

連続プログラミングの

ロックセット方法による

牛乳集荷最適路線の確定

小林 康 平

一、連続プログラミングの

ロックセット方法の理論

農業協同組合や企業にとって、トラックによる原料の集荷と製品の配達は重要な業務である。牛乳・野菜・果物等の農家からの集荷、また肥料・飼料・農薬等の農家への配達然りである。その際トラックが最短距離を走るのは、運搬時間と費用の節約をもたらし、流通過程の改善につながるであろう。

事前に原料の集荷地点が決められている場合に、トラックが工場を出発して総ての集荷地点を経由して再び出発点の工場に戻る経路は幾通りもあり、その総数は地点の組み合わせの数に

等しい。集荷地点が N 箇所あるとすれば、その組み合わせは二分の $N!$ 箇所である。例えば地点が一〇ならばその組み合わせは一八万四四〇〇箇所、地点が五〇箇所にもなればその組み合わせは天文学的数字である。その中から最短距離の経路を見つけ出すことは至難の業と言わねばなるまい。

この種の問題はいわゆる「Traveling-Salesman Problem」と呼ばれるもので、その解法はダンチック(George E. Dantzig)・フルカーソン(Delbert R. Fulkerson)・シムンソン(Selmer M. Johnson)・ワグナー(Harvey M. Wagner)・ラヴィンドラン(A. Ravindran)等によって一応与えられているものがある特定の条件が満たされた場合にのみ実行解が得られ、現実の複雑な問題に素人が応用するのは容易でない。その点ロックセット方法は適用幅が広く、どんな事例でも簡単な計算で実行解が得られ、米国ではすでに実際問題へ適用した幾つかの例が見られる。わが国ではまだその適用例は見られないが、適用の余地は農業部門に限らず、輸送に関する多くの分野で可能であろう。本稿の目的はこの方法を用いて一調査地域の牛乳集荷路線の最短経路を確定しようというものである。

連続プログラミングのロックセット方法(Lockset Method of Sequential Programming)は、シムンソン(Leonard W. Schruben)とクリフトン(Ruth E. Clifton)によって共同で

開発された。最初に公表されたのは『米国農業経済学会誌』五〇巻四号(一九六九年十一月)で、両氏の共著による論文“The Lockset Method of Sequential Programming Applied to Routing Delivering and Pick up Tracks”である。参考のためにこの論文の一部を引用してその基本的な原理を簡単に述べたい。

ロックセット方法を説明するために仮定の問題をもちいる。

「一台のトラックが工場を起点として出発し四ヶ所の集荷所を経由して再びこの工場へ戻る場合、いかなる順でこれらの集荷所を経由するのがトラックの総走行距離を最小にするか」。これはいわゆる “Traveling-salesman problem” の一般的問題と全く同じ単数路線の問題である。だがロックセット方法による解法は後に示すように異なる。さらに複数路線の問題は二台以上のトラックが幾つかの集荷所に向かい同時に出発するが、各集荷所にはいずれかのトラックが唯一回経由するという条件の下で、全トラックの総走行距離を最小にする経路を確定することであり、ロックセット方法の開発によって初めて実行解が得られることになった。ここではロックセット方法の説明を単数路線の場合についてだけ示すので、複数路線については前掲の論文を参照されたい。なお本稿で最適化とは総走行距離が最小になる場合を指す。

前述の仮定問題について簡単化のために工場を P_0 とし、四ヶ所の集荷所をそれぞれ P_1, P_2, P_3, P_4 とすると、工場と集荷所の距離および集荷所相互の距離は第一表に示すとおりである。

例えば工場 P_0 から集荷所 P_1 への距離は三四キロ、集荷所 P_2 から P_3 へは二六キロである。(この場合もし試行錯誤で最小路線を選ぶならば、一二通りの路線の組み合わせを作り、そのそれぞれの距離を計算して、その中から最短距離の線を選ぶということになるであろう。)ロックセット方法では、まずもし工場 P_0 から集荷所 $P_1, \dots, P_4$ へそれぞれ直接往復する場合を想定し、その場合に要するであろう距離を基準解とする。第一図Aがそれで、この場合には総走行距離は最大となるであろう。以下最適解を求める過程に従って原理を説明しよう。

まず第一は、工場 P_0 を除いて集荷所 P_1, P_2, P_3, P_4 について可能な総ての対を作り、そのリストを作ることである(第二表右欄)。

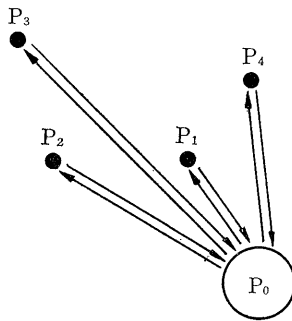
第二には、その各対について距離節約係数(Distance Saved Coefficient、以下DSCと略す)を計算する。DSCとは集荷点 P_i と P_j を経由することによってそれぞれ別に經由する場合よりも短縮される分の距離のことで、次のように計算される。すなわち第二図Aは、 P_0 からそれぞれ一〇キロ離れた P_i と P_j を経由する場合であるが、トラックが P_0 から出発して P_i と P_j を別々

第1表 例題における工場と集荷点相互間の距離

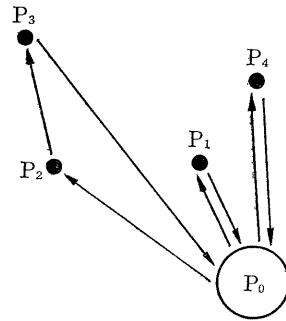
(単位: km)

集荷点へ	工場から (P_0)	集荷点1から (P_1)	集荷点2から (P_2)	集荷点3から (P_3)
1 (P_1)	34			
2 (P_2)	47	17		
3 (P_3)	67	34	26	
4 (P_4)	48	23	34	31

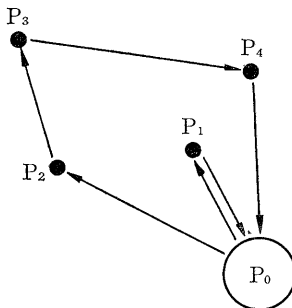
第1図 例題における集荷点を路線に統合させていく方法



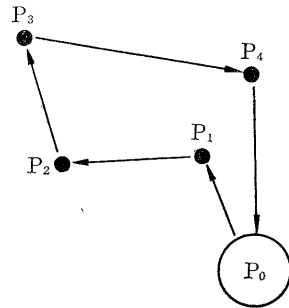
A. 基準解



B. P_2, P_3 を結合する第1統合

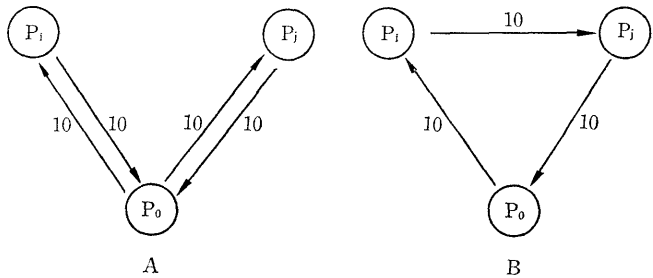


C. P_3, P_4 を結合する第2統合



D. P_1, P_2 を結合する第3統合

第2図 説明図：集荷点 P_i と P_j を路線に統合することにより節約された距離



第2表 例題における集荷点の対と距離節約係数

対		距離節約係数			
P_i	P_j	$P_0 P_i$	$P_0 P_j$	$P_i P_j$	DSC
P_2	と P_1	47	34	17	64
P_3	と P_1	67	34	34	67
P_3	と P_2	67	47	26	88
P_4	と P_1	48	34	23	59
P_4	と P_2	48	47	34	61
P_4	と P_3	48	67	31	84

に往復すると、その総走行距離は四〇キロである。
ところが同図Bのように P_0 から P_i と P_j を連続して走ると三〇キロであり、A図と比較して一〇キロの節約をもたらしたわけだ、これがDSCと呼ばれるものである。

DSCを計算する一般方程式は、

$$P_0P_i + P_0P_j - P_iP_j = \text{DSC}$$

ここで、 P_0 ：トラック出発点

P_i ：集荷所 i

P_j ：集荷所 j

P_0P_i ： P_0 と P_i の間の距離

P_0P_j ： P_0 と P_j の間の距離

P_iP_j ： P_i と P_j の間の距離

この例題で計算されたDSCは第二表の通りである。つまり第二表は集荷所 $P_1, \dots, P_4$ を二つずつ対にした総ての組み合わせについて、工場 P_0 を発ってこの対を経由して再び工場に戻る経路のDSCを計算して一覧表にしたものである。

第三は、第二表を用いてDSCの大なる順から集荷点を結合させて最短距離の経路を決めていく過程である。同表でDSCの一番大きい値は八八で、そ

の経路は P_0, P_2, P_3, P_0 (またはその逆でもよい)である。この値はすでに述べたように P_0 を起点として P_2 と P_3 を別々に往復する距離の合計よりも、 P_0 から P_2 と P_3 を経由して P_0 へ戻る連続した経路の方が八八キロ節約し得ることを示している。

次は実行可能な解であるための検定である。その条件は、

(1)、各集荷所とも少なくとも一方の端は出発点と連結していること (つまり同一集荷所を出発して再びそこに戻るための必要条件)。

(2)、各集荷所とも互いに異なった路線で結ばれていること (つまり同一集荷所を二度経由することを禁止するための必要条件)。

先に選ばれた P_0, P_2, P_3, P_0 の経路は、条件(1)と(2)を共に満たしているから受容される。この P_2, P_3 の対は先に述べたようにDSCが最大であり検定の二つの条件に合致するから、経路の最初の停車点として選ばれる。これを路線への“Locked in”閉じ込めと呼ぶ。第一図のBである。

次の操作はDSCの次に大きな値を持つ対の集荷所を選び出し、最初に選ばれた経路と連結させることである。第二表で見るとDSC八四を持つ P_3, P_4 である。この対は検定の二つの条件に合致するから受容される。従って経路は改善されて新しく P_0, P_2, P_3, P_4, P_0 となる。第一図のCである。

以上の残りの対のなかでDSCの最大の値は P_1, P_2 の対が持つ六七キロである。しかし今までの過程で選ばれた P_3 はその両端が P_2 と P_4 でつながれており条件(1)に合致しない。かくして P_3, P_1 の対は経路に結合されず棄却される。一度棄却された対は再び考慮されることはない。つまり“Locked out”締め出されたわけである。

次に大きなDSCを持つ対は P_1, P_2 である。 P_1 はまだその両端が P_0 に繋がりが、 P_2 は片端が P_0 に繋がっており、いずれも検定の二つの条件に合致している。改良された路線は今や $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_0$ (その逆も可)である。

もはや検定すべき対は残されていないから、以上で最適路線 (optimum route) が確定されたわけである。つまり $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_0$ またはその逆の経路で集荷所を経由するのが最短コースである (第一図D)。

以上のようにロックセット方法は、極めて簡単な原理に基づく計算で最適解を得ることが可能である。これを Lockset Method と呼ぶのは、集荷所の各対が一路線で結ばれて、その部分が既定路線として一旦推定されると Locked in されて、もはや選択の範囲外におかれることである。そして路線を確定されるそれぞれの過程で、選考の対象となる集荷所の対の片端はいままで確定された路線に Locked in されるか、あるいは

Locked out されるかのいずれであり、その検定を経て路線が確定されていくからである。

注(一) Dantzig, George E., *Linear Programming and Extension*, Princeton, 1963.

Wagner, Harvey M., *Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions*, Prentice-Hall, 1969.

二、応用—牛乳集荷の最適路線の確定

1 距離節約係数(DSC)の指標

この方法を適用したのは福岡県酪農協同組合連合会の一つ、福岡地方酪農協同組合で、トラックの配置や路線の設定が合理的であるかどうかを検討するためであった。昭和四八年五月に同組合傘下の支部や集乳所を訪ね、同時点における集乳の実態を調査した⁽²⁾。

ここでロックセット方法を適用するのに必要な資料は

- (1) 同農協が保有して稼動し得る集乳用トラックの数とそれぞれの積載可能容量
- (2) 同農協傘下の全集乳所の一日当たり牛乳出荷量
- (3) 牛乳処理工場と各集乳所間の距離、および各集乳所相互間の距離

である。DSCの指標は(3)の距離のみとした。

調査時点における福岡地方酪農協同組合の集乳組織の実情は次の通りである。牛乳処理工場は福岡市と久留米市に各一カ所ずつあり、総数六四カ所の集乳所のうち三〇カ所が久留米工場へ、三四カ所が福岡工場へ集荷されている。集乳所はバルクーラーの施設を備えている。各集乳所の一日当たり出荷量は稿末の付表一の通りで、この地域の牛乳生産が最盛になる四月末日から五月にかけて最大約三千余キログラム、最小約一〇〇キログラムである。集乳にあたるトラックはタンクローリー車で七台あり、規模別に見ると積載可能量五〇石(九三八一キログラム)が一台、同三五石(六五六七キログラム)が四台、同二五石(四六九〇キログラム)が二台である。これらのトラックが集乳にあたる路線の数は、久留米工場が六本(一日に三五石積みトラック二台二往復、同二五石積みトラック二往復)、福岡工場が七本(一日に五〇石積みトラック二往復、同三五石積みトラック二台で三往復、同二五石積みトラック一台二往復)ある。各路線の詳細については付表二に示したとおりで、トラックの積載可能量、トラックが經由する順位に並ぶ集乳所名、工場から集乳所および集乳所間の距離、一日当たり出荷量が記入されている。

さてロックセット方法を適用するためにはまず集乳所間のD

第3表 集乳路線の現状と計算結果の比較

集乳路線	現 状			計 算 結 果		
	トラックの 積載可能量	距 離	集 乳 量	トラックの 積載可能量	距 離	集 乳 量
	kg	km	kg	kg	km	kg
工場Ⅰ：						
No. 1	6,567	76	6,327	6,567	76	6,327
No. 2	6,567	53	6,467	6,567	53	6,467
No. 3	6,567	36	4,997	6,567	32	6,529
No. 4	6,567	67	4,554	6,567	69	6,567
No. 5	4,690	25	3,545	廃 止		
No. 6	4,690	30	4,637	4,690	30	4,637
合 計		287	30,527		267	30,527
工場Ⅱ：						
No. 7	9,381	119	6,544	6,567	119	6,544
No. 8	9,381	97	7,510	9,381	98	9,130
No. 9	6,567	62	6,125	9,381	71	8,075
No. 10	4,690	39	3,065	4,690	39	3,065
No. 11	4,690	67	3,570	廃 止		
No. 12	6,567	119	6,235	6,567	110	6,235
No. 13	6,567	55	6,342	6,567	55	6,342
合 計		558	39,391		492	39,391

SCが推計されねばならない。具体的には次のような作業を経てDSCを推計した。

① 調査対象地域の道路網がはっきりしている二五万分の一の地図を用意し、その上に福岡酪農協の集乳所の現路線を全部記入し、同農協集乳担当職員の手助けを得て工場から集乳所および各集乳所間の距離を計った。この場合工場と各集乳所間の距離および既存路線のトラックが立ち寄る順位の集乳所間の距離は、すでに同農協によって実測されており正確な数字が容易に得られた。しかし、総ての集乳所についてDSCを計算するためには、現在トラックが走っている路線以外についても、もし走ればどの程度のDSCが得られるかを推計しなければならないから、全集乳所六四カ所の相互の距離を計らなければならない、それは極めて煩雑な作業であった。

② 路線の決定には、まず各集乳所間のDSCを計算して複数路線の方法を用いた。実際の計算作業はシュルーベンが作製したプログラムを用いて、米国カンサス州立大学経済学部のコМПЮーターで行った。

2 計算結果による改善の方法

計算結果を現状の路線と対比してみると、第三表の通りで次のような変化がみられる。

① 福岡地方酪農協の総集乳路線距離は現在工場Ⅰで二八七キロ、工場Ⅱで五五八キロあるが、計算結果は工場Ⅰが二六七キロへと二〇キロ（約七％）減少し、工場Ⅱでは四九二キロへと六六キロ（約一二％）減少している。

② 総路線距離が計算結果減少した理由は、工場Ⅰでは路線 No. 5（距離二五キロ）、工場Ⅱでは No. 11（同六七キロ）が廃止されたことが大きく影響している。廃止された路線の集乳は、路線 No. 5 には集乳所 No. 18 は路線 No. 4 へ移り、同 No. 19 は路線 No. 3 へ移り、路線 No. 11 には集乳所 No. 4 が路線 No. 9 へ、同 No. 45 は路線 No. 8 へ移ったことによる。

③ 集乳所 No. 59 は現状では路線 No. 13 に属しているが、計算結果では路線 No. 12 と No. 13 の両方に属し、いずれの路線でも集乳し得るようになった。これは集乳所 No. 59 が路線 No. 12 の集乳所 No. 53 から、また路線 No. 13 の集乳所 No. 60 から等しく三キロの距離であり、どちらの路線で集乳しても農協全体の集乳路線には影響されないからである。

④ 現状よりも計算結果の距離が増加した路線は、No. 4（増

加分二キロ）、No. 8（同一キロ）No. 9（同九キロ）の三本で、他は同等または減少している。

注（2） この酪農協を対象として、かつて筆者小林は、昭和

三九年から四〇年にかけて牛乳の出荷と集乳に関する克明な調査を行い、その結果は『本誌』第二巻第二号（昭和四三年四月）に「牛乳の出荷および集乳費用の研究」と題して掲載され、またより一層詳細な調査資料を含めて福岡県酪農協同組合連合会から『牛乳の出荷及び集乳費用の研究——福岡県F酪農協同組合連合会を中心として——』（昭和四三年三月）が刊行されている。

三、考 察

調査対象農協の集乳路線は現在合計一三本あるが、これに対して計算結果は二路線を廃止しても他の路線で全集乳所の牛乳を集乳し得ることを示している。二路線の廃止に伴うトラックの運転労働時間、諸経費の節約を考えると、改善される余地は極めて大きい。

ただし、この結果が実際に採用され得るかどうかは、その前に計算に用いた資料の各集乳所間の道路がもう一度吟味されなければならぬであろう。計算に用いた距離は物理的な長さだけでなく、ここで考察されていない道路の勾配、路面の状態、

交通量については、現地の天候や他の諸条件によって影響を受けるかもしれないからである。

〔付記〕

本稿は、福岡県での実態調査により得たデータに基づいて取り纏めたものであるが、研究の手法および計測作業について、米国カンサス州立大学経済学部教授 L・W・シュルーパー氏から貴重な示唆とご協力をいただいた。

シュルーパー教授は、ロックセット方法の開発者であり、本法の適用についてご助言を得るとともに、カンサス州立大学のコンピューターを利用し、同教授の開発したプログラムによって筆者の送ったデータを計測していただくという、多大のご厚意をかたじけなくした。心から感謝する次第である。

付表1 出荷量最盛期における集乳所別1日当たり出荷乳量

(昭和48年4月末日から1週間の平均)

(単位: kg)

	集乳所名	乳量		集乳所名	乳量
No. 1	上津	780	No. 33	宮野	1,086
2	追分	1,015	34	朝倉	625
3	安武	1,382	35	久喜宮一二	2,347
4	三瀨	720	36	杷木	540
5	八丁弁田	198	37	甘木	625
6	大和	713	38	中原	1,529
7	柳川	712	39	石原	1,032
8	大川	807	40	上浦	945
9	羽犬塚	1,001	41	金福	814
10	水田	1,612	42	蜷城	3,190
11	長浜	728	43	筑紫	1,177
12	古川	1,656	44	夜須	1,950
13	新庄	1,516	45	馬田	1,620
14	西田	1,673	46	宇美	863
15	八女農	108	47	植木	1,746
16	大淵	540	48	篠栗	1,246
17	黒木	717	49	粕屋	1,093
18	長峰	357	50	内野	502
19	稲富	3,188	51	入部	1,829
20	木塚	1,442	52	金武	734
21	与田一二	2,859	53	波田江	1,457
22	勿体島	336	54	怡土	1,310
23	合川	476	55	雷山	1,353
24	弓削	599	56	荻浦	925
25	味坂	830	57	福吉	443
26	金島	752	58	志登	747
27	紫刈中部	545	59	周船寺	1,044
28	常持	1,255	60	池田	1,145
29	山本	474	61	志摩	479
30	山川	1,536	62	泊	978
31	朝高	105	63	太郎丸	1,614
32	三奈木	1,216	64	今宿	1,082

付表2 集乳路線別のトラック規模, 集乳所名, 距離, 乳量
〔工場—I:久留米〕

集乳路線	トラック 積載可能量 (kg)	集 乳 所 名	距 離 (km)	集 乳 量 (kg)
No. 1	6,567	工場から No. 1	5	780
		No. 2	6	1,015
		No. 3	1	1,382
		No. 4	6	720
		No. 5	6	198
		No. 6	12	713
		No. 7	6	712
		No. 8	6	807
		工場まで	28	
			76	6,327
No. 2	6,567	工場から No. 30	8	1,536
		No. 29	3	474
		No. 28	5	1,255
		No. 27	7	545
		No. 26	4	752
		No. 25	10	830
		No. 24	5	599
		No. 23	5	476
		工場まで	6	
			53	6,467
No. 3	6,567	工場から No. 9	12	1,001
		No. 10	4	1,612
		No. 11	3	728
		No. 12	3	1,656
		工場まで	14	
			36	4,997
No. 4	6,567	工場から No. 13	13	1,516
		No. 14	1	1,673
		No. 15	3	108
		No. 16	22	540
		No. 17	9	717
		工場まで	19	
			67	4,554
No. 5	4,690	工場から No. 19	11	3,188
		No. 18	7	357
		工場まで	7	
			25	3,545
No. 6	4,690	工場から No. 20	12	1,442
		No. 21	1	2,859
		No. 22	2	336
		工場まで	15	
			30	4,637

〔工場―Ⅱ：福岡〕

集乳路線	トラック 積載可能量 (kg)	集 乳 所 名	距 離 (km)	集 乳 量 (kg)	
No. 7	9,381	工場から	No. 31	39	105
			No. 32	2	1,216
			No. 33	6	1,086
			No. 34	3	625
			No. 35	8	2,347
			No. 36	2	540
			No. 37	27	625
		工場まで		32	
				119	6,544
No. 8	9,381	工場から	No. 42	40	3,190
			No. 41	3	814
			No. 40	7	945
			No. 39	5	1,032
			No. 38	3	1,529
		工場まで		39	
				97	7,510
No. 9	6,567	工場から	No. 43	18	1,177
			No. 46	15	863
			No. 47	3	1,746
			No. 49	7	1,093
			No. 48	5	1,246
		工場まで		14	
				62	6,125
No. 10	4,690	工場から	No. 51	16	1,829
			No. 50	2	502
			No. 52	5	734
		工場まで		16	
				39	3,065
No. 11	4,690	工場から	No. 45	33	1,620
			No. 44	10	1,950
		工場まで		24	
				67	3,570
No. 12	6,567	工場から	No. 53	25	1,457
			No. 54	3	1,310
			No. 55	3	1,353
			No. 56	5	925
			No. 58	12	747
			No. 57	25	443
		工場まで		46	
				119	6,235
No. 13	6,567	工場から	No. 59	21	1,044
			No. 60	3	1,145
			No. 61	2	479
			No. 62	2	978
			No. 63	6	1,614
			No. 64	3	1,082
		工場まで		18	
				55	6,342

付表3 計 算 結 果

〔工場一Ⅰ：久留米〕

集乳路線	トラック 積載可能量 (kg)	集 乳 所 名	距 離 (km)	集 乳 量 (kg)
No. 1	6,567	変 更 な し	76	6,327
No. 2	6,567	変 更 な し	53	6,467
No. 3	6,567	工場から No. 9 No. 10 No. 11 No. 19 工場まで	12 4 3 2 11 32	1,001 1,612 728 3,188 6,529
No. 4	6,567	工場から No. 12 No. 13 No. 14 No. 15 No. 16 No. 17 No. 18 工場まで	14 2 1 3 22 9 11 7 69	1,656 1,516 1,673 108 540 717 357 6,567
No. 5		廃止する。集乳所 No. 18は路線 No. 4へ、集乳所 No. 19は路線 No. 3へそれぞれ委譲する。		
No. 6	4,690	変 更 な し	30	4,637

〔工場Ⅱ：福岡〕

集乳路線	トラック 積載可能量 (kg)	集 乳 所 名	距 離 (km)	集 乳 量 (kg)
No. 7	6,567	工場から No. 36 No. 35 No. 34 No. 33 No. 32 No. 31 No. 37 工場まで	59	540
			2	2,347
			8	625
			3	1,086
			6	1,216
			2	105
			7	625
			32 119	6,544
No. 8	9,381	工場から No. 42 No. 41 No. 40 No. 38 No. 39 No. 45 工場まで	40	3,190
			3	814
			7	945
			7	1,529
			3	1,032
			5	1,620
			33 98	9,130
No. 9	9,381	工場から No. 44 No. 43 No. 46 No. 47 No. 48 No. 49 工場まで	24	1,950
			6	1,177
			15	863
			3	1,746
			7	1,246
			5	1,093
			11 71	8,075
No. 10	4,690	変 更 な し	39	3,065
No. 11		廃止する。集乳所 No. 44 は路線 No. 9へ、集乳所 No. 45 は路線 No. 8 へそれぞれ委譲する。		
No. 12	6,567	工場から No. 53 No. 57 No. 56 No. 55 No. 54 No. 53 No. 59 工場まで	33	747
			25	443
			17	925
			5	1,353
			3	1,310
			3	1,457
			3 21 110	6,235
No. 13	6,567	工場から No. 64 No. 63 No. 62 No. 61 No. 60 No. 59 工場まで	18	1,082
			3	1,614
			6	978
			2	479
			2	1,145
			3	1,044
			21 55	6,342