

(Ⅱ-6)

日程・作業空間上制約のある 大規模土工計画のシステム化

Systems Approach to Planning of Large-Scale Earth-Moving
under Constraints on Schedule and Work Area

名古屋工業大学 和田 かおる*
名古屋工業大学 山本 幸司**

By Kaoru WADA, Koshi YAMAMOTO

従来、宅地造成工事やゴルフ場建設工事に伴う土工計画の策定には古典的輸送問題を適用したシステム化が行われてきた。しかし関西国際空港プロジェクトに代表されるような大規模沖合人工島建設工事では、単に土工の規模が拡大しただけでなく、埋立工事完了後の整地工事において、各種施設工事との関連上、空間的な並びに工程的な制約を受けることになる。そのため従来の土工計画システムでは対応できなくなっている。また運土計画を立てる際に、切土量、盛土量、輸送距離あるいは輸送単価のいずれかが確定量として把握できない場合も古典的な輸送問題としてはもはや定式化できない。本研究ではこのように不確定性を含む大規模土工に対してファジィ理論を導入したシステム化を試みるもので、関西国際空港建設工事を例にとり、ファジィ理論を用いた輸送問題の適用について検討する。

【キーワード】 大規模土工、輸送問題、ファジィ理論

1. はじめに

関西国際空港のような大規模埋立による沖合人工島の整地工事やゴルフ場建設工事等にもなる大規模土工では工期が長くなる。特に沖合人工島の建設では工期による時間的な制約だけでなく、海上工事であるがために空間的な制約を受ける。本研究ではこのような大規模土工において関連する土木工事を効率的に行うため、工事対象区域を各種施設建設計画に対応して工区分割し、各工区ごとに段階的に輸送問題を適用し運土計画を策定することを試みる。また、実際問題としては運土計画をたてる際に、切土量、盛土量、輸送距離（あるいは輸送単価）が確定量として事前に把握できないことが多いため、そのような場合に対してはファジィ理論の適用を試みる。そして最終的には不確定性を含む大規模土工計画に対してファジィ輸送計画問題の適用を試みるべ

く、その可能性について検討する。なお適用事例としては、現在工事が進められている関西国際空港建設工事を取上げる。

2. 需要量、供給量、輸送距離の確定性を考慮した輸送計画モデル

実際の土工では、現場の状況等により運土計画策定段階においてこれらの値を確定できないことも多い。したがって、切土量、盛土量、輸送距離の確定性により運土計画のパターン分類を行ない、それぞれのパターンごとに輸送計画モデルの定式化を行う。輸送計画はこのような3項目の確定性により表-1に示す8つのパターンに分類することができる。これらのうち、パターン1はヒッチコック・クープマンズの古典的輸送問題で対応できるが、パターン2～8については切土量、盛土量、輸送距離のいずれかに不確定要素が含まれているため、輸送問題にファジィ理論を適用することで対応する。なお、切土量、盛土量が制約条件であるのに対し、輸送距離は目的関数に含まれる係数で、切土量、盛土量と輸送距離

* 工学部社会開発工学科 052-732-2111
(ex2378)

** 工学部社会開発工学科 052-732-2111
(ex2378)

表-1 パターン分類

パターン	需要量		供給量		輸送距離	
	確定	不確定	確定	不確定	確定	不確定
1	○		○		○	
2	○			○	○	
3		○	○		○	
4		○		○	○	
5	○		○			○
6	○			○		○
7		○	○			○
8		○		○		○

とではモデル化における性質が異なること、および輸送距離に不確定要素が含まれる場合については問題が複雑となり、現段階では解析が困難であることを考慮し、本稿ではパターン2～4について検討することとし、輸送距離に不確定要素が含まれるパターン5～8については基本的な定式化のみを示す。各パターンの定式化は以下の通りである。(定式化において～は不確性を表す記号である)

【パターン1】

$$Z = c(\{x_{ij}\}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j$$

$$x_{ij} \geq 0, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$$

【パターン2～4】

$$Z = c(\{x_{ij}\}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \sim a_i$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \sim b_j$$

$$x_{ij} \geq 0, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$$

【パターン5～8】

$$Z = c(\{x_{ij}\}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \sim a_i$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \sim b_j$$

$$x_{ij} \geq 0, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$$

3. 輸送問題へのファジィ理論の適用

本章では切土量、盛土量に不確定要素が含まれるパターン2～4に対してファジィ理論の適用を試みる。定式化については上述の通りであるので、つづいて図-4に示す解法について説明する。

まず不確定要素を含む切土量、盛土量を、ファジィ数 $a_i = [a_i^1, a_i^1, a_i^2, \bar{a}_i^2]$ 、 $b_j = [b_j^1, b_j^1, b_j^2, \bar{b}_j^2]$ として扱う。図-1は切土量に対するメンバーシップ関数を示し、図-2は $a_i^1 = a_i^2$ となる場合で、このときメンバーシップ関数は三角形となる。盛土量についても同様である。

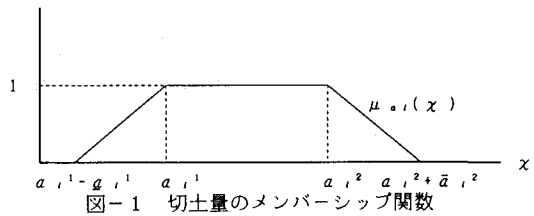


図-1 切土量のメンバーシップ関数

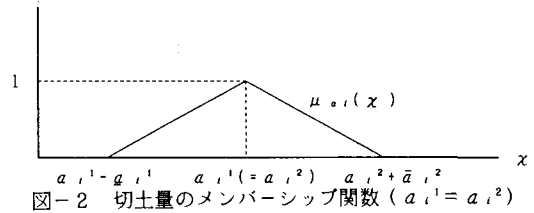


図-2 切土量のメンバーシップ関数 ($a_i^1 = a_i^2$)

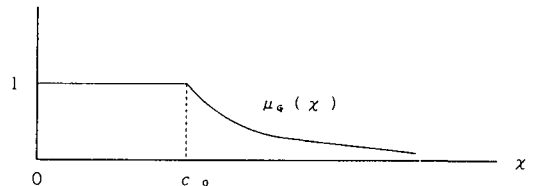


図-3 ファジィ目標Gのメンバーシップ関数

また目的関数に対するメンバーシップ関数 $\mu_g(x)$ を次式のように仮定する。

$$\mu_g(x) = \begin{cases} 1 & (x < c_0) \\ f(x) & (x \geq c_0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $f(x)$ は図-3に示すように、ある値 c_0 以下では1をとり、それ以上では0に向けて減少する制約関数とする。このように考えると、 $\mu_g(c(\{x_{ij}\}))$ は総仕事量 $c(\{x_{ij}\})$ に対する意思決定者の満足度を表すことになる。このようなファジィ輸送問題に対しパラメトリック計画法の考え方を適用すれば、切土量、盛土量にパラメータ r を含むパラメトリック輸送問題に変換できる。すなわち、表-

表-2 パラメトリック輸送問題

需要地 供給地	1	2	...	n	1*	2*	n*	FR	供給量	
1	C_{11}	C_{12}	...	C_{1n}	C_{11}	C_{12}	...	C_{1n}	M	$a_1^{1-}r\underline{a}_1^1$
2	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	M	$a_2^{1-}r\underline{a}_2^1$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	
m	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	M	$a_m^{1-}r\underline{a}_m^1$
* 1	C_{11}	C_{12}	...	C_{1n}	C_{11}	C_{12}	...	C_{1n}	0	$(a_1^{1-}-a_1^1)$ $+ (\bar{a}_1^1+\underline{a}_1^1)r$
* 2	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	0	$(a_2^{1-}-a_2^1)$ $+ (\bar{a}_2^1+\underline{a}_2^1)r$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	
* m	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	0	$(a_m^{1-}-a_m^1)$ $+ (\bar{a}_m^1+\underline{a}_m^1)r$
FD	M	M	...	M	0	0	...	0	0	$\sum_j(b_j^{1-}-b_j^1)$ $+r\sum_j(\bar{b}_j^1+\underline{b}_j^1)$
需要量	$b_1^{1-}r\underline{b}_1^1$	$b_2^{1-}r\underline{b}_2^1$	...	$b_n^{1-}r\underline{b}_n^1$	$(b_1^{1-}-b_1^1)$ $+ (\bar{b}_1^1+\underline{b}_1^1)r$	$(b_2^{1-}-b_2^1)$ $+ (\bar{b}_2^1+\underline{b}_2^1)r$	...	$(b_n^{1-}-b_n^1)$ $+ (\bar{b}_n^1+\underline{b}_n^1)r$	$(\sum_i a_i^{1-}-\sum_j b_j^1)$ $+ (\sum_i \bar{a}_i^1+\sum_j \underline{b}_j^1)r$	

2に示すようなsingle-stage型輸送問題となる。この表から判るように、パラメトリック輸送問題への変換にともない $M \times N$ の大きさの輸送計画問題が $(2M+1) \times (2N+1)$ と非常に大きな問題に変換される。表-2で与えられたパラメトリック輸送問題は乗数定理の適用により解くことができるが、その解はパラメータ r に依存するため、次式よりパラメータ r を求め、解 $\{x_{ij}\}$ を決定する。(ここで $\wedge$ は最小化を示す演算子である)

$$\mu_o(\{x_{ij}(r)\}) = \mu_q(\{x_{ij}(r)\}) \wedge (1-r) \rightarrow \max \quad (2)$$

ところで、輸送問題は需要量、供給量が整数で与えられた場合には最適解も整数となる性質があるものの、ここで説明してきた解法ではその保証がない。したがって、得られた解 $\{x_{ij}\}$ が整数ならばこの解が最適解となり計算はここで終了するが、求めた解が整数でなければ λ に上で求めた $\mu_o(\{x_{ij}(r)\})$ を代入し、図-4に示したフローに従って解の改善を行う。解の改善により求めた解が $\mu_o(\{x_{ij}(r)\}) \geq \bar{\lambda}$ を満たせばこの解が最適解となる。一方、 $\mu_o(\{x_{ij}(r)\}) < \bar{\lambda}$ であれば改めて $\lambda = \bar{\lambda}$ と置いて再び解の改善を行い、最適解が得られるまでこの操作を繰り返す。ここで λ は以下の式から求

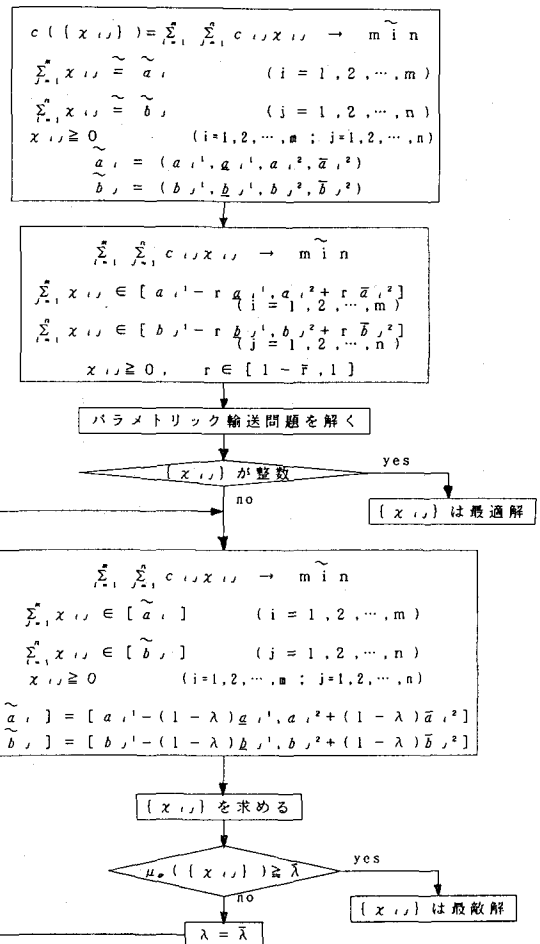


図-4 ファジィ輸送問題フロー図

まる変数である。

$$\bar{\lambda} = \max \{ \max \mu_{ai}(\chi), \max \mu_{bj}(\chi) \} \quad (3)$$

以上の結果、切土量、盛土量に不確定要素を含む場合の輸送計画問題がファジィ輸送計画問題として定式化され、その最適解が整数解として求められることになる。

4. 大規模土工へのヒッチコック・クーブマンズ型輸送問題の適用

(1) 大規模土工運土計画の考え方

大規模土工へのファジィ輸送計画問題の適用の前段階として、ここでは空間的に制約を受ける大規模土工に対する運土計画の立案方法について検討する。

大規模土工の場合、現場全体の切盛バランスを考えながら運土工事を行うと総仕事量最小化という目的の達成度は大きくなるが、土工が完了するまでの間、各種施設工事に着手することができなくなる。さらに、現在埋立工事が進められている関西国際空港建設工事のように、作業空間が限られ、かつ工期的余裕がない大規模土工では、施設建設工事を段階的に着手していかなければならないため、結論として現場全体を対象とした運土計画の立案は意味がなくなる。そこで本章では、施設建設工事の着工順序を考慮することによって工事対象区域がいくつかの工区に分割され、かつ工区ごとに施工していかざるを得ないような大規模土工を取り上げ、どのように輸送問題を適用すれば効果的な施工が可能となるかを検討する。ここでは関西国際空港建設工事を例にとり、各種施設建設計画に対応して工事対象区域をいくつかの工区に分割し、その後各工区ごとに輸送

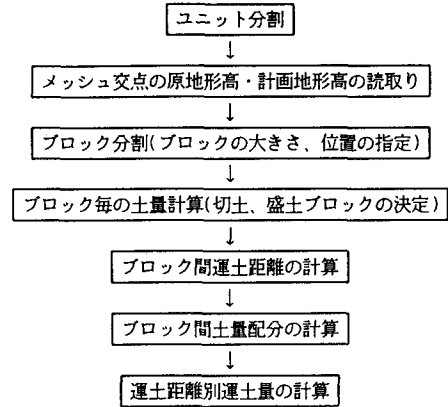


図-5 運土計画の手順

問題を適用して運土計画を策定していく方法を提案する。原則的には運土計画の手順を示した図-5の操作を各工区単位で行えばよいが、一般に個々の工区内で切盛土量が均合うことは少ない。そこで、切盛土量がバランスしない場合には次期工区を土捨場あるいは土取場として扱い、最終工区で現場全体として切盛バランスを検討するという考えが必要となる。これによって、時間的かつ空間的制約を受ける大規模土工計画問題はヒッチコック・クーブマンズ型輸送問題で対応できることになる。

(2) 適用事例

ここでは、4-(1)で提案した大規模土工運土計画へのヒッチコック・クーブマンズ型輸送問題の段階的適用事例として関西国際空港建設プロジェクトの空港島内整地工事を取り上げ、工事対象区域全体で一つの運土計画を立案する場合と比較し、その実行可能性の検討を行うことにする。

関西国際空港の建設工事では各種空港施設のうちターミナル施設の建設から着工するため、ターミナル施設用地から滑走路用地へと順に整地工事を進め

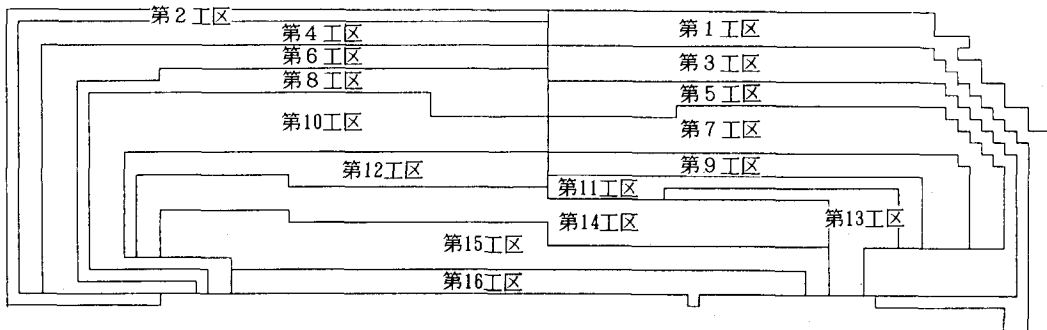


図-6 工区分割

ていくことを前提として工区分割が考えられている。その概略は図-6に示す通りである（第1期工事：第1工区、第2期工事：第2、3工区、第3期工事：第4、5工区、第4期工事：第6、7工区、第5期工事：第8、9工区、第6期工事：第10、11工区、第7期工事：第12、13工区、第8期工事：第14工区、第9期工事：第15工区、第10期工事：第16工区）。一般に整地工事において各工区の切土、盛土ブロックの大きさの設定は原地形が急峻か否かによっても異なるが、ここでは1ブロックを100m×100mと想定する。なお、工区分割は各種空港施設工事に対応して行うことから、その形状は一部不整形となるが、このような区域に関しては50m×100m、50m×150m等の不整形ブロック割りも考えていくことにした。

この事例では護岸工事の対象である空港島周辺区域に切土が、空港島内部の埋立工事部分に盛土が集中しているため、第1、3工区および第2、4工区では大量に土が余り、第5工区から第14工区ではかなり不足することになる。したがって、工区外への搬出土量あるいは工区外からの搬入土量が多くなり、

表-3 現場全体での運土量および仕事量（工区分割）

	運 土 量
100m以下	149.12
200m以下	281.30
300m以下	247.40
400m以下	110.75
500m以下	54.38
600m以下	56.46
750m以下	68.32
1000m以下	97.66
1001m以上	89.58
仕 事 量	447850.51

（単位：運土量は×2500m³、仕事量は×2500m³・m³）

表-4 現場全体での運土量および仕事量

	運 土 量
100m以下	27.46
200m以下	33.41
300m以下	61.22
400m以下	36.18
500m以下	44.85
600m以下	35.47
750m以下	68.41
1000m以下	55.34
1001m以上	85.21
仕 事 量	289901.56

（単位：運土量は×2500m³、仕事量は×2500m³・m³）

他工区へ及ぼす影響が大きくなると考えられる。しかし本研究では空港施設建設工事に対応して土工を行うため、工区内での切盛のバランスが悪い場合でも次期工区を土取場あるいは土捨場として扱い、各工区単位で土工を終了させることとした。

表-3は図-6のように現場を工区分割した場合に、上述した方法で最適運土計画を求めたときの輸送距離別運土量および総仕事量を示したもので、表-4は現場全体を対象として輸送問題を適用したときの最適運土計画の結果である。この結果から、現場全体で運土工事を行う方が総仕事量最小化という目的に対しては有効であること、そしてその差は主として短距離土工量に表れていることがわかる。これは工区分割を行ったことにより切土および盛土ブロックの数が増加し、余分な運土作業が発生したためと考えられる。しかしすでに述べたように、現場全体を対象として求めた運土計画は空港施設工事の着工順序を考慮していないことから、実行不可能となる場合が多いことに留意しなければならない。

5. ファジィ理論を適用した輸送問題の事例

ここでは関西国際空港の空港島整地工事において、各工区の切土量、盛土量の発生量が不確定となる場合を想定し、すでに提案したファジィ輸送計画問題の適用可能性を検討する。なお今回はその準備段階として、4-(2)で取り上げた事例における特定工区の一部に対しての適用を試みた。そして需要量、供給量のメンバーシップ関数 μ_{ai} 、 μ_{bj} を変化させ、これらが目的関数の値にどのような影響を及ぼすかを調べた結果、需要量、供給量の不確実性が大きくなるほど目的関数の値が大きくなることを確認した。また目的関数に対するメンバーシップ関数 μ_{θ} に対しても同様の結果が得られた。具体的な数値例は講演時に発表する。

また今回ファジィ輸送計画問題を適用した結果、次のような問題が起こった。表-2のパラメトリック輸送問題の表では、最初のM行の切土地区、N行の盛土地区の切土量、盛土量は現場内で処理されなければならないため、仮想盛土地区（FR）、切土地区（FD）との土の搬入、搬出を許さないよう、この間の輸送距離をM（大きな値）としている。しかし解の改善の段階において、このように輸送距離

をMとおいた場所に基底変数が入ってしまい、それ以後の計算が実行不可能となるケースが生じた。したがって、今後はこのようなケースに対しても対応できるよう、ファジィ輸送計画問題を改善していく必要がある。

このほかファジィ輸送計画問題のシステム化においては、パラメトリック輸送問題のプログラム化が困難となっている。プログラム化を困難にする原因としては次のことが考えられる。輸送問題では初期基底解を求める際、切土量 a_i と盛土量 b_j の大きさを比較する必要があるが、パラメトリック輸送問題の場合はこれらにパラメータ r を含むため、この r の値によって何パターンかの初期基底解が存在する。このため問題が複雑となり、プログラム化を困難にしている。したがって、現在のところパラメトリック輸送問題の前後はシステム化が完了しているが、パラメトリック輸送問題についてはシステムを以下のような方法で開発中である。すなわち、パラメトリック輸送問題において、パラメータ r の値が確定すれば従来の輸送問題に変換されることは表-2から明らかであることから、パラメータ r に適当な値を代入して最適解をもとめていくことになる。そして、この r を変化させて求めた最適解を式①に代入し、目的関数のメンバーシップ関数を決定する。 r の値を変化させて、いくつかの異なる初期基底解とそのときの r を求めるという方法である。

6. 結論

近年、海上空港等の大規模沖合人工島建設工事が増えている。これらは海上工事であることから、それに伴う大規模埋立工事の土工計画を策定する際には、工事期間が長いことに加えて作業空間上の制約を強く受けることになる。また、状況によっては切盛土工量が確定的の扱えない場合も生じてくる。そこで本研究では、古典的輸送問題を適用する従来型の運土計画システムは、もはやこのような大規模土工に対応できないと判断し、この計画にファジィ輸送計画の適用を試みたものである。

その結果、大規模土工において着工順序を考慮しながら工事区域をいくつかの工区に分割し、各工区ごとに輸送問題を適用すると、時間的、空間的制約への対応が可能となることを明らかにした。しかし

現場全体を一つの工区と考えるとブロック分割を行なう場合と比較すると、各工区単位で輸送問題を適用すべくブロック分割を行うとブロック数が増加し、その分、運土作業量が増え目的関数最小化に対応できなくなる可能性が大きいといえる。またファジィ理論を用いる場合は、需要量、供給量、目的関数に対するメンバーシップ関数をどのような基準のもとで決定するかが大きな問題となり、定式化においては従来の輸送問題よりもかなり大きなマトリックスを対象としなければならないという問題が生じる。しかし本研究によって、切盛土工量が不確定な大規模土工に対しても運土計画にファジィ理論が適用可能であることを示すことができた。

【参考文献】

- 1) Stefan CHANAS, Waldemar KOLODZIEJCZYK, Anna MACHAJ : A FUZZY APPROACH TO THE TRANSPORTATION ALGORITHM, Fuzzy Sets and Systems 11, pp.211-221, 1984.
- 2) Micheal OheIGEARTAIGH : A FUZZY TRANSPORTATION ALGORITHM, Fuzzy Sets and Systems 8, pp.235-243, 1982.
- 3) 紅林・山本 : 都市土木工事の残土輸送計画に関するシステムズアプローチ、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第4部、pp.179-180、1985.
- 4) 和田・山本 : 切盛土工量が不確定な場合の大規模土工のシステム化、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第4部、pp.66-67、1990.