

大都市ライフラインシステムの災害復旧 シミュレーションについて

三 森 友 彦*
鈴 木 浩 平*

要 約

近年、都市機能は十分に発展・充実してきており、それぞれの要素は規模を拡大し、かつ互いに複雑に影響し合うようになった。そのために災害時には、直接被害を受けていない要素でも、二次災害により予期せぬ機能障害を受けるといった脆弱性を露呈する可能性が高くなってきた。

これらの都市機能の中でも、特にライフラインシステムと呼ばれる電気・ガス・水道・交通・通信等の生活関連機能は、一般に膨大な広がりを持ち、かつ広域な範囲を網羅しているため、地域的な不確定性等を考慮すれば、システム全体としての耐震性を一様に保障・強化する事は極めて困難であり、災害時の部分的被害はある程度免れないものと言える。ところが、これらはいずれも、何らかの媒体がそのシステム内を流動する事により機能を発揮しているため、遠距離における被害や規模の小さい局所的な被害でさえも、その流れを停止させるような事態になれば、被害がシステム全体に波及する可能性も高くなる。

以上の事から近年、ライフラインシステムの防災の重要性が目されるようになってきたが、ライフラインシステム自体が一般の構造物とは異なった性質を持っているため、防災上の基本的視点も多少異なっている。すなわち、通常の構造物の防災に関しては、耐震設計強化等により、被害を発生させない事に重点を置くのが一般的であるが、ライフラインシステムの防災を考える際は、施設の耐震設計強化は十分に考慮されているとした上で、復旧対策に重点を置き、いかに被害の継続期間を短くするかが最大の課題となっている。

本研究では、ライフラインシステムの中でも特に影響力の大きいと考えられる電力ラインを例に、耐震設計の視点から、その災害復旧の方法について、基本的考察を試みている。

1 はじめに

ライフラインシステムは、都市の中核機能や市民の日常生活を支える文字通りの生命線であり、平常時にはエネルギー、水、交通、情報などがこのネットワークシステム内を絶えず流動する事により、特有の機能を発揮しているが、そのラインは一般に広域な範囲を網羅し、かつ膨大な広がりと多種多様な要素により構成されている。一方、システムへの入力としての地震は不確定性が高く、発生する被害を正確に予測する事は非常に困難であり、また地域的な地盤状態の不均一性も存在するため、広範囲にわたるライフラインシステム全体の耐震性を一様に高いレベルに保つ事は不可能であり、地震等の災害時におけるシステムの部分的被害はある程度免れないものと言える。ところが一般にライフラインシステムは何らかの流動媒体を伴う機能を有するため、遠距離における被害や規模の小さい局所的な被害でさえも、その流れを一時的に停止させるような事態になれば、いずれは被害が系全体に波及する可能性も高くなる。

またライフラインシステムは、その機能が生活(生命)そのものに関わるものであるため、防災上の問題としては、単なる被害の有無よりも機能障害の継続期間が与える影響の方がより重要視されねばならず、復旧対策の重要性は極めて大きいものと言える。

ライフライン系の被害により、市民生活に大きな支障を来した地震としては、サンフェルナンド地震(1971年・ロサンゼルス市内、近郊)、宮城県沖地震(1978年・仙台市内)、ロマ・プリエタ地震(1989年・サンフランシスコ市内)等がある。いずれの場合もエネルギー系ライフラインである電力供給システムが局所的あるいは、広範囲で破壊されたことにより、他のライフラインシステムもその機能を十分に発揮できなかった。

平常時にはあまり意識されていないが、ほとんどの都市機能は、日常的に何らかの形で電力供給を受けているために、停電時にはその影響が顕著に現れる。例えば他のライフラインシステムに与

える影響だけを考えてみても、信号停止による道路交通の渋滞、通信途絶、送配水施設の機能停止による上下水道への影響など様々な弊害を誘発させる。また、災害後の復旧活動においても、その活動自体が停電により支障を来す場合も少なくないため、災害時には停電状態をいち早く解消する事が、他のライフラインシステムおよび都市機能全体の復旧にもつながると言える。つまり、電気系統はライフラインシステムとしての役割を担っている一方、災害後の都市機能全体の活動を大きく左右する重要なメディアであると言える。

以上の観点から、大都市の地震防災を考える上での重要な要因として、ライフラインシステムの復旧対策を取り上げ、その中でも特に重要性の高い電力供給システムについて、ロマ・プリエタ地震の実例の検証とシミュレーションにより、大都市の地震防災上の問題点を検討する。

2 ライフラインシステムの復旧対策

一般的に、あるシステムがその一部に被害を受けて機能に支障を来した場合、被害を受けた部分を修理するなどして、被害発生前の状態に復元するのが最善の策であるが、ライフラインシステムの場合は、その機能低下、もしくは停止の状態が継続、拡大しないように十分な配慮がされねばならず、いかなる状態においても、機能を速やかに回復させる事が最優先される必要がある。したがって、ライフラインシステムに求められる地震対策としては、

- (1) 震害時の機能低下やその波及効果を最小限に止める。
- (2) 効果的な応急復旧対策により速やかに原状復帰を図る。
- (3) (1)、(2)を考慮して平常時から適切な措置を講じておく。

等が重要となっており、以上から応急的復旧活動による機能回復の迅速化が望まれる。

しかし、応急的な復旧活動による機能回復は必ずしも十分なものとは言えず、また復旧活動の最終目的が被害発生前の状態への復元であり、その

目的を達成するのに要する時間も可能な限り短縮する必要があるから、災害時には、応急的な復旧活動だけでなく、根本的な復旧を目的とした活動も並行して行われなければならない。したがって、ライフラインシステムの復旧対策は

- (a) 根本的復旧対策——被害箇所を根本的に以前の状態に復元する事を目的とする。
- (b) 応急復旧対策——災害後の機能回復の迅速化を目的とする。

の2種類に大別できる。

2-1 根本的復旧対策

例えば、水道管が破裂した時の根本的な復旧活動を取り上げると、その被害発生箇所を掘り起こして新しい水道管の埋設作業を行う。このような場合、早急な復旧を実施するには、必要な資材や機材を迅速に調達し、効率よく使用せねばならない。ここで、被害が発生してから復旧活動に取りかかるのは当然だが、もし事前に検討された対応策が全く無かったならば、災害後の混乱の中で白紙の状態から資材、機材等の調達に取り組まねばならず、連絡や輸送の問題から考えても多大な時間の浪費が予想される。また、ある会社が資材・機材等を準備しており、自社内で発生する被害に備えていたとしても、実際に発生した被害に対し、そ

れらの供給量が十分でないという事態も起こり得るので、これらの調達に関しては十分な余裕を持たねばならない。

次に、物資面の調達が行われた後の問題としては、それらを使用して効率よく復旧活動を行うために、復旧作業員の確保及び彼らの効率のよい作業が必要となる。このように、根本的復旧対策として重視されているのは、主に資機材の調達と人員の確保となる。

2-2 応急復旧対策

応急復旧対策は被害の継続、拡大を防ぐためのものであって、根本的な復旧を意味するものではないが、結果的にもそれが最終的復旧手段となる場合もある。いずれにしても、この対策によって被害発生直後の影響をできる限り少なくする方策が重要であり、その代表的な対策としては次の3種の方法がある。

- ①リダンダンシー (Redundancy)：多重化
- ②ポジティブバックアップ (Positive Back Up)：積極的支援
- ③ネガティブバックアップ (Negative Back Up)：消極的支援

*一般には、冗長性ともいうが、本研究では多重化という訳語を使うことにする。

表1 応急復旧対策分類

名称	REDUNDANCY 〔リダンダンシー〕 多重性	POSITIVE BACK UP 〔ポジティブバックアップ〕 積極的支援	NEGATIVE BACK UP 〔ネガティブバックアップ〕 消極的支援
内容	平常からラインを多重化しておき、ある区間内でひとつの系統が切断されてもその区間内の別の系統で被害分をカバーする。	平常時には使用しないものを被害発生時には被害を受けた部分の機能を補う代用策として使用する。	被害を受けた部分をラインから切り離し、他の部分に影響が及ばないようにする。
具体例	交通手段の多重化による地域間流通の確保	停電時の非常用電源の使用	水道管破裂による水圧低下の防止
長所	被害発生後に特別な対処を講じる事なく区間内の機能が保たれる。	支援機能が適正に作用すれば、その区間の機能が速やかに復旧される。	平常から特別な準備をしておく必要がなく、他に比べて支援効果の成功率が高い。
短所	区間内全体として機能が保たれるかわりに、個々の系統にかかる負担が大きくなる。	平常から準備しておく必要があり、また支援機能自体が被害を受ける可能性もある。	被害を受けて切り離された部分では機能が完全に停止する。また主力幹線の被害には適用できない。

表2 応急復旧対策モデル例

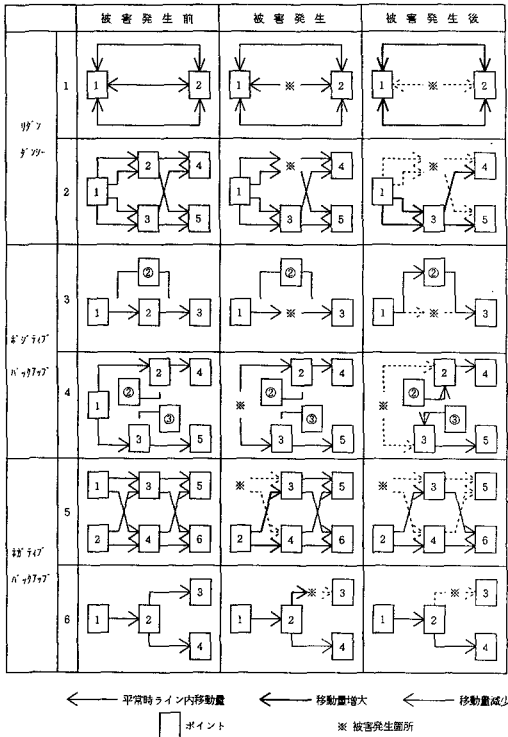


表3 モデル内容例

番号	具体例	復旧内容
1	地域間の交通路線の多重化	1・2を都市とし、その間を3つの路線で結んでいたとする。今、そのうちの1本の路線が被害を受けて使用不能となったとすると、残りの2本の路線によって2都市間の交通を維持する事になる。したがって、その際使用される路線の混雑が予想される。
2	電力系統の多重化	1を発電所、2・3を変電所、4・5を消費地とし2の変電所が被害を受けたとする。この際3の変電所を経由して2つの地区に送電しなければならないので、3の変電所は通常時の出力よりも余裕を持っていなければならない。
3	変電所の予備変圧器	1を発電所、2②を変電所、3を消費地とし2の変電所の変圧器が被害を受けたとする。ここで予備変圧器②を使用して消費地区に送電をする。
4	緊急用水源	1を貯水池、2・3を浄水場等の中間施設、4・5を消費地、②・③を緊急用水源とする。いま貯水池が被害を受けて供給が停止した場合②、③を接続して消費地区に水を供給する。
5	供給電力不足による切り離し	1・2を発電所、3・4を変電所、5・6を消費地とし1の発電所に被害が発生したとする。この際2の発電所だけで5・6地区に送電しようとするがオーバーロードとなり2の発電所も停止しかねないので5地区への供給を停止する。
6	水道管破裂におけるバルブ閉鎖	1を貯水池、2を浄水場等の中間施設、3・4を消費地とする。いま3地区へ供給するラインの途中で管が被害を受けて大きな断水が発生したとすると、他の地域への供給ラインの水圧が低下してしまい被害を受けていない地域(2地区)への供給が不十分になってしまうので3地区への供給を停止する事により水圧低下を防ぐ。

表1に応急復旧対策の代表例を、表2に応急復旧対策のモデル例を、表3にそのモデル内容例を示す。表2はそれぞれの具体的なモデルであるが、活用状況を見ると、リダンダンシーは一般的に有効であるため多くの場面で使用されている。またポジティブバックアップは電気・通信系に、ネガティブバックアップはパイプライン系に多く用いられる。

以上2つの復旧対策を比較すると、根本的復旧対策は比較的全般にわたる企業・公共団体等に対応する方法であり、近年においては、この対策を講じておく事はある程度常識となっている。これに対し、応急復旧対策の準備状況は企業・公共団体等によって一様ではなく、しかも復旧対策が正常に機能した際の復旧効果は前者よりも大きくなる場合が多いため、災害後には応急復旧対策の存在の有無が被害規模に大きな影響を与える。したがって、本研究では応急復旧対策について検討を試みるものとする。

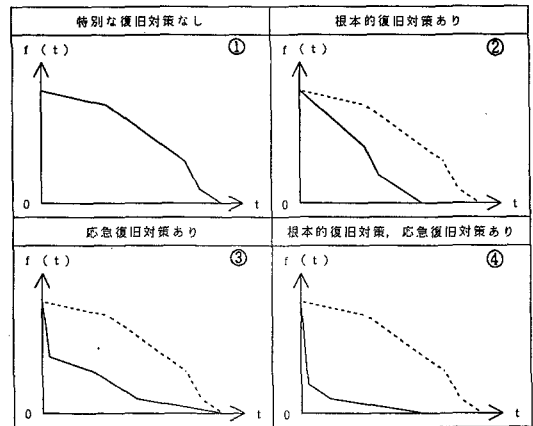


図1 復旧対策による被害規模の変化

図1はあるライフラインシステムに対して、任意の地震が発生した際の被害規模について表している。ここで、 $f(t)$ は被害発生 t 時間後のシステムの使用不能量であり、②・③・④における破線は、特別な復旧対策を講じてない場合の使用不能量を表し、それぞれの被害規模は座標軸と実線に囲まれた面積になっている。

被害規模については、根本的復旧対策が講じられると復旧完了時間が短縮され、また応急復旧対

策が講じられると被害発生直後の使用量が減少する。

ライフラインシステムの中でも特に電気系統の影響力は強く、他のライフラインシステムのメディアも何らかの影響を受けており、その影響は停電時に顕著に現れる。一般家庭における生活支障はもちろんのこと、災害発生時に最もその活躍が期待される、救急病院施設における手術機能の停止、通信途絶による警察・消防関係の指示系統の混乱等、社会全体に与える停電の影響は大きい。このように災害時には、停電状態の早急な解消が、他のライフラインシステムの復旧にもつながると考え、ロマ・プリエタ地震の調査においても、その対象を電力ラインに絞った。

3 ロマ・プリエタ地震による被害

1989年10月17日に発生したロマ・プリエタ地震はM6.6の規模のもので、図2に示すようにサンフランシスコ市周辺地域の広い範囲で、ライフラインシステムの諸施設を中心に、以下に述べるような多くの被害をもたらした。

3-1 地震被害の概要

① 電力

数カ所の発電所と変電所に被害が発生、電力供給量が多重化されていなかったために復旧が遅れ、停電時間は最長2日間にわたった。

② 水道

液状化現象のため管路の被害が多発したが、配

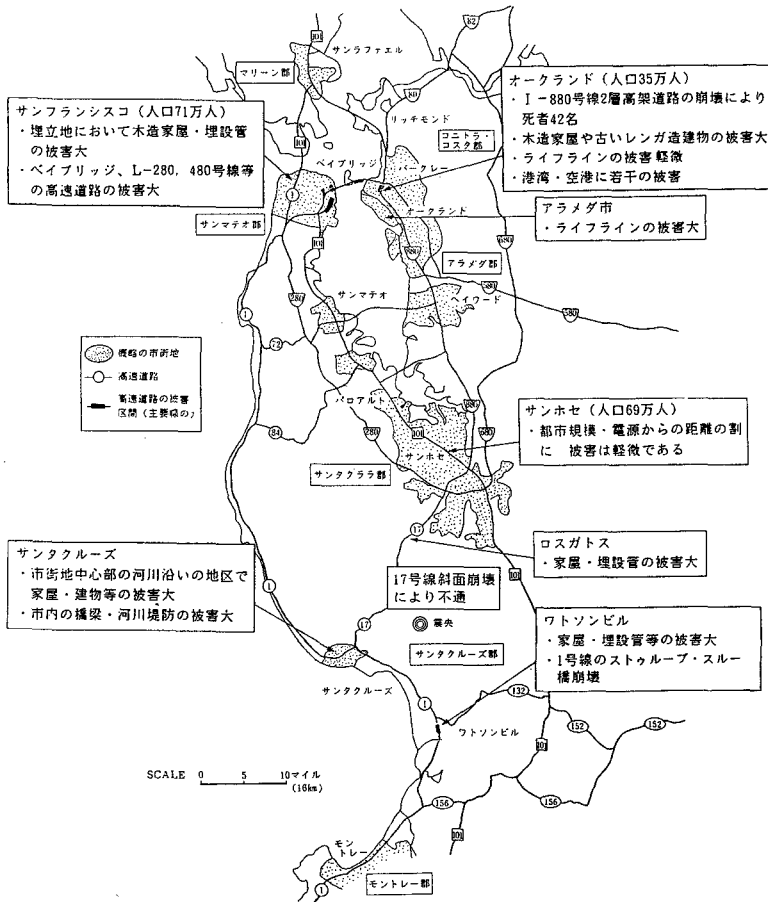


図2 ロマ・プリエタ地震の被害概要

水池・貯水池の能力に十分な余裕があったので、全体的な被害規模は小さかった。水圧低下により消火栓が使用不能となったが、組立式の送水管の使用によって機能の代替をした。これはポジティブバックアップの効果と言える。

③ ガス

液化化による被害が多数発生したが、大多数の需要家が危険を感じて自ら元栓を閉めたので、被害規模はそれほど大きくなかった。

④ 交通

最も大きな被害はベイブリッジの落下で、一か月間不通となったが、ゴールデンゲート橋、サンマテオ橋、地下鉄（BART）の存在によって、多重化が有効に機能した。

⑤ 通信

電話・通信施設には直接的被害はほとんど無かったが、震災後の短時間に電話の使用が急増し、「異常ふくそう（輻輳）」の状態となった。このため、通信規制が行われたが、これはまさにネガティブバックアップである。

以上、電力系統の被害が比較的大きく、復旧対策も不備な点が目立った。停電によるライフラインシステムへの影響も少なからず現れている。

表4、表5、表6に電力系統の被害をまとめて示した。

表4 発電所運転停止施設

発電所名	モスランディング	ポトレロ	ハンターズポイント
震央距離 (km)	約27	約100	約90
総出力 (MW)	2060	368	426
運転停止装置出力 (MW)	750	217	106×2
(比率)	(36.4%)	(59.0%)	(49.8%)
	3発電所合計 1179 / 2854 (41.3%)		
主原因	ボイラー、タービン、給水タンクの一部の損傷と変電設備の被害により運転停止	サンマテオ変電所の被害による負荷の増大により運転停止。その後、安全弁の誤動作により蒸気が外部へ放出した。	サンマテオ変電所の被害による負荷の増大により運転停止。

表5 変電所設備被害

変電所名	モスランディング	メトカフ	サンマテオ
震央距離 (km)	約27	約25	約70
電圧 (kV)	500, 230 115	500 / 230 230 / 115	230 / 115 115 / 60
被害設備 (kV)	500	500	230
主被害	避雷器損傷 遮断器倒壊	遮断器倒壊、変圧器の冷却器油漏れ	変圧器の冷却器油漏れ
遮断器倒壊数 (比率)	4 / 5 (80%)	3 / 4 (75%)	4 / 4 (100%)
☆ただし、いずれも重心の高い碍子型遮断器			

表6 配電送電設備被害

柱上変圧器の落下、油漏れ	約150件	停電に対する影響は、ほとんどなかった。
電柱の倒壊、傾斜		なかった。
地中ケーブルを収納しているダクトのおじれ		停電の原因にはならなかった。

3-2 電力系統の復旧状況

前節において、ロマ・ブリエタ地震における電力系統の被害内容を概説したが、これについて、PG & E社発表による停電件数と施設の復旧状況を比較してその復旧効果を考察し、さらに復旧対策の準備状況とその効果について調べた。

表7 停電件数 (PG & E 社発表)

日経過時間	件数	復旧率 (%)	地域 (件数内訳)
10/17 17:04 0	1,400,000	0	マリナー郡からサンフランシスコ、サンマセ、サンタクルーズ、ホリスターに至る地域が停電。
10/18 18:00 25	463,000	66.9	サンフランシスコ 120,000件 (サンフランシスコの住宅地とサンマテオ郡の大半、サンフランシスコ湾東岸部の地域への電力供給が復旧)
10/18 5:00 37	96,000	93.1	サンフランシスコ 56,000件 湾南岸地区 39,000件 湾東岸地区 1,000件
10/19 17:30 48.5	26,000	98.1	サンフランシスコ 8,000件 湾南岸地区 18,000件
10/20 17:00 72	5,200	99.6	サンフランシスコ 2,500件 湾南岸地区 2,700件
10/22 14:30 117.5	2,550	99.8	サンフランシスコ 2,500件 湾南岸地区 50件
10/23 10:00 137			サンフラン 2,500件はマリナー地区の復旧不可能な家屋であり、供給可能な家屋の全ての対しては、実質上電気の供給は復旧した。

表7によると地震発生直後の停電件数が多くなっ

ているが、これは配電設備の被害と、サンマテオ変電所系統の送電が停止した際にポトレロ、ハンターズポイント両発電所が、負荷増大のために運転停止をしたのが主な原因である。

25時間後には約100万件の停電が解消されたが、これは発電所のうち実際に修理を必要とする設備被害を受けたのが、ポトレロ発電所の3号機（出力：217MW）と、モスランディング発電所の6号機（出力：750MW）のみであり、地震発生時に運転していなかった他の発電機には被害が無かったため、これらの運転と配電設備の復旧とによりなされたものである。つまり、地震発生時の停電件数の多さは、運転中の設備が被害を受けたり、停止したことが大きな原因であった。

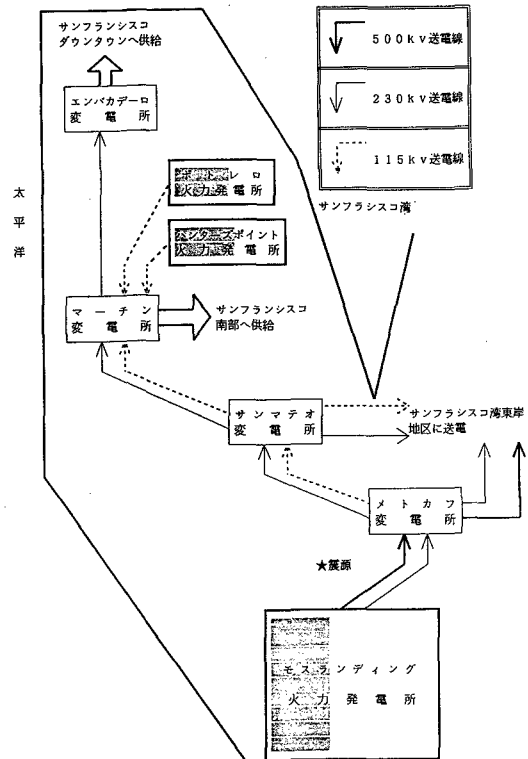
表8 サンフランシスコおよび湾南岸地区の復旧状況

日 時 経過時間	停電件数		主な復旧要因
	サンフランシスコ	湾南岸地区	
0	—	—	8時間後、ハンターズポイント発電所が系統に再接続される。
10/18 18:00	120,000	(約300,000?)	36時間後、ポトレロ発電所(3号機を除く)が運転再開。
25	—	—	—
10/19 6:00	56,000	39,000	19日の夕刻、メトカフ、サンマテオ両変電所が予備変圧器に仮配線し送電再開。モスランディング発電所の2号機が運転再開。ポトレロ発電所の3号機が、米海軍のフリゲート艦の支援を受け、蒸気を補給し運転再開。
10/19 17:30	8,000	18,000	20日、モスランディング発電所の4、5号機が運転再開。
48.5	—	—	—
10/20 17:00	2,500	2,700	☆なおモスランディング発電所の6号機の修理は一か月の期間を要し、11/18に完了した。
72	—	—	—

表8に復旧状況を整理した。この内容は、サンフランシスコの住宅地とサンマテオ郡の大半、サンフランシスコ湾東岸部地域への電力供給の復旧であるが、これはポトレロ、ハンターポイント両発電所系統へ再接続されたためである。また市の中心部よりも先に住宅地が復旧した理由については、この時点での供給量が少なかったため、一件当たりの需要量の少ない住宅地の方を優先して復旧したのと考えられる。サンマテオ郡、湾東岸地区についても同様に、サンフランシスコ中心部と比べると需要量が少ないため、メトカフ、サンマテオ両発電所の被害を受けていない設備を使用して送電したものと推定する。

25時間後の総停電件数463,000件の内訳は、サン

フランシスコの120,000件しか記録に残っていないが、他の地域の復旧状況から考えると、残りの停電件数の大半は湾南岸地区のものであったと考えられる。しかし、36時間後にポトレロ発電所が再接続されたことにより、湾南岸地区の停電が大幅に解消されている。それに対して同じサンフラン



火力発電所の枠の大きさは出力の大きさを表す。
点線の大きさは運転を停止した装置の出力の割合を表す。

図3 PG & E 社の電力系統(一部)

シスコでもダウンタウン地区は、図3に示すように、サンマテオ変電所→マーチン変電所→エンバカデーロ変電所の230kV送電線の系統が主力であったため、たとえポトレロ、ハンターズポイント両発電所が運転再開をしてもそれほど効果はなく、サンマテオ変電所の復旧を待つ形となった。したがって、25時間後～37時間後の間に総停電件数が約1/5になっているのに対し、サンフランシスコの停電件数が約1/2にしかなっていないのは、その結果である。

19日の夕刻にはメトカフ、サンマテオ両変電所

が予備変圧器に仮配線し、送電を再開したので、この系統を主力とするサンフランシスコは、大幅に停電が解消された。

20日にはモスランディング発電所の4, 5号機が運転を再開し、停電件数はサンフランシスコが2, 500件湾南岸地区が2, 700件となったが、これら残りの停電件数の多くは建物の損傷がひどく、意図的に送電を停止したものであった。そのためPG & E社の電気作業員がこれらの家に立入検査をし、個別に送電を再開した。したがって、ライフラインシステムという、地域的な系統として大局的にみた場合には、実質上復旧は完了したと言える。

なお、モスランディング発電所の6号機は、復旧に一月を要し11月18日完全復旧したが、復旧状況からみると、この「復旧の遅れ」はあまり影響が無く、この地域の電源系統全体に十分な出力の余裕があったと考えられる。

以上のことからまとめると、サンフランシスコの停電が長引いた最大の原因は、この地区の復旧がメトカフ、サンマテオ両変電所の復旧を待たねばならなかったというシステム構成上の問題、つまり多重化欠如にあり、この問題さえ解決していれば、出力の余裕から考えても今回ほどの停電にはならなかったはずである。

3-3 復旧対策の活用状況

ロマ・プエリタ地震の際、電力系統の被害復旧のために根本的復旧対策と、応急復旧対策がどのように実施されたかを概観する。

(1) 根本的復旧対策

() 災害対策本部の設置

地震発生後の1時間後にPG & E本社内に災害対策本部を設置。委員会の迅速な設置と効率的な指揮のもとに復旧作業が機能的に行われた。

() 社内直営力の総動員

PG & E社は設備被害の重大さを判断して、全社の従業員を総動員した。人員確保に関しては終業時刻直後の地震発生(17:04)であったため、職員の確保は容易であった。

() 米軍による支援

PG & E社は、復旧に必要な大型の資機材の緊急

輸送の必要性を考慮して、連邦危機管理局(FEMA)を通じて米空軍に協力を要請した。

これらの復旧対策は、いずれも同年6月2日に行われた非常災害訓練の成果が発揮されたものである。また、偶然的要因として、地震発生の時間が職員の確保を容易にしたが、逆に言えば、職員の確保が困難となる時間帯を作らないようにする必要が生じる。

(2) 応急復旧対策

() リダンダンシー

サンフランシスコ地区に供給する電力系統に関しては、リダンダンシーが皆無に等しかったため、系統の要であるサンマテオ変電所が被害を受けた事により、停電がサンフランシスコ市全域に及んでしまった。

() ポジティブバックアップ

復旧の中心的役割を果たす市や、治安維持のための警察、救急活動に必要な病院等が自家発電装置を所有していた。しかし、その容量が充分ではなく、医療活動に支障をきたした病院もあった。また、メトカフ、サンマテオ変電所では被害を受けた遮断機をバイパスして、予備の変圧器に接続し、停電時間を短縮した。

() ネガティブバックアップ

電力の場合、需要が供給を上回るとオーバーロード(負荷超過)となり、発電所が停止してしまうため、供給地区の一部を切り離す必要性が生じる。これが原因で、サンフランシスコと湾南岸地区の停電の復旧状況に差が生じた。

以上、地震被害および復旧対策の実施状況調査から、電力系統が3つの応急復旧対策の全てに関与している事実がはっきりした。

4 多重化モデルシミュレーション

ロマ・プエリタ地震による停電状況を調査して、多重化の重要性が改めて浮き彫りにされると同時に、電力系統が3つの応急復旧対策の全てに関与している事がわかった。多重化はもちろんであるが、変電所の復旧の際に予備変圧器が用いられ、災害後の送電では、供給量不足のため一部の消費地区

を供給系統から切り離した。したがってここでは、多重化された電力供給システムを応急復旧対策全般の代表モデルとして取り上げ、2種類のシミュレーションを行い、問題点の検討を行う。

(1) 系統内停電量シミュレーション

任意の多重化システムモデルを考え、この系統内での被害施設（発電所・変電所）と、停電量の関係を調べる事により、施設の規模や配置等の諸条件について考察する。

(2) 増設効果シミュレーション

既存の系統に変電所と送電線を増設して中間供給経路を増やしてやり、その際の供給量の期待値（任意の規模の地震を想定した際に見込まれる供給量）を確率的に求める事により、多重化システムを作る際の諸問題について考察する。

4-1 系統内停電量シミュレーション

シミュレーションを行うにあたり、施設の被害状況および復旧に要する時間はロマ・プリエタ地震のデータをもとに、施設能力は東京電力はか国内電力会社の資料を参考にして、諸条件を以下のように設定した。

① 発電所出力

東京電力の資料によれば、水力、火力、原子力の総出力の比は約1:4:2になっているので、シミュレーションにおける施設の出力および施設数を次のように設定した。

- 水力 50×3=150万KW
- 火力 200×3=600万KW 出力/単位施設×施設数
- 原子力 300×1=300万KW

② 稼働率

日本国内での1989年度の年間平均需用量は、約7,000万KWであり、最大供給量は約14,000万KWであるから、平均的には年間を通して施設能力の5割程度が稼働していることになる。したがって、シミュレーションは年間の平均的な期間で行うものとし、系統内の出力を1,050万KW、稼働出力を560万KWと設定した。

- 水 圧：20万KW×3 施設=60万KW
- 火 力：100万KW×3 施設=300万KW
- 原子力：200万KW×1 施設=200万KW

③ 変電所出力

変電所の許容出力は十分な余裕があるとする。

④ 被害施設の単一扱い

被害施設内機器の一部分が故障しても、施設全体を停止する。

⑤ 系統内における被害数

ライフラインシステムの防災を考える際は、被害施設による供給停止が、いかに多方面へ影響するかが問題となるから、被害規模が小さい程システムの特徴は表れ易いと考え、被害を受けるのは3施設までとする。

⑥ 被害を受けた変電所の復旧

ロマ・プリエタ地震の経験から、2日後には復旧し送電を再開するものとした。

⑦ 休止中設備の被害

被害を受けなかった施設内の機器は1日、被害を受けた施設内の機器は2日で運転開始をする。

⑧ 他電力会社からの電力融通

比較的大きな電力が融通されていると考え、1日後に200万KWが供給されるものとした。

⑨ 消費地区の単一扱い

消費地区への供給は変電所によって制御されるから、供給停止は地区単位で考える。

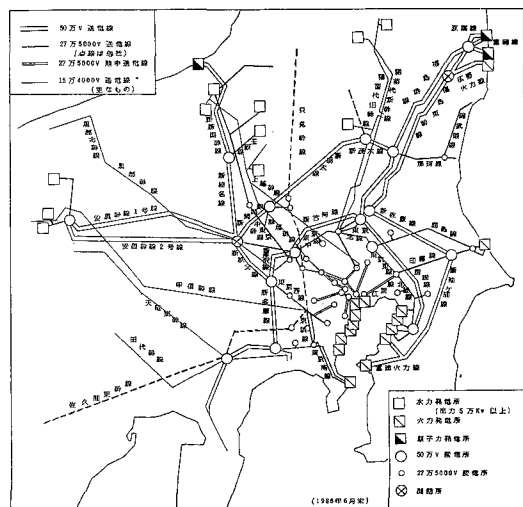


図4 東京電力主要発・送・変電設備概略図

以上の設定と図4の東京電力系統図における各施設の配置を参考にして、図5のような簡単な電力系

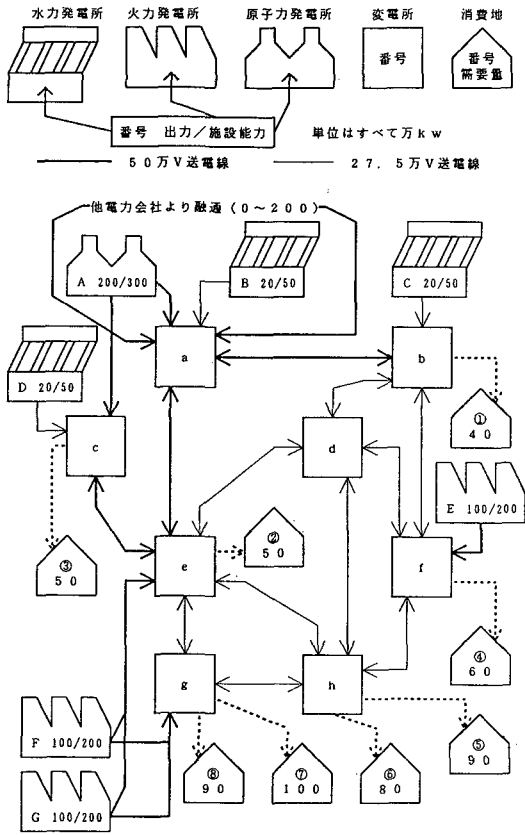


図5 電力システムモデル

統モデルを作成し、これを基本設定モデルとしてシミュレーションを行った。

図6に示すようなシミュレーションプログラムの流れに従って、以下のように3施設が被害を受けた場合の計算を試みる。

被害施設をA, a, eとすると、D水力発電所側と残りの地区の2つのブロックに分けられる。D側をブロックⅠ、他方をブロックⅡとする。

ブロックⅠ：供給量=20万KW、需要量=50万KW、不足分=30万KW、③地区切り離し(供給不可能)、 $T1(1)=50万KW$ 、 $F1(1)=1$

ブロックⅡ：供給量=320万KW、需要量=460万KW、不足分=140万KW、切り離し組合せ=①⑦、④⑤、④⑥、④⑦、④⑧、⑤⑥、⑤⑦、⑤⑧、⑥⑦、⑥⑧、⑦⑧の11通りとなり、 $T1(2)=1820/11=165.5万KW$ 、 $F1(2)=0$ 、となり

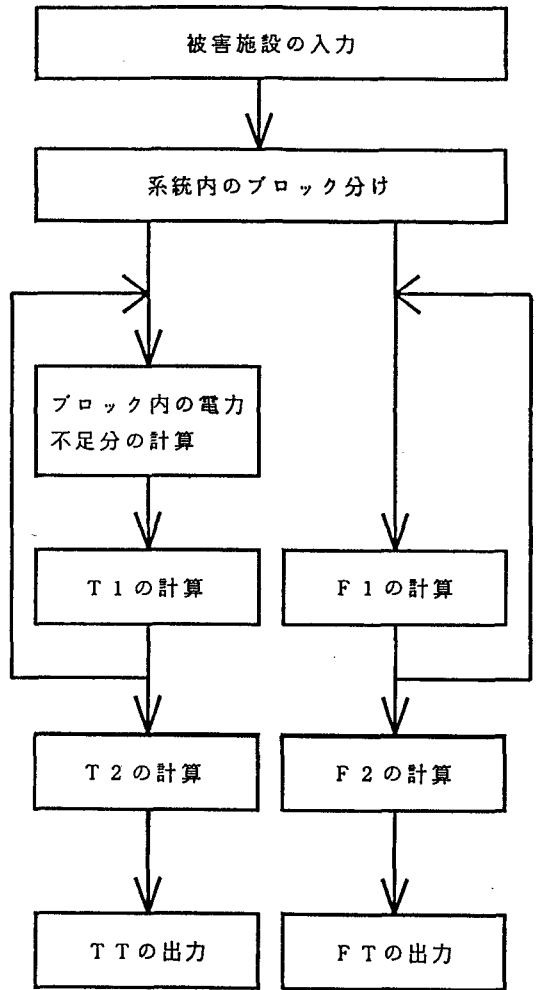


図6 プログラム流れ図

$TT=50+165.5$ 、 $FT=1+0$ 、 $T2=50万KW$ (②地区)、 $F2=1$ (②地区)、 $TT=215.5+50=265.5万KW$ 、 $FT=1+1=2$ 地区となる。

ここで、 $T1$ ：ブロック内平均停電量

$T2$ ：変電所の被害による必然的停電量

TT ：平均総停電量

$F1$ ：ブロック内供給量を上回る需要量の地区数

$F2$ ：変電所被害による必然的な供給不可能地区数

FT ：総供給不可能地区数とする。

表9 基本モデル平均停電量(万kw)

施設名	A	B	C	D	E	F	G	a	b	c	d	e	f	g	h
被害数 1	228	70	70	70	134	134	134	70	80	100	0	100	191	380	340
被害数 2	304	156	156	156	213	219	219	183	207	227	150	228	280	437	400
被害数 3	386	257	256	257	309	319	319	303	326	337	251	358	369	504	467

以上が1日目の停電量の計算過程であり、2日目以降は発電所の出力アップ等を考慮して、同様の計算をする。表9は停電量シミュレーション結果の例であるが、被害施設数が2, 3の場合は平均値を示した。例えば、Aを含む2施設の組合せは(A, B)、(A, C)、…(A, G)、(A, a)、…(A, h)の全14通りあるため、被害施設数2のA欄はその平均値を示しており、同様に3施設の場合は全91通りの平均値を示した。また供給不可能地区数については、単に供給量不足から生じる停電ではなく、系統の分断や変電所の被害により、必然的に供給不可能になる地区数を算出した。

この基本モデルの他に、需要量や変電所の復旧時間等を変更した4種類のモデルについてもシミュレーションを行い、それらの結果を総対的に検討して、次のような結論に至った。

〔I〕 一般的に、発電所より変電所の被害の方が影響は大きい。発電所の被害は単純に供給量の減少に結びつくが、変電所の被害は消費地への供給を直接的に停止させたり、その組合せ次第では、系統の分断による需給関係の偏りを生み出し、停電を引き起こす。

〔II〕 局地的な系統の分断は、供給力のムダおよび供給不可能地区を生じさせる可能性が大きい。例えばa,cが同時に被害を受けた際、Aが系統から分離させられるため、その供給力が生かされず停電が生じる。同様に、消費地が局地的に分断されると、供給を受けられずに停電に陥る。

〔III〕 多くの送電線と接続している施設ほど被害時の影響は大きい。変電所の被害時には供給経路パターンが大幅に減少するため、停電の可能性が高くなるのは当然であると言える。発電所については、出力の等しいEとF(またはG)で比較すると、Eはfに被害が出ると実質上その機能を停止するが、Fの場合e, gが同時に被害を受けない限り

供給経路が確保されるため、他からのFに対する依存度が高く、その分、被害発生時の影響は大きくなる。例えばe, fが同時に被害を受けた際、さらにEまたはFに被害が出る事を考えると、Fの場合の方が停電量が大きくなる。

4-2 増設効果シミュレーション

系統内停電量シミュレーションにおいてg,h発電所が被害を受けると、停電量が大きくなっており、しかもこれらの被害の有無が、停電量を大きく左右する事になる。これは消費地への供給が直接的に絶たれるためであり、変電所や送電線を増設して系統の構造を変えれば、その性質が改善される可能性もあるので、次のようなシミュレーションを行い、構造の性質を比較検討してみた。

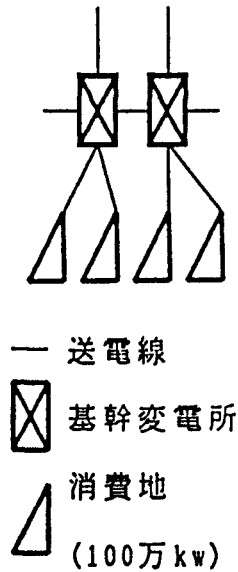


図7 基本モデル

図7の様な系統の一部を地域的に取り扱ったものを基本モデルとし、このモデルにおける設定を次

表10 基本モデルの電力供給量の確率分布、平均値、標準偏差

供給量(万kw)	0	200	400	平均供給量(万kw)	320
確率	0.04	0.32	0.64	標準偏差	113.1

のように定めた。

- ①各消費地の需要量は一律100万kWとする。
- ②送電線の切断は考えない。
- ③外部から基幹変電所へ接続するラインの電力供給量は、いずれも400万kWが確保できる。
- ④変電所の被害確率はこの地域内では一様とする。

ここで、ある任意の地震において、この地域の変電所の被害確率を0.2と仮定すると、基本モデルにおける電力供給量の確率分布、平均値、および標準偏差は表10のようになる。

この基本モデルに変電所や送電線を増設して、その平均供給量および標準偏差を比較するわけであるが、増設の際の設定は次のように定めた。

①複数の変電所から、特定の消費地への直接的供給は無い。

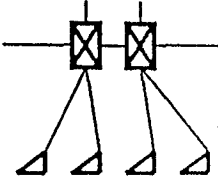
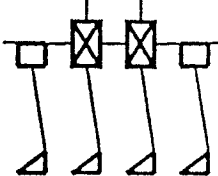
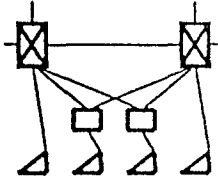
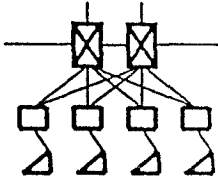
②増設する変電所の被害確率は基幹変電所と同じとする。

以上のような設定で基本モデルのような、狭い範囲内での地域的系統を考え、これに送電線および変電所を増設した際の、平均的供給量(期待値)と標準偏差を比較してみた。表11の②~④はその一例である。(①は基本モデル)

増設モデルの標準偏差はいずれも①より小さいが、これは①の供給パターンが0, 200, 400の3種類しか無く、平均供給量からかけ離れた数値になりがちであったのに対し、増設モデルでは、300という平均値に近い供給パターンを加えたために、供給量の不確実性が改善されたためである。

供給量は増設するほど低くなっているが、これは被害確率を一律にした事に影響している。なぜなら、各施設の被害を受けない確率が0.8であるため、いくら増設を行っても、期待値は $400 \times 0.8 = 320$ を超える事は無く、逆に増設された施設は②のモデルを除いて、いずれも他の施設の被害の影響

表11 増設モデル例

番号	系統モデル	平均供給量	標準偏差
①		320.00	113.1
②		320.00	80.00
③		313.60	96.45
④		307.20	100.4

基幹変電所
 増設変電所
 消費地
 — 送電線 (平均供給量の単位は万kw)

を受けるため、実質被害率(自分自身の被害確率と、他の施設の被害により間接的に供給停止となる確率の和)が0.2を上回るからである。したがって、被害確率の設定理由を考慮すれば、狭い範囲

内での施設増設はマイナス効果になる可能性が大きくなる。もう一つの原因として、最終的に消費地と接続している変電所が1つずつであるという事が挙げられる。なぜなら、ある地区へ複数の変電所から送電線が伸びていても、最終的には、それらを調整する変電所が必要になり、この場合いくら多重化を充実しても、最終変電所に被害が出ると、効果が発揮されなくなるからである。したがって施設増設の際は、耐震設計や復旧対策を強化して、その変電所の被害確率を低下させる必要性が生じる。一例として④のモデルにおいて、増設変電所の被害確率を0.1に設定してみると、その平均供給量と標準偏差は345.60と91.83となり、増設した利点が生かされるが、①のモデルの被害確率を0.1にした場合、平均供給量と標準偏差は360.0と84.85になるため、結局は増設しない方が良い結

強度)が低ければ、多重化の充実度が生かされない場合が多い。

5 おわりに



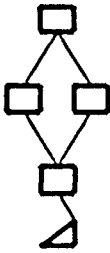
大都市ライフラインシステムの災害復旧対策について、ロマ・プリータ地震の被害と復旧状況の考察から次のような結果を得た。

1. ライフラインシステムは生活（生命）に関する機能であるため、災害後の機能停止期間が短いほど被害規模は減少する。(復旧対策の重要性)
2. ライフラインシステムの被害規模は機能停止状態の大きさと時間との積で考えられ、その意味では根本的な復旧よりも、とりあえず機能の運転を持続させる方が有効である。(応急復旧対策の重要性)
3. ライフラインシステムの復旧対策を供給系統全体で考える場合、多重化の存在が極めて重要である。(多重化の重要性)

以上のように多重化の重要性が確認されたため、電力供給系統モデルのシミュレーションを行い、次の結論を得た。

1. 大消費地に接続する変電所や大出力の発電所等の、一般的に末端に位置する施設の被害は大きな影響（停電）を与える。
2. 施設のむやみな増設は確率的に考えればマイナス効果になる可能性が高い。

表12 平均供給率(%) (被害確率0.1)

A	B	C
		
81.00	72.90	80.19

□ 変電所 — 送電線 ▲ 消費地

果になる。ここで表12を見ると、供給率はAが最も高いが、電圧降下等の都合上、中間変電所が必要不可欠となる場合(B, C)では、増設した方(C)が良くなる。つまり、必要範囲内での増設ならば有効であると言える。以上、増設降下シミュレーションから次のような事が言える。

- [I] 多重化は、広範囲において必要十分なつながりを持つべきであり、むやみな施設増設は、マイナス効果となる可能性が高い。
- [II] 末端の施設の信頼度（被害に対する総合的

文 献 — 覧

東京者
 1990 「いつか東京にも？」
 ロマ・プリータ地震東京都調査団報告
 望月利男・中野尊正
 1990 『巨大地震と大東京圏』 日本評論社
 日本経済新聞社
 1989 「緊急レポート・サンフランシスコ湾岸地震」
 『NIKKEI CONSTRUCTION』
 国土庁防災局
 1990 「サンフランシスコ湾岸地震の記録」

Key Words (キー・ワード)

Life Line System (ライフラインシステム), **Disaster Recovery Method** (災害復旧法), **Electric Power System** (電力網), **Redundancy** (多重化), **Positive Back Up** (積極的支援), **Negative Back Up** (積極的支援)

On a Simulation of Disaster Recovery Method for an Urban Life Line System

Tomohiko Mitsumori* and Kohei Suzuki*

*Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

Comprehensive Urban Studies, No. 44, 1991, pp. 127~141

Urban functions that have developed rapidly in Japan in recent years and have now reached the state of near completion, are prone to unexpected damage from secondary disasters. Since upgrading of individual elements has complex implications for the whole system, the possibility of damage exists even for parts that suffer no direct damage at the time of a disaster.

Among the urban functions, especially the so-called *life lines* - the functions related to daily life utility systems like electricity, gas and water supply lines, transportation and communication lines - have generally been greatly expanded. Furthermore, they cover a wide area, and when we consider their geographical indeterminacy, it is becoming extremely difficult to uniformly strengthen and secure the earthquake resistance of the system as a whole.

When we have to examine anti - earthquake counter measure to these life line systems, disaster prevention emphasizes recovery measures - besides giving due consideration to strengthening the earthquake-proof design of the facilities - in order to shorten the period of intermittence caused by the damage.

In this paper, we attempt a thorough inquiry into methods of recovery from damage to electric power lines, which occupy a crucial position among the life line systems, from the viewpoint of earthquake-proof design.