

遺伝的アルゴリズムを用いた都市ごみ 収集作業員スケジューリング手法の開発

保倉修一¹・内海秀樹²・松井三郎³・寺田悟⁴

¹京都大学大学院 工学研究科 修士課程 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学大学院助手 地球環境学堂 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 Ph.D. 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学大学院 工学研究科 修士課程 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

ごみの収集運搬事業は都市衛生に直結するため、清掃事務所はそのサービスの水準を高く維持することが要求される。そのため清掃事務所では、特に各収集地域の習熟や職員間の不公平感を解消するために公平に作業を分担したり、職員同士の組合せを調整したりすることに対応している。このように清掃事務所における人員配置の持つ意味は大きい、様々な制約の下で適切な人員配置を行うことは非常に困難である。

本研究では、収集員配置問題を職員同士の組合せ回数および各班の担当回数を均等化する2目的最適化問題に置き換え、遺伝的アルゴリズムを用いてパレート最適集合を得ることで、人員配置を立案する手法を開発した。そして、実際の人員配置履歴をもとにシミュレーションを行い、本手法の有効性を検証した。

Key Words : *Municipal Solid Waste, Collector, Personnel Station, Pareto Optimal Solution, Genetic Algorithms*

1. はじめに

ごみの収集運搬事業は都市衛生および都市景観に直接影響を与えるものであり、そのサービス水準を常に一定レベル以上に維持することが要求される。このため、収集運搬作業を行う清掃事務所は労務管理に気を配り、職場の環境を整える必要がある。特に各職員の能力に見合った公平な作業の分担が重要であり、清掃事務所における人員配置の持つ意味は大きい。しかし、人員配置は、膨大な数の職員の組合せが存在し、かつ複雑な制約があることから高度な熟練を要する作業となっている。このため、現在の方法を見直し、その手法を開発することは意義があると考えられる。

収集運搬システムの効率化の観点から、収集経路の最適化等の試みがあるが、実用化には至っていないのが現状である。この一因として、実際に作業を行う収集員の配置についての視点の欠落が考えられる。例えば、コストの点で収集経路を最適化しても、収集員への負荷が増大するならば、作業の継続が困難になると予想される。このため、収集運搬システムの効率化を考える上でも人的資源の配分を扱うことが重要であると認識している。

以上を踏まえて、本研究ではまず、ある市の清掃事務所において聞き取り調査を行い、人員配置の方法および問題点を整理した。続いて人員配置の基礎となる計算手順を提案し、シミュレーションを行って検証した。

2. 清掃事務所における人員配置の事例調査

(1) 清掃事務所の業務および人員配置の概要

収集作業は収集員2名、運転手1名からなる班によって行われる。運転手は収集車の運転のみを、収集員はごみの積み込み作業のみを行い、収集員のうち1名が班の責任者である収集班長を務める。各班には用いる収集車、収集するごみの種類および収集コースが予め定められている。人員配置はこの班に職員を割当てる形で、作業長と呼ばれる職員によって行われる(図-1)。

主な配置基準は、全ての収集地域の習熟および職員間の不公平感の解消などの理由から、各職員がそれぞれの班を均等に担当すること、および、緊張感の保持のためできるだけいつも異なるメンバーで班を構成することの2点である。しかし、一部の負荷の大きい班

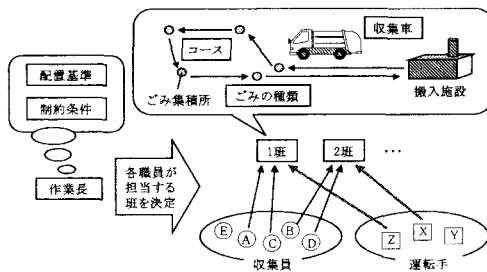


図-1 収集員配置問題

(収集車の積載量が大きく作業量が多い班など)や職員同士の組合せによっては、職員の能力や特徴(年齢や性別など)や職員間の相性を考慮して班の構成を変更する場合もある。

また、収集作業は肉体労働であり、以前は労務災害が多発したことから、健康管理のために職員が有給休暇を消化する傾向がある。このため、事務所に出勤してくるメンバーは毎回異なる。これが毎回人員配置を行わなければならない、担当する班を機械的にローテーションさせる方法の適用が困難な所以である。

(2) 人員配置の現状

現在の人員配置方法は非常に複雑なものとなっており、配置を立案する作業長の負担は大きい。また、真に公平な分担ができていないかどうか、記録はあるが手計算により確認するのは困難であるのが現状である。

現在の方法では、公平に分担するために負荷の大きい特殊な班から優先的に配置を決定する仕組みになっている。そのため、優先順位の低い標準的な班は残った職員で分担することになり、均等に分担されていない可能性が高い。そこで、清掃事務所から提供された作業報告書をもとに、各職員が各班を担当した回数と職員同士の組合せ回数を集計して履歴を作成したところ、両者について偏りが認められた。ただし、対象職員は収集員のみで、期間は現在の方法で配置が一巡する13週間である。特に偏りが生じていると予想された標準の班について、その担当回数集計値を分布として示したものが図-2である。特殊な班の担当や休暇も考慮すれば、各職員はこの期間中に各班をほぼ1回ずつ担当することになる。しかし、図-2からは、分布の色の濃淡が不均一なことから、担当回数に偏りがあることが確認でき、現在の人員配置方法では本来の目的を十分に果たすことが困難と推察される。



図-2 各班の担当回数の分布

3. 提案するスケジューリング手法

(1) 人員配置問題の設定

収集員の配置問題を、「限られた人員という制約の下で、各職員の各班の担当回数および各職員同士の組合せ回数を均等化する」という2目的最適化問題に置き

換える。ただし、計算対象は班の数が最も多い標準的な班の収集員のみで、その他の特殊な班は従来通りの優先順位・方法で配置を決定することを前提とする。

(2) 遺伝的アルゴリズムと多目的最適化問題

本手法で用いる遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms; 以下 GA とする) は、生物の進化の過程に着想を得た解の探索手法である。GA では、最初に複数の染色体 (解を表現する記号列) を解候補として生成し、以降の手順を決めた世代数だけ繰り返す。各々の染色体を目的関数に適用して評価値を求め、相互に比較して優秀なものを次世代の計算対象に残す (選択)。それ以外の染色体に対する一定の比率に応じて、染色体の一部を替えたり (突然変異)、二つの染色体の一部を入れ替えたり (交叉) して解候補を生成し、再び目的関数に適用するという作業を定められた回数 (世代) だけ繰り返して行い、準最適解を探索する手法である。ただし、より良い解を求めるためには、GA の演算子 (選択、交叉、突然変異の方法) やパラメータ (世代数や交叉率等) を適切に設定する必要がある。

一般に、多目的最適化問題は全ての目的関数を最小 (あるいは最大) 化する最適解が存在するとは限らず、合理的な妥協解、つまりパレート最適解を求めることが有効なアプローチである。また、パレート最適解は1つではなく複数個存在する場合が多い。これに対して GA は、複数個の解を保持して計算する並列計算を特徴としており、解を集合として探索することが可能であるため、効率的な探索が期待できる。

(3) 計算手順

提案するスケジューリング手順を図-3に示す。班の数に対応する人数の収集班長を決定した後、GA を用いて職員同士の組合せ回数が可能な限り均等となるように収集班長と班員の組を作る (この操作を以下「組分け」と呼ぶ)。このとき GA で保持していた複数の解それぞれに対して、さらに GA を用いて各職員の各班の

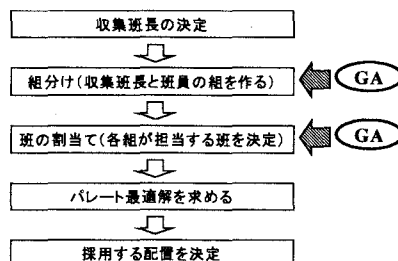


図-3 提案するスケジューリング手順

担当回数が可能な限り均等となるように、各組が担当する班を決定する（この操作を以下「班の割当て」と呼ぶ）。こうして得られた解の集合から、職員同士の組合せ回数および各班の担当回数についてのパレート最適解を抽出する。パレート最適解から採用する1つの解（配置）の選択は、作業長など現場の職員が行うと想定している。本手法は、収集班長と班員の組合せを探索する際に、制約を満たさない組を予め除くため、2段階に分けているのが特徴である。また、これにより、GAの染色体の表現方法が整理され、適用が容易になる。

(4) GAの適用方法

a) 組分け

班が N 班だけあるとし、これらの班を担当する $2N$ 人の収集員にそれぞれ $0, 1, \dots, 2N-1$ の番号を与える。「組分け」の前のStepで決定された N 人の収集班長の番号から成る配列 $C = (c_0, c_1, \dots, c_{N-1})$ および、班員の番号から成る配列 $S = (s_0, s_1, \dots, s_{N-1})$ をおく。 c_k 番の収集班長と s_k 番の班員が組となるとし、その組は k 番の組として識別する。配列 C は固定し、配列 S を「組分け」段階の解、すなわち GA の染色体として定義する。GA の演算過程では、様々な解 S について、その評価値は次に示す目的関数 F_{pair} の値として計算され、より評価値が小さい解が目的関数の値を小さくする優秀な解として次世代に残る。

$$\min F_{pair} = \sum_{k=0}^{N-1} \left(1 - \frac{1}{1+m_k} \right) + \alpha \cdot \sum_{k=0}^{N-1} a_k \quad (1)$$

式(1)において、 m_k は k 番の組がある日を基準として計画対象日の前日までに組まれた回数であり、各職員の履歴が反映される。 α はペナルティパラメータで N 以上の定数、 a_k は k 番の組が基準を満たさない（新米職員同士や相性の悪い組合せ等）場合は1の値、基準を満たす場合は0の値をとる変数である。

式(1)第1項の小括弧内の値は組1組当りの評価値を表しており、その組が今まで組まれた回数が少ないほど値が小さくなる。そして、各組の評価値の和を目的関数に定義することで全体として評価し、各職員がそれぞれ組んだ回数の少ない職員と組になる解が、GA適用時に優秀な解として選択されやすくなる。各組の評価値を1未満に定義した理由は、仮に上限を設定しない場合、特定の評価値の大きい組によって全体の評価が左右されてしまうからである。また、組んだ回数の平均や分散を用いなかった理由は、回数の変動部分のみを扱うことで計算負荷を軽減するためである。

式(1)第2項は、新米職員同士の組合せ等、円滑な作業の遂行上望ましくない組が生成することを防ぐための項である。解 S が基準を満たさない組を含んでいる場合、その組の数に応じてペナルティパラメータ α が

加算されて評価値が大きくなり、GAの演算過程で淘汰されることになる。式(1)第1項の値は N 未満であることから、基準を満たさない組を1組でも含んでいたら淘汰されやすくなるよう、 α の値は N 以上の定数に設定する。また、変数 a_k の設定、すなわち各組が基準を満たすかどうかの設定は、作業長等現場の職員によって行われることを想定している。

以上のように、基準を満たし、かつ、ある程度優秀な解 S を GA を用いて複数生成する。次の「班の割当て」は、ここで生成した複数の解 S それぞれに対して行う。このとき、偏りなくパレート最適解の探索を行うため、「組分け」の評価値が優れた解を生成するだけでなく、多様な解を次のStepに進めることにより「班の割当て」の探索領域を拡大することが重要であり、GAの演算子やパラメータを設定する際の基準となる。

b) 班の割当て

N 個の班にそれぞれ $0, 1, \dots, N-1$ の番号を与える。班番号から成る配列 $T = (t_0, t_1, \dots, t_{N-1})$ をおき、 k 番の組は t_k 番の班の担当として対応させ、配列 T を「班の割当て」段階の解、すなわち GA 適用時の染色体として定義する。GA の演算過程では、様々な解 T について、その評価値は次に示す目的関数 F_{team} の値として計算され、より評価値が小さい解は次世代に残る。

$$\min F_{team} = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \left(1 - \frac{1}{1+n_{c_k, t_k}} \right) + \left(1 - \frac{1}{1+n_{s_k, t_k}} \right) \right\} \quad (2)$$

式(2)において、 $n_{w,x}$ は職員 w がある日を基準として計画対象日の前日までに班番号 x を担当した回数であり、各職員の履歴が反映される。式(2)は、各職員の各班の担当回数に関して、式(1)の第1項と同様の理由に基づいて設定したものである。

「組分け」では解の多様性も考慮する必要があったが、「班の割当て」では、定められた組分けの下で最も優秀な1つの解を探索するため、評価値に重点を置いて GA の演算子・パラメータを設定する必要がある。

4. シミュレーション

(1) 感度分析

本手法における GA の染色体の表現方法では、適用可能な交叉方法と突然変異方法が限られているため、特に選択方法、交叉率と突然変異率、染色体数、世代数に重点をおいて感度分析を行い、最も良い解が多く出現する時の設定を検討した。感度分析は、まず「組分け」、「班の割当て」それぞれ単独で行った。次に両者を組合せてシミュレーションを行い、抽出されるパレート最適解への影響について考察した。

a) シミュレーション条件

感度を明瞭に検出するため、班数等を次のように仮想的に設定した。班数は2.(2)で集計対象とした7班の倍の14班、収集員人数は28人とした。GAの演算子とパラメータ以外の影響を取り除くため、14人の収集班長の組合せを1通りに固定した。職員同士の組合せの制約は特に設定しなかった。職員同士の組合せ回数および各班の担当回数は、集計値の最大値がそれぞれ8回、4回であったことから、10週目から13週目の日を想定し、組合せ回数は0から8、班の担当回数は0から4の整数をランダムに生成して各職員の履歴を作成し、毎回同じ履歴を用いた。分析対象の演算子・パラメータ以外は、次の表-1に示す値を用いた。「班の割当て」単独でシミュレーションする場合は、組分けを1通りに固定した。また、解の質、多様性および計算の効率性の指標として、それぞれ評価値、染色体の種類数および計算時間を用いた。

表-1 GAのパラメータの設定

演算子・パラメータ	組分け	班の割当て
染色体数	150	150
世代数	200	300
選択方法	エリート保存方式 およびランク方式	
交叉方法	部分一致交叉	
突然変異方法	転座	
エリート保存率	0.5	0.1
交叉率	0.8	0.5
突然変異率	0.2	0.2

b) シミュレーション結果および考察

組分け、班の割当てをそれぞれ単独で感度分析を行ったところ、全ての項目について、値の大小の差はあったものの、その特性はほぼ一致した。これは、職員同士の組合せの制約を設定しなかったため、式(1)および式(2)の形の類似性が結果に反映したものと考えられる。このため、以下、班の割当ての結果のみを示す。

まず、交叉率および突然変異率の変化による評価値および染色体の種類数の変化をそれぞれ図-4、図-5に示す。これらの図は、班の割当てについて、交叉率および突然変異率をそれぞれ0.1から1.0の範囲で0.1刻みに変化させ、5回ずつ計500回シミュレーションを行い、その平均値を示したものである。計算時間は、交叉率、突然変異率の増加に比例して増加する結果となった。図-4より、交叉率および突然変異率の値が小さい方が評価値は小さくなるが、両者の値が0.5以下の範囲では、図-5より、交叉率よりも突然変異率の方が染色体の種類数の増加に対する寄与が大きいことが分かる。ただし、突然変異は強制的に染色体の一部分を替える

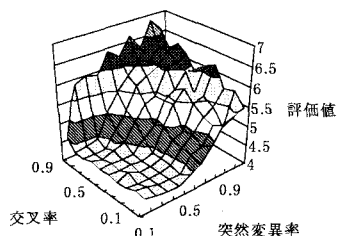


図-4 交叉率と突然変異率の変化による評価値の変化

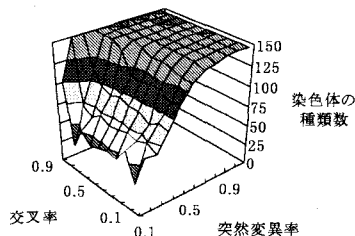


図-5 交叉率と突然変異率の変化による染色体の種類数の変化

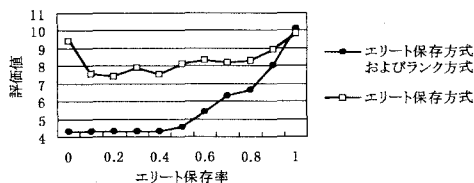


図-6 選択方法とエリート保存率の変化による評価値の変化

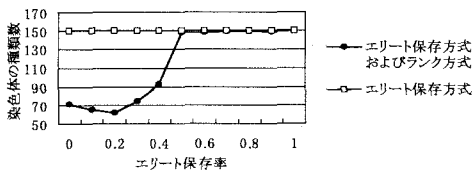


図-7 選択方法とエリート保存率の変化による染色体の種類数の変化

方法であり、染色体の種類数が増加しても、それらが優秀な解であるとの保証はないことに注意が必要である。

次に選択方法とエリート保存率の変化による評価値および染色体の種類数の変化をそれぞれ図-6、図-7に示す。これらの図は、「班の割当て」で、エリート保存方式のみかランク方式と併用した場合の2通りについて

て、エリート保存率を0から1.0まで0.1刻みに変化させてそれぞれ5回ずつシミュレーションを行い、その結果得られた評価値および染色体の種類数の平均値をとったものである。計算時間は、どちらの方式もエリート保存率の増加に比例して減少した。

エリート保存方式のみの場合は、エリート保存率によらず染色体の種類数は多いが、評価値の改善はあまり進まない結果となった。ランク方式を併用した場合は、評価値と染色体の種類数に関するトレードオフの関係が見られる。その関係は図-6、図-7に示したようにエリート保存率0.5の前後で大きく変化しており、この範囲では評価値は小さく、かつ染色体数の種類は多い。また、エリート保存方式では優秀な解を次世代に残すため、ランク方式を併用しエリート保存率0.5前後で調節することで、優秀かつ多様な解の集合を探索できると考えられる。

続いて、選択方法およびエリート保存率の変化がパレート最適解に与える影響を示す。次の図-8は、組分けと班の割当てを組合せたシミュレーションにおいて、組分けのみの選択方法とエリート保存率を変化させたときに得られたパレート最適解を示した図である。図中の凡例に示した4通りの条件についてそれぞれ3回ずつシミュレーションを行い、見易さのため、各回で得られたパレート最適解を線で結んでいる。

この結果の解釈は、図-6、図-7から説明可能である。ランク方式を併用した場合、組分け段階でのエリート保存率が小さい時は、組分けの評価値が小さく優れた解を発見しやすいが、染色体の種類数が少ないために班の割当て段階での探索領域が狭くなり、班の割当てでは良い解を発見することが困難になると考えられる。逆にエリート保存率が大きい時は、組分けの評価値は大きいが染色体の種類数が多く、班の割当てでは探索領域が拡大し、良い解を発見しやすくなると考え

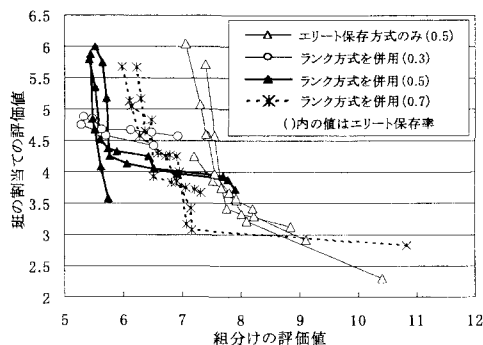


図-8 エリート保存率によるパレート最適解の変化

られる。エリート保存方式のみの場合は、組分けの評価値は大きいですが、染色体の種類数が多いことから班の割当てでは良い解を得やすいと考えられる。最終的にいずれの方式を採用するかは、本手法の使用者の選好（組分けと班の割当てのどちらを優先するか）による。

その他、染色体数や世代数等についても感度分析を行った。

(2) A市の清掃事務所への適用

a) シミュレーション条件

2.(2)で述べた集計の条件（職員、班、期間）と同じ条件の下で本手法を適用した。つまり、まず期間は、同じ13週間で、初日から1日ずつ順に計算した。1日分の計算は、その日の作業報告書から標準の班を担当した収集員を抽出し、本手法の適用対象とした。これは、特殊な班の担当は従来通りの方法で決定するという3.(1)で述べた前提に基づいている。職員同士の組合せ回数および各班の担当回数の履歴は、その日までの本手法による配置から集計したものをを用いた。

GAの演算子およびパラメータは次の表-2に示したものをを用いた。感度分析に基づき、エリート保存率は、組分けでは優秀かつ多様な解を求めるため0.7に、班の割当てでは解の質に重点をおいて0.1に設定した。また、染色体数や世代数は値が大きいほど良い解を発見できる可能性が高くなるが、計算時間が長くなることから解が収束する必要最小限の値に設定した。

また、パレート最適解から採用する解を選択する際は、本来なら現場の職員の選好によるが、ここでは便宜的に次のように決定した。パレート最適解の F_{pair} （あるいは F_{team} ）の値を小さい順に並べ、パレート最適解の個数が奇数個の場合は中央の解、偶数個の場合は中央の前後2個の解からランダムに一方を選択した。

また、本手法が提案する配置と実際の配置を比較するため、作業報告書から集計した職員同士の組合せ回数および各班の担当回数を用いて F_{pair} 、 F_{team} の値を計算し、実際の配置の評価値とした。1日の各班の作業

表-2 GAのパラメータの設定

演算子・パラメータ	組分け	班の割当て
染色体数	100	50
世代数	100	150
選択方法	エリート保存方式 およびランク方式	
交叉方法	部分一致交叉	
突然変異方法	転座	
エリート保存率	0.7	0.1
交叉率	0.8	0.5
突然変異率	0.2	0.2

負荷には差があるため、人員配置が公平に行われたかどうかは一定期間を通して判断することになる。そのため、実際の配置と比較する際は1日分の評価値を比較するのではなく、その日までの合計値を用いた。

b) シミュレーション結果

組分けおよび班の割当てについて、評価値の合計値の変化をそれぞれ図-9、図-10に示す。職員同士の組合せ回数については、実際の配置よりも若干良い結果を得られた。計算の対象外とした特殊な班もカウントしたため大きな差はでなかったと考えられる。一方、各班の担当回数については、実際の配置より十分良い結果を得られた。その分布を示すと図-11のようになっており、図-2と比較して、色の濃淡が均一になっていることが確認できる。

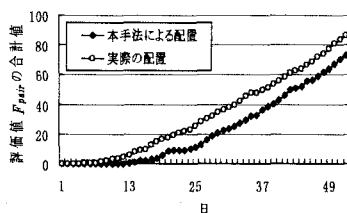


図-9 組分けの結果

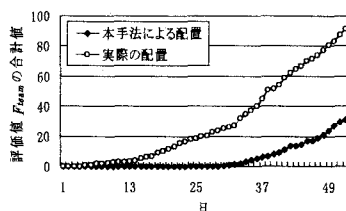


図-10 班の割当ての結果

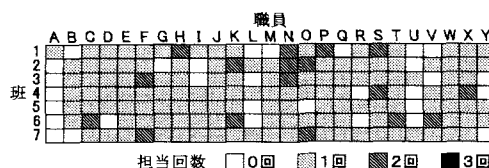


図-11 本手法による各班の担当回数の分布

また、1日分の計算時間は約20秒（CPU: Pentium IV、2.00GHz）であった。実際の配置は、作業前日に数十分かけて作成されている。今回は計算の対象外とした特殊な班や運転手を含めた全ての処理が数分単位で計算可能であるならば、当日の急な欠勤による配置の修正についても公平性に配慮した対応ができると予想される。

5. まとめ

本研究では、まず、聞き取り調査により都市ごみ収集作業員の人員配置問題について整理し、現在の配置方法では各班の担当回数などに偏りが見られたことを確認した。続いて、GAを用いて人員配置の候補を立案する手順を開発し、シミュレーションによりその有効性を検証した。

今後の展開としては、今回は計算対象外とした特殊な班や運転手を含めた人員配置システムを完成させ、実際に清掃事務所で試用することや、他の都市の事例調査などを考えている。

謝辞： 研究に協力していただいたA市環境局およびまち美化事務所の皆様に深く御礼申し上げます

APPLYING THE GENETIC ALGORITHMS TO COLLECTOR SCHEDULING FOR MUNICIPAL SOLID WASTES

Shuichi YASUKURA, Hideki UTSUMI, Saburo MATSUI and Satoru TERADA

To maintain good public health, it is necessary that the solid waste collection service should be maintained in good condition. In waste collection services, collector's schedule, especially distributing the works equally to each collector, is very important from the viewpoint of collectors' morale and experience. However, it's difficult to compose collector teams so that they can collect wastes efficiently, because there are many patterns of composing teams and a variety of restrictions.

The first step of this study is an investigation into the problem by interviewing and collecting records at the waste collection office in city 'A'. The next step is the development of a scheduling method which considers the Collector Scheduling Problem as a Multi-Objective Optimization Problem. The method can solve the problem by finding Pareto Optimal Solution, by means of the Genetic Algorithms. The last step is a demonstration that the method can provide a good solution as shown by applying it to the case of city 'A'.