

論文の内容の要旨

論文題目	二変量時間変数に基づく信頼性寿命解析とその応用
学 位 申 請 者	横山真弘

市場型製品を製造する企業にとって、市場から取得される故障データや打ち切りデータなどの寿命データを解析することにより、製品の寿命特性を把握し、最適な予防保全方法などの検討が可能となる。その際の寿命データを測る時間尺度は、暦時間のみでなく、実使用量に関する複数の時間尺度（走行距離、エンジンの起動回数など）も検討することが必要である。さらに、その中でどの時間尺度が最も寿命分布を記述するのに適しているのかを検討することが大切となる。その際、故障メカニズムから一つの時間尺度を選択しうる場合もあるが、複数の時間尺度が影響する場合も考えられる。

本論文では、正常な稼働を維持するために保全を必要とする製品の実寿命データを扱っている。このデータは、累計で8988台分があり、故障発生時には暦時間と累積使用量の二つの時間尺度で測定された故障データが得られ、打ち切り時（観測期間中の最終動作確認時点）にも同様に、二つの時間尺度で測定された打ち切りデータが得られている。さらに、この製品の1080台に関しては、故障と打ち切り時点以前の途中の履歴が得られている。この途中の履歴の各時点を結ぶことで、この1080台の製品の累積使用量曲線（二変量の故障時点や観測打ち切り時点に至るまでの暦時間と累積使用量の軌跡）を描くことができ、その累積使用量曲線が直線となる様子を確認した。即ち、製品間では使用頻度（暦時間での単位期間における累積使用量の増分）に差があるものの、各製品内では使用期間中に使用頻度が大きくは変化しない特徴を持つことがわかる。複数の時間尺度で観測されている寿命データの解析では、使用頻度のような各時間尺度から観測される変量同士の関係も考慮することが求められる。そこで本論文では、累積使用量曲線が直線と仮定される製品に対する使用頻度を考慮した二変量寿命データの解析方法を提案する。

本論文は、表計算ソフトウェアなどで容易に実装できることを念頭に、二次元平面を離散化して寿命データを集計する集計表を扱う。その際の集計表は、寿命データの散布図全体の領域を、対数変換した軸上で等間隔な矩形となる格子で覆うようにする。これにより、直線となる累積使用量曲線の傾き（使用頻度）の値に応じた層別が可能となる。この層別を行った上で、本論文では条件付き累積ハザード関数の推定方法を提案する。

また、提案方法を実データ（8988台）に適用した際の推定結果を示し、推定結果に基づく解析方法とその結果を示すことで、提案方法により使用頻度を考慮した解析が可能となることを示す。本論文では、推定した条件付き累積ハザード関数の結果をもとに、故障の発生率の様子や各時間尺度への故障の依存性をより視覚的に捉えることを目的とした三次元ワイブルプロットによる解析と、条件付き累積故障確率・同時累積故障確率への変換による解析の二つを示した。

加えて、累積使用量曲線を考慮しない先行研究を用いて推定した同時累積故障確率と提案方法により推定した同時累積故障確率の結果が大きく異なることを受けて、シミュレーションにより従来研究との性質の違いについて検証を行い、本提案方法の有効性について考察した。

さらに、発展的な内容として、共変量を活用した解析を提案する。市場から取得される故障データは、各製品のユーザにより様々な使われ方や環境条件で使用された下で測定される。製品の使われ方や環境条件などのように故障の発生に影響を与えうる要因は共変量と呼ばれる。従来の市場型製品の寿命データ解析においては、製品の使用途中に逐次的に共変量を取得することは難しかった。しかし、近年の情報通信技術の発達により、共変量の活用が可能になりつつある。先行研究において、寿命変数 T に対して共変量を取り入れた変数 T^* に変換するモデルが提案されている。しかし、先行研究を用いた解析を行う際には、変換した変数 T^* の寿命分布の型をあらかじめ定めておくことが必要である。本論文は、変換した変数 T^* の真の寿命分布がワイブル分布に従っている場合に、寿命分布を対数正規分布と仮定しても共変量の影響を表すパラメータを近似的に推定可能であることを解析的に示し、シミュレーションによりその近似の有効性を確認した。

そして最後に、本論文の内容をまとめ、今後の取り組むべき、寿命データ解析への共変量のさらなる活用の展望について述べる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 横山 真弘

審査委員主査 鈴木 和幸

委員 田中 健次

委員 長岡 浩司

委員 植野 真臣

委員 田原 康之

第1章において、寿命データ解析における時間尺度の検討の重要性、複数の時間尺度で観測される変量同士の関係の考慮、使用頻度・累積使用量曲線・共変量の定義と必要性、本研究の目的が示されている。本論文では、ある製品の二変量寿命データの実データが示されている。このデータは、累計で8988台分があり、故障発生時には暦時間と累積使用量の二つの時間尺度で測定された故障データが得られ、打ち切り時（観測期間中の最終動作確認時点）にも同様に、二つの時間尺度で測定された打ち切りデータが得られている。このデータの基で、一変量と二変量の寿命データ・寿命分布が定義されている。さらに、この製品の1080台に関して、故障と打ち切り時点以前の途中の履歴のデータも得られている。この途中の履歴の各時点を結ぶことで、1080台の製品の累積使用量曲線（二変量の故障時点や打ち切り時点に至るまでの履歴）を描くことができ、その累積使用量曲線が直線となる様子が示されている。即ち、製品間では使用頻度（暦時間での単位期間における累積使用量の増分）に差があるものの、各製品内では使用期間中に使用頻度が大きくは変化しない特徴を持つことがわかる。これにより、暦時間と累積使用量の二つの時間尺度で観測される二変量寿命データの解析において、使用頻度に着目した解析を行う必要性、累積使用量曲線を考慮する必要性が示されている。そして上記の背景に基づき、「累積使用量曲線を直線と仮定した二変量寿命データから使用頻度を考慮した寿命特性を把握する」という本研究の目的が示されている。それに加えて、近年の情報通信技術の発達に伴い、共変量（使われ方・環境条件など、製品の故障に対して影響を与えうる要因）の寿命データ解析への活用の必要性についても述べられている。

第2章において、一変量の寿命分布と累積ハザード関数の関係、二変量の条件付き分布および同時分布と、その条件付き累積ハザード関数と同時累積ハザード関数の関係が示され、累積使用量曲線を考慮した推定と考慮しない推定との違いについて述べられている。

第3章において、一変量の累積ハザード関数の推定に関する先行研究として、Nelson-Aalen推定量(O. Aalen 1978), (W. Nelson 1972) が示されている。さらに、二変量の累積ハザードの推定量(O. Pons 1986)が示されており、先行研究(O. Pons 1986)の推定量は累積使用量曲線を考慮した推定を行っていないことが述べられている。

第4章において、条件付き累積ハザード関数の推定方法が提案されている。本論文の提案方法は、表計算ソフトウェアなどで容易に実装できることを念頭に、二次元平面を離散化して寿命データを集計する集計表を扱っている。その際の集計表は、寿命データの散布図全体の領域を、対数変換した軸上で等間隔な矩形となる格子で覆うように定められており、これにより、直線となる累積使用量曲線の傾き(使用頻度)の値に応じた層別が可能となることが述べられている。

第5章において、提案方法を実データ(8988台)に適用した際の推定結果と推定結果に基づく解析方法とその結果が示されている。それにより、提案方法を用いることで、使用頻度を考慮した解析が可能となることが示されている。推定結果に基づく解析方法としては、推定した条件付き累積ハザード関数の結果をもとに、故障の発生率の様子や各時間尺度への故障の依存性をより視覚的に捉えることを目的とした三次元ワイブルプロットによる解析と、条件付き累積故障確率・同時累積故障確率への変換による解析の二つが示されている。さらに、提案方法による同時累積故障確率の推定値を先行研究(O. Pons 1986)を用いた方法による推定値と比較した際に、推定結果が大きく異なることが示されている。

第6章において、累積使用量曲線を考慮しない先行研究(O. Pons 1986)を用いて推定した同時累積故障確率の結果と提案方法による結果とが大きく異なるという第5章での内容を受け、シミュレーションにより提案方法と先行研究との性質の違いについて検証がなされ、本研究の提案方法の有効性が示されている。

第7章において、共変量を用いた、より発展的な寿命データ解析に関する研究内容が述べられている。まず、共変量を用いた先行研究が示されている。先行研究では、寿命変量 T に対して共変量を取り入れた変量 T^* に変換するモデルが用いられているが、変換した変量 T^* の寿命分布の型をあらかじめ定めておく必要がある。そして、本研究の主張として、変換した変量 T^* の真の寿命分布がワイブル分布に従っている場合に、寿命分布を対数正規分布と仮定しても共変量の影響を表すパラメータを近似的に推定可能であることが述べられている。さらに、上記の主張をスコア関数の比較により解析的に示し、シミュレーションによりその近似の有効性の確認し、サンプル数や分布のパラメータの影響について考察している。さらに、共変量を取り入れて累積使用量曲線に直線性が成り立つように変換した変量 T^* を用いることにより、第4章における提案方法の適用の幅が広がることが述べられている。

第8章において、本論文の内容のまとめが述べられ、今後に取り組むべき寿命データ解析への共変量のさらなる活用の展望について述べられている。

以上より、本論文は市場寿命データを解析する上での有用な知見を与えるものとして、博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。