

2次元メッシュ生成システムの開発

高田 修、中西広吉、堀之内成明、永岡 真

(株) 豊田中央研究所

480-11 愛知県愛知郡長久手町長湫横道41-1

あらし 「車体空力解析」、「エンジン筒内流解析」および「塑性変形解析」などの計算力学の分野の専門家のメッシュ生成プロセスを分析し、そのモデル化を行なった。このモデルに基づきシステム設計を行ない、2次元メッシュ生成システムを試作した。エンジンポート・筒内モデルに適用し、システムの妥当性を確認した。本システムは、分野毎に知識を実装することにより、様々な分野に容易に展開できる。システムの特長は次のとおりである。(1)複数の推論方式を組み合わせそれらをメタルールにより制御することにより、複雑な処理の流れを容易に記述することができる。(2)文脈を考慮した依存関係に基づく探索手法により効率よく解を求めることができる。

和文キーワード 人工知能、探索問題、推論制御、計算流体力学、構造解析、塑性変形解、メッシュ生成

Two-dimensional Mesh Generation System

Osamu TAKATA, Koukichi NAKANISHI,
Nariaki HORINOUCI, Makoto NAGAOKA

Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc.

Nagakute, Aichi, 480-11, Japan

Abstract

This paper describes an expert system called GENMAI (Artificial Intelligence Mesh GENERator), which automates two-dimensional quadrilateral mesh generation. We analyzed mesh generation process by experts in the fields of computational mechanics: vehicle aerodynamics, internal flow in engines and plastic deformation analysis, and formulated this process as follows. (1) Subdivide complex region into meshable subregions by applying domain knowledge. (2) Generate meshes in each subregion satisfying connectivity. Based on this idea, GENMAI is widely applicable to a large class of two-dimensional geometry. Efficient search method and extensive inference engine is also discussed.

英文 key words

Artificial Intelligence, Search Problem, Inference Engine, Computational Fluid Dynamics, Structure Analysis, Plastic Deformation, Mesh Generation

1. はじめに

構造解析や塑性変形解析、衝突解析、そして、計算流体力学などは総称して計算力学と呼ばれている。これらは近年の計算機の性能の向上により適用範囲が急激に拡大してきている。計算力学における一連の作業にはメッシュ生成(前処理)、解析(本計算)、解析結果の評価(後処理)の3つの過程がある(図1)。

解析に関しては、スーパーコンピューターなどの発展に伴い高速化、高精度化がはかられ、ソフトウェアなどの環境もかなり整備されてきた。

一方、メッシュ生成、解析結果の評価に関しては、市販の自動メッシュ生成システムやグラフィックス処理システムなどが構築されつつある。しかし、これらのソフトを利用したとしても質の良いメッシュ生成や解析結果の的確な評価を行なうためには、対象分野の多くの経験や知識を必要とし、経験の浅いユーザでは対処することが困難である。また、熟練したユーザであっても試行錯誤を繰り返し、多くの工数を要しているのが現状である。このように現状では、メッシュ生成や解析結果の評価の大部分は人手により行なわれているため、これらのタスクを自動化するニーズが高い。

例えば、車体回りの空気の流れ場を解析する場合、本計算はスーパーコンピューターにより数十時間ですむのに対して、新しくメッシュを生成するには1~3人月かかる。

このようなニーズに関して、人工知能のアプローチが有効であるとされ、いくつかのシステ

ムが開発されている。しかしながら、現在開発されているシステムは、種々の問題点を持っているため実用化には至っていない。

例えば、NASAで開発されているEZGRIDは、2次元の翼回りの流れ場の解析用のメッシュ生成システムとして有名である[1]。しかし、翼以外の対象への展開や3次元への拡張が困難である。

また、Sandia国立研究所で開発されているAMEKSは、構造解析用のメッシュ生成システムであり、汎用性は比較的高い[2]。しかし、予めシステム内に登録されているパターンに基づいて処理を進めており、新しい形状への取り扱いに問題がある。

当所でも、「車体空力解析」、「エンジン筒内流解析」および「塑性変形解析」をはじめとする数値シミュレーションを行なっている。これらの解析におけるメッシュ生成のプロセスを分析した結果、各分野において個々の知識などは異なってはいるが、基本的な考え方および知識の使い方などが同じであることが分かり、共通に使えるツールの構築が可能であると判明した。

今回この分析に基づいて、システム設計を行ない、2次元メッシュ生成システム(GENMAI: Artificial Intelligence Mesh GENERator)を試作した。本システムは、分野毎に知識を実装することにより、様々な分野に容易に適用できる。その特長は、複雑な処理フローを容易に記述できる知識表現と推論方式、および複数の解を同時に効率よく求める探索手法にある。

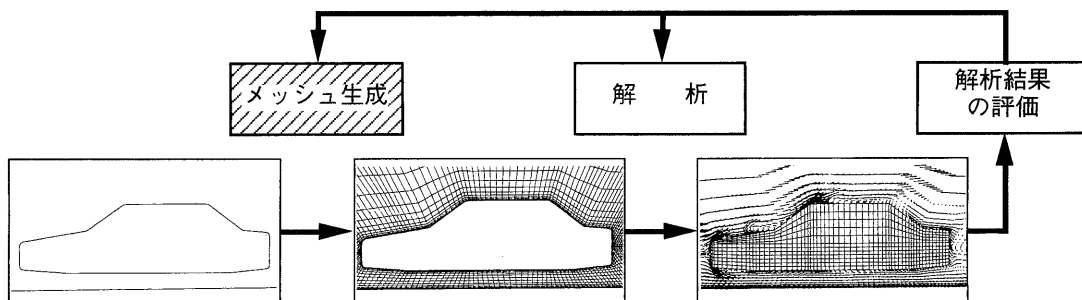


図1. 計算力学プロセス

2. システム概要

2.1. ねらい

メッシュ生成に関しては、形状、境界条件、解法の特徴、格子体系、物理特性など考慮すべき点が多く、分野固有の知識や経験などを多く必要とする。また、質のよい格子を生成するには、熟練した専門家でも多くの試行錯誤を繰り返す必要がある。

そこで、本研究では、以下の点をねらいとして、システム開発を行なう。

- ・ノウハウを知識ベース化し、経験の浅いユーザーでも質のよいメッシュを生成できる。
- ・分野毎に知識を実装することにより様々な分野に容易に適用できる。

2.2. 入出力

入力：対象を表す形状点列の座標、形状点列の属性(直線、円弧、スプライン曲線)および点列の持つ境界属性(内部・外部物体、壁、流入・流出など) (図2)

出力：解析ソルバーに応じた格子点座標の並び

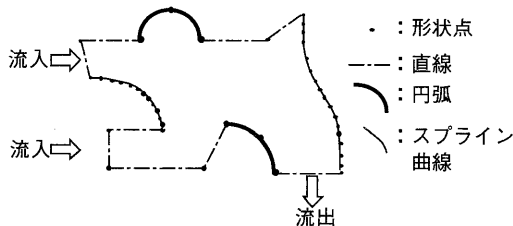


図2. 入力対象の表現

2.3. データ表現

システムでは、入力、出力およびシステム内で扱う形状をオブジェクトで表現している。また、本システムは、2.7節で示すように複数の解(分割パターン)を同時に生成する。これを実現するために、世界(文脈)毎にデータを定義するようにした。各世界におけるデータの定義は継承される世界からの変化分だけを登録するようにした。

例えば、図3にデータの継承の例を示す。世

界 w_1, w_2, w_3 が図3の左図のように構成されているとき、あるオブジェクトに関して、 w_1 において x, y 属性がそれぞれ x_1, y_1 、 w_2 において x, z 属性がそれぞれ x_2, z_2 、 w_3 において x, z 属性がそれぞれ x_3, z_3 と登録されているとき、各世界でのデータの値は図3の右図のように継承される。

	x	y	z
w_1	x_1	y_1	--
w_2	x_2	y_1	z_2
w_3	x_3	y_1	z_3

--: 未定義

図3. データの継承

各世界におけるデータの参照、登録は、それぞれ`get_data`、`put_data`述語により行なわれる。これにより、異なるクラスのデータも同じ枠組みで扱え、知識の記述性や可読性が高い。

- ・参照：`get_data`(クラス名, インスタンス名, 世界, 属性名, 値)
- ・登録：`put_data`(クラス名, インスタンス名, 世界, 属性名, 値)

以下にシステムが扱うデータのクラスを示す。

- (1)対象領域：メッシュ生成の対象となる領域(図2)
- (2)基本領域：対象領域を分割していく過程でシステムが取り扱う基本となる領域。各基本領域は分割線により2つの基本領域に分割される。最終的には、全ての基本領域が副領域となる。(図4の2つの領域)
- (3)副領域：複雑な形状をもつ対象領域を幾つかに分割し単純形状とした小領域の各々。それぞれの副領域においては、トランスファイナイト法などにより確実にメッシュが生成できる。(図5の各領域)
- (4)境界セグメント：同一の境界属性を持つ連続した線分の集まり。セグメントの列で構成される。(図4の黒丸には含まれた線分)
- (5)セグメント：本システムにおいて形状表現の基本単位となる線分。(図4の白丸では含まれた線分)
- (6)点：セグメントおよび分割線の端点など

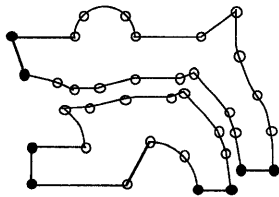


図4. 基本領域

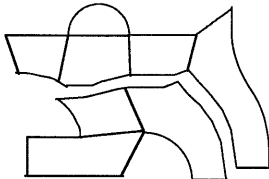


図5. 副領域

2.4. システムのモデル化

計算力学の各分野の専門家のメッシュ生成プロセスを分析した結果、以下のような試行錯誤を繰り返し、適切なメッシュを生成していることがわかった。

- (1)与えられた対象領域に関して、分野固有の経験や知識を用いて、まず、全体領域を大まかな部分領域に分割する。
- (2)各部分領域に関して、トランスファイナイト法などを適用し、格子を生成させる。
- (3)全体での整合性をチェックし、よければ終了し、そうでなければ(1)に戻る。

上記の専門家のプロセスの分析結果を基に、メッシュ生成過程を以下のようにモデル化を行なった(図6)。なお、(3),(4)のプロセスは、基本領域が全て副領域になるまで繰り返される。各プロセスは知識に基づいて推論される。

- (1)入力データの内部表現への変換：入力された形状表現点および形状点の持つ属性値を、システム内部で用いるデータ表現(セグメント、点など)に変換する
- (2)基本領域の抽出：与えられた対象領域の流入(入口)と流出(出口)の関係を調べ、必要があればカット線を入れて2つの基本領域を生成する(図6の右上)。不要ならば対象領域を基本領域とする。
- (3)基本領域の初期化：各基本領域に関して、流入・流出ベクトル、分割始点など

の属性を決定する。

- (4)副領域分割：各基本領域に関して、分割線の始点、終点を決定し、分割後の領域の評価を行ない、2つの基本領域に分割する(図6の右下)。
- (5)格子生成：得られた副領域に関して、各副領域の辺上にばらまく格子点数などを決定し、トランスファイナイト法により格子を生成する(図6の左下)。
- (6)全体の調整：全ての副領域の接続関係を調べて、スムージングやマージを行ない、最終的な格子を生成する。

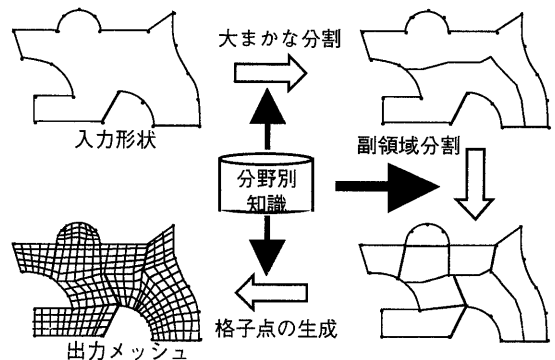


図6. メッシュ生成過程

2.5. 推論方式

前節で示したようにメッシュ生成過程は、大まかな処理の流れが決まっており、ある処理をした後に次にどの処理をすればよいかは予め分かっている。このような処理の流れを知識に基づいて推論する方法として、メタルールによる推論制御がある。これは、あるルール群を適用した後に別のルール群を適用するといった制御である。

しかしながら、メタルールによる推論制御を行なったとしても、MEA, LEXなどの比較的単純な競合解消戦略では、個々のルールの適用順序などをユーザーが陽に制御することが難しい。そのため、以下に示す5つの競合解消戦略を用意した。

戦略1のデータを新しく登録された順にソートしたものがMEA戦略であり、ルールの

条件部の数の多い順番にソーティングしたものがLEX戦略である。

ワーキングメモリ内にデータwm1, wm2, ..., wmNが、知識ベースにルールr1, r2, ..., rMがあるとする。ただし、これらのデータおよびルールの順番は予め決められているとする。

- (1)戦略1(wm-rule)：ルールを固定して、データをwm1, wm2, ...という順に調べ、条件部を満足したデータについて結論部を実行し、次の推論サイクルに移る。もし、条件部を満足するデータが1つもない場合には、次のルールに関して同様の処理を進める。
- (2)戦略2(wms-rule)：ルールを固定して、全てのデータ(wm1, wm2, ..., wmN)について条件部を調べ、条件部を満足したデータについて、結論部を実行し、次の推論サイクルに移る。もし、全てのデータが条件部を満足しない場合には、次のルールに関して同様の処理を進める。
- (3)戦略3(wms-rules)：ルールを固定して、全てのデータ(wm1, wm2, ..., wmN)について条件部を調べ、条件部を満足したデータについて、結論部を実行し、次のルールについて同様に処理を進め、全てのルールを適用したら、次の推論サイクルに移る。
- (4)戦略4(rule-wm)：データを固定して、ルールをr1, r2, ... と順に調べ、条件部を満足したルールについて結論部を実行し、次の推論サイクルに移る。もし、条件部を満足するルールが1つもない場合には、次のデータに関して同様の処理を進める。
- (5)戦略5(rules-wm)：データを固定して、全てのルール(r1, r2, ..., rM)について条件部を調べ、条件部を満足したルールについて、結論部を実行し、次の推論サイクルに移る。もし、全てのルールが条件部を満足しない場合には、次のデータに関して同様な処理を進める。

なお、照合処理、競合解消処理およびルールの発火はインタープリターにより実行時に行なわれる。

システムでは、これらの競合解消戦略を組み

合わせて推論することにより、複雑な手続き的な処理を知識を用いて、簡便に記述できるようになった。これら推論制御はこのシステム固有のものではなく、一般的な合成型の問題へも展開できる。

これらの推論制御は以下に示すinference__engine述語によりメタルールとして記述される。

- ・ inference_engine(戦略, 知識ベース名, 世界, ワーキングメモリ)

2.6. 知識の分類

2.4節のメッシュ生成過程のどのプロセスで使われるかということを中心に、知識を以下のようになを分類した([]内は使われるプロセス名を示す)。知識は、データの参照、登録述語などオブジェクトの操作述語により記述される。また、条件部および結論部にはPrologの述語も書くことができる。

- (1)カット線の要否に関する知識[基本領域抽出]
流体計算において、流入面、または流出面が二つ以上ある場合や内部物体がある場合には、カット線と呼ぶ基本領域分割に相当する線を設定する必要がある。ここでは、その要否を判定する。
- (2)カット線生成に関する知識[基本領域抽出]
カット線の始点になる点の決め方や、その点からの線の出し方などを決定する。
- (3)基本領域の属性の定義に関する知識[基本領域の初期化]
例えば基本領域を、流入領域、中間領域、流出領域という属性に分けて処理行うなど、属性に応じてその処理内容は異なる。ここでは、知識を適用するために必要となる各種属性の初期設定を行なう。
- (4)分割線の始点の決定に関する知識[基本領域の初期化]
隣接セグメントの交点角度や端点角度などから、その点における分割線の要否を判定する。
- (5)分割線を出す順番に関する知識[副領域分

割]

分割線を出す必要な始点に対して、始点の出す順番を決定する。

(6)分割線の終点の決定に関する知識[副領域分割]

分割線の出し方とその終点を決定する。

(7)分割線・分割領域の評価に関する知識[副領域分割]

形状のよいメッシュを生成するため、分割線がセグメントとなす角度や、副領域の形状を評価する。

(8)格子点数の決定に関する知識[格子生成]
属性に応じて、格子点の粗密を決定する。

2.7. 探索手法

図7に示すように、1つの基本領域において、分割線の始点、終点が複数あるため、その選び方により分割パターンにバリエーションが生じる。図7の同じハッチングされている基本領域は形状(文脈)の等しいものである。単純に探索を行なうと組合せ爆発が生じる。

本システムでは、同じ文脈のものをまとめて管理することにより、ATMSと同じような探索の効率化をはかっている[3]。また、分割線により2つに分割された基本領域の片側が最終的に副領域に展開できない場合(NGのとき)、もう一方の基本領域もNGとすることにより探索の効率化をはかっている。これは、ATMSのhyper resolutionに相当する[4]。

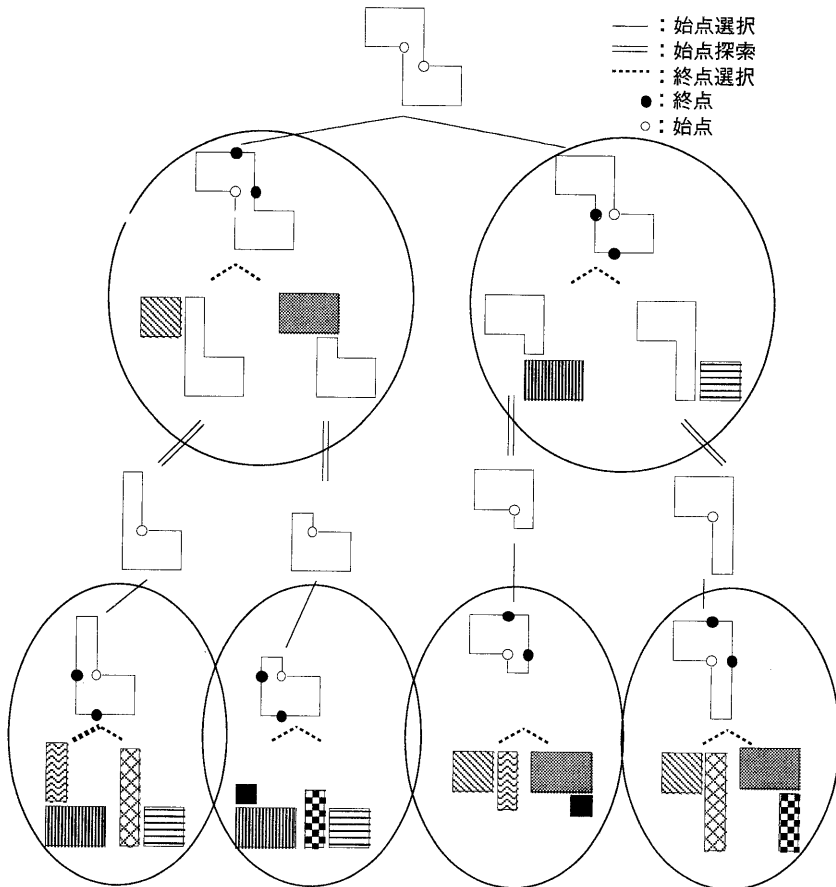


図7. 基本領域の分割プロセス

さらに、本システムは、各推論フェーズ[2.4節の(3)、(4)]において、制約条件を満足する全てについて探索するのではなく、各フェーズでの評価値の高い上位n個(ユーザーが実行時に指定する)について探索を進めるようにしている。

上位n個について探索を進め、最終的に基本領域を副領域に展開できないときには、依存関係に基づいてバックトラックを行なう。これは、各文脈毎にバックトラックのための候補を登録しておいて、ある基本領域を展開できないとき、バックトラックの戦略に従い次の候補について探索を進める。

現在の探索の戦略制御を以下に示す。この戦略は、失敗したノードに一番近いものに戻って探索を進めるため、動作としては、Prologのdepth-firstに似ているが、一度計算した文脈については再計算しないため、効率がよい。

- (1)知識に基づき分割線の始点を求める(図7の=)。
- (2)知識に基づき始点の探索する順番を決める(図7の一)。
- (3)(2)で得られた一番最初のの始点について、知識に基づき終点を求める(図7の点線)。
- (4)(3)で得られた全ての分割について制約条件をチェックし、満たさないものを棄却する。
- (5)(4)で全てのものが棄却された場合、(2)に戻り次の始点で探索を進める。さらに(2)において探索すべき始点がない場合にはその基本領域を棄却し、その前のフェーズに戻る。
- (6)(4)で得られた各分割パターンについて順

位づけを行なう。

(7)(4)で得られた上位n個について(1)~(6)のプロセスを繰り返す。ただし、これらの操作は両方の基本領域が全て副領域になるまで繰り返される。

探索の戦略はユーザーが陽に設定することができる。システムには、各ノードに評価値を付加しておいて評価値の高いノードにバックトラックする戦略や、ヒューリスティクスによる戦略あるいは制約を緩和しながら探索を進める戦略がある。

3. 実行例

2.4節のメッシュ生成過程のモデルを基にシステムを試作した。今回試作した部分は、2.4節の(1)および(3)~(5)である。システムはPrologにより記述され、数値計算およびインターフェースなど一部分をC言語により記述されている。

以下に図8に示すエンジンポート・筒内について実行した結果を示す。

図9に図8の代表的な副領域パターンを、図10にその格子生成パターンを示す。

図11に図8の左側半分について処理を進めたときの探索の流れを示す。ただし、上位2個について探索をした場合を示す。

細線の四角は基本領域を、太線の四角は副領域を示す。また、四角の中の数字は探索した順番(生成される基本領域の順番にも対応している)を示している。ただし、一部省略したものである。

初期の基本領域1において5つ(a, b, c, d, e)の分割始点があり、基本領域1について始点aから

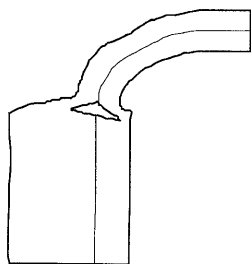


図8. 入力：エンジンポート・筒内モデル

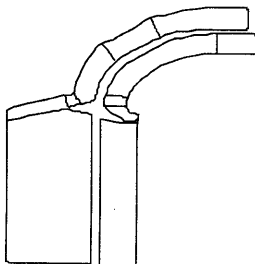


図9. 出力：副領域分割例

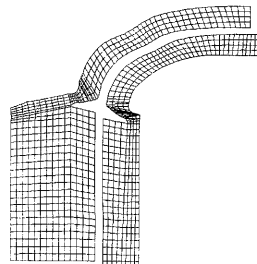


図10. 出力：格子生成例

[2, 3]と[4, 5]という2つの分割パターンが生成される。3と5が副領域であるため、基本領域2と4について探索を進める。まず、4について進めると残り4つ(b,c,d,e)の分割始点がある。4について始点bから[8, 9]という分割パターンが生成される。以下同様に探索を進めると図11のようになる。×印のついた基本領域は分割に失敗し処理を進めることができず、バックトラックを起こしたものである。53と59、55と61および30と144は同じ文脈のもの(∥の付いているもの)で53、55および144については再計算を行わない。ハッチングのされている基本領域はバックトラック時に使用される候補である。

4. まとめ

「車体空力解析」、「エンジン筒内流解析」および「塑性変形解析」の専門家のメッシュ生成プロセスを分析し、メッシュ生成過程をモデル化した。

このモデルに基づきシステム設計を行ない、基本部分のプログラムを開発した。2次元エンジンポート・筒内モデルに適用し、システムの妥当性を確認した。

本システムは、分野毎に知識を実装することにより、様々な分野に容易に適用することができる。特長は、以下のとおりである。

- ・複数の推論方式を組み合わせ、それらをメタルールにより制御することにより、複雑な処理の流れを容易に記述することが可能である。

- ・依存関係に基づく探索手法により効率よく解を求めることができる。

今後は、得られた複数の解を評価する手法を組み込みさらに探索効率をあげる。

【参考文献】

- [1] A.E.Andrews: Knowledge-based zonal grid generation for computational fluid dynamics, NASA Conf. Publ. No. NASA-CP-3019, pp. 73-80(1988)
- [2] T. D. Blacker, J. L. Mitchiner, L. R. Phillips, and Y. T. Lin : Knowledge system approach to automated two-dimensional quadrilateral mesh generation, Proc. ASME Int. Comput. Eng. Conf., pp.153-162(1988)
- [3] J. deKleer: An Assumption-based TMS, Artif. Intell., Vol. 28, No.2, pp. 127-162(1986)
- [4] J. deKleer: Extending the ATMS, Artif. Intell., Vol. 28, No.2, pp. 163-196(1986)

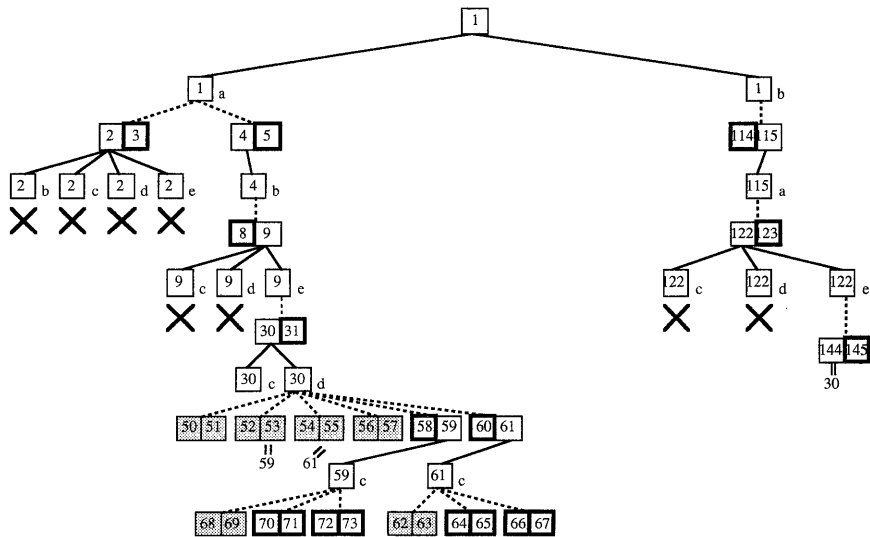


図11. 出力：探索の流れ