論文の内容の要旨

大文字

論文題目: Satisfiability judgment of modal logics
and their application to verification problems
(様相論理の充足可能性判定手続きと検証問題への応用)

氏名: 田辺 良則

様相論理を用いて，XML 文書をはじめとする木構造を扱うシステムを解析する研究が行われている．このような解析を可能とする鍵になるのは，充足可能な論理式は木構造によって充足される，という性質であり，これは木モデル性と呼ばれている．最小の様相論理 **K** をはじめとするいくつもの様相論理がこの性質を持っている．木モデル性により，木構造の性質を記述するために論理式を使うことができる．また，木モデル性は充足可能性問題が決定可能であることを証明する際にも重要な役割を演じる．

本論文では，必ずしも木構造ではないグラフ構造に関する解析に応用可能な様相論理について研究することを主目的とする．あつかう論理は，解析したいグラフ構造の性質を記述できるだけの表現力を持つ必要がある．また，充足可能性問題が決定可能であること，さらに，実用的な応用を想定すれば，効率的な充足可能性判定手続きが存在することが要求される．

上述の条件を満たすため，様相論理 **K** に対して，以下の拡張を行う: (a) 不動点演算子 μ および ν の導入．ただし，不動点演算子のネストにある種の制限を設ける．この導入により，到達可能性など，応用上頻繁に現れる性質が記述できるようになる．(b) ノミナルと呼ばれる原子論理式の導入．この導入により，木モデル性が失われる．木構造以外のグラフを記述するための鍵となる拡張である．(c) 逆様相の導入．論理の記述力が増加する．また，検証問題への応用において必要になる，グラフを変換する操作に関する最弱事前条件が，逆様相を用いた論理式で記述できる．(d) 関数型クリプキ構造への制限の導入．この制限は，ある種のグラフ，たとえばプログラムのヒープ構造などを扱う際に必要である．

以上の導入は，おのおの独立に行いうる．解析したいグラフの構造や操作に応じて，適当な組み合わせが考えられる．しかし，その任意の組合せが応用可能なわけではない．上記 (a) から (d) までのすべてを導入した論理の充足可能性判定問題は，決定不能であることが知られている．しかし，3 種類を導入した論理はどの組み合わせでも蹴って可能である．本研究では，応用上重要な 3 つの組み合わせに関して，具体的な判定手続きを与え，その正当性を証明する．この判定手続きが適用可能であるためには，不動点演算子のネストに制限が必要であるが，この制限によって，従来知られている手続きに比較して計算量が小さくなっており，効率的な実装が可能である．このため，以下に述べるような，応用が実現可能となる．

論文の後半では，様相論理の充足可能性決定手続きを応用した，2 つの分野の検証問題を扱う．ひとつの応用分野は，シェープ解析である．手続き型プログラム言語におけるポインタ操作における，データ構造の形状に関する検証を行う枠組みを構築する．前述のある組み合わせに関する充足可能性判定手続きを用いて，ツールを実装し，いくつかの検証問題が解けることを示す．検証問題には，シェープ解析における検証手段の実効性の目安となる例題である Deutsch-Schorr-Waite マーキングアルゴリズムと呼ばれるアルゴリズムの正当性の検証を含む．もうひとつの応用は，一次元セルオートマトンである．セルオートマトンのなす無限遷移系の性質を検証するために，様相論理を利用した有限抽象遷移系を構成する方法を与え，これに基づいた実装を行う．