

I. はじめに

柔軟な表面を持つロボット

⇒ 指表面の摩擦が常に大きく，滑りにくい

II

常にゴム手袋をしているような状態



・ 狭いところに手が入れない

・ なてて、なぞる ができない

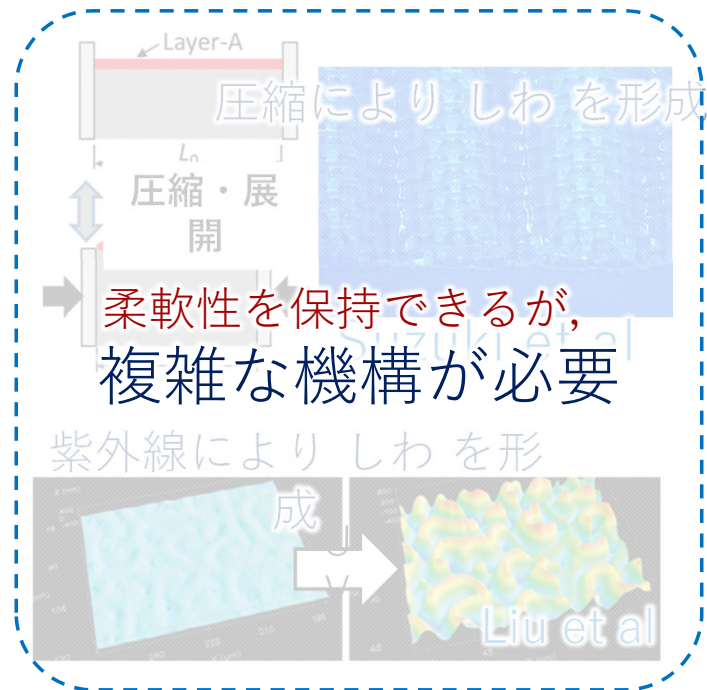
・ 動くたびに、どこか引っかかる ... キーボード打ちにくい...

非常に不便

⇒ 滑りにくさを換えられるロボットハンドも必要

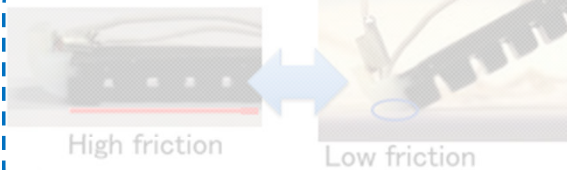
I. はじめに

摩擦可変な
柔軟表面・ロボット



柔軟性を損なわず、滑らせるには？

交互に接触



2種の素材を配置する
スペースが必要

Vikas et al



硬い表面から
柔らかい表面が突出

柔軟性がなく
物体になじまない

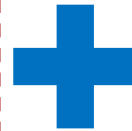
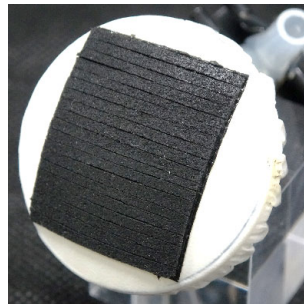
Becker et al

I. はじめに

目的

柔軟表面の利点を損なわず，**乾潤両状態**で接触表面の摩擦を**意図的に制御**できるロボットハンドの開発

乾潤両状態で**高摩擦**を得る
テクスチャを備えた流体指



潤滑作用を利用した
摩擦低

減機構



⇒ 複雑な機構を追加せずに，柔軟性を失わず摩擦のコントロールが可能

目次

I. はじめに

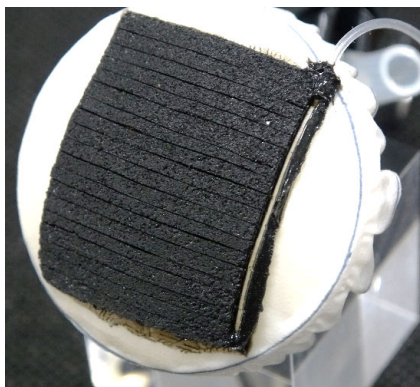
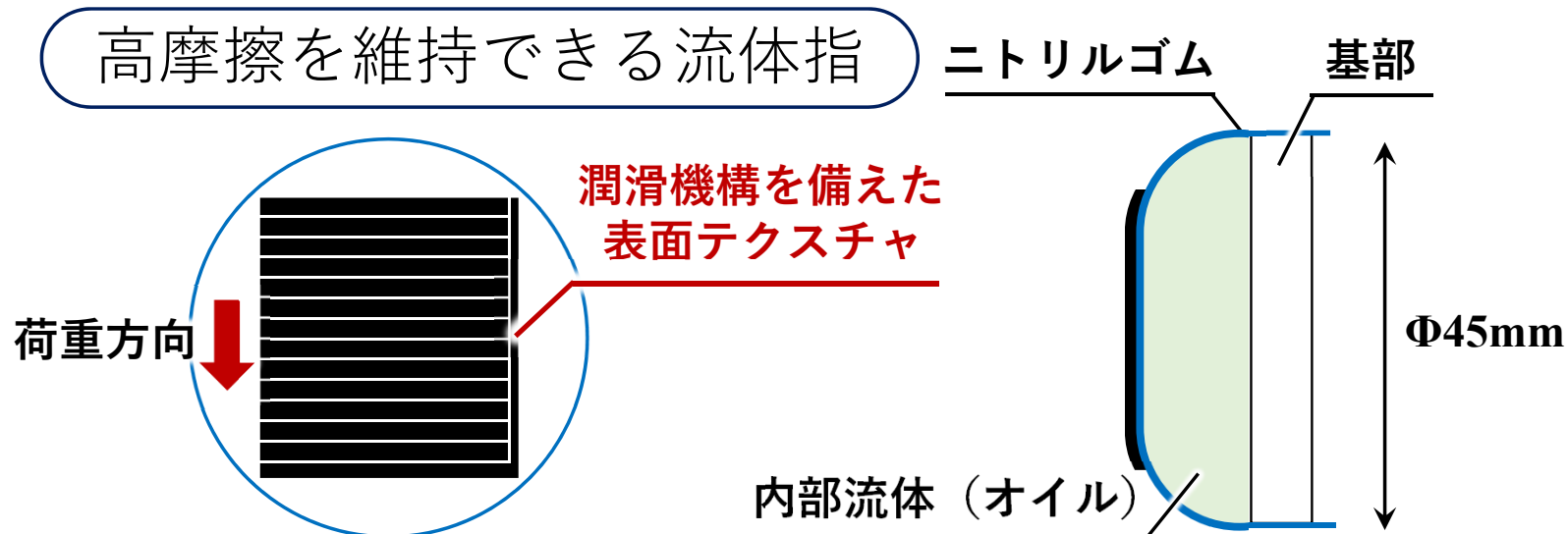
II. 流体指の基本構造と潤滑機構

III. 潤滑機構の検証実験

IV. 接触表面の観察

V. 把持実験

II. 基本構造



荷重に対し垂直な Slit からなる表面テクスチャ[※]

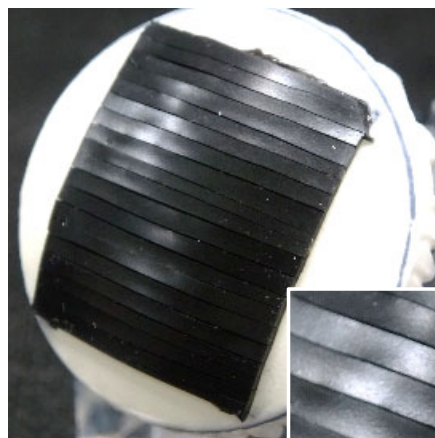
- ・ 乾燥状態において、十分な摩擦を確保
- ・ 湿潤状態において、
乾燥状態と同様の高摩擦を発揮

※ K. Mizushima, T. Nishimura, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, "Surface Texture of Deformable Robotic Fingertips for a Stable Grasp Under Both Dry and Wet Conditions," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 4, pp. 2048–2055, 2017.

II. 基本構造

高摩擦を維持できる流体指

凹凸のない滑らかな表面 ⇒ 物体を手放す動作も考慮した粗い表面



Smooth surface



Rough surface

- 物体に密着し、大きな外力に耐える
- ✕ ゴミが付着しやすい
- ✕ 物体に張りつき、うまく手放せない

II. 基本構造

摩擦低減用潤滑機構

液体 による潤滑 を利用し摩擦を低減

- ⇒ 複雑な機構やスペースが不要
- ⇒ 柔軟性を損なわずに摩擦の低減が可能

→ エタノール

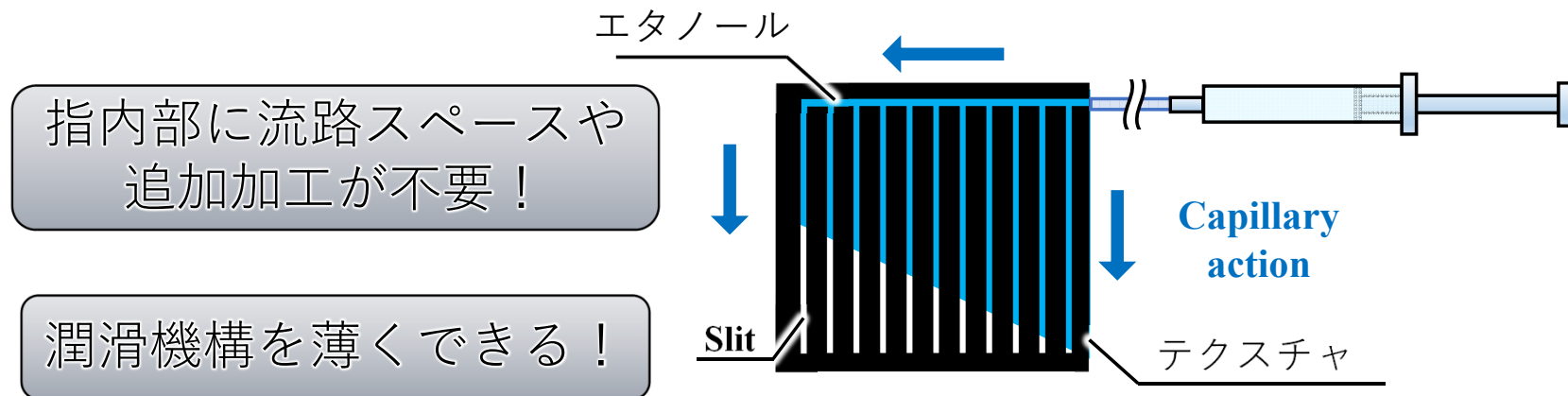
- ・ 水潤滑に比べゴム材料の静・動摩擦係数が小さい
- ・ 衛生的
- ・ 人体への害が少ない
- ・ 速乾性があり，高摩擦状態への復帰が早い

II. 基本構造

摩擦低減用潤滑機構

エタノール

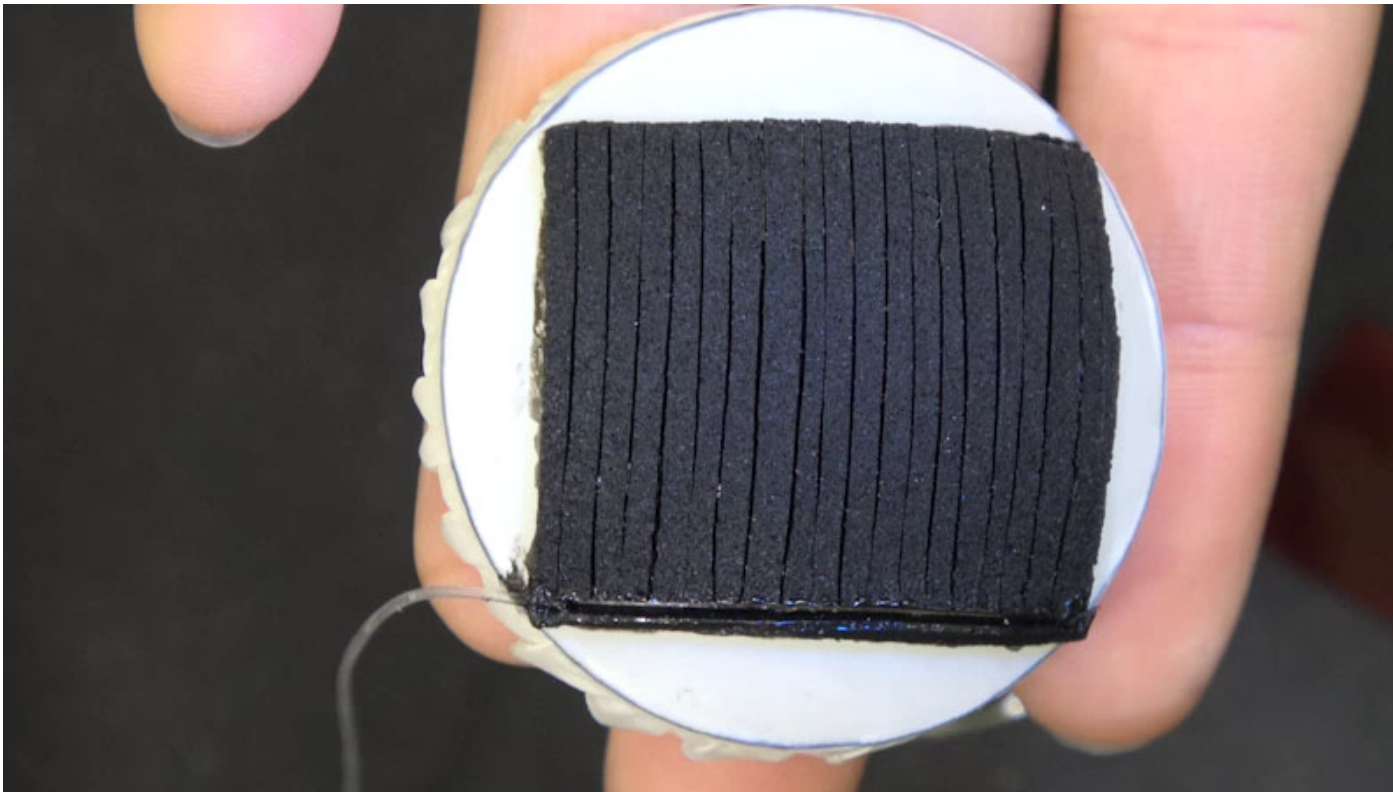
- 水潤滑に比べゴム材料の静・動摩擦係数が小さい
 - 衛生的
 - 人体への害が少ない
 - 速乾性があり、高摩擦状態への復帰が早い
- 指表面全体にエタノールを如何に行き渡らせるか？
⇒ 毛細管現象 を利用. Slit にエタノールを流す.
表面張力が小さく、(水の1/3)毛細管現象が起こりやすい



II. 基本構造

潤滑機構

毛細管現象によりエタノールを slit に充填
物体が触れると 接触面に 滲出し，潤滑効果を発揮



目次

I. はじめに

II. 流体指の基本構造と潤滑機構

III. 潤滑機構の検証実験

実験I: 異種素材に対する効果の検証

実験II: 異なる濡れ状態に対する効果の検証

IV. 接触表面の観察

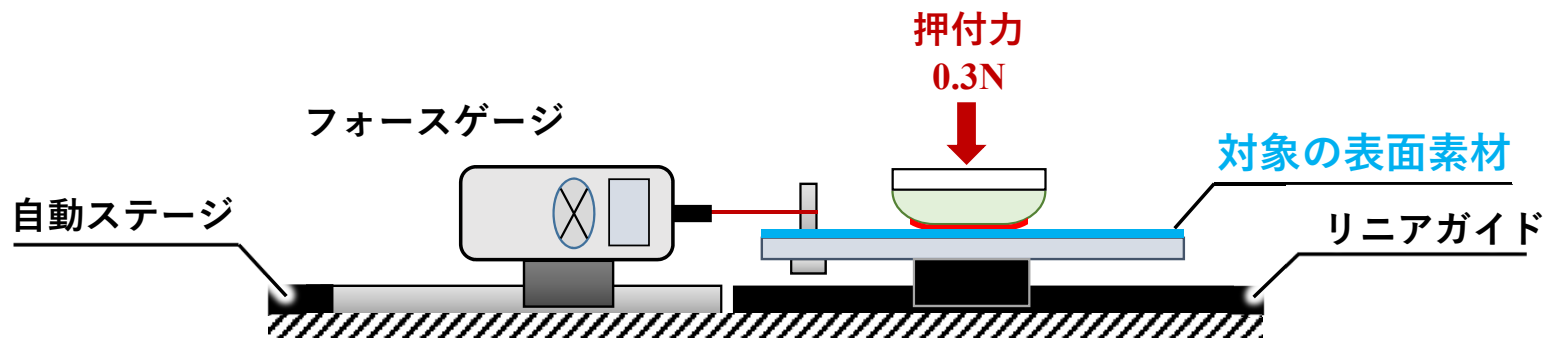
V. 把持実験

III. 潤滑機構の検証

実験方法

対象素材を貼ったテーブルを牽引し，牽引力を記録．

※ 試行回数：4回



$$\frac{\text{滑り出した瞬間の牽引力}}{\text{押付力 } 0.3\text{N}} = \text{等価最大静止摩擦係数 EMSFC}$$

※ EMSFC : The equivalent maximum static frictional coefficient

III. 潤滑機構の検証

実験条件

		潤滑剤の有無		
		なし	接触前に添加	接触後に添加
対象表面の 状態	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

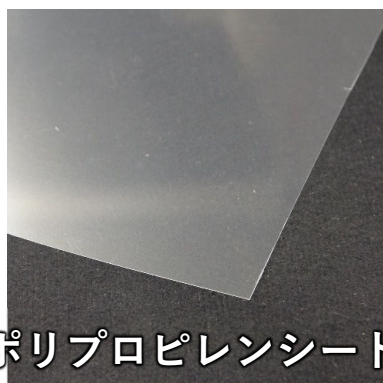
検証すべき項目

- ・ 表面構造による高摩擦の維持
- ・ 潤滑機構による摩擦の低減効果
- ・ 潤滑剤添加のタイミングの影響 (接触前後)

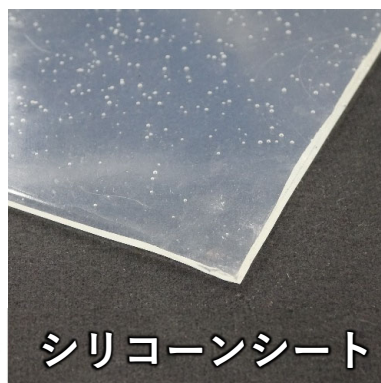
III. 潤滑機構の検証

実験I

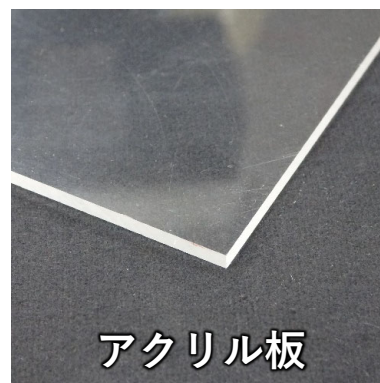
異種素材に対する
テクスチャ及び潤滑機構の有効性を検証



ポリプロピレンシート



シリコンシート



アクリル板



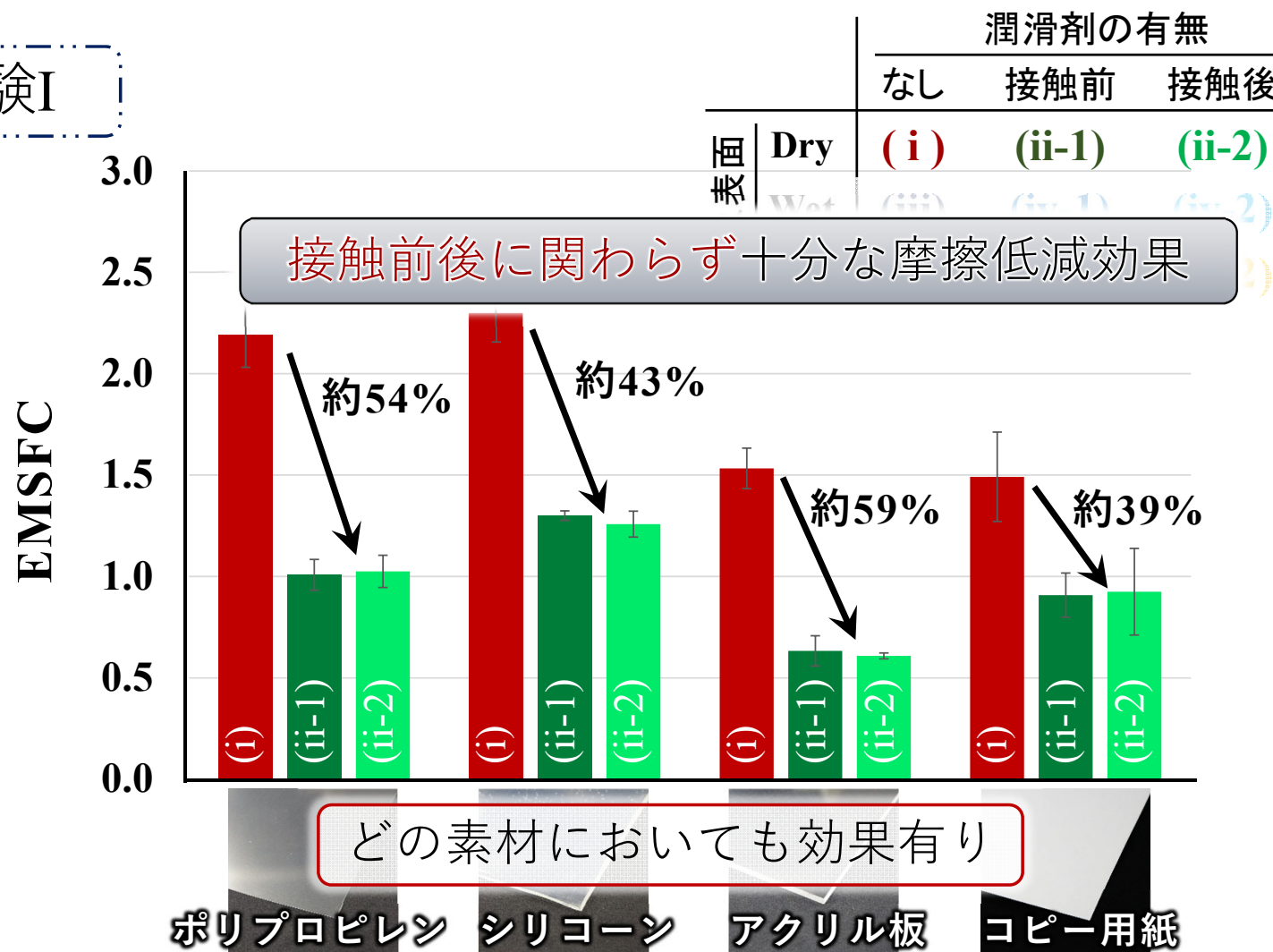
コピー用紙

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
対象表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

- 対象表面の状態 : Dry
- 潤滑剤 : なし / 接触前に添加
/ 接触後に添加

III. 潤滑機構の検証

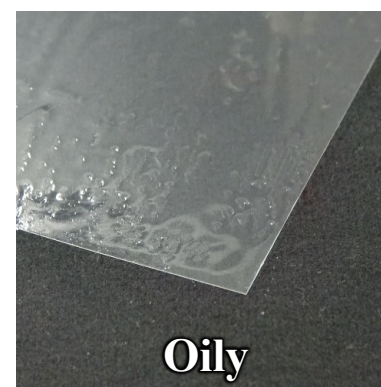
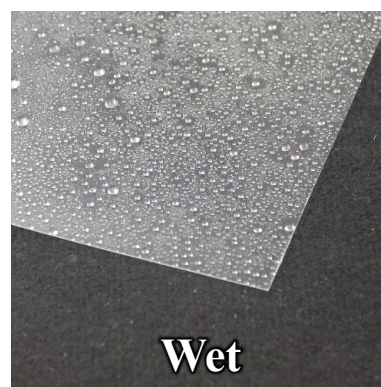
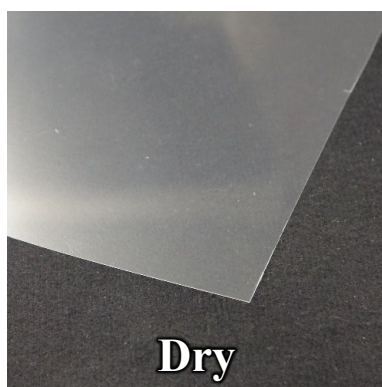
実験I



III. 潤滑機構の検証

実験II

濡れ状態に対する
テクスチャ及び潤滑機構の効果を検証



実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
対象表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

EMSFC 2.0 以上
摩擦低減率 50%以上

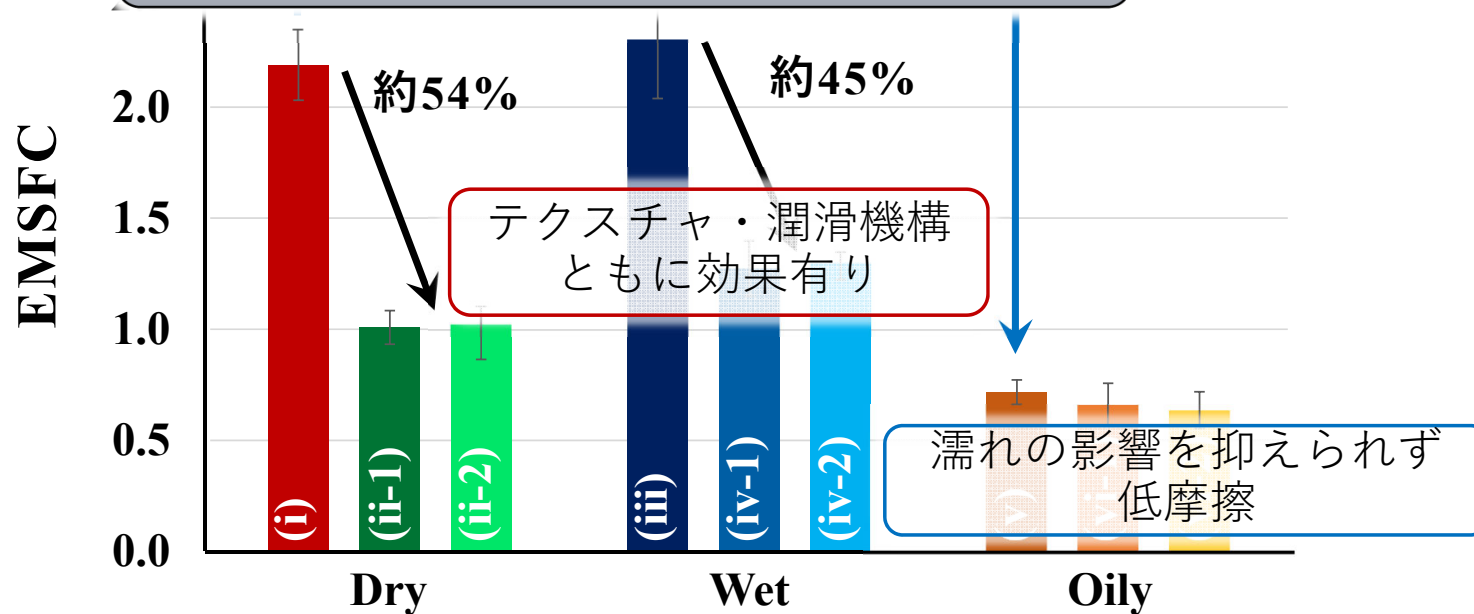
- ・ 表面素材 : ポリプロピレンシート
- ・ 対象表面の状態 : Dry / Wet / Oily
- ・ 潤滑剤 : なし / 接触前に添加
/ 接触後に添加

III. 潤滑機構の検証

実験II

		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)

水濡れの影響を排除した高摩擦維持と意図的な摩擦低減が可能



目次

I. はじめに

II. 流体指の基本構造と潤滑機構

III. 潤滑機構の検証実験

種々の素材と水濡れに対する有効性を確認

⇒ なぜ意図した結果を得られたのか？

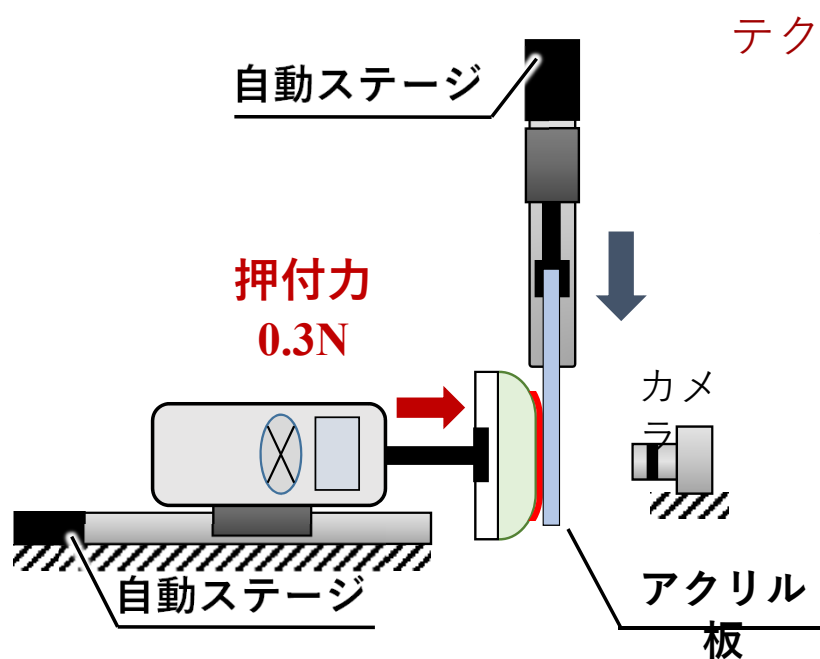
IV. 接触面の観察

V. 把持実験

IV. 接触面の観察

観察方法

透明なアクリル板に指を0.3Nで押し付け、垂直荷重を印加する。
荷重印加前後の接触面の挙動をカメラで撮影。



テクスチャの変形や潤滑剤の挙動を観察。

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
対象表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

- 対象表面の状態 : Dry / Wet / Oily
- 潤滑剤 : なし / 接触前に添加

IV. 接触面の観察

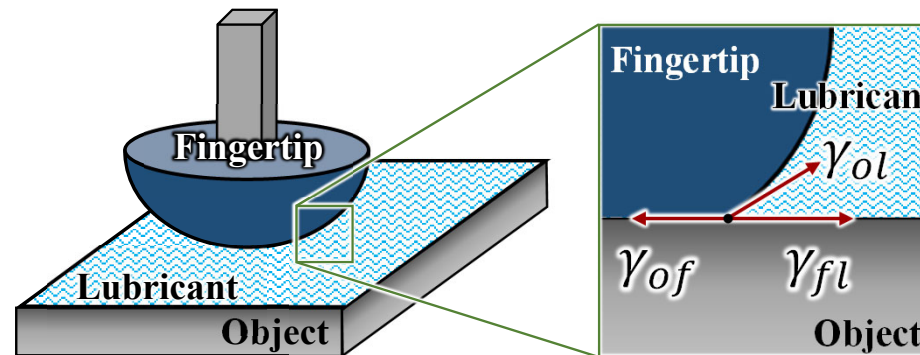
拡張係数 S とは

物体の界面における濡れの進展度合いを表す指標

= 接触面で潤滑剤がどれだけ広がりやすいかを表す

$$S = \gamma_{of} - (\gamma_{ol} + \gamma_{fl})$$

γ_{of} 指表面と潤滑剤
 γ_{ol} 物体と潤滑剤
 γ_{fl} 物体と指表面
の界面自由エネルギー



S が大きいほど、静・動摩擦係数が小さい = 滑りやす

IV. 接触面の観察

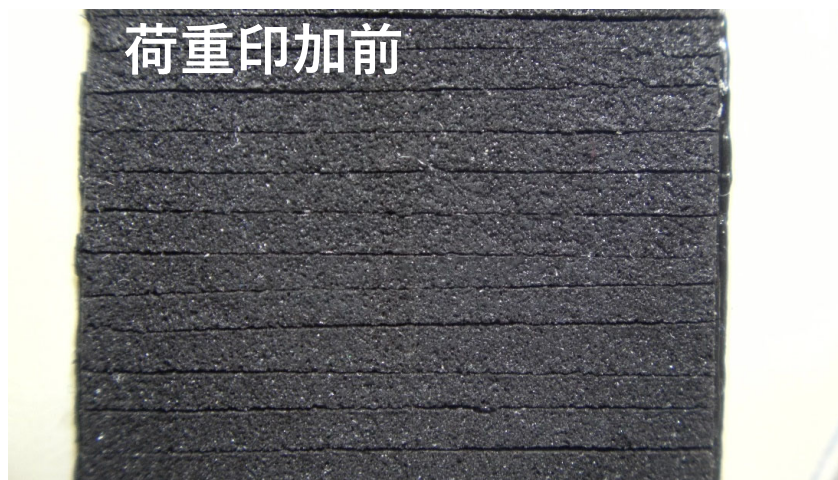
観察結果

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
対象表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

- ・ 対象表面の状態 : Dry
- ・ 潤滑剤 : なし

摩擦によりSlitが開いているが、
過剰な張りつきはない

広範囲の微小な接触面により
適度な摩擦を維持



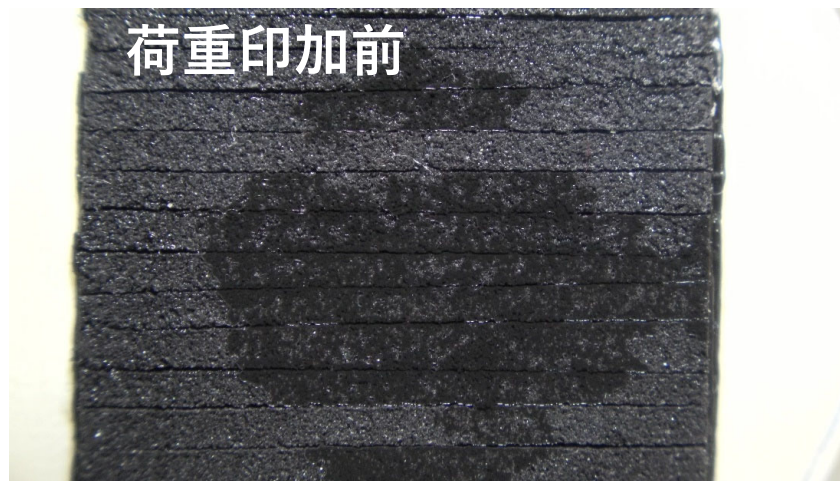
IV. 接触面の観察

観察結果

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
面 象 表 刻	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

Slit内部のエタノールが
接触面全体に進展

拡張係数 S が大きい $\Rightarrow$ 低摩擦



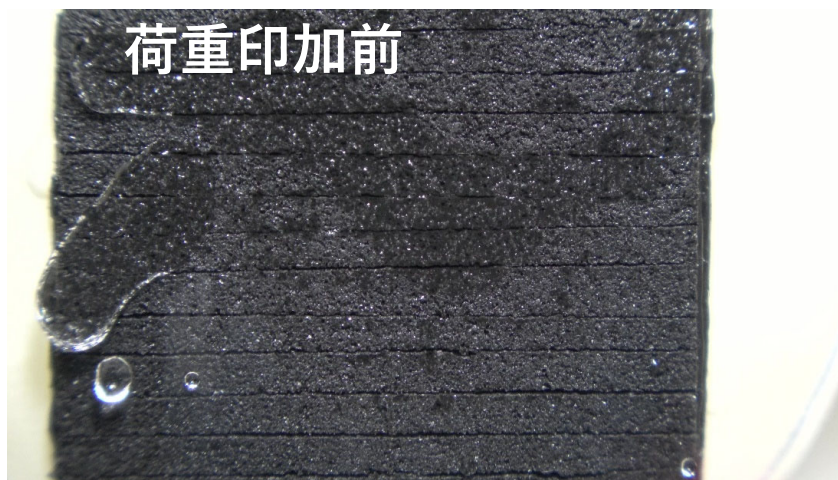
IV. 接触面の観察

観察結果

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
面 象 表 対	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

接触面の水は周囲に広がらず、
Dry状態の接触部分も存在

拡張係数 S が小さい $\Rightarrow$ 高摩擦



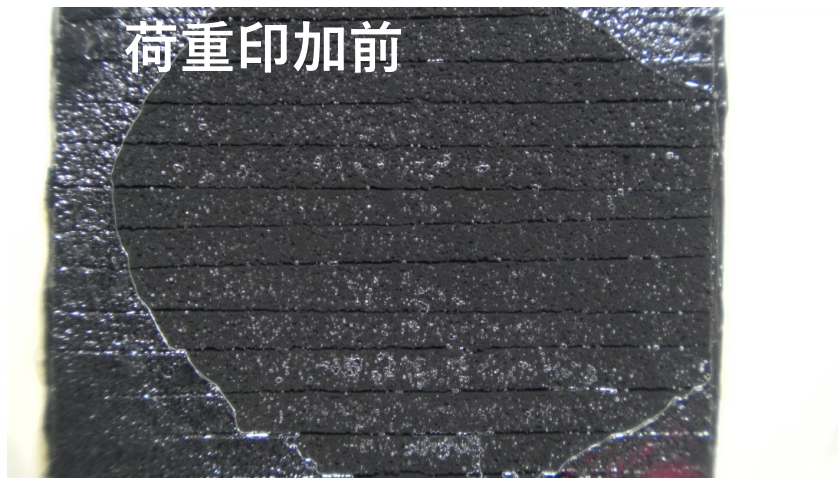
IV. 接触面の観察

観察結果

実験条件		潤滑剤の有無		
		なし	接触前	接触後
面 象 表 衣	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)

油の層が接触面全体を覆う
slitの変形なし

拡張係数 S が非常に大きく、
slitの効果がない $\Rightarrow$ 低摩擦



IV. 接触面の観察

観察結果

(iv), (vi) の結果を推測すると？

		潤滑剤の有無			
		なし	接触前	接触後	
対象表面	Dry	(i)	(ii-1)	(ii-2)	(iv) : 水に潤滑剤が混ざり, 拡張係数は(ii)と(iii)の間 ⇒ EMSFCも同様に(ii)と(iii)の間
	Wet	(iii)	(iv-1)	(iv-2)	
	Oily	(v)	(vi-1)	(vi-2)	(vi) : (v)の結果から, 潤滑剤添加の効果は小さい ⇒ EMSFCは(v)と近い値

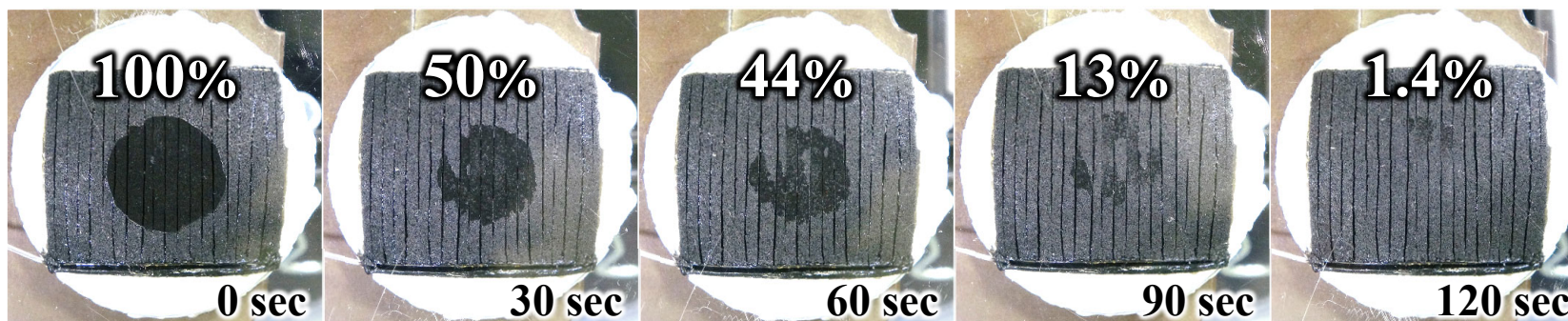
実験条件		観察結果
(i)	広範囲に微細な接触面	⇒ 高摩擦
(ii)	拡張係数S : 大きい	⇒ 低摩擦
(iii)	拡張係数S : 小さい	⇒ 高摩擦
(iv)	拡張係数S : (ii)と(iii)の間	⇒ (ii)と(iii)の間の値
(v)	拡張係数S : 非常に大きい	⇒ 低摩擦 (潤滑)
(vi)	拡張係数S : 非常に大きい	⇒ 低摩擦 (潤滑)

IV. 接触面の観察

効果の持続性

添加から接触までの時間を変更

⇒ 接触時の滲出量（面積）で持続性を比較



0秒後を100%とすると、

30秒で半減，120秒でほとんど滲出しない。

物体接触後であればより早く乾燥。

短時間での高摩擦・低摩擦の切り替えが可能

目次

I. はじめに

II. 流体指の基本構造と潤滑機構

III. 潤滑機構の検証実験

種々の素材と水濡れに対する有効性を確認

IV. 接触面の観察

接触面の様子と拡張係数から実験結果を検証



把持実験

乾潤両状態で有効な,潤滑作用を用いた摩擦低減機構を有する柔軟指

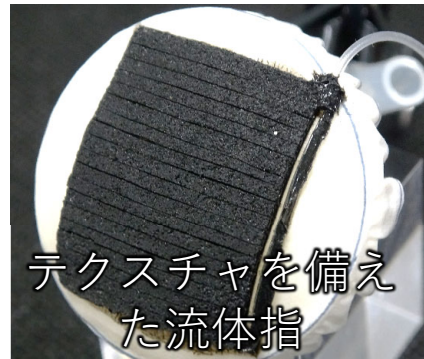
Deformable Fingertip with Friction Reduction System
Based on Lubricating Effect for Smooth Operation
under Both Dry and Wet Conditions



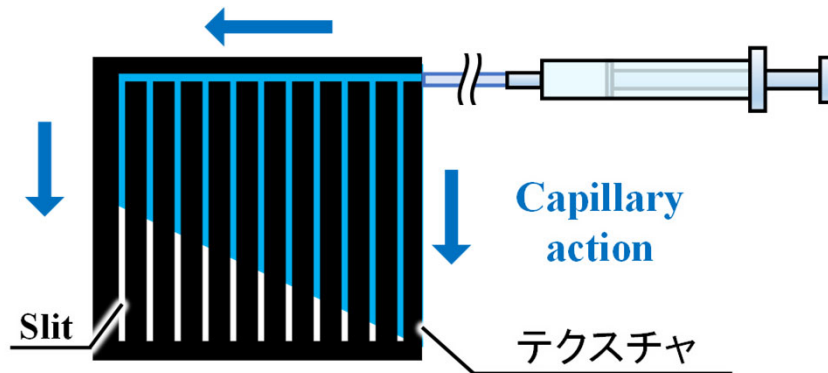
K.Mizushima, Y.Suzuki, T.Tsuji, T.Watanabe
Kanazawa University, Japan

V. まとめ

表面テクスチャにより、
乾潤双方で高摩擦を確保



毛細管現象を利用した潤滑機構により、
乾潤双方で能動的に摩擦を低減



拡張係数の観点から
提案機構の有効性を検証

今後

- ・ 油濡れに有効な摩擦保持・低減機構を検討
- ・ 潤滑剤の量や種類を検討し、適用可能範囲を拡大

Contents

- 背景
- 壊れやすい物体を流体指で掴む！
- 濡れていても乾いていても高い摩擦を与えるロボットハンド
- 濡れていても乾いていても表面摩擦を変えられるロボットハンド
- **食産業におけるAI適用の可能性**

AIが得意とするのは

- 答えが分かっているもの . . .
 - 例：画像とその意味というペアリングの組
- 不確実性を許容してくれるもの . . .
 - 例：ハンドリング法やプレイシングに精密さを求めない

食産業が扱うもの

- 個体差が大きい食材・食品
- 定量化が難しい作業
 - 例：盛り付け（バランスや美しさほか）
- 精密な位置決めは必要



AI導入には工夫が必要

盛り付けを自動化するには . . .

- 美しさの基準を定量化
- 個体差が小さい調理後の食べ物を扱う
 - 色・形状・重量
- ロボットやAIが動きやすい環境を作ること
- 見た目が多少美しくなくても許すコトも必要？

まとめ

- 事前知識なしでも壊れやすい物体をつかむ戦略の提案
- 濡れていても乾いていても有効な高摩擦テスクチャの概要
- 高摩擦テスクチャと液体滲出による摩擦低減機構を有するロボットハンドの開発について
- AI導入の可能性について

