

パンの販売数の予測と最適生産計画

2019SS029 岩堀凌治 2019SS037 加藤ゆず希 2019SS072 鈴木琴葉

指導教員：鈴木敦夫

1 はじめに

本研究では、あるベーカリーのパンの生産計画問題をオペレーションズ・リサーチの手法を用いた解決法を考える。

現在、多くのベーカリーでは一日に生産するパンの個数を職人の感覚に頼り決定している。これはベーカリーで長年働いた経験から得られるものであり、ある職人が経験を積むまでの間、予測が大きく外れ、パンの売れ残りや売り切れで販売機会を損失している。

実際にこのベーカリーを訪問した際、オーナーによると、パン職人は過重労働になる場合が多く、体調を崩してしまう人も出てきてしまう。1人の職人が体調を崩してしまうと、通常営業や他スタッフへの負担も大きくなり、悪循環が生まれている。生産予測を行う事でベーカリーで働く従業員の負担を減らし必要最低限の働きで効率化できたらより幸せな生活を創造できる可能性がある。

そこで私たちはこの問題をオペレーションズ・リサーチの技術で解決できると考えた。本研究を通して、余分なパンの製作時間、販売時間が削減されることによる生産性の向上、ベーカリー業界で問題である低賃金で過酷な労働時間課せられる労働環境の向上を実現することが期待できる。

生産計画のシステム作成にあたり、パンが将来的にどれだけ売れるかを予測する必要がある。予測には、プログラミング言語 Python で利用できる Prophet による時系列予測を使用し、各パンの販売履歴から将来の販売個数を予測した [1]。その予測結果から利益を最大化にする最適化モデルと廃棄量を最小化する最適生産モデルを作成しそれぞれ Excel のソルバーを用いて解を求められるようにした。

2 利用するデータについて

本研究で利用するデータとして、あるベーカリーから 2021 年 8 月から 2022 年 9 月 10 日の約 1 年間の販売履歴を提供してもらった。このデータには各パンの販売個数、売れ残り個数、予約、売り上げ、日付が記録されている。

本研究では、10 種類のパン（食パン 1 斤・食パン 2 斤・クランベリー・フランスパン・チョコねじ・クロワッサン・抹茶・ウィンナー・クロックムッシュ・フレンチトースト）の販売個数、売れ残り個数、日付を抽出して扱う。

3 問題解決へのアプローチ

本研究の目標は、過去の販売個数からパンの販売個数を予測し、その結果から最適生産計画を立てるシステムを作成する事である。そこで、ベーカリーから提供してもらったデータをもとに、日付、各種のパンの販売個数を Excel でまとめ、プログラミング言語の Python で利用できる

Prophet を用いて時系列予測を行った。その際に、パンの販売に影響するものを数値化し、外部変数として利用することでより良い精度で予測を行うことができる。

3.1 Prophet について

Prophet とは Meta (旧 Facebook) が公開している OSS ライブラリで、Python によって比較的容易に時系列予測が行えるものである。ベーカリーから提供してもらったデータを元に、表 1 のように日付、販売個数、不快指数を Excel でまとめ、Prophet で予測を行った。表 1 の場合、2021 年 8 月 4 日には販売個数をが 16 個、不快指数が 79.82125、2021 年 8 月 5 日には販売個数をが 17 個、不快指数が 80.62704 という結果になっている。

表 1 Prophet に読み込ませるデータの一部

日付	販売個数	不快指数
2021/8/4	17	81.07888
2021/8/5	17	82.13916
2021/8/6	10	81.36864

一例として、実際に Prophet による販売個数の予測結果を提示する。図 1 はクロワッサンのプロット図である。グラフの見方は、横軸が日付であり縦軸が個数である。青色の線は予測値であり黒い点が実際の販売個数である。薄い青色は予測される範囲である。クロワッサンでは予測値に一致している日は少ないが予測範囲内には点が多い。このベーカリーの営業日は火曜日から土曜日のみである。

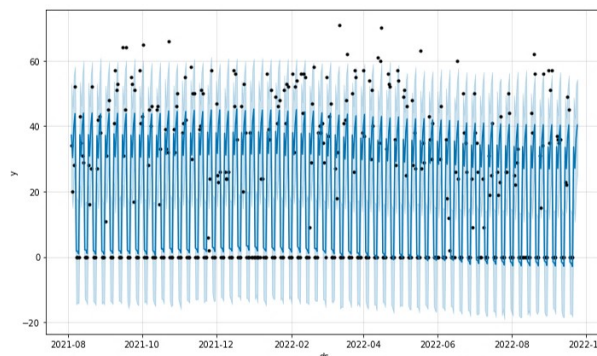


図 1 クロワッサンの販売実績と予測のプロット図

3.2 不快指数

不快指数とは、温度・湿度などの関係で人に感ずる快・不快の程度を数値で表したもので、85になると、93%の日本人が蒸し暑さで不快感を感じるとされている。不快指数は次の式で表される。

$$DI = 0.81T + 0.01 \times H \times (0.99T - 14.3) + 46.3$$

変数の説明

DI: 不快指数

T: 気温

H: 湿度

過去の不快指数は気象庁の過去の気象データから愛知県江南市の気温、湿度を用いて計算されたものを使用した。実際の予測では、tenki.jpの名古屋市2週間天気から各日にちの6時間ごとの予測気温、湿度を取得し平均気温、平均湿度を求め不快指数の公式に代入して求めた。

気温、降水量、天気（天気を晴れ、曇り、それ以外の3つに分類したもの）、不快指数を外部変数とした予測結果を比較した際、誤差ではあるが不快指数が一番精度が良いと総合的に判断し決定した。

4 Prophetによる実行結果

提供してもらったパン10種類の2021年8月から2022年9月10日までのデータを元に、9月の3週間の予測をProphetを用いて行った。予測結果と実際の販売個数を表2にまとめた。この10種類のパンの中から特徴のあったクロワッサン・チョコねじ・フランスパンの3種類を取り上げ、詳しく見ていく。

表2 予測結果と実際の販売個数

日付	クランベリー		食パン2斤		フランスパン		チョコねじ		抹茶	
	実績	予測	実績	予測	実績	予測	実績	予測	実績	予測
8月31日	23	19	10	13	21	16	11	9	21	20
9月1日	11	18	12	11	12	15	8	10	24	19
9月2日	20	20	11	16	13	17	12	12	30	21
9月3日	23	23	13	14	18	22	0	15	33	23
9月7日	16	18	9	13	17	16	9	11	17	20
9月8日	15	18	24	11	12	15	24	12	23	19
9月9日	20	20	9	14	22	17	21	13	22	21
9月10日	17	23	8	16	18	22	18	16	23	23
9月14日	22	18	12	13	12	16	17	11	22	20
9月15日	9	18	9	11	16	15	12	12	23	19
9月16日	21	20	12	14	19	17	12	13	28	21
9月17日	10	23	14	16	23	22	12	16	41	23

日付	クロワッサン		食パン1斤		ウィンナー		クロックムッシュ		フレンチトースト	
	実績	予測	実績	予測	実績	予測	実績	予測	実績	予測
8月31日	57	33	11	12	19	17	20	15	0	8
9月1日	35	26	16	11	16	16	14	14	10	10
9月2日	51	36	23	16	25	20	12	17	0	12
9月3日	57	40	11	16	28	23	3	19	0	5
9月7日	37	34	13	12	16	17	10	15	10	8
9月8日	36	27	7	11	14	16	16	14	10	10
9月9日	35	36	14	16	14	19	12	16	10	12
9月10日	36	40	11	16	18	23	18	18	9	5
9月14日	23	34	16	12	11	17	9	15	8	8
9月15日	22	27	5	11	9	16	19	14	10	10
9月16日	49	36	12	16	22	19	18	16	11	12
9月17日	45	40	15	16	23	23	24	18	20	5

4.1 クロワッサン

クロワッサンは人気のある商品である。売れる時には70以上売ることがある。しかし、売れる時と売れない時があり販売個数が安定していない商品である、要因としては、売れ残りが出て翌日に加工することにより再販売できるため多く生産する為だと考えられる。

図2はクロワッサンの販売個数の予測結果と販売個数である。販売個数が安定しないため予測結果と一致することが少なかった。しかし、またProphetの予測範囲から外れる値も多い。

図3は、データがある2021年8月から2022年9月にかけて、全体的な販売個数の推移を表している。グラフから、全体的に減少傾向にあり、昨年8月から約4個減っていることがわかる。

図4は、曜日ごとの販売個数を表している。木曜日が最も少なく、土曜日が一番多い販売個数となっており、差が10個ほどあるとわかる。

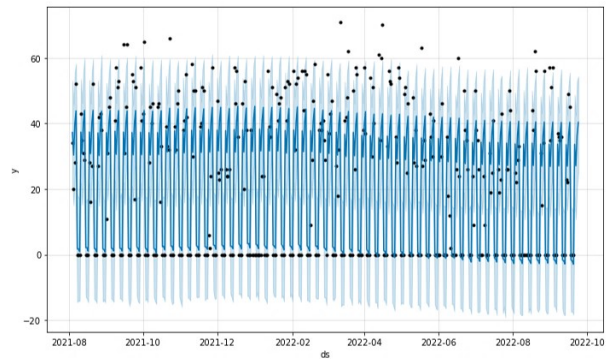


図2 クロワッサンの販売個数予測

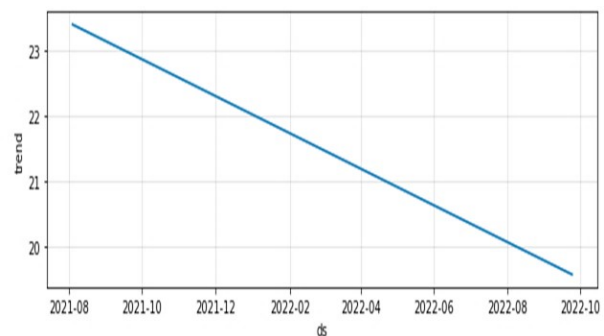


図3 クロワッサンの売れ行き傾向

4.2 チョコねじ

チョコねじは手間がかかるため人手不足で生産個数が安定せず、実際の生産個数が減少傾向で0の時もある商品である。

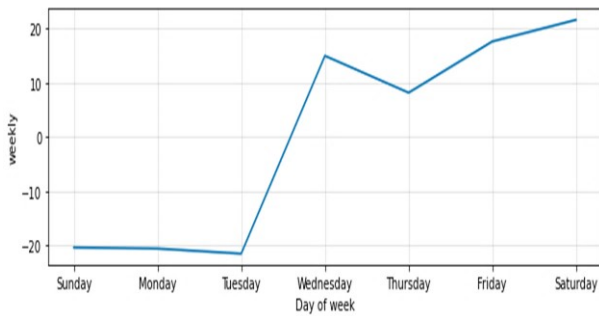


図4 クロワッサンの曜日ごとの販売個数

図5は、チョコねじの販売個数の予測結果と販売個数である。生産個数が安定していないため売れている時期と売れていない時期が明確に分かれている。そのため予測範囲から大きく外れているところがある。しかし、生産個数が安定している時期に関しては予測結果が当たりやすい傾向である。

図6は、データがある2021年8月から2022年9月にかけて、全体的な販売個数の推移を表している。全体的に減少傾向にあり、2021年8月から約8個減っていることがわかる。この要因は、人員不足により休業日を増やしたなど生産個数の不安定さと考える。2021年8月と2022年8月の総販売個数を比べると2021年8月は289個であり2022年8月は70個であった。2022年8月のデータには売れ残りのデータを見るとすべて0だった。営業日は2021年8月のほうが3日多かった。

図7は、曜日ごとの販売個数を表している。水曜日が最も少なく、土曜日が一番多い販売個数となっており、差が5個ほどあるとわかる。

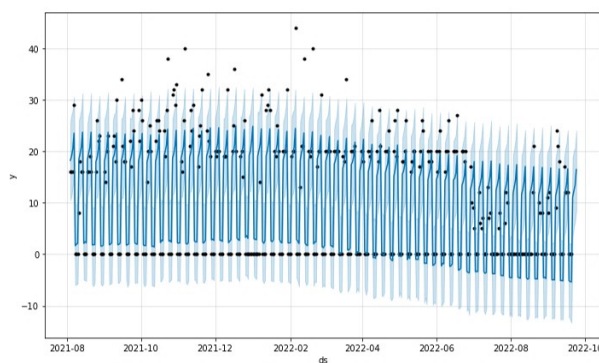


図5 チョコねじの販売個数予測

4.3 フランスパン

フランスパンは最も精度よく予測できた商品である。

図8は、フランスパンの販売個数の予測結果と販売個数である。1日だけ大きく外れている日があるが、それ以外の日は比較的销售個数と予測結果が近い値をとっている。

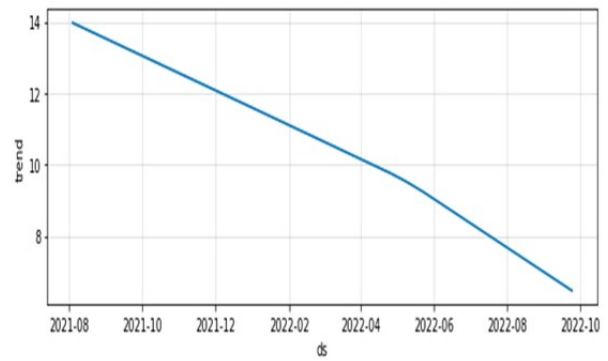


図6 チョコねじの販売個数の傾向

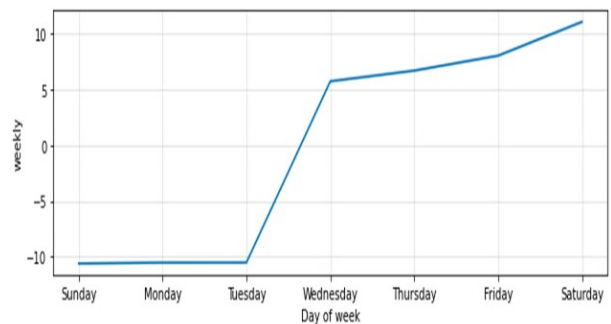


図7 チョコねじの曜日ごとの販売個数

図9は、データがある2021年8月から2022年の9月にかけて、全体的な販売個数の推移を表している。全体的に減少傾向にあり、昨年8月から約4個減っていることがわかる。また、今年の5月付近から傾きが急になっており、減少傾向が強くなっている。

図10は、曜日ごとの販売数を表している。木曜日が最も少なく、土曜日が一番多い販売個数となっており、差が8個ほどあるとわかる。

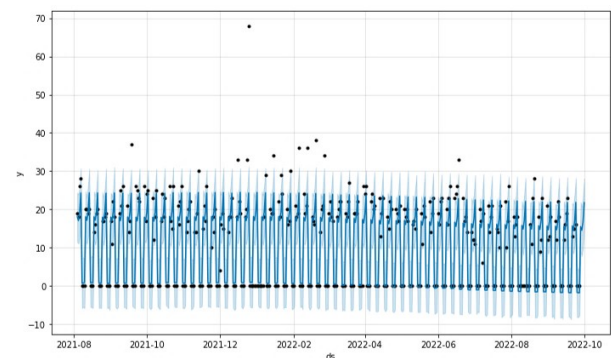


図8 フランスパンの販売個数予測

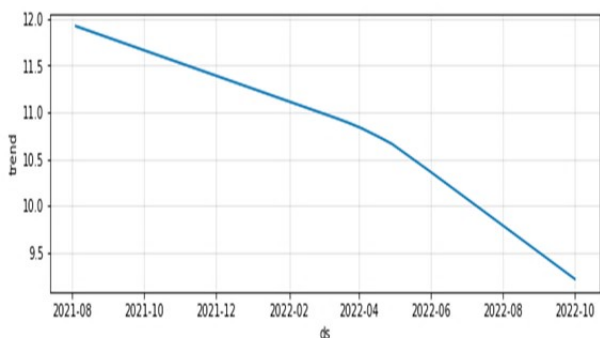


図9 フランスパンの売れ行き傾向

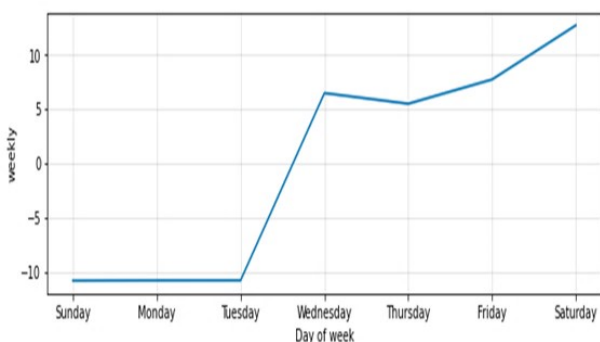


図10 フランスパンの曜日ごとの販売個数

4.4 予測結果の提供

ベーカリーでは2日前に製造量の決めて仕込みを始め長時間発酵後に店頭で焼き上げる。ベーカリーではドイツパンを生産しているため通常のパンより発酵に時間をかけている。この工程を考慮し毎週日曜日に最新の購買履歴を提供してもらい Prophet にて予測を行い予測結果を毎週月曜日に提供している。現在ベーカリーではパンを生産する人数が不足しているため、生産するパンの個数を限定している。しかし売り上げは一定以上は確保しなければいけないため売れ残りを減らし売り上げを最大にするために尽力している。予測結果はその参考として使われている。

4.5 ベーカリーにおける Prophet の実用性

Prophet を用いた場合と用いなかった場合の比較をする。今までは販売個数と予測結果を比較してきたが、予測結果の個数を生産した場合売れ残りはどうなるのかについてシミュレーションを行う。

表3, 4では、実際の生産個数・販売個数・売れ残り、予測結果・予測結果を生産数とした場合の売れ残りを表している。このとき、予測結果を生産個数とした場合の売れ残りは、予測結果の個数だけ生産し、実際の販売個数だけ売れたとしたときの売れ残りである。また、「-」はその日の実際の生産数が0だったため、売れ残りの予測ができないものを示している。

表3から、クロワッサンを例に読み取れることを挙げていく。

9月9日のように、売れ残りが減っているものは良いが、8月31日のように、実績より予測のほうが少なくなっている場合は、売れ残りは0になっているが、実際はもっと売れたはずである。つまり、もっと売上を伸ばすことができたはずである。

また、9月10日のように実際の生産数と実績が同じ場合は、本当はもっと欲しい人がいたが、売り切れのため買えなかったということが考えられる。その場合は、予測結果が実績値より多くても、予測結果の通り売れる可能性がある。

表3には、売れ残りの数が減った、抹茶とクロワッサンについて、実際の売れ残りと予測結果の分だけ生産した際の売れ残りの比較を表す。売れ残りの数はかなり減っているが、予測が実際の販売数を下回っているものがあるため、実際には販売個数を伸ばすことができたはずである。

表3 売れ残りの数が減ったもの

日付	抹茶				クロワッサン				
	生産数	実績	売れ残り	予測	生産数	実績	売れ残り	予測	売れ残り
8月31日	21	21	0	20	60	57	3	33	0
9月1日	30	24	6	19	59	35	24	26	0
9月2日	30	30	0	21	69	51	18	36	0
9月3日	33	33	0	23	57	57	0	40	0
9月7日	24	17	7	20	54	37	17	34	0
9月8日	28	23	5	19	42	36	6	27	0
9月9日	26	22	4	21	56	35	21	36	1
9月10日	25	23	2	23	36	36	0	40	4
9月14日	28	22	6	20	72	23	49	34	11
9月15日	24	23	1	19	70	22	48	27	5
9月16日	28	28	0	21	70	49	21	36	0
9月17日	41	41	0	23	65	45	20	40	0
	売れ残り合計		31	3			227		21

表4には、売れ残りの数が増えた、食パン1斤とクロックムッシュについて、実際の売れ残りと予測結果の分だけ生産した際の売れ残りの比較を表す。売れ残りの数は増えているが、売り切れが多いため、実際には予測通り商品が売れた可能性がある。

表4 売れ残りの数が増えたもの

日付	食パン1斤				クロックムッシュ				
	生産数	実績	売れ残り	予測	生産数	実績	売れ残り	予測	売れ残り
8月31日	11	11	0	12	20	20	0	15	0
9月1日	16	16	0	11	14	14	0	14	0
9月2日	24	23	1	16	12	12	0	17	5
9月3日	12	11	1	16	4	3	1	19	16
9月7日	13	13	0	12	10	10	0	15	5
9月8日	7	7	0	11	16	16	0	14	0
9月9日	14	14	0	16	12	12	0	16	4
9月10日	11	11	0	16	24	18	6	18	0
9月14日	16	16	0	12	9	9	0	15	6
9月15日	5	5	0	11	22	19	3	14	0
9月16日	12	12	0	16	20	18	2	16	0
9月17日	15	15	0	16	24	24	0	18	0
	売れ残り合計		2	28			12		36

以上のことから、生産計画を立てるときは、売り上げを最大にするのか、売れ残りを最小にするのか、どちらを優先するのか考える必要がある。

4.6 定休日を除いた予測

これまでの予測はすべて定休日を含めた予測である。中間発表で、定休日を除いた場合のほうが予測の精度が上がるのではないかと指摘があり、定休日を除いた予測を実行した。

次の表 5 は、定休日を含めた場合と除いた場合、それぞれの予測と実績を比べ、差を出したものである。あまり差が変わらなかった商品が多かったが、表 5 の印をつけた商品は差が大きくなり、売り切れや売れ残りが増えてしまった。

以上のことから、定休日を含めたままのほうが精度が良かった為、定休日を含めた予測を予測結果として使用している。

表 5 定休日を除いた予測と実績

	食パン1斤			食パン2斤			クラパンベリー			フランスパン		
	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差
2022/11/16	13	19	-6	9	5	4	21	17	4	15	14	1
2022/11/17	13	7	6	9	6	3	21	22	-1	15	18	-3
2022/11/18	13	11	2	9	12	-3	21	19	2	15	16	-1
2022/11/19	13	10	3	10	13	-3	20	31	-11	14	18	-4
	チョコ粒じ			クロワッサン			抹茶					
	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差
2022/11/16	12	17	-5	36	49	-13	23	13	10			
2022/11/17	12	17	-5	36	11	25	23	26	-3			
2022/11/18	12	17	-5	36	50	-14	23	27	-4			
2022/11/19	15	30	-15	38	64	-26	25	28	-3			
	ワインダー			クックムッシュ			フレンチトースト					
	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差	予測	実績	差
2022/11/16	27	20	7	21	12	9	6	10	-4			
2022/11/17	27	18	9	21	16	5	6	0	6			
2022/11/18	27	16	11	21	17	4	6	10	-4			
2022/11/19	22	30	-8	26	24	2	6	0	6			

5 問題の定式化

記号の定義

定数

- I : パンの種類の集合
- p_i : パン i の価格 (利益)
- k_i : パン i に必要な小麦の量
- m_i : パン i の販売予測量
- σ_i : パン i の販売予測量の標準偏差
- M : 1 日に使用する小麦の量
- L : 小麦の期待廃棄量の上限
- P : 期待利益の下限

変数

x_i : パン i の生産量

準備

$E(x_i)$: パン i を x_i だけ生産したときの売上個数の期待値

$$E_i(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} t f_i(t) dt$$

ただし、 $f_i(t)$ は平均 m_i 、標準偏差 σ_i の正規分布の密度関数。

$$F_i(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} f_i(t) dt$$

上記の正規分布の分布関数。

今回の販売個数予測では、Prophet による時系列予測を行った。Prophet のモデル式は以下のとおりである。

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t$$

$y(t)$: 予測する変数

$g(t)$: トレンドの項

$s(t)$: 周期性の項

$h(t)$: 祝日などのイベント効果の項

ε_t : 正規分布に従う誤差項

Prophet のモデル式の誤差項が正規分布に従っているため、最適生産モデルの際にも正規分布を使用する。

5.1 最適化モデル 1

廃棄する小麦粉の期待値の上限を決めてその条件下で期待利益最大

目的関数

$$\max. \sum_{i \in I} p_i E_i(x_i) \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{i \in I} k_i x_i \leq M \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} k_i \max \{0, x_i F_i(x_i) - E_i(x_i)\} \leq L \quad (3)$$

$$x_i = 1, 2, 3, \dots (i \in I) \quad (4)$$

数式の説明

- (1) 目的関数として、パンの期待利益を最大にする。
- (2) 生産するパンに使用する小麦粉の量は M 以下にする。
- (3) 廃棄する小麦粉の量の期待値は L 以下にする。
- (4) パンの生産量は 0 を含む自然数。

5.2 最適化モデル 2

期待利益の下限を決めてその条件下で廃棄する小麦粉の期待値最小

目的関数

$$\min. \sum_{i \in I} k_i \max \{0, x_i F_i(x_i) - E_i(x_i)\} \quad (5)$$

制約条件

$$\sum_{i \in I} k_i x_i \leq M \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} p_i E_i(x_i) \geq P \quad (7)$$

$$x_i = 1, 2, 3, \dots (i \in I) \quad (8)$$

数式の説明

- (5) 目的関数として、廃棄する小麦粉の量の期待値を最小化する。
- (6) 生産するパンに使用する小麦粉の量は M 以下にする。
- (7) パンの期待利益が一定以上にする。
- (8) パンの生産量は 0 を含む自然数。

今後、これらのモデルを解き、各パンについての最適な生産量を求める予定である。

6 Excel を用いた最適生産モデルの実行

6.1 実行方法

Excel のソルバーを用いて生産計画を行う。定数はハンスペーター・ペーターより提供していただいた数値に加え、Prophet により得られた予測値と標準偏差を用いた。実際に用いたファイルは以下のようなものである。M, L, P は本来ならば店舗で働く人たちがその日の状況に合わせてもらうのが好ましいが今回は貰ったデータにある販売個数、廃棄個数から M, L, P を求めた。また、Prophet から求められた予測生産数から大きく離れないように生産個数の範囲を決めた。

表 6 Excel ファイル例

パンの種類	売価	原価	予測値	標準偏差	生産量	原料使用量	上段販売残り	中段販売残り	下段販売残り	廃棄	小麦廃棄	総原価
食パン1斤	356	143.92	17	4	0	0	0	0	0	10.2	27.2	0
食パン2斤	713	287.84	16	4	0	0	0	0	0	9.6	25.6	0
フランスパン	300	143.92	24	4	0	0	0	0	0	14.4	38.4	0
クランベリー	338	67.73	25	4	0	0	0	0	0	15	40	0
チョコねじ	301	62.7	20	4	0	0	0	0	0	12	32	0
クロワッサン	252	34.2	40	4	0	0	0	0	0	24	64	0
抹茶	342	68.04	25	4	0	0	0	0	0	15	40	0
ウインナー	395	45.6	23	4	0	0	0	0	0	13.8	38.8	0
クロックムッシュ	310	23.99	21	4	0	0	0	0	0	12.6	33.6	0
フレンチトースト	220	28.78	6	4	0	0	0	0	0	3.6	9.6	0
					0	0	0	0	0	130.2	347.2	0

このファイルを基準にして制約条件を足すことにより最適生産モデルを実行していく。

6.2 最適生産モデル 1

実行結果

5.1 の最適生産モデル 1 を実行した結果は以下の様になった。生産量は 234 個、原料使用量は 14959.93g、売れ残り個数は 37.52313 個、売上金額期待値は 62873.55 円、売れ残り金額は 15074.45 円、小麦の廃棄量は 2915.451g となった。

6.3 最適生産モデル 2

実行結果

5.2 の最適生産モデル 2 を実行した結果は以下の様になった。生産量は 184 個、原料使用量は 14993.85g、売れ残り個数は 17.3895 個、売上金額期待値は 54394.52 円、売れ残り金額は 8295.479 円、小麦の廃棄量は 2053.384g と

なった。

6.4 考察

各パンの生産個数を比較する為、表 7 を作成した。最適生産モデル 1 は単価が高いパン（クランベリー、クロワッサン、ウインナー、クロックムッシュ、フレンチトースト）を予測値より多く生産していることで売上期待値を大きくしている。逆に最適生産モデル 2 では単価を重要視するのではなく予測値に寄せにいくことにより小麦の廃棄量を減らしている。生産個数を比べた際に最適生産モデル 1 では 234 個、最適生産モデル 2 では 184 個であった。また、売れ残り金額期待値は、最適生産モデル 1 では 15074.45 円、最適生産モデル 2 では 8295.479 円であった。よって生産数を 50 個増やして売上金額期待値を最大化にすることにより売れ残り金額期待値が最適生産モデル 2 より約 80 % も増えている。また、増産したパンの 40 % ほどが廃棄をされる。そのため最適生産モデル 1 を使用するの土日や祝日等来客人数が予測できないほど多い時に向いており、最適生産モデル 2 では、平日のような来客人数が大体予測できる日に使用することが向いていると考察できる。

表 7 生産数の比較

パンの種類	予測値	最適生産モデル 1	最適生産モデル 2
食パン 1斤	17	11	14
食パン 2斤	16	10	12
フランスパン	24	15	20
クランベリー	25	27	22
チョコねじ	20	20	16
クロワッサン	40	46	37
抹茶	25	21	22
ウインナー	23	36	20
クロックムッシュ	21	33	17
フレンチトースト	6	9	4

7 おわりに

本研究を通して、ベーカリーで働く職人の労働環境の改善に向け、パンの販売数予測・生産計画問題を解決し、実際の現場で導入することを目標とした販売個数予測と生産計画を作成するシステムの試作に取り組んできた。

今回作成した最適生産モデルを、今後はベーカリーの現場に導入していくことで、生産計画の際に、利益最大化、廃棄を減らす期待ができる。

今後、このノウハウをもとに、他のベーカリーでも適用可能か、更に導入を拡大し、実験データを増やしていきたい。そして現場の声を聞き、希望に沿ったシステムを作成する事で担当者が扱いやすいシステムとなるよう努めたい。

参考文献

- [1] Sean J. Taylor Benjamin Letham (2018) Forecasting at Scale, The American Statistician, 72:1, 37-45, DOI: 10.1080/00031305.2017.1380080