製品開発のためのスケジュールFMEA(第1報)*

—不具合モードとして作業の遅れのみが起こり得る場合—

山 品 元** 金 川 真 也*** 水 山 元**

Schedule FMEA for a Product Development Project (1st Report)

- The Case Where Delays in Activities are the Only Possible Failure Modes -

Hajime YAMASHINA, Shin-ya KANAGAWA and Hajime MIZUYAMA

In managing a product development project, one of the primary objectives is to minimize the gap between the resultant product quality and its predetermined target under the given due date constraint. Achieving this objective is not an easy task mainly because the fact that, due to uncertainties in the duration and the output of each activity, the project's lead-time and the product quality remain uncertain until the project is completed. In order to facilitate this task, the authors propose a new approach, called schedule FMEA. It classifies the possible outcome of each activity into several categories of results; success and one or some failure mode(s), and prepares a corrective action for each failure mode. If a failure mode is observed in running the project, the predetermined corrective action will be taken. In this article, only the truncation of each activity is considered as the optional corrective actions. In this case, the result of each activity is defined as success when it is completed with a shorter duration than the preset limit, otherwise it is regarded as failure and the corrective action will be taken, that is, the activity will be truncated. The problem of setting a limit to the duration of each activity is formulated as a dynamic decision making process, and a heuristic algorithm is developed to this problem. Some numerical examples are given to illustrate the power of the proposed approach.

Key words: CPM, FMEA, PERT, product development, project management, schedule FMEA

1. 緒 言

近年、多くの製造企業において、現行製品に品質改良を施した新製品を短期間で開発し、次々と市場に投入していくことが大きな目標となっている。通常、こうした企業においては、新製品を絶え間なく市場に送り出すことが特に重視されるため、個々の製品開発プロジェクトにおいては、計画されていた品質改良の一部を次世代以降に持ち越してでも、与えられた納期までに確実に開発を終えることが第一の条件となる。そして、この納期制約の下で、定められた品質、あるいはそれにできるだけ近い品質を達成しなければならない。

一般に、改善・革新には比較的限られた時間の枠内である程度の成果が期待できるという性格があるとされており¹⁾、適切な管理の下では、上で述べたような改良型の新製品開発にも、与えられた納期の枠内で相応の成果を期待することができる。しかしながら、今日、製品開発に与えられる納期は厳しくなり、製品品質に対する要求は高度になる傾向にあるため、製品開発プロジェクトの適切な管理は必ずしも容易ではなく、それを支援するための効果的なアプローチが強く求められている。

製品開発プロジェクトに含まれる作業の多くは、本質的に非定型的な作業であるため、作業時間にある程度の不確実性を伴うばかりか、得られる結果も完全に保証されているわけではない。各作業の「不確実性1：作業時間に関する不確実性」および「不確実性2：作業結果に関する不確実性」はそれぞれプロジェクトの総所要時間および得られる製品品質に不確実性をも

たらすため、当該プロジェクトの管理においては、これら二つの不確実性にいかに対応するかが重大な問題となる。

PERT/CPM²⁾に代表される従来のプロジェクト管理法では、作業時間を確率変数として捉えることによって上述の不確実性1のみを考慮した上で、総所要時間の平均や分散、納期遅れ確率などの推定を行っている。Golenko-Ginzburg³⁾およびWilliams⁴⁾は、作業時間に対してどのような確率分布を想定するべきかについて論じている。また、Gong and Hugsted⁵⁾、Soroush⁶⁾およびGong and Rowings Jr⁷⁾は、総所要時間の平均や分散、納期遅れ確率などに関する推定値の正確さを向上させる方法を提案している。Cho and Yum⁸⁾は、各作業が総所要時間の不確実性に与える影響の定量化を試みている。

しかし、これら従来の研究は、不確実性1の下で実際に納期を守るための手段を与えるまでには至っていない。また、不確実性2、およびそれが製品品質に与える影響については全く考慮していないため、不確実性2の下で所期の品質、あるいはそれにできるだけ近い品質を実現するための手段について検討することは難しい。さらに、不確実性1と不確実性2の間には何らかの関係が想定されるため、これら二つの不確実性に対応するための手段をそれぞれ独立に議論することは許されない。

これに対して、著者らは「これら二つの不確実性によって生じ得る各作業の状態を、許容できる正常な状態と、総所要時間や製品品質に重大な悪影響を及ぼし得る一つあるいはいくつかの不具合モードとに分類した上で、各不具合モードが生じた場合に施すべき対策をあらかじめ用意しておき、プロジェクト進行中に状況に応じて適切な対策を施していく」というアプローチを提案する。そして、このアプローチを、システムの信頼性向上の手段であるFMEAとの類似性から「スケジュールFMEA」と呼ぶことにする。

* 原稿受付 平成13年2月26日

** 正会員 京都大学工学研究科(京都市左京区吉田本町)

*** ソニー(株)(東京都品川区北品川6-7-35)

Fig.1 The precedence relationships among the activities

本論文では、スケジュールFMEAの第1ステップとして「作業の遅れ」という不具合のみが生じ、かつそれに対して「作業の打ち切り」という対策を用意する場合を想定する。この場合、各作業にそれぞれ作業時間の上限を設けておき、その上限までに完了しなければ不具合が生じたと判断して、当該作業に打ち切りという対策を施す（ただし、その後、プロジェクト自体は最後まで実施する）。このとき、納期制約が破られるのを防止するために、一部の作業を途中で中止することになるため、得られる製品品質は所期の目標よりも低下してしまう。したがって、各作業に不具合が生じたかどうかの判断基準、すなわち作業時間の上限を適切に設定することが重要なポイントとなる。

以下では、まず、上述の二つの不確実性、ならびにそれらの間の関係を考慮するために製品開発プロジェクトを改めてモデル化するとともに、各作業に作業時間の上限を設定する問題を、納期制約の下で、期待される製品品質をできるだけ所期の目標に近付ける問題として定式化する。さらに、この問題に対して近似解法を展開した後、数値例を用いてその有効性を示す。

2. プロジェクト管理問題の定式化

2.1 作業間の先行関係

対象とする製品開発プロジェクトは I 個の作業 $1, 2, \dots, I$ から構成されており、それらの間の先行関係は、図1に示すようなPERTダイアグラム $G(N, A)$ で表現できるものとする。ここに、 N は、当該プロジェクトの開始ノード1、終了ノード J を含むノードの集合 $(= \{1, 2, \dots, J\})$ 、 A はアークの集合である。各アークはそれぞれ一つの作業に対応しており、 A は作業の集合 $(= \{1, 2, \dots, I\})$ と見ることが出来る。

2.2 製品品質の評価

当該プロジェクトの対象製品は、 K 個の品質特性 $1, 2, \dots, K$ を持つものとする。各品質特性にはそれぞれあらかじめ目標値が定められているものとし、プロジェクトの結果として得られた品質特性 k ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) の値がその目標値に近接している度合を品質達成度 Q_k ($0 \leq Q_k \leq 1$) によって表す。ここに、 $Q_k = 1$ は、当該プロジェクトによって品質特性 k の値が所期の目標値に達したことを、 $Q_k = 0$ は、品質特性 k の値が全く改善されなかったことを、それぞれ表している。

さらに、当該製品の総合的な品質の尺度として総品質達成度 Q を次式で定義する（ここに、 u_k は、総和が1となる正数であり、品質特性 k の相対的な重要度を表している）：

$$Q = \sum_{k=1}^K u_k Q_k \quad (1)$$

各品質達成度 Q_k は、一般に、いくつかの作業の作業結果に依存している。ここでは、この関係の一次近似を用いて、 Q_k の値は次式によって決定されるものとする：

$$Q_k = \sum_{i \in A} v_{ki} q_i \quad (2)$$

ここに、 q_i は、作業 i の作業達成度である。これは作業結果を表す尺度であり、所期の作業結果が得られた場合は1、得られ

Fig.2 The relationship between τ_i and q_i

なかった場合は、後述するように、0以上1未満の値を取る。一方、 v_{ki} は、 i についての総和が1となる正数であり、各 q_i が Q_k に与える影響の大きさを表している。式(2)を式(1)に代入すると次式が得られる（ただし、 w_i は総和が1となる正数）：

$$Q = \sum_{i \in A} w_i q_i \quad (3)$$

2.3 作業の完了時間と打ち切り時間

任意の作業の作業達成度が1になることを当該作業の完了、作業開始から完了までの時間を完了時間とそれぞれ呼ぶことにし、作業 i の完了時間を c_i と表記する。 c_i は、一般には確率変数となり、その密度関数は次式で近似できることが多い²⁾：

$$f_i(c_i) = \frac{12(c_i - a_i)(b_i - c_i)^2}{(b_i - a_i)^4} \quad (4)$$

ここに、 a_i および b_i はそれぞれ c_i の楽観値および悲観値であり、それらの値は既知であるものとする。また、任意の c_i と $c_{i'}$ ($i \neq i'$) は互いに独立であるものとする。

当該プロジェクトでは、前述したように、各作業にあらかじめ作業時間の上限を設けておき、その時間までに完了しなければ、その作業を途中で打ち切る。ここに、この作業時間の上限を打ち切り時間と呼び、作業 i の打ち切り時間を d_i と表記する。以下では、任意の作業を極端に短い時間で打ち切ることは実際には難しく、また、 b_i を超える打ち切り時間を設定することに意味はないため、 $a_i \leq d_i \leq b_i$ であるとする。また、打ち切り時間 d_i は、作業 i を開始するまでは必要に応じて変更することができるが、作業 i の開始後は変更できないものと仮定する。

さらに、任意の作業の完了と打ち切りを併せて終了と呼び、作業 i の開始から終了までの時間を終了時間 $t_i = \min(c_i, d_i)$ と呼ぶことにする。完了時間 c_i が式(4)に従う確率変数であることから、終了時間 t_i もまた確率変数となる。そこで、打ち切り時間 d_i が与えられた下での期待終了時間を $\bar{t}_i(d_i)$ とおくものとする、これは次式で求められる：

$$\bar{t}_i(d_i) = \int_{a_i}^{d_i} c_i f_i(c_i) dc_i + d_i \int_{d_i}^{b_i} f_i(c_i) dc_i \quad (5)$$

2.4 作業達成度

任意の作業 i は、 $c_i > d_i$ の場合、経過時間 $\tau_i = d_i$ となった時点で作業達成度 $q_i < 1$ のまま打ち切られる。この場合、それまでに行った当該作業の内容が作業達成度に反映されるケース(case1)と反映されないケース(case2)があり得る。ここでは、作業開始後の経過時間 τ_i とその時点での作業達成度 q_i の間には、これらそれぞれのケースに対応した、図2に示す二つの典型的な関係のいずれか一方が成立するものと仮定する（なお、本論文では、作業の遅れ以外の不具合モードは生じないと想定していることから、作業達成度に影響を与え得る経過時間以外の要因は考慮しないものとする。また、以下の議論では、必要に応じてこれら以外の関係を想定することも可能である）。

作業 i の作業達成度 q_i は、 $c_i \leq d_i$ ならば 1 であり、 $c_i > d_i$ の場合は、case1 ならば d_i/c_i 、case2 ならば 0 でそれぞれ与えられる。完了時間 c_i が式 (4) に従う確率変数であることから、作業達成度 q_i もまた確率変数となる。そこで、打切時間 d_i が与えられた下での期待作業達成度を $\bar{q}_i(d_i)$ とおくものとすると、これは、case1 の場合、次式で求められる：

$$\bar{q}_i(d_i) = \int_{a_i}^{d_i} f_i(c_i) dc_i + d_i \int_{d_i}^{b_i} \frac{f_i(c_i)}{c_i} dc_i \quad (6)$$

一方、case2 の場合は次式で与えられる：

$$\bar{q}_i(d_i) = \int_{a_i}^{d_i} f_i(c_i) dc_i \quad (7)$$

2.5 プロジェクトの総所要時間と総品質達成度

当該プロジェクトの総所要時間 T は、PERT ダイアグラム $G(N, A)$ において、作業 i に対応するアークの長さを t_i とおいたときの、ノード 1 からノード J へのクリティカルパス $CP(t)$ の長さ $cp(t)$ によって与えられる。ここに、終了時間 $t = (t_1, t_2, \dots, t_I)$ は完了時間 $c = (c_1, c_2, \dots, c_I)$ および打切時間 $d = (d_1, d_2, \dots, d_I)$ の関数であるため、総所要時間 T もこれらの関数 $T(c, d)$ となる。一方、上述のように、 q_i が c_i および d_i に依存していることから、総品質達成度 Q もまた c および d の関数 $Q(c, d)$ となることが分かる。

2.6 打切時間の決定問題

当該プロジェクトにはあらかじめ納期が設定されているものとし、プロジェクト開始から納期までの時間を D とおく。このとき、打切時間の決定問題は、納期制約の下で、期待される総品質達成度を最大化する問題として、以下のように定式化することができる（ただし $E[\cdot]$ は期待値を表す）：

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &: E[Q(c, d)] \quad (\text{最大化}) \\ \text{納期制約} &: \max_c [T(c, d)] \leq D \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、任意の作業の打切時間は、それぞれ当該作業の開始前に、その時点での状況に応じて最終決定すればよい。このことから、各作業の打切時間を決定していく基本的な手順は以下のように整理することができる。ここに、 A_0 、 A_1 および A_2 は、未着手の作業、実行中の作業、および既に終了した作業の集合をそれぞれ示しており、作業 i の始点ノードおよび終点ノードを $from(i)$ および $to(i)$ 、ノード j を終点および始点とする作業の集合を $IN(j)$ および $OUT(j)$ とそれぞれ定義しておく：

- step1 $j^* = 1$, $A_0 = A$, $A_1 = \emptyset$, $A_2 = \emptyset$ とおく。
 - step2 $j^* = J$ ならば終了。
 - step3 各作業 $i \in OUT(j^*)$ について、打切時間 d_i を最終決定した後、 $A_0 = A_0 - OUT(j^*)$ および $A_1 = A_1 \cup OUT(j^*)$ とおき、それらの作業を開始する。
 - step4 任意の作業 $i \in A_1$ が終了した時点で $A_1 = A_1 - \{i\}$ および $A_2 = A_2 \cup \{i\}$ とおき、step5 へ。
 - step5 終了した作業 i について、 $IN(to(i)) \subset A_2$ ならば、 $j^* = to(i)$ において step2 へ。そうでなければ再び step4 へ。
- したがって、問題 (8) は、step3 での意思決定を繰り返し実行する確率的な多段階意思決定過程となることが分かる。

各意思決定時点では、既に終了した各作業 $i \in A_2$ について t_i および q_i が既知である。また、実行中の作業 $i \in A_1$ については d_i が確定済みである。したがって、step3 では、厳密には、これらについての条件付きの総品質達成度の期待値を納期制約の下で最大化するように各 d_i ($i \in OUT(j^*)$) の値を

決定することが求められる。しかし、ここでの目的関数は、当該意思決定だけでなく将来の意思決定にも依存するものである。これを厳密に評価するためには、多段階にわたる将来の確率的な意思決定過程を完全に記述する必要があるが、このことは現実には難しい。したがって、この問題を直接そのままの形で取り扱うことは困難であり、これを取り扱い容易な近似問題に変換した上で近似解を得ることが実際の課題となる。

3. 打切時間の決定法

3.1 成行管理的アプローチ

問題 (8) の近似解を得るための最も単純なアプローチは、打切時間をあらかじめ合理的に定める努力はせずに、各意思決定時点で、将来的に納期を確実に満足できるかどうかだけを検討し、このままでは納期を満足できない可能性があるときからはじめて、そこで開始する作業に必要な応じた打切時間を設定する、いわば成行管理的アプローチであろう。以下では、便宜上、このアプローチを「手法 1」と呼ぶことにする。

各意思決定時点では、既に終了した各作業 $i \in A_2$ の終了時間 t_i は確定しており、実行中あるいは今回開始する各作業 $i \in (A_1 \cup OUT(j^*))$ の終了時間 t_i の最大値は d_i (当該作業に特に打切時間が設定されていない場合は $d_i = b_i$ と考える) によって与えられる。一方、将来開始する各作業 $i \in A_0 - OUT(j^*)$ については、その終了時間 t_i の最大値を将来の意思決定によって a_i にまで短くすることができる。したがって、最終的に納期を確実に満足するためには、各意思決定時点において少なくとも次式を満足していなければならないことが分かる：

$$cp(s_0) \leq D \quad (9)$$

ここに、 $s_0 = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0I})$ の各要素は次式で定義される：

$$s_{0i} = \begin{cases} t_i & (i \in A_2) \\ d_i & (i \in A_1 \cup OUT(j^*)) \\ a_i & (i \in A_0 - OUT(j^*)) \end{cases} \quad (10)$$

したがって、手法 1 では、各意思決定時点において、式 (9) の制約の下で、そこで開始する各作業が期待総品質達成度を与える影響のみを最大化するように各 d_i ($i \in OUT(j^*)$) の値を決定していることになる。将来開始する各作業が期待総品質達成度を与える影響は考慮していないため、手法 1 は近視眼的なアプローチである。この手法を用いた場合、納期に十分な余裕がないと、プロジェクトの終盤に作業の大幅な打切りが集中し、満足度の高い近似解を得ることは難しいと考えられる。

3.2 静的最適化アプローチとそれを繰り返し用いる方法

一方、合理的に打切時間を設定しようとする場合の最も単純なアプローチは、問題 (8) を、プロジェクト開始前にすべての打切時間を決定する静的な意思決定として捉えることであろう。以下では、この静的最適化アプローチを「手法 2」と呼ぶことにする。この場合、いくつかの作業が設定した打切時間よりも短い時間で完了し、結果としてプロジェクトに新たに時間的な余裕が生じたとしても、プロジェクト進行中にその余裕を利用して総品質達成度の向上を図ることは困難である。したがって、手法 2 を用いるだけでは、必ずしも満足な性能が得られるとは限らない。

この難点を解消するための手段として、静的最適化アプローチを繰り返し用いることによって打切時間を必要に応じて更新していくことが考えられる。以下では、この方法を「手法 3」と呼ぶことにする。各意思決定時点では、既に終了した各作業 $i \in A_2$ の終了時間 t_i は確定している。したがって、手法

3では、各意思決定時点において、未着手の各作業の打切時間 d_i ($i \in A_0$) を決定変数とした次の問題を取り扱うことになる：

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &: \sum_{i \in A_0} w_i \bar{q}_i(d_i) \quad (\text{最大化}) \\ \text{納期制約} &: cp(s_1) \leq D \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 $s_1 = (s_{11}, s_{12}, \dots, s_{17})$ の各要素は次式で定義される：

$$s_{1i} = \begin{cases} t_i & (i \in A_2) \\ d_i & (i \in A_0 \cup A_1) \end{cases} \quad (12)$$

手法3では、各意思決定時点での目的関数として、そこで開始する各作業だけでなく、将来開始する各作業が期待総品質達成度を与える影響も考慮している。しかし、将来開始する各作業の打切時間は、プロジェクトに新たな時間的余裕が生まれた場合には変更される可能性があり、また、それは基本的に正の方向への変更である。このことは、各意思決定時点で、将来開始する各作業に短い打切時間を設定するほど、それらの作業の期待作業達成度をバイアスのかかった過小な値として評価する傾向があることを示している。この結果、手法3では、プロジェクトの初期に過剰に作業の打切りが行われがちになり、必ずしも満足度の高い近似解が得られるとは限らない。

3.3 提案する打切時間決定法

3.3.1 基本的な考え方

上述のように、手法1、手法2および手法3にはそれぞれ限界があるため、それらに代わる新たな手法を提案する。提案法では、各意思決定時点で d_i ($i \in OUT(j^*)$) の値を決定する際に、同時に d_i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) の値についても仮決定することにし、これらの値を用いて、前述の各意思決定時点における本来の目的関数を次式によって近似的に評価する：

$$\begin{aligned} E[Q(c, d)] \approx & \sum_{i \in A_2} w_i q_i + \sum_{i \in A_1} w_i \bar{q}_i(d_i) \\ & + \sum_{i \in OUT(j^*)} w_i \bar{q}_i(d_i) + \sum_{i \in A_0 - OUT(j^*)} w_i \bar{q}_i(d_i) \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、式(13)の右辺第1項は、既に終了した各作業 i ($i \in A_2$) が総品質達成度与えた影響を、第2項および第3項は、実行中の各作業 i ($i \in A_1$) および今回開始する作業 i ($i \in OUT(j^*)$) が総品質達成度与える影響の期待値をそれぞれ表している。一方、第4項は、これら以外の将来開始する各作業 i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) の打切時間 d_i を将来すべて最適に決定したとした場合に、それらの作業が総品質達成度与える影響の期待値を推定するための項である。

将来開始する各作業の打切時間 d_i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) は、式(9)および次の制約条件の下で、式(13)の右辺第4項の値が最大となるように仮決定するものとする：

$$cp(s_2) \leq D \quad (14)$$

ここに、 $s_2 = (s_{21}, s_{22}, \dots, s_{27})$ の各要素は次式で定義される：

$$s_{2i} = \begin{cases} t_i & (i \in A_2) \\ \bar{t}_i(d_i) & (i \in (A_0 \cup A_1) - IN(J)) \\ d_i & (i \in IN(J)) \end{cases} \quad (15)$$

この制約条件は、未終了の各作業 i ($i \in A_0 \cup A_1$) の終了時間 t_i がすべて結果としてその期待値 $\bar{t}_i(d_i)$ に等しい値をとった場合に、今回仮決定した d_i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) にも将来その値を変更する必要性が生じないという条件を近似的に表している（なお、プロジェクトの終了ノードが終点となっている任意

の作業 i ($i \in IN(J)$) について $s_{2i} = d_i$ であるのは、結果的に $t_i = \bar{t}_i(d_i)$ となるとしても、それが事前に分かるわけではないので、後続作業のないこれらの作業では $t_i = d_i$ でも納期に間に合うように打切時間を設定しておく必要があるためである）。したがって、ここで仮決定した各 d_i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) の値は、 $t_i = \bar{t}_i(d_i) \forall i \in A_0 \cup A_1$ となった場合には最適な選択となることが分かる。さらに、任意の作業 i ($i \in (A_0 \cup A_1) - IN(J)$) について、 $t_i > \bar{t}_i(d_i)$ であったならば、後続のいずれかの作業の打切時間を負の方向に、 $t_i < \bar{t}_i(d_i)$ であったならば、正の方向に、それぞれ変更することになるため、式(13)の右辺第4項は、明らかに負のバイアスが生じる前述の手法3の場合よりも、比較的バイアスの小さい推定値になると期待できる。

以上より、問題(8)を、各意思決定時点における静的な意思決定問題の系列として次のように変換することができる：

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &: \sum_{i \in A_0} w_i \bar{q}_i(d_i) \quad (\text{最大化}) \\ \text{納期制約} &: cp(s_0) \leq D, \quad cp(s_2) \leq D \end{aligned} \quad (16)$$

ここに、決定変数は各 d_i ($i \in A_0$) であり、式(13)の右辺の第1項および第2項は決定変数には依存しないので省略した。決定変数のうち、各 d_i ($i \in OUT(j^*)$) の値は当該意思決定によって確定し、各 d_i ($i \in A_0 - OUT(j^*)$) の値はこの時点では仮決定であり、将来的に変更する可能性がある。

3.3.2 解法アルゴリズムの展開

上で得られた各意思決定時点における静的な組合せ最適化問題は、原理的には列挙法によって最適解を得ることができるものであるが、実際には、プロジェクトの規模とともに、このことは困難になる。また、この問題自体が近似問題であるため、最適解に固執することに大きな意味はない。むしろ現実には、比較的簡単かつ直感的に理解しやすい方法で近似解を得ることが重要である。そこで、各意思決定時点での近似解法アルゴリズムとして以下の手順を提案する：

- step1 $d_i^* = b_i$ ($i \in A_0$) および $d_i^* = d_i$ ($i \in A_1 \cup A_2$) とおく。
- step2 $cp(s_0(d^*)) \leq D$ ならば step4 へ。
- step3 作業 $i \in OUT(j^*) \cap CP(s_0(d^*))$ について $d_i^* = d_i^* - (cp(s_0(d^*)) - D)$ とおき、step2 へ戻る。
- step4 $cp(s_2(d^*)) \leq D$ ならば d_i^* ($i \in A_0$) を解として終了。
- step5 各作業 i ($i \in A_0$) について、下述の品質影響度 $\Delta Q_i(\delta_i)$ と時間影響度 $\Delta T_i(\delta_i)$ ($\delta_i = 1, 2, \dots, \delta_{i, \max}$) を求める。
- step6 $\Delta T_i(\delta_i) / \Delta Q_i(\delta_i)$ が最大となる i と δ_i の組を選択し、 $d_i^* = d_i^* - \delta_i$ において step4 へ戻る。

ここに、品質影響度 $\Delta Q_i(\delta_i)$ および時間影響度 $\Delta T_i(\delta_i)$ は、 $d = d^*$ の状態から、作業 i の打切時間をさらに δ_i 短縮することによる品質面および時間面への影響を表す指標であり、それぞれ次式で定義される：

$$\Delta Q_i(\delta_i) = w_i \{ \bar{q}_i(d_i^*) - \bar{q}_i(d_i^* - \delta_i) \} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_i(\delta_i) &= \begin{cases} \bar{t}_i(d_i^*) - \bar{t}_i(d_i^* - \delta_i) & (i \in CP(s_2(d^*)) \cap \overline{IN(J)}) \\ \delta_i & (i \in CP(s_2(d^*)) \cap IN(J)) \\ 0 & (i \notin CP(s_2(d^*))) \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

また、 $\delta_{i, \max}$ は、 $\Delta T_i(\delta_i) \leq cp(s_2(d^*)) - D$ となる δ_i ($\leq d_i^* - a_i$) が存在する場合は、その最小の値、存在しない場合は、 $d_i^* - a_i$ であるとする。

Table.1 The quality levels obtained in case1

K_D	method1	method2	method3	proposed
0.25	0.85(0.03)	0.88(0.03)	0.89(0.03)	0.89(0.03)
0.50	0.89(0.03)	0.93(0.02)	0.94(0.03)	0.94(0.03)
0.75	0.94(0.04)	0.96(0.02)	0.97(0.02)	0.97(0.02)
1.00	0.98(0.03)	0.98(0.01)	0.98(0.01)	0.99(0.02)
1.25	1.00(0.01)	0.99(0.01)	0.99(0.01)	1.00(0.01)
1.50	1.00(0.00)	1.00(0.00)	1.00(0.00)	1.00(0.00)
mean value (standard deviation)				

上述のアルゴリズムでは、まず、step2 および step3 で、納期制約 (9) を満足する初期解 d_i^* ($i \in A_0$) を導出する。次に、step4 で、いずれかの作業の打切時間をさらに短縮する必要があるかどうかを判断する。そして、その必要があると判断された場合に、step5 および step6 で、品質面での影響が小さく、時間面で効果が大きい作業を同定し、その打切時間を短縮する。このように、当該アルゴリズムには直感的に理解しやすいという利点がある。

4. 数 値 実 験

4.1 実験結果の一例と考察

提案したプロジェクト管理法の効果を確認するために、某企業から得られた実データを含む様々な条件の下で多くの数値実験を行った。ここでは、その結果の一例を示す。対象プロジェクトとして、図1に示した先行関係を持つプロジェクトを取り上げた。各作業の w_i , a_i , b_i の値については、4通りの異なる設定を用意した。このとき、 w_i の値は、一様乱数で与えた後、総和が1となるように尺度調節した。また、 (a_i, b_i) の値は、(3, 8), (6, 16), (9, 24), (12, 32), (15, 40) の中からランダムに与えた。これらの各設定の下で、完了時間 c の実現値の異なる与え方をそれぞれ25通り想定した。そして、以上の合計 $4 \times 25 = 100$ 通りの条件の下で、納期の厳しさを変化させながら、手法1、手法2、手法3および提案法をそれぞれ適用し、総品質達成度を求めた。

各手法を適用した場合に得られた総品質達成度の平均および標準偏差を表1(case1)および表2(case2)に示す。表における K_D の値は、納期の厳しさの指標であり、次式で定義される：

$$K_D = \frac{D - cp(a)}{cp(\bar{c}) - cp(a)} \quad (19)$$

ここに、 a および $\bar{c}$ は、それぞれ完了時間の樂觀値および期待値のベクトルである。例えば、 $K_D = 0$ は、すべての作業が完了時間の樂觀値で終了しないと納期に間に合わないことを、 $K_D = 1$ は、すべての作業が完了時間の期待値で終了すればちょうど納期に間に合うことを、それぞれ表している。

総品質達成度の平均は K_D の値が小さくなるのに伴って低下する傾向にある。この傾向はいずれの手法にも当てはまるが、手法1を用いた場合に最も大きい。また、case1 よりも case2 の方がこの傾向が強い。手法1は、納期に余裕がある場合 ($K_D > 1$ の場合) は提案法と同程度の性能を示す一方で、納期に余裕がない場合 ($K_D < 1$ の場合) には提案法を含む他の三つの手法よりも性能が劣る。提案法と手法2および手法3とを比較すると、提案法の性能が平均的に最も高く、続いて手法3、手法2の順となる。また、case1 よりも case2 の方がその差が顕著である。case2 で K_D の値が小さい場合、提案法における標準偏差が他の二つの手法よりも若干大きい。一つの例外を除いてその差は平均値の差以下である。その他の場合は、どの手法においても標準偏差はほぼ等しい。なお、ここで示した以外の他の事例に適用した場合も同様の傾向が見られた。

Table.2 The quality levels obtained in case2

K_D	method1	method2	method3	proposed
0.25	0.57(0.05)	0.58(0.07)	0.61(0.08)	0.61(0.09)
0.50	0.68(0.08)	0.71(0.07)	0.76(0.07)	0.78(0.09)
0.75	0.81(0.11)	0.80(0.07)	0.84(0.08)	0.90(0.08)
1.00	0.92(0.10)	0.87(0.07)	0.91(0.05)	0.95(0.07)
1.25	0.99(0.04)	0.91(0.05)	0.96(0.04)	0.99(0.04)
1.50	1.00(0.00)	0.95(0.04)	0.98(0.03)	1.00(0.00)
mean value (standard deviation)				

納期面での要求が厳しくなると K_D の値は小さくなる。また、品質面での要求が厳しくなると、各作業の作業時間や作業結果に関する不確実性が増し、結果として K_D の値が低下し、case2 の作業が増加する。上述の実験結果より、納期に余裕がある場合には成行管理的アプローチでも十分であるが、納期面や品質面での要求が厳しい今日的な状況になるのに伴って、打切時間を合理的に定めるための努力が重要になることが分かる。このとき、各作業の打切時間は、プロジェクト進行中の状況に応じて動的に更新していくことが望ましく、また、そのためのアプローチとしては、比較対象として取り上げた他の手法よりも、提案法の方が平均的に有効であることが確認できた。

5. 結 言

本論文では、不確実性をはらんだ製品開発プロジェクトを管理するための手段として、スケジュールFMEAという概念を提唱した。そして、作業の打切りという対策のみを考えた下で、その具体的なアプローチを展開し、次の結果を得た：

- (1) 各作業に打切りという対策を施す必要があるかどうかの判断基準、すなわち打切時間の決定問題を確率的な多段階意思決定過程として定式化することに成功した。
- (2) この問題に対して提案した近似解法アルゴリズムは、プロジェクト開始前にすべての打切時間を静的に最適化する方法や、それを繰り返すことによって打切時間を更新していく方法よりも有効である。
- (3) 納期面や品質面での要求が厳しい今日的な状況になるのに伴って、提案法の効果は大きくなる傾向にある。

本論文では、単一の製品開発プロジェクトを対象としたが、実際には、複数プロジェクトをリソース制約の下で同時に管理していかなければならないことも多い。そこで、次報では、リソース面での対策を考慮した複数プロジェクトのためのスケジュールFMEAのアプローチを提案する。

参 考 文 献

- 1) 山品 元ほか (編著)：製品開発リードタイムの短縮 — TPM とコンカレント・エンジニアリング —, 日本プラントメンテナンス協会, (1994) 17.
- 2) Moder, J.J., Phillips, C.R. and Davis, E.W.: Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming, Van Nostrand Reinhold Company, (1983).
- 3) Golenko-Ginzburg, D.: On the Distribution of Activity Time in PERT, J. Opl. Res. Soc., 39, 8 (1988) 767.
- 4) Williams, T.M.: Practical Use of Distributions in Network Analysis, J. Opl. Res. Soc., 43, 3 (1992) 265.
- 5) Gong, D. and Hugsted, R.: Time-Uncertainty Analysis in Project Networks with a New Merge-Event Time-Estimation Technique, Int. J. Proj. Manage., 11, 3 (1993) 165.
- 6) Soroush, H.M.: The Most Critical Path in a PERT Network, J. Opl. Res. Soc., 45, 3 (1994) 287.
- 7) Gong, D. and Rowings Jr, J.E.: Calculation of Safe Float Use in Risk-Analysis-Oriented Network Scheduling, Int. J. Proj. Manage., 13, 3 (1995) 187.
- 8) Cho, J.G. and Yum, B.J.: An Uncertainty Importance Measure of Activities in PERT Networks, Int. J. Prod. Res., 35, 10 (1990) 2737.