

通信システムの構造安定性

小野里好邦
電気通信大学

野口正一
東北大学電気通信研究所

通信システムを一つのダイナミカル・システムとして大局的に捉え、負荷の変動あるいはシステムの制御を変えることによるシステムの変化をダイナミカル・システムの変化として記述し、カタストロフ理論の成果を援用して通信システムの構造安定性について考察する。

具体例として、ネットワークにおけるルーティング方式と超小型地球局ネットワークをとりあげ、その構造安定性の概略について検討する。

Structural Stability in Communication Systems

Yoshikuni ONOZATO and Shoichi NOGUCHI
Univ. of Electro-Communications Tohoku Univ.

1-5-1, Chohugaoka, Chohu, Tokyo

2-1-1, Katahira, Sendai

We investigate the structural stability in communication systems. We model communication systems using a method based on dynamical systems. Structural stability is analyzed in line with catastrophe theory. Two examples of alternate routing and Very Small Aperture Terminals networks are considered.

1. まえがき

計算機技術及び通信技術の進展により、情報ネットワーク社会の到来が唱えられている。情報ネットワーク社会は、多種多様な資源を多重に活用し新たな情報を作り出しそれを伝搬させる、本質的にダイナミックな社会である⁽¹⁾。従って、情報ネットワークの捉え方もダイナミズムを十分に理論化できるものでなければならぬ。一方、情報ネットワークは大規模かつ複雑になり、全体の動作を正確に把握するのが困難になってきている。

そうした状況において、工学的見地から、柔軟で高度な情報ネットワークを達成すべく、ネットワークの有する能力をより高めること、或は全く新しい原理に基づく通信方式、情報処理様式を生み出すこと等に対して、何等かの手がかりを模索するため、通信システムの構造安定性について考察する。

構造安定性とは各種の原因による構造のゆらぎに対して、全体としての機能が極端に乱されることなく安定して働き続けることができることをさす。これは、情報ネットワークを維持していくうえで欠くことのできない機能である。しかるに、実際には、ちょっとした変動により、情報ネットワークが有する機能の全面的停止、或は少なくとも本来果たすべき機能から遠くかけ離れた振舞いをする。そして、多くの場合情報ネットワークに不都合な影響を与えることになる。この様に、構造の変化に対して常に定性的に安定しているということが、通信ネットワークに柔軟性に富んだ働きを与え得ると考えられる。

一般に、システムの持つ構造が何等かの原因で変化するとき、そのシステムの有する機能、性質が不変に保たれる様な条件、或はその様なシステムの特性を研究することは、数学の分野

において構造安定性の問題として議論されている。より現実的な立場から、構造安定性を議論することは十分意義のあることと考えられる。⁽²⁾例えば、通信ネットワークが機能する所にはトラヒック変動等、必然的に数々のゆらぎが伴っているものであり、その様な環境でシステムがその性質、機能を維持してゆく為に、構造安定な性質を要請することは妥当である。特に、工学的見地から、構造安定な性質を情報ネットワークに組み込むことによって、システムを致命的なシステムダウンから救うと共に、より柔軟性に富んだシステムの開発が期待できるからである。

2. 通信システムのモデル

ダイナミックな変動を包含する情報ネットワークを解析するため、ダイナミカル・システムの手法を導入し、通信システムのモデル化を行う。ここで、ダイナミカル・システムは、通信システムの状態と各状態に対応するパケット或はメッセージ（情報の処理単位）のフローにより構成される。通信システムを一つのダイナミカル・システムとして大局的に捉え、負荷の変動あるいはシステムの制御を変えることによるシステムの変化をダイナミカル・システムの変化として記述し、カタストロフ理論^(3,4)の成果を援用して通信システムの定性的な振舞いを明確にする。さらに、システムの変化を定量的に評価しシステム制御法について追求する。

本手法はシステム解析の見通しが立て易く、しかも種々の通信システムを統一的に扱える解析方法である。そして、本手法を用いれば通信システムで起こっている急激な変化や質的な変化は、ダイナミカル・システムの構造が変化することで生じると考えられる。これらの変化の途中で現れる構造不安

定なダイナミカル・システムは、いくつかのタイプに分類され現象の本質が解明できる。

3. 具体例

3. 1 ルーティング方式の構造安定性

3. 1. 1 Alternate routing

ディジタル交換機あるいはインテリジェントLANなどの、高度通信ネットワークでは、種々の機能が分散したインテリジェントノード形のネットワークで、かつ、局階位の存在しない対等形ネットワークが普及すると考えられる。このようなネットワーク構造では従来のFar to near rotation(遠近回転法)といったルーティング方法ではなく、ダイナミックルーティング⁽⁵⁾、あるいは、網の状態を関知し、それに基づいて最適なルーティングを行うような方法を考えなければならない。

このようなネットワークの一例として、メッシュ形ネットワークを考える。このネットワーク形態では、直通路が接続できないときに、う回中継を行うことにより、リンクの有効利用を図ると共に、比較的高いスループットを得ることができる。

しかし、このメッシュ形無階位ネットワークでは、リンクの有効利用が可能になる反面、う回中継による所要リンク長が直通接続による所要リンク長の2倍以上になるため、う回がネットワークに与える影響が大きく、ふくそう領域ではブロック率が飛躍的に増加し、その結果スループットが低下する。

中込、森⁽⁶⁾はノードに入出力する呼の関係式と、アーランの損失式とが複数のブロック率の解を持つことによりスループット低下現象を説明した。

Krupp⁽⁷⁾、Akinpelu⁽⁸⁾はシミュレーションにより、実際にスループットが低下することを示した。

小野里、鈴木、水野、野口⁽⁹⁾は、リンクの回線数が十分に多く、う回トラヒックの影響のみが抽出できる環境を仮定した上で、ダイナミカル・システムによるモデル化を行った。定常状態における1つのノードに注目し、そのノードに出入りするトラヒックに関するフローバランス方程式を導入し、スループット特性を求めた。この結果はネットワークが大規模ならば、ほぼ中込、森⁽⁶⁾、Akinpelu⁽⁸⁾の結果と合致する。

ここでは、フローバランス法による安定性解析と計算機シミュレーションを比較し、ダイナミカル・システムによる解析の妥当性を示す。

3. 1. 2 ネットワークのモデル

メッシュ形ネットワークを考察の対象とする。メッシュ形ネットワークを取り上げたのは、それ自体が対称形であって、解析が行いやすいのと、ノード数に対する全回線数の比がループネットワークなどに比べて高く、回線の自由度が高いためスループット低下の現象が起きやすい理由による。

メッシュ形ネットワークの各ノードは、発生するすべての呼を受け入れると共に、他のノードからの中継呼を受け入れる中継選択機能も有しているとす。各ノードは、あらゆる中継リンク相互間の接続をも行う。

また、ノード間のリンクは、数本の通信回線で接続されており、1つのトラヒックが1本の通信回線を使用中は他のトラヒックは一切割り込むことができない。トラヒックには優先権がなく、すべて公平に取り扱う。

次の仮定を採用する。

(1)すべてのノードとノードは、等しいリンク容量で接続されている

(2)どのノード間にも等しい負荷が加わる

(3)ルーティング，網制御等に要する時間を無視する

(4)呼の発生は平均生起率 λ のポアソン分布とする

(5)呼の保留時間は平均 $1/\mu$ の指数分布とする

(6)う回中継段数は1段限りとする

(7)ルーティング方法は，各ノードで順次空きリンクを探して接続を行う順次選択方式を採用する

(8)呼の分布状態は，定常状態とし，どのノードにおいてもすべて等しい

(3)の仮定により，呼の発生した直後に接続を完了するか，あるいは損失になるかが判別され，損失呼はただちに消滅する。直通路がすべて使用中であるときには，ただちにう回中継による空きリンクを探し，このう回中継によっても接続できないときは，呼は損失呼となる。最終的に接続できなかったことをブロックと表現し，呼が損失呼になる確率をブロック率と呼び、 b で表す。

ノード数を N ，リンクの回線数を k ，あるノード間における正規化負荷率を $\rho = \lambda/\mu$ ，同様にあるノード間におけるスルーアウト S （呼の正規化出力率）を定義し， N ， k を設定したときのスルーアウト特性， S 対 ρ を求める。

3. 1. 3 解析

メッシュ形ネットワークを記述する物理量として、ブロック率をとり、これを状態変数とする。任意のブロック率 b ， $0 < b < 1$ ，及びパラメータ ρ が与えられた時、一つのノードへの入力フロー率を λ^* 、出力フロー率を μ^* とする。入出力フローを基にフローバランス $F(b, \rho)$ を次のように定義する。

$$F(b, \rho) = \mu^* - \lambda^* \quad (1)$$

ネットワーク全体について定常状態を考える。システムの状態変数が b のとき、ノード間において発生した呼が

う回中継で接続される確率をう回中継成功確率、 A 、と呼び次式で示す⁽⁹⁾。

$$A = b \cdot [1 - \{1 - (1-b)^2\}^{N-2}] \quad (2)$$

このとき

$$\mu^* = (N-1)\mu$$

$$\lambda^* = (N-1)\lambda(1-b+2A)$$

と表すことができる。

システムの安定性解析のために平衡点近傍の振舞いを表す関数としてポテンシャル関数 $f(b)$ を $F(b)$ を用いて、

$$f(b) = \int_b^1 F(b) db \quad (3)$$

と定義する。(6)式で表されたポテンシャル関数は複雑なので、カタストロフ理論を用いてシステム解析を行う。その結果、次の定理を得る。

定理 1

Alternate routingを用いたメッシュ形ネットワークでは、 ρ をコントロールパラメータとする折り目のカタストロフが存在する。

分岐集合 Σ_0 を次のように定義する。

$$\Sigma_0 = \{ \rho \mid \partial f / \partial x = \partial^2 f / \partial x^2 = 0 \}$$

上式を満たすパラメータ ρ_0 を折り目の点と呼ぶ。 $\rho_0 > \rho$ のとき、システムにはカタストロフが存在しない。 $\rho_0 < \rho$ のとき、折り目のカタストロフが存在する。

3. 1. 4 シミュレーション

シミュレーションの定常状態の判定は、シミュレーションの試行回数を多くしながら、値が安定することで判定している。ここでの試行回数は、呼が発生しその呼の接続完了あるいは損失になったまでを1試行回数とする。以後のシミュレーション結果は、ネットワークの規模によっても異なるが、数万回から数十万回の試行を行い、それに基づき得た結果である。

一例として、 $N=6$ ， $k=100$ のネットワークについてフローバランスによる結果と、シミュレーションを比較する。フローバランス法による解析

は、回線数 k が比較的大きいと仮定しており、 $N \ll k$ のこの例に適用できると考えた。

フローバランス法によって得られた、解析結果による折り目の点 ρ_0 と、ネットワークのふくそうが始まるトラヒック負荷と比較する。

シミュレーション結果において、スループットが低下しはじめる呼の負荷率 ρ_0 とする。 ρ_0 は ρ_0 よりやや大きくなることわかる。

3. 1. 5 まとめ

シミュレーション結果とフローバランス法による解析結果の比較から、 ρ_0 と実際にスループットが低下する点 ρ_0 とは一致しなかった。しかし、 ρ_0 をネットワークのふくそう開始点と仮定するならば、実際にスループットが低下する点はこれよりも大きな点 ρ_0 であり、スループットが低下するまで、まだ少し許容量があるといえる。

3. 2 超小型地球局ネットワーク

超小型地球局ネットワーク^(10,11) (Very Small Aperture Terminal: 以降 VSAT と略称する) では、各利用者が通信衛星に向けて直接送受信機能を持つため、中継の階梯が極端に少なくなり、新しく通信網を構成することが極めて容易となる。特に、通信網が未発達な開発途上国では非常に有効な手段である。また、先進国においても、ISDN, INS 等のシステムを補完し、航空機や自動車等の各種移動体の利用者とか、サテライト・オフィスの利用者に対し、高度な通信サービスを実現するうえで重要である。

通信衛星を用いて、多数の利用者間の通信を行う多元接続方式として、アロハ方式を用いると簡易にしかも低負荷の場合は良好な応答特性が得られることは、以前から知られていた。一方、

重負荷の場合、応答特性は急激に劣化し、いわゆる安定性の問題が存在することも指摘されていた。^(12,13) アロハ方式を用いた衛星通信システムの安定性解析法としては、カタストロフ理論が使われ、上述の問題について十分な見通しが得られるものと考えられる。しかし、衛星通信システムをモデル化し、その解析が可能であるためには、多元接続方式やモデル化の条件が極めて制限されねばならない。

アロハ方式を用いた通信システムの一つのモデルとして、拡散近似モデルがある。⁽¹⁴⁾ 我々は、そのモデルについてカタストロフ理論を用いた解析を行いシステムの安定性に関する若干の知見を理論的に得ている。^(15,16) また、通信衛星特有の伝搬遅延時間 (約 270 msec) を考慮したアロハ方式の安定性解析は文献 (17) で扱っている。さらに、アロハ・予約複合方式を用いることにより通信チャネルの利用率 (スループット)、及び応答特性が向上することは知られているが、それらの安定性解析については文献 (18) で扱っている。

4. むすび

本稿では、通信システムの構造安定性について、幾つかの例を用いて議論した。さらに、他の通信システムに関する解析は今後に残された課題である。

本研究は、電気通信普及財団の研究調査助成金の補助を受けている。

参考文献

- (1) 今井賢一：情報ネットワーク社会、岩波新書、285、1984年
- (2) 木下、原尾、野口：“非線形空間回路網の構造安定性”、東北大学電通談話会記録、第48巻、第2号 (昭和54年5月)

- (3) R. Thom, Structural Stability and Morphogeneous, W. A. Benjamin, 1975.
- (4) M. Golubitsky, "An introduction to catastrophe theory and its applications", SIAM Review, 20, 2, pp.352-387 (Apr. 1978)
- (5)松本, 渡辺 : "ダイナミックルーチング", 信学誌.69,2, pp.164-167 (昭61-02)
- (6)中込, 森: "一回中継を行う通信網のトラヒック特性", 信学論(A), 50-A, No.6, pp.331-338 (昭50-06)
- (7)Roy.S.Krupp : "Stabilization of Alternate Routing Networks", IEEE International Commun.Conf., Paper NO.31.2, Philadelphia,(Feb.1982)
- (8)J.M.Akinpelu : "The Overload Performance of Engineered Networks With Nonhierarchical and Hierarchical Routing", AT&T Bell Laboratories Technical Journal, Vol.63, No.7, pp.1261-1281(Sep.1982)
- (9)Y.Onozato, M.Suzuki, K.Mizuno and S.Noguchi : "An Approximate Analysis of the Alternate Routing in Homogeneous Networks" IEEE GLOBECOM '87, Session6,6.4, (Nov. 1987)
- (10) D. Chakraborty, "Constraints in Ku-band continental satellite network design", IEEE Comm. Magazine, 24, 8, pp. 33-43 (Aug. 1986)
- (11) A. Fujii, Y. Teshigawara, S. Tejima and Y. Matsumoto, "AA/TDMA-adaptive satellite access method for mini-earth station network", in Conf. Record. GLOBECOM '86, pp. 1494-1499, (Houston, TX., Dec. 1986)
- (12) S. S. Lam, Packet Switching in Multiaccess Broadcast Channel with Application to Satellite Communication in a Computer Network, Ph. D. dissertation, Comput. Sci. Dept., Univ. of California, Los Angeles (Mar. 1974)
- (13) A. B. Carlisle and M. E. Hellman, "Bistable behavior of ALOHA-type systems", IEEE Trans. Commun., COM-23, pp. 401-410 (Apr. 1975)
- (14) H. Kobayashi, Y. Onozato and D. Huynh, "An approximate method for design and analysis of an ALOHA system", IEEE Trans. Commun., COM-25, pp.148-158 (Jan. 1977)
- (15) Y. Onozato and S. Noguchi, "On the thrashing cusp in slotted ALOHA systems", IEEE Trans. Commun. COM-33, pp.1171-1182 (Nov. 1985)
- (16) Y. Onozato and S. Noguchi, "A unified analysis of steady state behavior in random access schemes", Computer Networks and ISDN Systems vol.10, pp.111-122 (1985)
- (17) Y. Onozato, J. Liu, S. Shimamoto and S. Noguchi, "Effect of propagation delays on ALOHA systems", Computer Networks and ISDN Systems vol.13(1987)
- (18) 小野里、加藤、野口: "ランダム・予約複合アクセス方式における安定性の解析", 信学論(B) J70-B, no.11, pp.1360-1366 (昭63-11)