

単体法の2段階解法(2段階目)と罰則付単体法

単体法の2段解法、適用の条件

等式標準形

minimize

$$z = -6x_1 + 6x_2$$

subject to

$$2x_1 + 3x_2 + x_3 = 6$$

① $-5x_1 + 9x_2 = 15$

② $-6x_1 + 3x_2 - x_4 = 3$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

人工問題の等式標準形

minimize

z

subject to

$$2x_1 + 3x_2 + x_3 = 6$$

$$-5x_1 + 9x_2 + x_5 = 15$$

$$-6x_1 + 3x_2 - x_4 + x_6 = 3$$

$$z - 11x_1 + 12x_2 - x_4 = 18$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \geq 0$$

① 係数が1の変数がなく定数項がゼロでない

② x_4 の係数と定数項で符号が異なる

→「 x_3, x_4 を基底変数、それ以外を非基底変数」とすると、非負条件を満たせない。→2段解法を利用する

単体法の2段解法、2段目

- 初期のsimplex表

z	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	x_6	定数	最大増加量
0		2		3		1		0	0	0	6
0		-5		9		0		0	1	0	15
0		-6		3		0	-1	0	1	3	
1		-11		12		0	-1	0	0	18	

- 1段目終了時のsimplex表

z	x_1	x_2	x_3	非	x_4	x_5	非	x_6	非	定数	最大増加量
0		1		0	$3/11$		0	$-1/11$		0	$3/11$
0		0		0	$-13/11$		1	$8/11$		-1	$9/11$
0		0		1	$5/33$		0	0		0	$20/11$
1		0		0	0		0	-1		-1	0

- 人工問題の最適解

$$(z, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (0, 3/11, 20/11, 0, 9/11, 0, 0)$$

- 1段目終了後の解法はどう進めるのか？

単体法の2段解法、2段目

- 人工問題の最適解から人工変数を除けば、
 $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (3/11, 20/11, 0, 9/11)$
基底変数: x_1, x_2, x_4 非基底変数: x_3

等式標準形

minimize

$$z = -6x_1 + 6x_2$$

subject to

$$2x_1 + 3x_2 + x_3 = 6$$

$$-5x_1 + 9x_2 = 15$$

$$-6x_1 + 3x_2 - x_4 = 3$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

基底変数の連立方程式

$$2x_1 + 3x_2 = 6$$

$$-5x_1 + 9x_2 = 15$$

$$-6x_1 + 3x_2 - x_4 = 3$$

の解は、人工問題の最適解

$$x_1 = 3/11$$

$$x_2 = 20/11$$

$$x_4 = 9/11$$

- 基底変数を x_1, x_2, x_4 非基底変数を x_3 として、単体法の手順を開始すれば良い

単体法の2段解法、2段目

- 基底変数: x_1, x_2, x_4 非基底変数: x_3
元の等式標準形からsimplex表を作る

Z	x_1	x_2	x_3	非	x_4	定数	最大増加量
0	2	3	1	0	0	6	
0	-5	9	0	0	0	15	
0	-6	3	0	-1	0	3	
1	6	-6	0	0	0	0	

- 一度連立方程式を解いて、基本解を得る

Z	x_1	x_2	x_3	非	x_4	定数
0	1	0	3/11	0	0	3/11
0	0	1	5/33	0	0	20/11
0	0	0	-13/11	1	0	9/11
1	0	0	-8/11	0	0	102/11

- (この例では)非基底変数の係数が全て負なので最適解

単体法の2段解法、2段目

- 元の標準形まで戻らなくても、人工問題の最終段階の simplex 表を削って

z	x_1	x_2	x_3	非 x_4	x_5	x_6	定数	最大増加量
0	1	0	3/11	0	-1/11	0	3/11	
0	0	0	-13/11	1	8/11	-1	9/11	
0	0	1	5/33	0	0	0	20/11	
1	0	0	0	0	-1	-1	0	

- 基本解を得ることができる

z	x_1	x_2	x_3	非 x_4	定数
0	1	0	3/11	0	3/11
0	0	0	-13/11	1	9/11
0	0	1	5/33	0	20/11

- z の行は？

単体法の2段解法、2段目

- 元の標準形まで戻らなくても、人工問題の最終段階の simplex 表を削って

z	x_1	x_2	x_3 非	x_4	定数
0	1	0	$3/11$	0	$3/11$
0	0	0	$-13/11$	1	$9/11$
0	0	1	$5/33$	0	$20/11$

- 目的関数値の段は、定義より計算

$$\begin{aligned}
 z &= -6x_1 + 6x_2 = -6\left(-\frac{3}{11}x_3 + \frac{3}{11}\right) + 6\left(-\frac{5}{33}x_3 + \frac{20}{11}\right) \\
 &= \frac{8}{11}x_3 + \frac{102}{11}
 \end{aligned}$$

z	x_1	x_2	x_3 非	x_4	定数
1	0	0	$-8/11$	0	$102/11$

- 非基底変数の係数が全て負なので最適解

2段階単体法(2stage simplex method)

第1段階:初期基底解を求めるための線形計画問題を解く

- ・元の問題の等式標準形に以下の操作を施し人工問題を作る。
 - (1)基底変数候補の係数が正でない制約式に人工変数を加える
 - (2)人工変数の総和から成る人工目的関数を定める
- ・人工問題の最適解を単体法を用いて求める

※初期基底変数はsimplex表の目的関数から消去しておく

※最適値が 0 ならば元の問題の初期基本解として利用できる

第2段階:元の問題と同等の線形計画問題を解く

- ・最終段階のsimplex表から人工変数を取り除き、元の目的関数の定義と併せて元の問題のsimplex表を作り単体法を適用する

※初期基底変数はsimplex表の目的関数から消去しておく

※補助問題のsimplex表に目的関数の行を加えて利用する

例題(単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

$$\text{maximize } z = x_1 + 2x_2$$

subject to

$$x_1 + x_2 \leq 2$$

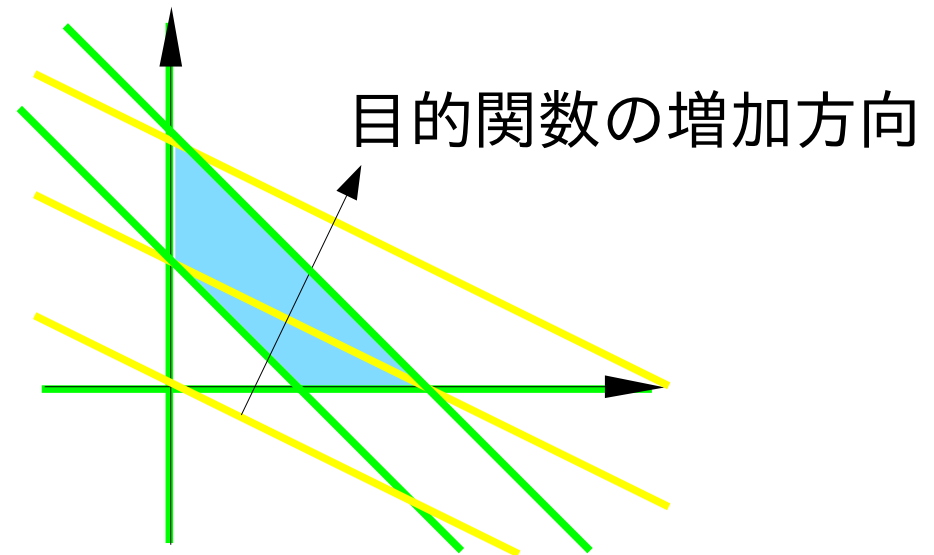
$$x_1 + x_2 \geq 1$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

例題(単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

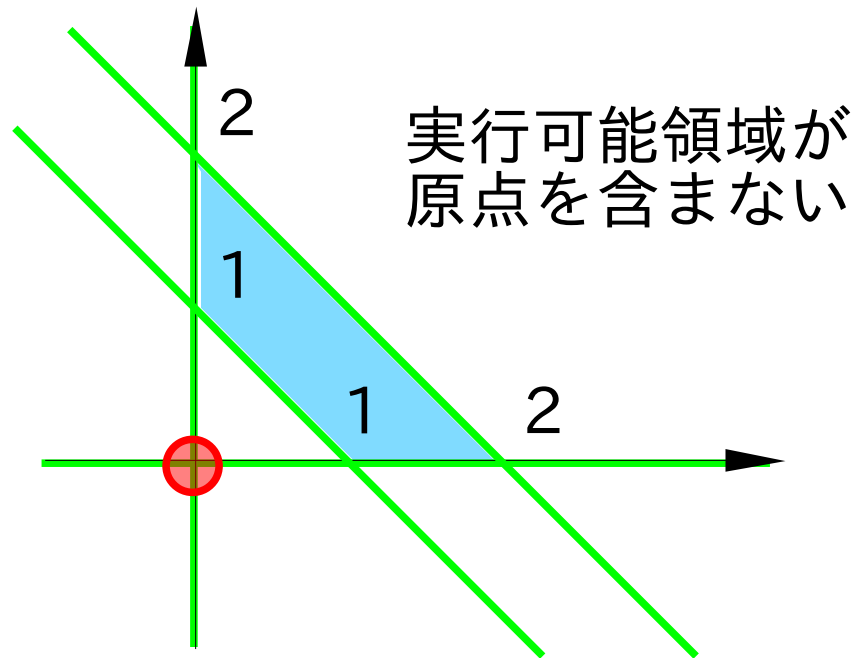
$$\begin{aligned} &\text{maximize } z = x_1 + 2x_2 \\ &\text{subject to} \\ &x_1 + x_2 \leq 2 \\ &x_1 + x_2 \geq 1 \\ &x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$



例題 (単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

$$\begin{aligned} &\text{maximize } z = x_1 + 2x_2 \\ &\text{subject to} \\ &x_1 + x_2 \leq 2 \\ &x_1 + x_2 \geq 1 \\ &x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$



例題 (単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

$$\text{maximize } z = x_1 + 2x_2$$

subject to

$$x_1 + x_2 \leq 2$$

$$x_1 + x_2 \geq 1$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$\text{minimize } z = -x_1 - 2x_2$$

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

等式標準形を導く

例題 (単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

minimize $z^* = x_5$

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* - x_5 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

同じもの

人工問題を導く

例題 (単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

minimize $z^* = x_5$

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* - x_5 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

2式を両辺加えて

人工問題を導く

例題 (単体法の2段解法)

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

人工問題の等式標準形

minimize z^*

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

例題 (単体法の2段解法)

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z^*	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	定数	最大増加量
0		1		1		1	0	0	2	
0		1		1		0	-1	1	1	
1		1		1		0	-1	0	1	

各行に1つずつ係数が1の変数を基底変数に選び、残りを非基底変数とする

連立方程式が
解けた状態に
対応する

$$\begin{array}{r}
 x_1 + x_2 + x_3 \\
 x_1 + x_2 \\
 z^* + x_1 + x_2
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 -x_4 + x_5 \\
 -x_4
 \end{array}
 = \begin{array}{l}
 2 \\
 1 \\
 1
 \end{array}$$

例題 (単体法の2段解法)

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く

z*	x ₁	x₂	非 x ₃	x ₄	非 x ₅	非 定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2 /1=2
0	1	1	1	0	-1	1	1 /1=1
1	1	1	1	0	-1	0	1

基底変数と非基底変数を交換して現れた連立方程式を解く

$$\begin{array}{l}
 x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{l}
 x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1
 \end{array}$$

z*	x ₁	x ₂	非 x ₃	x ₄	非 x ₅	非 定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	-1	1 $\times 2$
0	1	1	1	0	-1	1	1 $\times 1$
1	0	1	0	0	0	-1	0 $\times 1$

例題 (単体法の2段解法)

- 人工問題(= z^* 最小化問題)を解く

z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	0	-1	1	2	$-x_1$
0	1	1	1	0	-1	1	1	1	1	
1	0	1	0	0	0	-1	-1	0	1	

$$\begin{array}{l}
 x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1
 \end{array}
 \quad \Rightarrow \quad
 \begin{array}{l}
 x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* - x_5 = 0
 \end{array}$$

連立方程式を解いて得た関係式をもとにシンプレックス表を更新する

z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	0	0	1	1	-1	1	1	1	
0	0	1	1	0	-1	1	1	1	1	
1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	

例題 (単体法の2段解法)

- 非基底変数の係数が非正なので終了
 $z^*=0$ となる最適解が求まった → 成功

z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	0	0	1	1	-1	1	1		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
1	0	0	0	0	0	-1	0	0		

- 元の線形計画問題: $z = -x_1 - 2x_2$ の最小化問題を解く

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	0	0	1	1	-1	1	1		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	0	0	0	0	-1	0	0		
z	1	1	2	0	0			0		

- 人工問題専用の目的関数・変数を削除して、目的関数 z の定義式をsimplex表に記入すると x_1 に非ゼロ係数がつく

例題 (単体法の2段解法)

- 元の線形計画問題: $z = -x_1 - 2x_2$ の最小化問題を解く

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
	0	0	0	1	1	-1	1	1		
	0	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	0	0	0	0	-1	0	0		
z	1	1	2	0	0				0	

- 人工問題専用の目的関数・変数を削除して、目的関数 z の定義式をsimplex表に記入すると x_1 に非ゼロ係数がつく
 x_1 は基底変数なので方程式が解けていないことになる
 \Rightarrow 非基底変数 x_2, x_4 で置き換える

$$\begin{array}{l}
 x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* - x_5 = 0 \\
 z + x_1 + 2x_2 = 0
 \end{array}
 \quad \rightarrow \quad
 \begin{array}{l}
 x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* - x_5 = 0 \\
 z + x_2 + x_4 - x_5 = -1
 \end{array}$$

2段目の式 $x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$ を利用して x_1 を消去

単体法の2段解法、2段目=元の問題を解く までにすること

- 連立方程式(制約式)に注目すれば、次の通りになる

$$\begin{array}{r}
 x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1 \\
 z + x_1 + 2x_2 = 0
 \end{array}
 \quad \Rightarrow \quad
 \begin{array}{r}
 x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1 \\
 z + x_1 + 2x_2 = 0
 \end{array}$$

基底変数である x_1, x_3 の係数を払う

$$\begin{array}{r}
 x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* - x_5 = 0 \\
 z + x_1 + 2x_2 = 0
 \end{array}
 \quad \Rightarrow \quad
 \begin{array}{r}
 x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1 \\
 z^* - x_5 = 0 \\
 z + x_2 + x_4 - x_5 = -1
 \end{array}$$

基底変数である x_1, x_3 の係数を払う

- 元の問題を解く前にしていること=

人工問題についてしたこと \Rightarrow 一緒にやっつけてしまえば?

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 次の線形計画問題のグラフを描き、原点が実行可能領域でないことを確認のうえ、単体法の2段解法を用いて最適解を求めよ

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

人工問題の等式標準形

minimize z^*

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$(z + x_1 + 2x_2 = 0)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(or補助問題)の等式標準形に対応して simplex 表を作る
- 単体法を用いて第1段、第2段の線形計画問題を解く

人工問題の等式標準形

$$\text{minimize } z^*$$

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$(z + x_1 + 2x_2 = 0)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

z, z^*	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	定数	最大増加量
0	1	1	1	0	0	2	
0	1	1	0	-1	1	1	
z^*	1	1	0	-1	0	1	
z	1	1	2	0	0	0	

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	定数	最大増加量
0		1		1		1		0	0	2
0		1		1		0		-1	1	1
z^*	1	1		1		0		-1	0	1
z	1	1		2		0		0	0	0

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	定数	最大増加量
0		1		1		1		0	0	2
0		1		1		0		-1	1	1
z^*	1	1		1		0		-1	0	1
z	1	1		2		0		0	0	0

目的関数の定義式のある行にある非規定変数の係数のうち、正の係数を選ぶ。
 係数は正であれば良いが、より大きなものを選ぶ等としておくと良い。
 ここでは、大きさも同じ係数があるので、変数の添字が若い○の係数を選ぶことにする。

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	1	1	1	0	-1	0	1
z	1	1	2	0	0	0	0

目的関数の定義式のある行にある非規定変数の係数のうち、正の係数を選ぶ。

係
選
の

上の例では、○印の係数を選んだので x_1 を非基底変数から基底変数に移すことになる。

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2 / 1=2
0	1	1	1	0	-1	1	1 / 1=1
z^*	1	1	1	0	-1	0	1
z	1	1	2	0	0	0	0

x_1 の代わりに非基底変数となる基底変数を z^* 以外の x_3, x_5 から選ぶ。
 x_3 なら1行目は $x_1=2$ 、 x_5 なら2行目は $x_1=1$ になるので、 x_1 の値が小さくなる x_5 を非基底変数に選ぶ必要がある。

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2 /1=2
0	1	1	1	0	-1	1	/1=1
z^*	1	1	1	0	-1	0	
z	1	1	2	0	0	1	

$x_1 \rightarrow$ 基底変数、 $x_5 \rightarrow$ 非基底変数とすれば次のsimplex表が得られる。

z, z^*	x_1	x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	1	1	1	0	-1	0	1
z	1	1	2	0	0	0	0

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

この表は、元の制約式において、 $x_2=x_4=x_5=0$ を仮定したことを表す。

他の変数の値は x_2, x_4, x_5 を省いた関係式からなる連立方程式の解として得られる

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

↓ $x_2, x_4, x_5 = 0$ とする

$$x_1 + x_3 = 2$$

$$x_1 = 1$$

$$z^* + x_1 = 1$$

$$z + x_1 = 0$$

$x_1 \rightarrow$ 基底変数、 $x_5 \rightarrow$ 非基底変数とすれば、次のsimplex表が得られる。

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	0	2		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	1	1	0	-1	0	1	1		
z	1	1	2	0	0	0	0	0		

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

関係式に基本操作を施して変数の値を求めることができる。

同じ操作を元の制約式に施すことで元の制約式と同等で異なる表現の関係式を得ることができる。

$$\begin{array}{rcl}
 x_1 + x_2 + x_3 & = & 2 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 & = & 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 & = & 1 \\
 z + x_1 + 2x_2 & = & 0
 \end{array}$$

↑ 同じ操作を施す

$$\begin{array}{rcl}
 x_1 + x_3 & = & 2 \\
 x_1 & = & 1 \\
 z^* + x_1 & = & 1 \\
 z + x_1 & = & 0
 \end{array}$$

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	0	2		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	1	1	0	-1	0	1	1		
z	1	1	2	0	0	0	0	0		

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

関係式に基本操作を施して変数の値を求めることができる。

同じ操作を元の制約式に施すことで元の制約式と同等で異なる表現の関係式を得ることができる。

$$\begin{array}{rcl}
 & x_2 + x_3 & = 2 \\
 x_1 + x_2 & - x_4 + x_5 & = 1 \\
 z^* & + x_2 & - x_4 = 1 \\
 z & + 2x_2 & = 0
 \end{array}$$

同等の関係式が求まる

$$\begin{array}{rcl}
 & x_3 & = 1 \\
 x_1 & & = 1 \\
 z^* & & = 1 \\
 z & & = 0
 \end{array}$$

変数の値が求まる

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	0	2		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	1	1	0	-1	0	1	1		
z	1	1	2	0	0	0	0	0		

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

関係式に基本操作を施して変数の値を求めることができる。

同じ操作を元の制約式に施すことで元の制約式と同等で異なる表現の関係式を得ることができる。

この基本操作を表を使って実施する。

$$\begin{array}{rcl}
 & x_2 + x_3 & = 2 \\
 & x_1 + x_2 - x_4 + x_5 & = 1 \\
 z^* & + x_2 - x_4 & = 1 \\
 z & + 2x_2 & = 0 \\
 & \text{同等の関係式が求まる} & \\
 & x_3 & = 1 \\
 & x_1 & = 1 \\
 z^* & & = 1 \\
 z & & = 0 \\
 & \text{変数の値が求まる} &
 \end{array}$$

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	0	2		
0	1	1	1	0	-1	1	1	1		
z^*	1	1	1	0	-1	0	1	1		
z	1	1	2	0	0	0	0	0		

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は3/3

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4
0	1	1	1	1
0	1	1	1	0
z^*	1	1	1	0

変形後の目的関数式と制約式:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

基底変数: x_1, x_2, x_3

この基本操作を表を使って実施する。

z, z^*	x_1	x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	-1	1
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	1	1	1	0	-1	0	1
z	1	1	2	0	0	0	0

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

基底変数は 3/3

$$\begin{array}{rcl}
 x_3 + x_4 - x_5 & = & 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 & = & 1 \\
 z^* + x_1 + x_2 - x_4 & = & 1 \\
 z + x_1 + 2x_2 & = & 0
 \end{array}$$

$-1 \times 1 = -1$
 $1/1 = 1$

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4
0	1	1	1	1
0	1	1	1	0
z^*	1	1	1	0

この基本操作を表を使って実施する。

z, z^*	x_1	x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	-1	1
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	0	1	0	0	0	-1	0
z	1	1	2	0	0	0	0

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

基底変数は 3/3

$$\begin{aligned}
 x_3 + x_4 - x_5 &= 1 \\
 x_1 + x_2 - x_4 + x_5 &= 1 \\
 -x_5 &= 0 \\
 z + x_1 + 2x_2 &= 0
 \end{aligned}$$

z*

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4
0	1	1	1	1
0	1	1	1	0
z^*	1	1	1	0

この基本操作を表を使って実施する。

z, z^*	x_1	x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	-1	1
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	0	1	0	0	0	-1	0
z	0	1	1	0	1	-1	-1 $\times 1$

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 人工問題(=z* 最小化問題)を解く
6変数3制約なので、基底/非基底変数は 3/3

z, z^*	x_1	非 x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	1	1	1	1	0	0	2 / 1=2
0	1	1	1	0	-1	1	1 / 1=1
z^*	1	1	1	0	-1	0	1
z	1	1	2	0	0	0	0

z, z^*	x_1	x_2	非 x_3	x_4	非 x_5	非 定数	最大増加量
0	0	1	0	1	1	-1	1
0	1	1	1	0	-1	1	1
z^*	0	1	0	0	0	-1	0
z	0	1	1	0	1	-1	-1

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法

- 非基底変数の係数が非正なので終了
 $z^*=0$ となる最適解が求まった→成功

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	0	0	1	1	-1	1			
0	1	1	1	0	-1	1	1			
z^*	1	0	0	0	0	-1	0		0	
z	1	0	1	0	1	-1	-1		-1	

- 元の線形計画問題 = z の最小化問題を解く

z, z^*	x_1	x_2	非	x_3	x_4	非	x_5	非	定数	最大増加量
0	0	0	0	1	1	-1	1			
0	1	1	1	0	-1	1	1			
z^*	1	0	0	0	0	-1	0		0	
z	1	0	1	0	1	-1	-1		-1	

目的関数式の変形を1段目に含む2段解法 から罰則付単体法へ

- z と z^* を区別してみると、
単体法の2段解法=
 z と z^* , x_1, \dots の関係式を用いて、
まず z^* を最適化、次に z を最適化する方法
と言える
- z と z^* を同時に最適化する方法=罰則付単体法

罰則付単体法

- 2段解法の人工(補助)問題と元の問題を併せた罰則付の線形計画問題を作る

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

罰則付単体法

- 2段解法の人工(補助)問題と元の問題を併せた罰則付の線形計画問題を作る

等式標準形

minimize z

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$z + x_1 + 2x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

罰則付問題の等式標準形

minimize $z + Mz^*$

subject to

$$x_1 + x_2 + x_3 = 2$$

$$x_1 + x_2 - x_4 + x_5 = 1$$

$$z^* + x_1 + x_2 - x_4 = 1$$

$$(z + x_1 + 2x_2 = 0)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0$$

罰則付単体法

- 2段階法における人工(補助)問題と元の問題の関係
 - まず z^* を最小化して、次に z を最小化する
- 人工問題を同時に解く方法=罰則付単体法
 - z の最小化と人工変数=0 が成立すれば良い
 - z, z^* を同時($z^*=0$ 優先)に最適化=罰則付単体法
 - $z + M \times z^*$ (M は大きな数) を最小化する
 M の影響が大きいため z^* の最小化 $\rightarrow z^*=0$ が優先的に実現される

罰則付単体法

- 罰則付問題の等式標準形に対応して simplex 表を作る

$z+M$	z^*	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_4	定数	最大増加量
	0		1		1		1		0	0	2
	0		1		1		0		-1	1	1
	1	$1+M$		$2+M$			0		$-M$	0	M

- $M=100$ とした場合

$z+M$	z^*	x_1	非	x_2	非	x_3	x_4	非	x_4	非	定数	最大増加量
	0		1		1		1		0	0	2	$/1=2$
	0		1		1		0		-1	1	1	$/1=1$
	1	101		102			0		-100	0	100	

$z+M$	z^*	x_1	0 非	x_2	0	x_3	x_4	1 非	x_4	-1 非	定数	1	最大増加量
	0		1		1		1		0	0	2		$- \times 1$
	0		1		1		0		-1	1	1		$- \times 102$
	1		101		102		0		-100	0	100		

-1
 0
 2
 -102
 -2

罰則付単体法

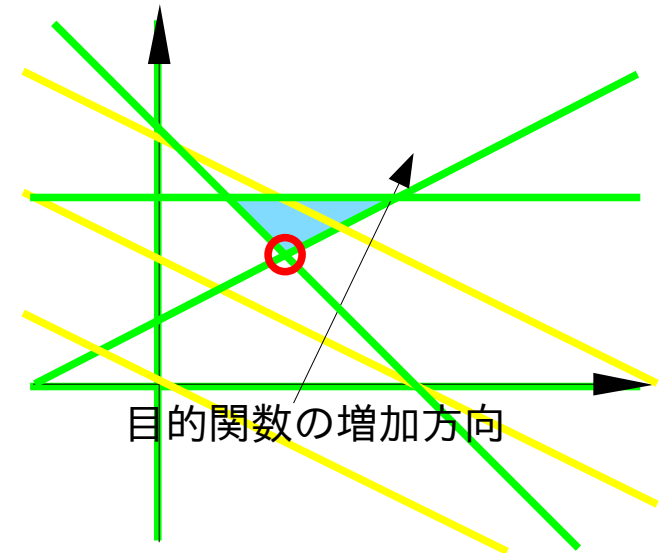
- 2段階法における人工(補助)問題と元の問題の関係
 - まず z^* を最小化して、次に z を最小化する
- 人工問題を同時に解く方法=罰則付単体法
 - z の最小化と人工変数=0 が成立すれば良い
 - z, z^* を同時($z^*=0$ 優先)に最適化=罰則付単体法
 - $z + M \times z^*$ (M は大きな数) を最小化する
 M の影響が大きいため z^* の最小化 $\rightarrow z^*=0$ が優先的に実現される
- 安全な罰則(M)を決める方法が無い
 - M を任意の数よりも大きい数として扱う
 - 2段階法と同じ手間になる

練習問題6

課題: 次の線形計画問題を罰則付単体法を用いて解く

$$\begin{aligned} & \text{maximize } x_1 + 2x_2 \\ & \text{subject to} \\ & x_1 + x_2 \geq 4, \quad x_1 - 2x_2 + 2 \leq 0 \\ & x_2 \leq 3, \quad x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

注意: 原点は実行可能領域ではありません
ヒント:



$$\begin{aligned} \min. \quad & z = -x_1 - 2x_2 \\ \text{s. t.} \quad & x_1 + x_2 \geq 4 \\ & -x_1 + 2x_2 \geq 2 \\ & x_2 \leq 3 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min. \quad & z = -x_1 - 2x_2 \\ \text{s. t.} \quad & x_1 + x_2 - x_3 = 4 \\ & -x_1 + 2x_2 - x_4 = 2 \\ & x_2 + x_5 = 3 \\ & x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0 \end{aligned}$$

練習問題6: 線形計画問題の導出

- 罰則付単体法

十分大きな M により、

$z + Mz^*$ の最小化で、

$z^* = 0$, z の最小化が

同時に実現する

$$\text{minimize } \tilde{z} = z + Mz^*$$

subject to

$$x_1 + x_2 - x_3 + x_6 = 4$$

$$-x_1 + 2x_2 - x_4 + x_7 = 2$$

$$x_2 + x_5 = 3$$

$$\tilde{z} + x_1 + (3M+2)x_2 - Mx_3 - Mx_4 = 6M$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \geq 0$$

z^{\sim}	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	定数
	1	1	-1			1		4
	-1	2		-1			1	2
		1			1			3
1	1	302	-100	-100				600

z, z^*	x1 非	x2 非	x3 非	x4 非	x5	x6	x7 非	定数
	1	1	-1			1		4 / 1 = 4
	-1	2		-1			1	2 / 2 = 1
		1			1			3 / 1 = 3
1	1	302	-100	-100				600

z, z^*	x1 非	x2	x3 非	x4 非	x5	x6	x7 非	定数
	1	1	-1			1		4
x1/2	-1/2	-1	2	-1/2	-1		1/2	1 1 2
		1			1			3
1	1	302	-100	-100				600

z, z^*	x1 非	x2 非	x3 非	x4 非	x5	x6	x7 非	定数
x-1	1/2	1	-1	1/2		1	-1/2	-1 4
	-1/2	1	1	-1/2	1		1/2	1 2
x-1	1/2	-1	1	1/2	1		-1/2	-1 3
x-302	1	151	1	302	-100	-100		-151 600
		-302		151			-302	

z, z^*	x1 非	x2	x3 非	x4 非	x5	x6	x7 非	定数
	3/2	0	-1	1/2		1	-1/2	3
	-1/2	1		-1/2			1/2	1
	1/2	0		1/2	1		-1/2	2
1	152	0	-100	51			-151	298

z, z^*	x1 非	x2	x3 非	x4 非	x5	x6 非	x7 非	定数
	3/2	0	-1	1/2		1	-1/2	3 / (3/2) = 2
	-1/2	1		-1/2			1/2	1 / (-1/2) < 0
	1/2	0		1/2	1		-1/2	2 / (1/2) = 4
1	152	0	-100	51			-151	298

z, z^*	x1 非	x2	x3 非	x4 非	x5	x6 非	x7 非	定数
$\times 2/3$	1 3/2	0	-2/3 -1	1/3 1/2		2/3 1	-1/3 1/2	2 3
	-1/2	1		-1/2			1/2	1
	1/2	0		1/2	1		-1/2	2
1	152	0	-100	51			-151	298

z, z^*	x1 非	x2	x3 非	x4 非	x5	x6 非	x7 非	定数
	1 3/2	0	-2/3 -1	1/3 1/2		2/3 1	-1/3 1/2	2 3
$\times 1/2$	1/2 1/2	1	-1/3 1/6	1/2		1/3 -1/6	1/2	1 1
$\times -1/2$	-1/2 1/2	0	1/3 -1/6	1/2	1	-1/3 1/6	1/2	-1 2
$\times -152$	1 152	0	-100	51			-151	298

z, z^*	x1	x2	x3 非	x4 非	x5	x6 非	x7 非	定数	
		1	-2/3	1/3		2/3	-1/3	2	
		0	1	-1/3	-1/3	1/3	1/3	2	
		0		1/3	1/3	1	-1/3	-1/3	1
1		0		4/3	1/3		-304/3	-301/3	-6

z, z^*	x_1	x_2	x_3 非	x_4 非	x_5 非	x_6 非	x_7 非	定数
		1	-2/3	1/3		2/3	-1/3	2
		0	1	-1/3	-1/3	1/3	1/3	2
		0	1/3	1/3	1	-1/3	-1/3	$1/(1/3)=3$
1	0		4/3	1/3		-304/3	-301/3	-6

z, z^*	x_1	x_2	x_3 非	x_4 非	x_5 非	x_6 非	x_7 非	定数
		1	-2/3	1/3		2/3	-1/3	2
		0	1	-1/3	-1/3	1/3	1/3	2
$\times 3$		0	1	1/3	1	1	-1/3	3
1	0		4/3	1/3		-304/3	-301/3	-6

z, z^*	x_1	x_2	x_3 非	x_4 非	x_5 非	x_6 非	x_7 非	定数
$\times 2/3$		1	2/3	2/3	2	-2/3	2/3	2
$\times 1/3$		0	1	1/3	1	-1/3	1/3	1
		0	1	1/3	3	-1	-1/3	3
$\times -4/3$		0	4/3	1/3		-304/3	-301/3	-6

z, z^*	x_1	x_2	x_3 非	x_4	x_5 非	x_6 非	x_7 非	定数
	1	0	0	1	2	0	-1	4
	0	1	0	0	1	0	0	3
	0	0	1	1	3	-1	-1	3
1	0	0	0	-1	-4	-100	-99	-10

$x_1=4$

$x_2=3$

最適解

練習問題6: 何よりも大きい数 M の利用

z, z^*	x1 非	x2 非	x3 非	x4 非	x5	x6	x7 非	定数			
$\times -1$	$1/2$	1	-1	1	-1	$1/2$	1	$-1/2$	-1	4	$/1=4$
$\times 1/2$	$-1/2$	-1	1	2	$-1/2$	-1	$1/2$	1	1	2	$/2=1$
$\times -1$	$1/2$	-1	1	$1/2$	1	1	$-1/2$	-1	-1	3	$/1=3$
$\times -3M+2$	$3M/2$	$-3M$	$3M$	$-M$	$3M/2$	$-M$	$-3M/2$	$-3M$	$-3M$	$6M$	
	-1	$+2$	-1		-1		$+1$	$+2$			

- 非常に大きい数 M を記号で残した場合、
 - シンプレックス表には M の係数と定数の両方を記録しなければならない
 - 連立方程式の解法では M の係数と定数の両方を掃き出さなければならない
- 結局、2段階単体法で z^* と同時に z の式を扱うのと同じことになる