

(40) ネットワーク機能回復のための優先修復リンクのGA探索

PRIORITY DETECTION OF LINK RECOVERY FOR NETWORK FLOW USING GA

佐藤 尚次*

Naotsugu SATO

* 工博 筑波大学助教授 構造工学系 (〒305 つくば市天王台 1-1-1)

This paper presents an application of Genetic Algorithm for minimum cut of network flow problems. Even though connectability is regarded as to play important role in the performance in most categories of lifeline systems, logistical ability of transfer system often becomes serious issues under disastrous situation such as great earthquake. Based on the theorem of minimum cut - maximum flow, genetic expression of cut surface in terms of both nodes and links are formulated. Flow capacity corresponding to each cut is evaluated easily in both expression. Search scheme for minimum value is carried out using GA. However, some kind of local minimum solution tend to absorb this procedure. It is hence more certain for obtaining optimum solution to choose rather random strategy. Quasi optimum solutions which are obtained in the search process at the same time also have important meaning. Priority of link recovery is derived by considering not only gen of optimum cut surface but also quasi optimum ones.

Key Words: network, minimum cut, GA, system recovery

1. まえがき

土木工学におけるシステム最適化の技法として、ニューラルネットワーク (NN) や遺伝的アルゴリズム (GA) が用いられることが次第に多くなってきている¹⁾。委員会報告書である文献1)の他にも、ここ数年は随所に応用例をみかける。

前回のシンポジウムでの報告²⁾でも述べたことであるが、土木の構造工学分野を中心にみた最適化の対象となる変数は、構造物の寸法諸元が多く、連続変数をあえて離散化近似したり、たまたま離散変数として扱い得たりということが多い。従来の最適化手法でも解析対象となりうる問題の延長線上で、一定の条件が満たされたときに力を発揮する、特殊なアルゴリズムという位置付けの印象が、拭えない部分もある。

一方本研究で扱うネットワークのような、トポロジカルな対象においては、連結性の表現とその変形に問題の困難さが密接に関連することが多く、また変数・解析内容が遺伝子表現と関連づけやすいところに特徴があるといえる。他方少し問題が複雑になるだけで、その論理表現のビット数が簡単に増加し、計算の手間が指数関数的に増加する。これが通常の構造最適化問題に比べ、GAの利用を強く動機付けさせる所以となっている。

これまでネットワークを重要な研究対象としてきたのは、交通工学を中心にした計画分野^(例えば2)・3)、ライフライン地震工学を中心とする構造工学分野^(例えば5)・9)など多

岐に亘っているが、さらに最近では、GAの利用による計算の効率化にも助けられ、計画系と構造系の共同研究も見られるようになってきた¹⁰⁾。

本研究は一昨年の報告²⁾の続編というべきものである。前報の結果を受けて、GAによるネットワークの最小カット探索の収束プロセスを追う傍ら、その過程で出てくる第2、第3...の極小カット断面にも注意を払い、これら上位のカット断面に、共通に含まれるリンクの性能向上(被災システムの場合には復旧)が、システムとしての可能最大フローの性能向上に、最も効果的であるという前提で、優先修復リンクの探索手順を導いた。詳しい手法の考察は次章以下に譲る。

2. 最小カットの定式化

理論展開については文献2)に詳しい説明を述べたので、ここでは要点のみ触れる。後出の図-1やにネットワークの例題が示されている。図では入力点(ソース)と出力点(シンク)がそれぞれ1つであるが、複数である場合の方が一般的であり、ここでの議論は一般的な場合にも適用できる。ネットワークフローを考える問題では、通常各リンクに通過容量(流量の上限値)が付与されており、節点に入る流れの量の総和と、出る流れの量の総和は等しい(節点では渋滞なし)という条件が満足されているとき、これを「円滑な流れ」と定義する。このとき「最小カット=最大フローの定理」が成立し、カ

ット（ソースとシンクの間の仮想切断面）を横切るリンク容量の総和の最小値に対し、必ずそれと一致する実行可能なフロー解（リンクへの流量分配）が存在し、最大値をも与える。

ソースとシンクの間に存在するカットは、中間の節点をソース側とシンク側に分離する機能を果たしている。この分割をカットの定義に用いる。節点全体の集合をVとし、カットによって分けられる節点の部分集合とその補集合を次のようにSとS^cとして定義する。

$$V = S \cup S^c \tag{1}$$

S：カットによって分けられた、ソースとソース側にある中間節点の部分集合の和集合

S^c：Sの補集合（シンクを含む）

またSに対応するカット定義ベクトル{A(S)}を

$$\{A(S)\} = \{1, 1 \text{ or } 0, \cdots, 1 \text{ or } 0, 0\} \tag{2}$$

；Sに属する節点の番号の要素に1、S^cに0

とする。{A}の要素中、第1要素が1、最後の要素が0であるのは、ソースを第1節点、シンクを最終節点にしていることに他ならない。

さらにネットワークの状態を表わす容量マトリクス[Q]

$$[Q] = \begin{cases} q_{ij} : \text{接点 } ij \text{ 間にリンクがある} \\ \quad \text{ときその容量} \\ 0 : i=j, \text{ またはリンクがないとき} \end{cases} \tag{3}$$

で定義する。一般的にはq_{ij}は節点iからjに向かう容量で、[Q]は無向グラフの場合対称、有向グラフの場合非対称となる。

このときSに対するカット容量C(S)は

$$C(S) = \{A(S)\} [Q] \{A^c(S)\} \tag{4}$$

で与えられる。ただし{A^c} = {1} - {A}は{A}

の補ベクトル（0と1を反転させたもの）である。

前報²⁾では、このCの最小化問題を、{A}を遺伝子とする単純GAにより、解くことを考えた。図-1はその例題の一つであり、次章の例でもこれを利用する。この例では無向グラフとし、[Q]の内容は表-1に示した。この例における最小カット断面の正解は図-1上に1点鎖線で示したもので、その遺伝子表現は{11110111100111000110010}、カット容量は770である。

前報および文献1)の pp. 159-163 に結果の概略を示している。限られた例題からではあるが、この問題の特質は次のように要約できる。

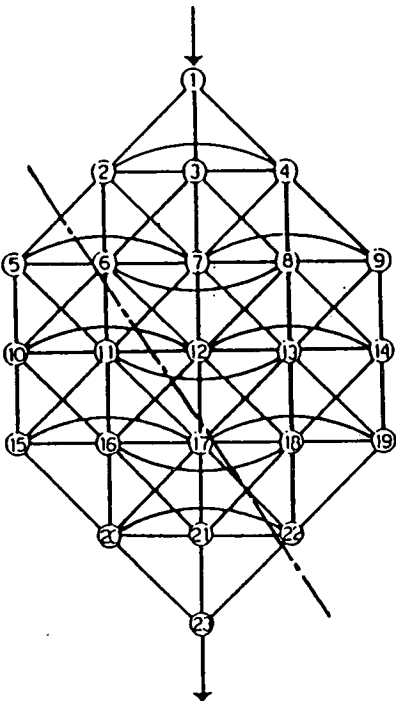


図-1 ネットワークの例題（23節点、77リンク）

表-1 ネットワークの容量行列の内容（被害を受けない状態）

リンク	両端節点 (i, j)	q _{ij}	リンク	両端節点 (i, j)	q _{ij}	リンク	両端節点 (i, j)	q _{ij}	リンク	両端節点 (i, j)	q _{ij}
1	1 2	200	21	6 8	10	41	11 13	10	61	16 18	10
2	1 3	350	22	7 9	10	42	12 14	10	62	17 19	10
3	1 4	400	23	5 10	90	43	10 15	90	63	15 20	170
4	2 3	10	24	5 11	70	44	10 16	80	64	16 20	110
5	3 4	10	25	6 10	70	45	11 15	80	65	16 21	110
6	2 4	10	26	6 11	70	46	11 16	80	66	17 20	110
7	2 5	130	27	6 12	50	47	11 17	80	67	17 21	110
8	2 6	110	28	7 11	50	48	12 16	50	68	17 22	50
9	2 7	50	29	7 12	70	49	12 17	50	69	18 21	50
10	3 6	50	30	7 13	70	50	12 18	80	70	18 22	110
11	3 7	110	31	8 12	70	51	13 17	50	71	19 22	120
12	3 8	110	32	8 13	70	52	13 18	80	72	20 21	10
13	4 7	110	33	8 14	70	53	13 19	80	73	21 22	10
14	4 8	110	34	9 13	70	54	14 18	80	74	20 22	10
15	4 9	150	35	9 14	90	55	14 19	80	75	20 23	550
16	5 6	10	36	10 11	10	56	15 16	10	76	21 23	300
17	6 7	10	37	11 12	10	57	16 17	10	77	22 23	100
18	7 8	10	38	12 13	10	58	17 18	10			
19	8 9	10	39	13 14	10	59	18 19	10			
20	5 7	10	40	10 12	10	60	15 17	10			

- ①収束過程のごく初期の段階では、GAの効果は顕著に現れる。これは、Sが定義するカット（2^{中間節点数}ある）の中に、「ソースとシンクを1本の断面で切り離す」ような、探索対象として実質的な意味のあるものと、「ソースともシンクともつながらない、中間節点の離れ小島を切り出すもの」とが混在している（数としては後者の方が圧倒的に多い）からである。GAは、実質的に意味のあるものを選び分ける段階では、期待通りの効果を挙げている。
- ②ある段階から収束は急に悪くなる。上記の実質的な意味のあるカット面の中に、真の最適解とは異なる（遺伝子も全く異なる）が、Cの値（小さいほど適応度が大きい）にはそれほど差がないような局地解が、多数存在するような場合（実際の問題でどうであるかはともかく、意図的にそういう性質を持つ例題を作成してみた）、典型的な「だまし問題」となり、そこから抜け出すのは容易ではない。ここに挙げた例題では、第2最小カットはシンク側に20, 21, 23を切り離すもので、C=780と、最小値とほとんど差がないが、{A}は{111111111111111111110010}と、最適解とは著しく異なる。この他、800台のカットが数多く存在し、また900台に設定した「階層間カット」（例えば表-1のリンク23~35を切る断面は、節点5~9と10~14の間を切り離すカットで、Cは910）も「有力」な局地解である。
- ③この「だまし問題」においては、誘因力の強い局地解の遺伝子のパターンが明瞭に見て取れた。通常のビットごとの突然変異程度の「攪乱効果」では、この局地解から抜け出すのは容易ではない。この局地解の誘因を、一種の「消失ビット」¹¹⁾ととらえ、線列の多様性を保つ手順の中に、この解消を大規模に行う操作を入れることで対応しようと考えた。具体的には、何世代か解の改良が見られない状態が続いた段階で、中間節点のビットを反転させた個体を、意図的に発生させてパターン破壊要員として交叉に加えてみた。これは正解への収束率をある程度は向上させたものの、問題の性質のほんの僅かな違いによって、劇的效果のみられるものとそうでもないものに分かれた。

なお、上記の文献の発表後、若干の追加計算も行ったので、そこでの知見も続けて加えておくことにする。

- ④初期の「選り分け」段階で用いるGAには、特段の工夫は必要ではない。また後半では多様性の維持が本質的に重要な問題になってくるので、淘汰戦略に工夫をして収束の効率化をはかるようなことは、真の正解への到達という意味では逆効果である。例えば各個体毎に算出されるC(S)の大小が適応度の大小になっているが、これを関数化して、交叉プールに入れる確率の大小に反映させるような方法（ルーレットルール等）は、収束性の「足を引っ張る」結果をもたらした。世代人口のうち下位（Cが大きい）個体の一定の割合

（計算では20%とした）を、無条件で淘汰し、上位数%と置換するような、単純な方法の方が結果はよかったのである。

- ⑤局地解の「誘因力」の強弱、とでもいうべきもの（十分論理的な説明ではないが）があり、それが正解への収束に大きな影響をもっている。最初の数世代における「選り分け」の後、どのような局地解に最初に達するかが、その後の収束過程を支配するようである。局地解によっては、③で述べたようなパターン破壊操作を加えても、容易に抜け出せないことがある。例題でいえば、いわゆる階層間カットがこれに当たる。

上の、⑤で述べたことは、見方を変えれば、正解への収束は乱数の初期値に強く依存している、ということであり、その後のGAオペレーションも、無論チューニングの良し悪しで解の改善性は異なるものの、その効果には一定の限界があるということである。

そして、そうであるならば、GAはランダムサーチの有効な部分的手段として、割り切って扱うのがよいと思われる。すなわち計算時間に影響の大きい「各世代の人口数」や「計算打ち切り世代数（あるいは収束判定条件となる仮収束期間の長さ）」を小さめに押さえる代わり、計算スキームの試行回数を増やしてやればよいのではないかと考えた。

何回か計算を行ううち、1回でも正解にたどり着けばそれでよいわけである。各回の計算で正解にたどり着く確率を p_1 とすると、 $p_1 = p_1$ （人口数，計算世代数）で、（）内の変数の増加関数となる。一方初期値を変えてN回計算を試行して1回でも正解を得る確率 p_N は、

$$p_N = 1 - (1 - p_1)^N \quad (5)$$

となる。

そこで、前記の例題に対し、Nと、計算世代数の積が一定になるような関係を保ち、探索計算を行ってみた。ただし各回の計算過程では途中で収束判定による打ち切りは行わず、決まった数の世代繰り返した上で、最後に残ったものを見ることとした。計算上人口数は100とし、GAオペレータは文献1, 2)でのチューニングで良好な結果を得たパラメータ（下位20%淘汰、通常の突然変異確率1%、パターン破壊操作の実行）はそのまま用いた。結果を表-2に示す。表の最後の行は非収束確率 $1E-6$ を得るのに必要な試行回数である。

ここで非収束確率 $1E-6$ は工学的にゼロとみなしうるといわれる、いわゆるシックス・ナインを意識した数字であるという以上の意味はない。この表から、最初の行の世

表-2 正解への到達確率 (%)

計算世代数	100	50	30	20	10
試行回数(N)	15	30	50	75	150
各回の収束確率(p_1)	66.7	56.7	54.0	45.0	19.3
非収束確率($1-p_N$)	7E-8	1E-11	1E-17	3E-20	1E-14
必要回数	13	17	18	23	65

代数と、最後の行の必要回数の積をみることで、計算効率のよい打ち切り世代数がみえてくる。余り早く計算を打ち切ってしまうとGAを行う効果が十分発揮できないが、ただなら長く続けるよりは、ランダムサーチの一部と割り切る方がよい。

この計算には、表面に出ないもう一つ別の側面がある。個々の試行においては、必ずしも真の正解には到達しないまでも、第2、第3...の準正解に達していることも少なからずある。今回提案している解析手法を、現実の問題に役立てようとするならば、この準正解もそれなりに重要な情報を含んでいる。個々の収束過程で、一定回数以上同一の解に留まった場合にも、そういう情報を残して置いて利用することは考えられるが、それよりは比較的短い計算回数で、数多くの初期値に対して試行を行う方が、準最適解探索の効果も大きいであろうことは容易に想像される。次章ではこの準最適解を有効活用する手段として、被害時の優先修復リンクを見出す試みについて述べる。

3. 準最小カットを用いた優先復旧リンクの発見

本研究で対象としているモデルは極めて単純なものであり、数学的な興味の対象としてはともかく、現実生ずる問題のどのような部分に適用できるのか、少なくともここまでの議論では、明らかにする努力をしてこなかった。

地震時あるいは交通渋滞時のネットワーク機能の評価の考え方としては、「連結性を重視するもの」と「ネットワークを通過しうるフローまで考慮するもの」に分類される。ガス・水道等多くのライフラインシステム、あるいは電気通信システムでは主に連結性が問題とされている。1章で挙げたライフライン関係の参考文献でも、震災復旧過程では、連結性の回復に重点を置いたものが多い。一方交通システムや、より一般的に輸送問題（救助、避難、物流）等ではフローまで考える必要がある。しかしながら、交通流問題では、一種の「流体挙動」ととらえていくことが重要であり、単純にシステム容量としての最小カットや、対応する最大フローのパスが与えられたとしても、それだけで十分な情報であるとはいえないところがある。例えばソースからシンクへの所要時間は重要であり、極端な迂回路の連続といったものは、実質的な解の性質を持ちにくいであろう。

本研究が念頭に置いている現実問題は、上に挙げたケースの、中間的な場合であるといえる。

地震による被害を受ける前の、健全な状態での道路網の情報は、ある程度の規模の都市であれば、警察の交通管制などに全体像の情報が収められているであろう。地震発生直後、被害の状況は少しずつ集まってくる。それらは統括して管理される必要がある。

一方地震発生直後、直ちに対応しなければならないこ

とは数多くある。火災の消火・延焼阻止、怪我人の救出、被災者のとりまとめと、葉や生活支援物資の運搬など多様なロジスティックスが必要となる。道路をふさぐ瓦礫等の障害物は優先度をつけてどこかに移動させなければならないし、野次馬等、不要不急の侵入物も、どこかに誘導しなければならない。塞がっている道路に、それを回復する優先順位をつけなければならないだけでなく、場合によっては余裕のある道路を、「待機場所」「回避場所」「瓦礫やゴミの仮置き場」として、あえて利用（すなわち塞ぐこと）しなければならないという、逆のケースもあるであろう。

そのときに、時事刻々入ってくる情報を順次入力しつつ、ネットワークがどのような機能上のダメージを受けているか、相対的に余裕のある箇所はどこかを見定めなければならない。このために、「ブラックボックスの中を覗いて」「その構造を掌握する」作業が必要となる。ここで述べている手法は、こうした状況下で有効に用いられるものであると考えている。

複数の箇所に物資を運搬しなければならない状況下では、それぞれをシンクと定義して、Cもそれぞれに対して計算される、多目的問題となる。余裕のある場所を見定めるには、作為的にそのリンク容量を低減させて、最小のCの挙動に、アクティブに効くかどうかを判定していくことになる。

ここではこうした応用を意識しながら、2章の理論を発展させ、準最小カットの情報を利用しつつ、優先的に修復すべき（あるいは一時的に塞いでしまう余裕のある）リンクの発見の手法を提案する。

文献1、2)では、例題として与えたネットワークのリンク容量は、固定的にとらえられていた。ここでは、問題として与えるネットワークは、何らかの被害を生じて一部分のリンク容量に欠損が生じているものとする。この欠損は、完全に流路が塞がれて、 q_{ij} が0になっている場合もあれば、一部の損傷により q_{ij} が減っている（道路の片側通行のような状況）場合もあると考え、修復作業によって全部または一部の機能回復が期待できるものとする。

まず、得られた被害情報をもとに、容量行列 $[Q]$ を再構成する。これに対し、2章で述べた最小カット探索を実施する。被害がない状態での $[Q]$ に対する解は、直接の役に立つとは限らないが、あらかじめ（時間的に余裕のあるときに）無被害状態での探索計算を実施しておいて、GAオペレータのチューニングをしておくことが望ましいであろう。

計算の試行は、2章の最後に述べたように、十分多くの回数を行う。このとき、各回の試行の結果（最終結果ばかりでなく、計算の後半に出てくる中間解も含めてもよい）は、正解であるなしにかかわらず、記憶し、Cの小さい順に並べておく。適宜チェックを行い、解の重複（同一のカットを別な解と誤認すること）は避けるよう

にするのがよいが、この作業は本質的に重要というわけではない。この結果、与えられた問題に対し、第1最小カット、第2最小カット...が、順にCの値と{A}の形の情報をもって与えられる。これをC(n)、{A(n)}; nはCの小さい方からの順位、と書くことにする。理論的には「落ち」が生じることもあるが、試行回数が多ければ、下位の方のカットはともかく、実質的に意味のある上位の極小カットは網羅しうることが期待できる。

ところで{A}は節点の部分集合を表現する遺伝子イメージのベクトルであるが、リンクについても、同様に部分集合を表現する遺伝子イメージベクトル{L}が定義できる。

$$\{L(U)\} = \{1or0, 1or0, \cdots, 1or0, \} \tag{6}$$

;リンクの部分集合Uに属する番号の要素に1、
属しない番号の要素に0

このUを、カット断面を通るリンクと考える。(2)式の節点の部分集合SとこのUの間に1対1の対応が成り立つことは自明である。

表-1に見られるように、k番目のリンクの両端の節点をi(k), j(k)と書くものとすれば、SまたはUが与えられたとき、{L}の要素 l_k は、{A}の要素 a_i を用いて、

$$l_k = a_{i(k)} \cdot (1-a_{j(k)}) + (1-a_{i(k)}) \cdot a_{j(k)} \tag{7}$$

で表わされる。ちなみに(4)式の積は、この l_k を用いて

$$C = \sum q_k \cdot l_k = \sum q_{i(k)j(k)} \cdot l_k \tag{8}$$

としたものと等価であり、実際の計算にもこれを用いている。

すべてのリンクの中で、被害を受け、修理により容量を増しうるものを選び出す、例えばそのリンク番号をmとし、修復の結果の容量増加を Δq_m とする。この修復により、各順位(n)のカット容量は、

$$C(n) \rightarrow C(n) + l_m(U(n)) \cdot \Delta q_m \tag{9}$$

に変化し、この結果カット容量の小ささの順位が変動する。

(9)式の操作は、C(1)を増加させなければ意味がない。すなわち最小カット断面に含まるリンクの中からmを選ばなければならない。 Δq_m は大きい方が効果的であるが、これがU(2)に含まれなければ、C(2)が最小カットになるだけであるから、 Δq_m の大きさだけで優先順位が決まるわけでもない。出来るだけ上位のU(n)に共通に含まれるリンクで、 Δq_m の大きいものが望ましい。論理的には、「(9)式の操作による順位変動の結果、新たな最小カットを最も大きくするようなmを最優先補修リンクとする」のが解であり、以下同様の順位変動操作の論理で、第2、第3...順位の優先補修リンクが決まっていく。また一時的に塞ぐ余裕のあるリンクとは、人工的に $\Delta q_m < 0$ を付加して(9)式の操作を行ったときに、上位の順位変動に影響を及ぼさないリンクである。

今回の計算例としては、図-1、表-1のネットワークに対し、各リンクが25%の確率でqが半分に減り、5

%の確率で0になる、という条件で[Q]を変化させるシミュレーションを行ってみた。第2章の結果も勘案し、計算打ち切り世代は20、試行回数は15とし、他のGAオペレータは変えずに用いた。結果として、100通りの[Q]に対し、第5順位までの最小(極小)カットはもれなく探索することができた。

結果のデータをうまく統計的に表現する方法が見つからなかったので、ここでは代表的な結果を、一つのケースのみ示させていただくことにする。

表-2にこのケースの、被害を受けたリンクを示す。この状態での[Q]に対して求めた第5順位までの極小カット断面が図-2である。原問題(無被害時の問題)が、意図的に「袈裟掛けに切れる断面(図-1)」が解になるように弱点を作った問題であるだけに、この周辺に被害が起これると極小断面を形成しやすい。しかし出てきた解は、無被害時のものとはどれも異なっている。

図のそれぞれの断面に対し、C(1)=645、C(2)=655、C(3)=695、C(4)=705、C(5)=710となっている。表-2で最も容量が減少したのは、節点12と18を結ぶリンク50だが(80減少)、これはU(1)、U(2)にはかからず、U(3)、

表-2 被害リンクの容量変化

リンク	両端節点		q _{ij}	リンク	両端節点		q _{ij}
9	2	7	50→25	43	10	15	90→45
11	3	7	110→55	50	12	18	80→0
16	5	6	10→5	51	13	17	50→0
21	6	8	10→5	56	15	16	10→5
23	5	10	90→45	57	16	17	10→0
26	6	11	70→35	59	18	19	10→5
30	7	13	70→35	74	20	22	10→5

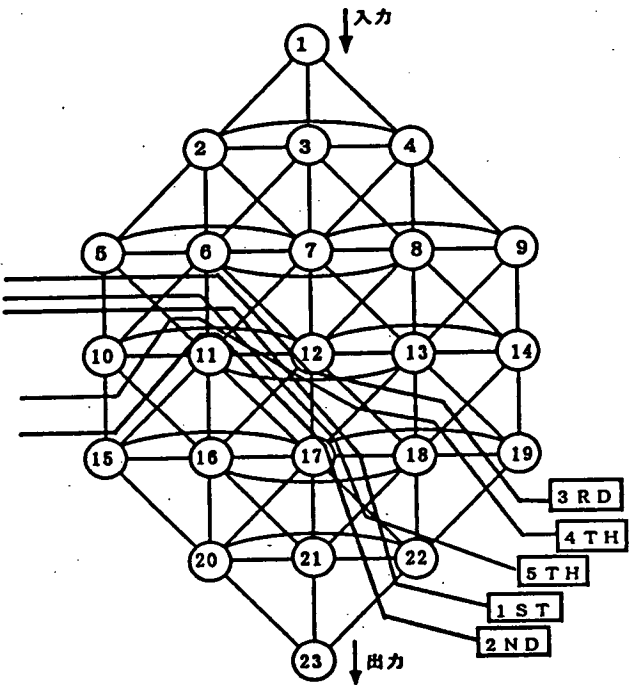


図-2 被害を受けた状況での極小カット断面

U (4)にかかっている。次に減少の大きい(55)リンク 11 (節点3-7)に至っては、これらのどれにもかかっていない。最優先修復リンクは51(節点13-17)であり、C (1)～C (5)をいずれも50増加させる。次はリンク26(節点6-11)で、これも5つすべてにかかる。増加は35。これらを修復しても、他の断面は「浮上して」来なかったので、この5種類(及びそれに近い遺伝子をもつ断面)が突出して極小の断面であったことがわかる。次はリンク23(5-10)で、C (1), (3), (5)が45増加するので、U (2)が最小カット断面に浮上し、次はリンク43(10-15)を回復させる手順となる。

このような計算を災害時リアルタイムで行えば、迅速な対応策策定に、有益な情報をもたらすことが期待できると思われる。

4・まとめ

本研究では、ネットワークフロー問題の基礎的概念である最小カットの問題に対する一昨年の報告を受ける形で、現実的な問題への適応性を高めることを意識した、理論の発展を述べた。ここで得られた知見を以下にまとめてみる。

- ①ネットワーク問題はGAの適用に即して定式化が容易な問題ではあるが、正解への収束を妨げる「だまし問題」が大きな障害になりうる。ここでは各探索計算における正解への収束率を高めることにはこだわらず、ランダムサーチの中の、有力な部分スキームと割り切ってGAを利用し、結果として十分な正解到達率を得た。
- ②初期値をいろいろ変えて得られる準正解は、とりわけ被災時の復旧の優先順位を判定するのに有益な情報である。最小解だけでなく、上位の極小解に共通に含まれる被害リンクが、修復の優先度が高くなることが多い。
- ③カットを考える際、節点の部分集合の遺伝子表現だけでなく、リンクについても同様の表現をするように工夫を加えた。これを利用することにより、情報を効率的に用いて計算を実行することが可能である。

例題で手法の有益性も示し得たと考えているが、ここで行ったような、無造作にどのリンクにも同様の破壊確

率を与えるようなモデルは現実的とはいえないかも知れない。実際には地盤の条件や設計における様々な条件(構造的条件・道路規格など)、節点の間の距離といった、交通流を通す上での支配因子など、モデルに取り込むべき要素は数多くあると思われる。こうした点に配慮して今後の発展につなげていくこととしたい。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会 AL (人工生命) 技術の構造システム最適化への応用に関する研究小委員会：新しい構造システム最適化手法－人工生命技術の応用－, 1996年9月。
- 2) 佐藤尚次：GAによるネットワークフローの最小カット探索, 第4回システム最適化シンポジウム論文集, pp. 83-88, 1995年12月。
- 3) 若林, 飯田, 井上：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法, 土木学会論文集 No. 458/IV-18, pp. 35-44, 1993年1月。
- 4) 赤松, 桑原：渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分, 土木学会論文集 No. 488/IV-23, pp. 21-30, 1994年4月。
- 5) 磯山, 片山：大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集第321号, pp. 37-48, 1982年5月。
- 6) 野田, 宮下：電話網の最適震後復旧予測のためのニューラルネットワーク, 構造工学論文集Vol. 39A, pp. 643-656, 1993年3月。
- 7) 能島, 亀田：地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法, 土木学会論文集 No. 507/I-30, pp. 231-241, 1995年1月。
- 8) 佐藤, 伯野：障害波及を考慮したライフライン設計への一考察, 第16回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 185-188, 1981年6月。
- 9) 吉田仁：供給量を考慮したネットワークシステムの信頼性解析, 東京大学卒業論文, 1981年2月。
- 10) 杉本, 片桐, 田村, 鹿：GAによるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 43A, pp. 517-524, 1997年3月。
- 11) 杉本, 鹿, 片桐：消失ビットの解消によるGAの性能向上に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 42A, pp. 365-372, 1996年3月。