Discovery Summit Japan 2022　　2022年11月17日

食品化学工学分野における「AI・数理データサイエンス」の基礎となる数理統計学

～実験計画法を用いた操作条件の最適化の事例紹介と提言～

国立大学法人岩手大学　農学部
応用生物化学科　食品工学研究室
三浦　靖

目次

1．食品化学工学分野におけるAI・数理データサイエンスの基礎となる数理統計学
　◇岩手大学での取り組み
　◇Society 5.0 (内閣府)
2．低糖質菓子の製造に向けた小麦粉代替素材の開発
　－中心複合計画法の適用－
3．AI・数理データサイエンス教育に向けた数理統計学の在り方
　◇数理統計学の体系
　　・記述統計学
　　・推測統計学 (伝統的統計学, ベイズ統計学)
　　・統計処理ソフトウェア
　　・数式処理・グラフ作成・データ分析ソフトウェア
　　・実学分野での取り組み姿勢

食品化学工学分野における AI・数理データサイエンスの 基礎となる数理統計学

3

岩手大学での取り組み

◆AI戦略2019 (統合イノベーション戦略推進会議決定)
「文理を問わず, すべての大学生が初級レベルの数理・データサイエンス・AIを習得する」という国家戦略の達成

◇岩手大学での取り組み
授業「情報基礎」(1年生, 必修)
全14回のうち2回を数理データサイエンス入門に割り当て
※その他はメール送受信, 文書・図表・プレゼンテーション資料の作成

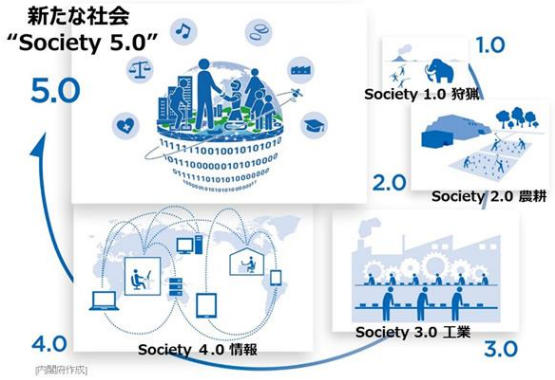
《概要》
☆数理データサイエンス入門
数理データサイエンス・AIの概要と利用, Society 5.0
データの取り扱い, 機械学習・人工知能など

☆データ分析入門
データの性質を捉えてグラフ化して議論できることを目標
データの分析・解析に繋げられることを目標
・周期性があるもの・抜けがあるデータの取り扱い
・関数の当てはめ (指数関数と対数関数など)
・統計処理 (検定)

Society 5.0

◆Society 5.0 (内閣府)
サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより, 経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会

- 狩猟社会 (Society 1.0), 農耕社会 (Society 2.0), 工業社会 (Society 3.0) 情報社会 (Society 4.0)に続く, 新たな社会を指すもの
- 第５期科学技術基本計画において, 我が国が目指すべき未来社会の姿として初めて提唱



内閣府ホームページ

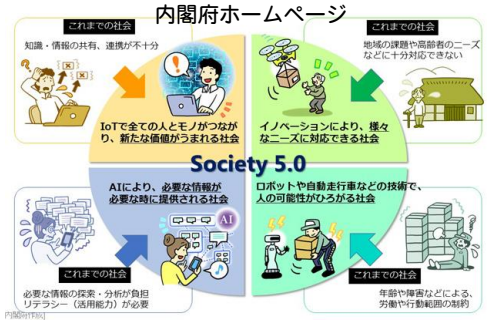
◆Society 5.0で実現する社会

- これまでの情報社会 (Society 4.0)では知識や情報が共有されず, 分野横断的な連携が不十分であるという問題
- 人が行う能力に限界があるため, 多くの情報から必要な情報を見つけて分析する作業が負担, 年齢や障害などによる労働や行動範囲に制約
- 少子高齢化や地方の過疎化などの課題に対して様々な制約
  ⇒ 十分に対応することが困難

★Society 5.0で実現する社会は, IoTで全ての人とモノが繋がり, 様々な知識や情報が共有され, 今までにない新たな価値を生み出すことで, これらの課題や困難を克服

- 人工知能により, 必要な情報が必要な時に提供されるようになりロボットや自動走行車などの技術で, 少子高齢化, 地方の過疎化, 貧富の格差などの課題が克服
- 社会の変革を通じてこれまでの閉塞感を打破し, 希望の持てる社会
- 世代を超えて互いに尊重し合える社会, 一人一人が快適で活躍できる社会

内閣府ホームページ



◆Society 5.0のしくみ

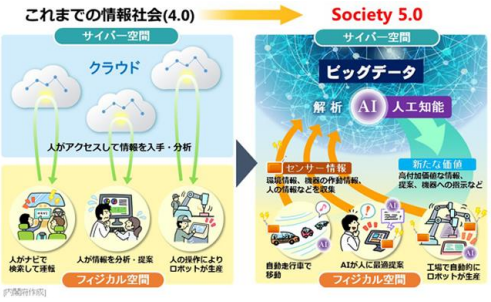
・Society 5.0は，仮想空間と現実空間を高度に融合させたシステムにより実現
これまでの情報社会（Society 4.0）では，人が仮想サイバー空間に存在する
クラウドサービス（データベース）にインターネットを経由してアクセスして
情報やデータを入手し，分析

・Society 5.0では，現実空間のセンサからの膨大な情報が仮想空間に集積

・仮想空間では，このビッグデータを人工知能が解析し，その解析結果が
現実空間の人間に様々な形でフィードバック

・今までの情報社会では，人間が情報を解析することで価値が発生

・Society 5.0では，膨大なビッグ
データを人間の能力を超えた
人工知能が解析し，その結果が
ロボットなどを通して人間に
フィードバックされることで，
これまでには出来なかった新たな
価値が産業や社会にもたらされる



内閣府ホームページ

◆経済発展と社会的課題の解決を両立するSociety 5.0へ

・我が国そして世界を取り巻く環境は大きな変革期

・経済発展が進む中，人々の生活は便利で豊かになり，エネルギーや食料の
需要が増加し，寿命の延伸が達成され，高齢化が進行

・経済のグローバル化が進み，国際的な競争も激化し，富の集中や地域間の
不平等といった面も発生

・経済発展に相反して解決すべき社会的課題は複雑化してきており，温室効果
ガス排出の削減，食料の増産やロスの削減，高齢化などに伴う社会コストの
抑制，持続可能な産業化の推進，富の再配分や地域間の格差是正といった
対策が必要

・現在の社会システムでは経済発展と社会的課題の解決の両立は困難

・世界が大きく変化する一方で，IoT，
ロボット，人工知能，ビッグデータ
といった社会の在り方に影響を
及ぼす新たな技術が進展し
我が国は課題先進国として，先端
技術をあらゆる産業や社会生活に
取り入れ，経済発展と社会的課題
の解決を両立していく新たな社会
であるSociety 5.0の実現を目指す

内閣府ホームページ

◆新たな価値で経済発展と社会的課題の解決を両立

・イノベーションで創出される新たな価値により，地域，年齢，性別，言語等による格差がなくなり，個々の多様なニーズ，潜在的なニーズに対して，きめ細かな対応が可能

・モノやサービスを，必要な人に，必要な時に，必要なだけ提供されるとともに社会システム全体が最適化され，経済発展と社会的課題の解決を両立していける社会

・その実現には様々な困難を伴うが，我が国はこの克服に果敢にチャレンジし課題先進国として世界に先駆けて模範となる未来社会を示していく

内閣府ホームページ

低糖質菓子の製造に向けた小麦粉代替素材の開発
－中心複合計画法の適用－

10

《研究課題》　おいしい低糖質菓子の製造技術の開発

《目的》糖尿病懸念者・罹患者でも安心しておいしく食べられる低糖質菓子の開発

⇩

エリスリトールの再結晶化を抑制しつつ高濃度で安定に溶解している
ショ糖代替素材(液状)

※果実やキノコ, ワイン・清酒・醤油・味噌などの発酵食品に含まれている糖アルコール
グルコースを原料にして酵母を用いた発酵により生産
化学式：$C_4H_{10}O_4$, モル質量：122.12 g mol^{-1}, 密度：1.45 g/cm^3, 融点：121℃

《背景》

◆生活習慣病の予防：摂取エネルギーの低減 ⇒ 低エネルギー化
(内臓脂肪症候群としての肥満症, 糖尿病, 高血圧症, 脂質異常症など)

◆ダイエットの実施

◆糖尿病が強く疑われる人：血糖値の低減 ⇒ 低糖質化
男性19.7%, 女性10.8%（調査実施2,836世帯)
2019年「国民健康・栄養調査」　厚生労働省2020年10月27日公表

⇩

『低糖質食品』

※糖質：ヒトの消化酵素で加水分解されてエネルギーを産生する炭水化物(単糖あるいは
それを最小単位とする重合体)
※非消化性/難消化性糖質：糖アルコール, 水溶性/非水溶性食物繊維, 非消化性/難消化性澱粉

《検討事項》

(1) ショ糖代替素材および薄力小麦粉代替素材の開発

従来　糖質素材の減量／不使用　　【問題点】[1] 甘味の不足，消失
⇩　　[2] 賦形しにくい／しない
糖 (グルコース, フルクトース, スクロース)の減量＋高甘味度甘味料の使用
…問題点[1]に対応

当方らの取り組み

全国中小企業団体中央会「2015年度補正[ものづくり・商業・サービス新展開支援補助金]」(かねご製餡㈱「日本で初となる糖質制限和菓子の開発」, 2016年)

◆ショ糖代替素材 (エリスリトール, 羅漢果抽出物, 粘度調整・エリスリトール結晶化抑制素材 [難消化デキストリン, イソマルトデキストリン, 還元マルトオリゴ糖]) …問題点[1][2]に対応

◆薄力小麦粉代替素材 (強力小麦粉, 微結晶セルロース, 大豆粉, 不溶性食物繊維)
…問題点[1][2]に対応
特許出願 (特開2019-154439)

販売：低糖質こし餡/つぶ餡, 低糖質どら焼き
低糖質ミルク饅頭

(2) 食品を高度に低糖質化するために用いるショ糖代替素材の開発

① エリスリトールのX線結晶構造分析
② 分子動力学法により結晶化モデルを構築
⇒ 結晶核の発生，結晶成長を抑制する手法を開発
③エリスリトール含量20%(w/w)以上のショ糖代替素材の組成を最適化
※水に対する25℃での飽和濃度36%(w/w)

目的

食品テクスチャーが好ましく，摂取エネルギーの低減された低糖質スポンジケーキを調製するために薄力小麦粉代替素材の配合を最適化

薄力小麦粉

全卵

ショ糖

→

薄力小麦粉代替素材
- 脱臭全脂大豆粉末
- 低カルボキシメチル化セルロース
- 難消化性澱粉

スポンジケーキ生地
- 水分含量
- 嵩密度
- 気泡分散構造
- 流動特性
- 動的粘弾性

スポンジケーキ
- 水分含量
- 嵩密度
- 内相の硬さ
- 三次元泡沫構造
- 表面構造

応答曲面法

→ 最適配合

薄力小麦粉代替素材の配合

◎薄力小麦粉代替素材の配合

100%

強力小麦粉 50%

薄力小麦粉代替素材 50%

脱臭全脂大豆粉末
低カルボキシメチル化セルロース
難消化性澱粉

因子

脱臭全脂大豆粉末
13.05~22.95%, 3水準
低カルボキシメチル化セルロース
0.01~6.00%, 3水準

◎中心複合計画法による薄力小麦粉代替素材の配合 [%]

番号	大豆粉末	セルロース	難消化性澱粉
No.1	18.00	0.01	31.99
No.2	18.00	3.05	28.95
No.3	13.05	3.05	33.90
No.4	18.00	3.05	28.95
No.5	18.00	3.05	28.95
No.6	22.95	3.05	24.00
No.7	18.00	3.05	28.95
No.8	21.50	5.14	23.36
No.9	14.50	5.14	30.36
No.10	18.00	3.05	28.95
No.11	18.00	6.00	26.00
No.12	14.50	0.96	34.54
No.13	21.50	0.96	27.54

スポンジケーキの調製

材料	質量分率 [-]	
	対照生地	薄力小麦粉代替素材配合生地
薄力小麦粉	100.0	0.0
ショ糖	100.0	100.0
全卵	100.0	100.0
起泡剤製剤	5.0	5.0
強力小麦粉	0.0	50.0
薄力小麦粉代替素材	0.0	50.0
脱塩水	47.4	47.4

薄力小麦粉代替素材

- 脱臭全脂大豆粉末 (アルファプラスHS-60 日清オイリオグループ(株))
- 低カルボキシメチル化セルロース (サンローズ　SLD-F1, 日本製紙(株))
- 難消化性澱粉 (アミロジェルHB-450, 三和澱粉工業(株))

全卵・ショ糖 (室温：25 ℃)
- ← 薄力小麦粉代替素材
- ← 起泡剤製剤
- 撹拌 (225 rpm, 1min)
- 撹拌 (680 rpm, 2.5 min)

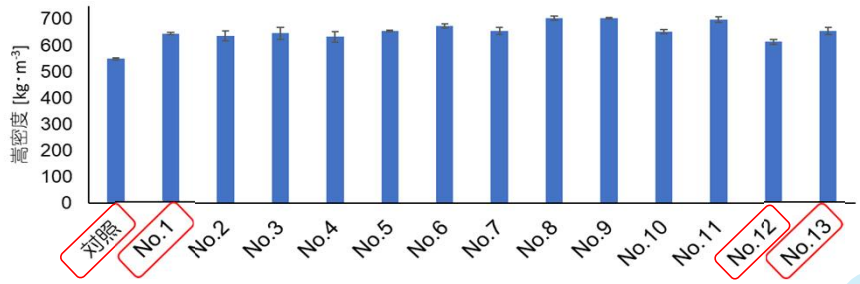
スポンジケーキ生地
- 500 g採取
- 焼成 (上火･下火 160 ℃, 25 min)

スポンジケーキ

スポンジケーキ生地の理化学的特性 (1) 嵩密度

◎方法
- 試料：スポンジケーキ生地
- 固体・液体密度測定装置 (Density Kit ML-DNY-43 メトラートレド㈱)
- JIS Z 8807 「固体の密度及び比重の測定方法」
- 媒体：メタノール

◎結果および考察
- 薄力小麦粉代替素材配合生地は嵩密度が対照生地よりも有意に大
- 低カルボキシメチル化セルロースの配合量が少ない生地は嵩密度が小さい傾向



(2)流動特性

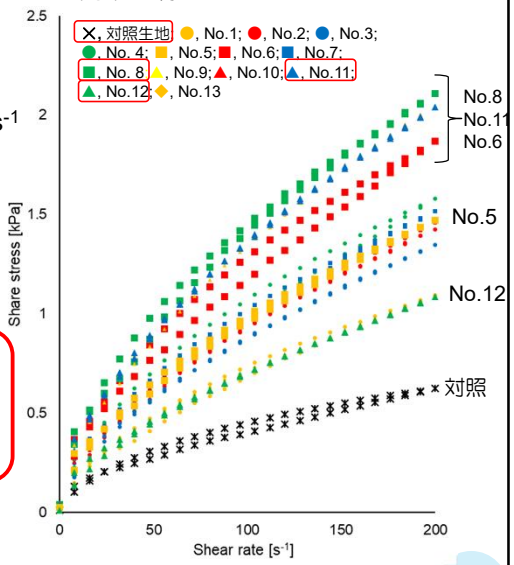
◎方法

- 試料：スポンジケーキ生地
- 動的粘弾性測定装置 (ARES-G2 TA Instruments社) で測定
  せん断速度：0➜200 s^{-1}, 200 ➜ 0 s^{-1}
- 温度：25 ℃
- コーン･プレート型治具
  (上部板, 下部板：Φ 25 mm)

◎結果および考察

- 対照生地に比べ, 薄力小麦粉代替素材配合生地は粘度が高
- 低カルボキシメチル化セルロースの配合量が多い試料ほど粘度が高

◎流動曲線



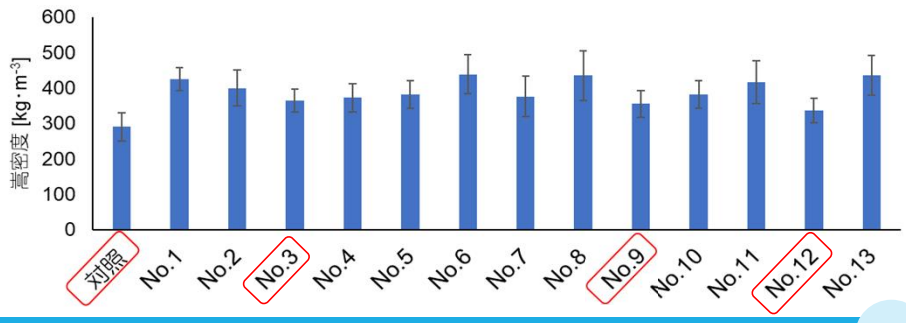
スポンジケーキの理化学的特性 (1)内相の嵩密度

◎方法

- 試料：一辺長20 mmの立方体に成形したスポンジケーキ
- 超高速レーザー体積計測機 (SELNAC-WinVM2100 ㈱アステックス)

◎結果および考察

- すべての薄力小麦粉代替素材配合ケーキが対照ケーキに比べ, 有意に嵩密度が大
- 脱臭全脂大豆粉末の配合量が少ないケーキは嵩密度が小さい傾向

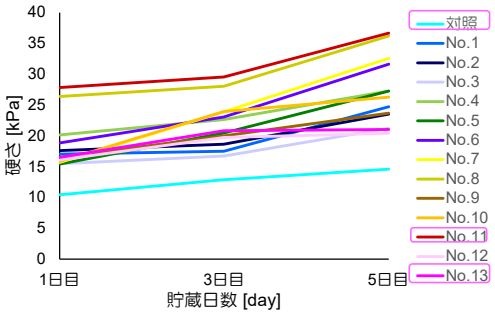


（2）内相の硬さ

◎方法

- 試料：厚さ20 mmにスライスしたスポンジケーキ
- 単軸圧縮･引張型レオメータ (RE-33005, 山電㈱)
- ロードセル：19.6 N，プランジャー：円柱状 (φ 12×H 35 mm)
- 圧縮速度：0.5 mm･s^{-1}
- 貯蔵日数1, 3, 5日 (25 ℃) の硬さ：最大ひずみ0.25での応力 (AACCI標準法74-09)

◎結果および考察

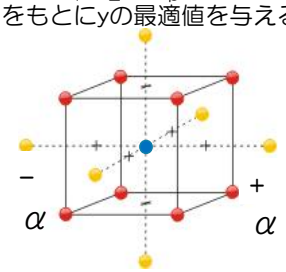


- 薄力粉麦粉代替素材配合ケーキは対照ケーキより硬い
- 低カルボキシメチル化セルロース配合量が少ない試料が柔らかい
- すべてのケーキが貯蔵日数が経つにつれて硬くなる

実験計画法

◎応答曲面法とは

p個の因子（説明変数）$x_1, x_2, \cdots, x_p$および特性値（応答）y がともに連続的なとき，$x_1, x_2, \cdots, x_p$とyとの間の関係式$y = f(x_1, x_2, \cdots, xp)$を実験データから推測し，これをもとにyの最適値を与える因子の値を求める手法。



- 中心点実験(0)
- 2水準系の要因計画の点(1/ -1)
- 軸上の点(α/ -α)

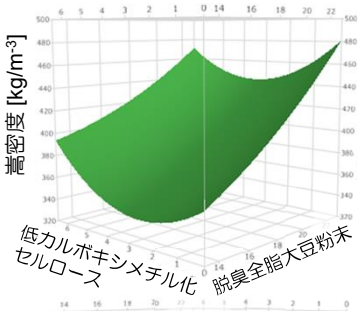
回転可能中心複合計画における変数の値 (α=1.414)

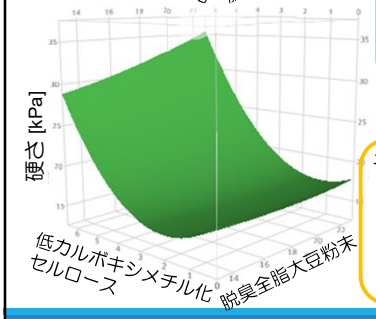
因子[%]	Symbol	Level				
		-α	-1	0	+1	+α
脱臭全脂大豆粉末	X_1	13.05	14.50	18.00	21.50	22.95
低カルボキシメチル化セルロース	X_2	0.10	0.96	3.05	5.14	6.00

中心複合計画による薄力小麦粉代替物の組合せ

代替素材	X_1	X_2
No.1	0	-α
No.2	0	0
No.3	-α	0
No.4	0	0
No.5	0	0
No.6	+α	0
No.7	0	0
No.8	+1	+1
No.9	-1	+1
No.10	0	0
No.11	0	+α
No.12	-1	-1
No.13	+1	-1

応答曲面法による薄力小麦粉代替素材の最適配合





因子

脱臭全脂大豆粉末

低カルボキシメチル化セルロース

応答

嵩密度
硬さ

最小化

◎結果

- 脱臭全脂大豆粉末 14.5 % (w/w)
- 低カルボキシメチル化セルロース 2.21 % (w/w)
- 難消化性澱粉 33.29 % (w/w)

ケーキ調製

予測値
- 嵩密度
  329.53~374.63 kg·m^{-3}
- 硬さ
  13.27~17.38 kPa

実測値
- 嵩密度
  360.27±41.34 kg·m^{-3}
- 硬さ
  17.81±3.42 kPa

10/11

応答曲面法による薄力小麦粉代替素材の最適配合

◎応答曲面法による嵩密度の予測式

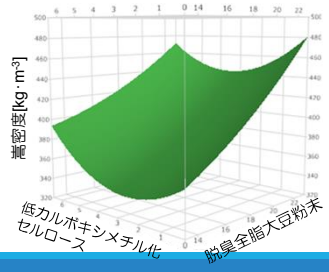
$$Y_d=382.45+35.22X_1+0.83X_2-4.72X_1X_2+4.81X^2_1+14.12X^2_2$$

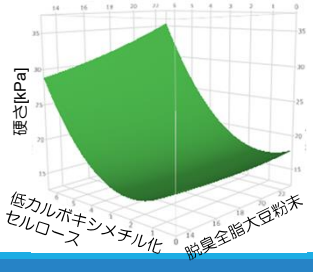
Y_d:スポンジケーキ内相の嵩密度[kg·m^{-3}]
X_1:脱臭全脂大豆粉末の配合量
X_2:低カルボキシメチル化セルロースの配合量

◎応答曲面法による硬さの予測式

$$Y_h=16.954+1.0727X_1+4.0140X_2+0.7525X_1X_2-0.2786X^2_1+2.9236X^2_2$$

Y_h:スポンジケーキ内相の硬さ[kPa]





AI・数理データサイエンス教育に向けた数理統計学の在り方

23

数理統計学の在り方

◆数理統計学 (mathematical statistics)

〇記述統計学 (descriptive statistics)
平均や分散などを使って，データの特徴を整理・記述

〇推測統計学 (inferential statistics)

・伝統的統計学【頻度論，頻度主義】
母集団 (population) から標本 (sample) を無作為に抽出し，その標本によって得られた標本平均や不偏分散などの統計量を使って，母集団の母数 (母平均や母分散)を検定して推定

・ベイズ統計学 (Bayesian statistics)
パラメータの確率分布 (事後分布)を想定し，そこから母平均や母集団などを推定して分析の正確さを向上

※当方が主宰する食品工学研究室でのセミナー
教科書：入門統計学 (第2版) －検定から多変量解析・実験計画法・ベイズ統計学まで－
ISBN：978-4-274-22738-7
発売日：2021年7月7日
発行元：オーム社
定価：2,860円

数理統計学の在り方

◆統計処理ソフトウェア

★JMP16, SAS Institute Japan㈱
SAS, SAS Institute
★SPSS Statics V29, 日本アイ・ビー・エム㈱（アドバンスト・AI㈱）
Tableau, Tableau Software,LLC
Eviews 13 (英語版), JUCA, Inc.
Stata 17 日本語／英語版, JUCA, Inc.
Nvivo, QSR International (ユサコ㈱)
※QDA(qualitative data analysis, 質的データ分析)に特化
MAXQDA2022, VERBI Software-Consult-Sozialforchung GmbH

◆数式処理・グラフ作成・データ分析ソフトウェア】

Mathematica 13.1, Wolfram Research (ヒューリンクス㈱)
★Origin Pro 2022b, Lightstone Corp. (㈱ライトストーン)

◆実学分野 (農学部, 工学部など)での取り組み姿勢

実学分野には数理統計学の専門家はいない (個人的な見解)
ユーザーとして数理統計学を利用
⇒ 実験系の教員であれば数理統計学の授業を担当できるはず