

可視化ライブラリ KVS の OpenXR サポート機能の開発  
仕様書

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

システム計算科学センター

高度計算機技術開発室

## 目次

第 I 部 契約に関する一般事項 .....	3
1. 作業の実施形態 .....	3
2. 作業項目 .....	3
3. 作業方法および作業期間 .....	3
4. 納入品目 .....	3
5. 納期および納入場所 .....	4
6. 検査 .....	4
7. 検収 .....	4
8. 貸与品 .....	4
9. 計算機の利用 .....	5
10. 協議事項 .....	5
11. 産業財産権等 .....	5
12. グリーン購入法の推進 .....	5
第 II 部 技術仕様 .....	6
1. 目的 .....	6
2. 要素技術の概要 .....	7
2.1. 可視化ライブラリ KVS .....	7
2.2. CS-PBVR .....	7
3. 作業内容 .....	9
3.1. 動作環境 .....	9
3.2. 開発項目 .....	9
3.3. 機能・性能評価試験 .....	12
3.4. ドキュメント類の作成 .....	12

本発注仕様書は、日本原子力研究開発機構システム計算科学センター（以下、原子力機構）が行う、「可視化ライブラリ KVS の OpenXR サポート機能の開発」について記述するものである。第Ⅰ部は契約に関する一般事項を定め、第Ⅱ部は本作業の目的、内容および基本仕様を定めるものである。

## 第Ⅰ部 契約に関する一般事項

### 1. 作業の実施形態

本作業は、原子力機構の発注により受注者が実施し、その成果は第 4 項に定める納入品として、原子力機構に納めるものとする。

### 2. 作業項目

本作業では、「可視化ライブラリ KVS の OpenXR サポート機能の開発」を行うために以下の項目を実施する。

- (1) プログラムの開発作業
- (2) 機能・性能評価試験
- (3) 報告書等の納入資料の作成

### 3. 作業方法および作業期間

本作業は受注者の環境を利用して実施し、契約成立日以降速やかに開始し、納期内に全作業を終了するものとする。ただし、原子力機構が必要と認めた場合は、原子力機構において作業を行うこともできるとする。

ソフトウェアの開発には C++による標準の開発環境、可視化ライブラリ KVS、そして CCSE が開発した遠隔可視化アプリケーションである CS-PBVR を利用する。

### 4. 納入品目

- |                          |     |
|--------------------------|-----|
| (1) ソースプログラム             | 1 式 |
| (2) 実行バイナリ               | 1 式 |
| (3) 詳細設計書                | 1 部 |
| (4) マニュアル                | 1 部 |
| (5) 作業報告書                | 1 部 |
| (6) 上記(1)～(4)を格納した DVD-R | 1 式 |

(3)～(5)はマイクロソフト社 Office 製品 (Word、Excel 等) および PDF で作成すること。受注者は納期までに、上記の納入品目の電子ファイルと印刷物を、DVD-R およびファイルリングした形で、システム計算科学センターに納入すること。

## 5. 納期および納入場所

- (1) 納期  
令和6年10月15日
- (2) 納入場所  
日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター  
〒277-0871 千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4 東京大学・  
柏の葉キャンパス駅前サテライト 4F

## 6. 検査

納入品に対しては、納入時に以下の検査を行う。

- (1) 動作確認試験  
第4項(1)(2)に基づき納入されたプログラム・実行バイナリが、仕様書に記載された機能と性能を満足すること。
- (2) 書類検査  
納入品の書類が本仕様書に定める内容を満たしていることを確認する。
- (3) 員数検査  
納入品が第4項で定めた事項に定める数量を満たしていることを確認する。

## 7. 検収

第6項に定める検査に合格することをもって検収とする。

## 8. 貸与品

本作業の実施にあたり、原子力機構から受注者に対して以下のものを無償貸与する。

- (1) ソフトウェア
  - ・ CS-PBVR のプログラム一式
- (2) 原子力機構の認めたドキュメント類
  - ・ CS-PBVR のマニュアル
  - ・ その他コンパイラ仕様手引書等の関連文書

## 9. 計算機の利用

受注者は性能評価試験の実施にあたり、柏に設置されている下表の PC を無償で利用できる。

表 1 性能評価試験で利用可能な計算機

マシン名	Alienware m18
OS	Windows 11
CPU	Intel Core i9
RAM	32GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX™4090

また、受注者は性能評価試験の実施にあたり、柏に設置されている以下の VR 用表示装置を無償で利用できる。

- (1) Meta Quest Pro
- (2) HTC VIVE
- (3) PICO4

## 10. 協議事項

本作業を的確に実施するために、原子力機構及び受注者は必要に応じ密接に協議を行う。本仕様書に関して疑義が生じた場合、または仕様書に規定されていない事項については、相互合意に基づき協議を実施する。

## 11. 産業財産権等

産業財産権等の取扱いについては、別紙—1「産業財産権特約条項」に定められたとおりとする。

## 12. グリーン購入法の推進

(1) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適用する環境品（事務用品、OA 機器等）が発生する場合は、これを採用するものとする。

(2) 仕様に定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

## 第 II 部 技術仕様

### 1. 目的

システム計算科学センター（CCSE）では、中長期計画の一環として大規模流体シミュレーション技術を開発しており、その計算結果を効率的に可視化・解析するための技術が必要とされている。また、仮想現実（Virtual Reality, VR）を利用した可視化は、対話性を伴った立体映像を提示することで複雑な 3 次元データを直感的に把握できるようになるため、シミュレーションの可視化・解析に有効である。昨今では、表示装置やモーションセンサのポータブル化によりヘッドマウントディスプレイ（HMD）型の VR 装置が普及しており、科学可視化に活用されるようになってきた。現在、CCSE では HMD を利用してシミュレーションを VR 空間中で解析する機能の開発を推進している。

CCSE は粒子ベースボリュームレンダリング（Particle Based Volume Rendering, PBVR）という可視化手法に基づく独自可視化ソフトウェアを開発しており、遠隔地のデータを可視化できるクライアント・サーバ型 PBVR（CS-PBVR）として公開している。CS-PBVR は C++ ベースのアプリであり、OpenGL、可視化ライブラリ KVS、そして GUI ライブラリ Qt により実装されている。CS-PBVR ではプログラミングモデルとしてオブジェクト指向を採用しており、アプリケーションの各機能をクラス化することで可読性、保守性、拡張性を維持してきた。

CS-PBVR は表示装置として HMD を選択することで遠隔地のデータを対話的に VR 可視化できる。CS-PBVR の VR 可視化機能は HMD 向けの API を標準化するプラットフォームである OpenXR で構築されている。当時利用していた KVS ver. 2.9 は Qt に対応していなかったため、CS-PBVR は GUI 管理に関する部分を独自実装していた。その影響により OpenXR を取り込む際に様々なクラスに波及し、CS-PBVR の可読性、保守性、拡張性が低下した。

2003 年にリリースされた可視化ライブラリ KVS ver. 3.0 は Qt に正式対応したため、CS-PBVR の GUI 管理に関する部分を KVS 側へと分離できるようになり、洗練された記述が可能になった。その結果、KVS の内部に OpenXR サポートのためのクラスを構築し、それを利用してより洗練された CS-PBVR の VR 可視化機能が設計可能になった。

本作業では可視化ライブラリ KVS ver. 3.0 を対象にして OpenXR による VR 可視化機能をクラスとして構築する。そして CS-PBVR がそのクラスを利用して表示装置をディスプレイから HMD に変えられるように機能開発する。そして、開発したクラスと CS-PBVR の動作確認および性能測定を実施し、設計書やユーザマニュアル等の書類を作成する。

## 2. 要素技術の概要

### 2.1. 可視化ライブラリ KVS

KVS はシミュレーション結果データや医療用データ等の3次元データ向け可視化アプリケーションを簡単に開発するための可視化ライブラリである。KVS はポリゴンによる等値面、ラインによる流線、グリフによるベクトル場の矢印表示、そして PBVR によるボリュームレンダリング等、様々な可視化に対応しており、KVS を用いてプログラミングをすることで可視化アプリケーションの構築が可能になる。

KVS は Windows、Linux、MacOS 上で動作するクロスプラットフォームのライブラリである。C++ で記述され、OpenGL をラッピングすることでレンダリング機能を構築している。そして、KVS は GLUT、OSMesa、GLFW、OpenCV をサポートしており、最新の KVS ver. 3.0 からは Qt がサポートされている。

KVS はオブジェクト指向のプログラミングモデルを採用しており、モジュール化された各クラスを図 1 に示すパイプラインに従って接続することで可視化アプリを構築できる。モジュールはデータリード、フィルタリング、マッピング、そしてレンダリングの4つに分類され、各モジュールの出力を次のモジュールに渡すことで可視化処理を実現する。画面のシーングラフは Scene クラスで、レンダリング画像は Screen クラスで管理される。詳細はオープンソースの可視化ライブラリ KVS の公開ページを参照すること。

KVS 公開ページ : <https://github.com/naohisas/KVS>

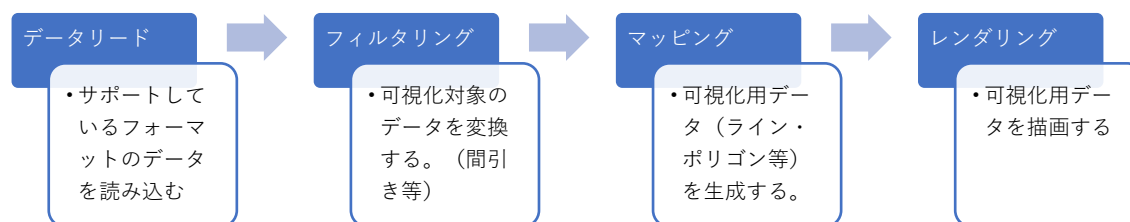


図 1 KVS の可視化パイプライン

### 2.2. CS-PBVR

流体解析で有効性が知られるボリュームレンダリングという可視化手法では、計算結果データ (ボリュームデータ) の格子以上に定義された物理値に対して色と不透明度が割り当てられ、3次元の物理値の分布が可視化される。

PBVR はボリュームレンダリングのアルゴリズムの一つである。PBVR は色・不透明度を参照しながら格子内部に可視化用の粒子データを生成し、それを画像面に投影することで画像を生成する。粒子生成処理は不透明度から粒子密度を計算し、要素毎に並列化されたモンテカルロ法により粒子分布を形成する。生成された粒子データは視点独立であり、粒子の再計算無しに視点変更が可能である。レンダリング処理は、画面上のインデックスバッファ、デプスバッファに粒子データを投影し、粒子の色情報を平均化することで最終的なピクセルの色の値を計算する。

CS-PBVR は PBVR の粒子生成処理とレンダリング処理を分割し、遠隔サーバと手元のユーザ PC で分散処理することで遠隔可視化を実現したアプリケーションである。CS-PBVR の構成を図 2 に示す。CS-PBVR は遠隔サーバ上の大規模データを分割するフィルタプログラム、粒子生成処理をおこなう粒子計算プログラム、そして、ユーザ PC でレン

ダリング処理をおこなうクライアントプログラムの3つのプログラムから構成されている。はじめに、可視化の前処理としてフィルタプログラムによりデータを分割する。そして、粒子計算プログラムとクライアントプログラムが ssh トンネルで接続され、遠隔可視化が実行される。クライアントプログラムは、可視化結果を表示する画面と、色・不透明度を編集するための可視化パラメータ編集用 GUI で構成されている。

CS-PBVR は C++ で記述され、その GUI は Qt を利用して構築されている。またレンダリング機能は可視化ライブラリ KVS を利用して開発されている。CS-PBVR の詳細はオープンソース web ページを参照すること。

CS-PBVR 公開ページ : <https://ccse.jaea.go.jp/software/PBVR/>

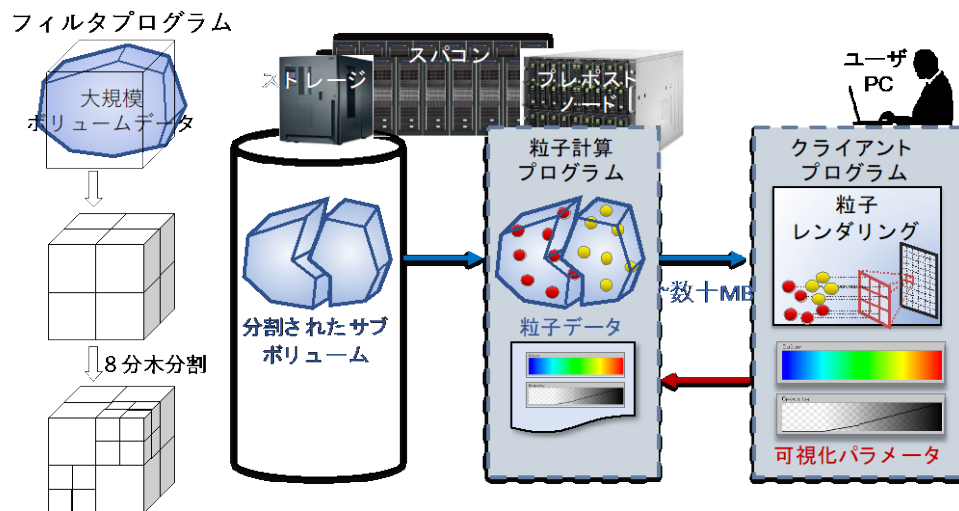


図 2 CS-PBVR の構成



## 3. 作業内容

本作業では可視化ライブラリ KVS ver. 3.0 (以降 KVS) を対象にして OpenXR による VR 可視化機能をクラスとして構築する。そして CS-PBVR がそのクラスを利用して表示装置をディスプレイから HMD に変えられるように機能開発する。そして、開発したクラスと CS-PBVR の動作確認および性能測定を実施し、設計書やユーザマニュアル等の書類を作成する。

### 3.1. 動作環境

動作対象 OS を Windows11、コンパイラを Microsoft Visual Studio 2019 / 2022、GUI 開発環境を Qt6 とする。そして、動作対象 HMD を Meta Quest Pro、HTC VIVE、および PICO4 とする。

### 3.2. 開発項目

以下の機能について、KVS 上でクラスとして実装する。

1. VR 表示機能
2. VR 空間の幾何変換ハンドラー
3. VR 空間のハンドモデル表示
4. フライスルー
5. VR 空間の 2次元 UI 表示
6. VR 空間のキーボード

開発するクラスに関して下記条件を満たすように開発する。

- KVS/Source ディレクトリ以下に SupportOpenXR ディレクトリを追加しその内部にコード追加する。
- kvs.conf ファイル内に OpenXR サポートフラグを追加し、KVS\_SUPPORT\_OPENXR = 1 とすることで機能を有効化する。
- クラスは名前空間 kvs::OpenXR で呼び出せる。
- 可能な限り KVS のコーディング規約に則る。

上記のクラスを利用して CS-PBVR 上で HMD を利用する機能を実装する。

7. kvs::OpenXR クラスによる VR 表示

これらの開発項目について以下の節で記述する。

#### 3.2.1. VR 表示機能

OpenXR SDK を利用して、KVS の既存のレンダラーを VR 表示する機能を実装する。この機能は従来の KVS によるプログラミングモデルと同様に kvs::OpenXR::Screen のように名前空間でクラスを指定してコーディングできるように開発する。

この機能は Qt を使用して実装された CS-PBVR で呼び出せるように開発するため (開発項目 7)、KVS の SupportQt の派生クラスとして作成すること。

### 3.2.2. VR空間の幾何変換ハンドラー

HMD 付属の VR コントローラを利用した可視化オブジェクトの幾何変換機能を開発する。VR コントローラの情報を OpenXR で取得し幾何変換を実行する。この機能は VR コントローラのトリガーを押下した状態で以下の両手のジェスチャを検出し幾何変換するように開発する。

- 並行移動：両手を並行移動する
- 拡大縮小：両手の距離を変える
- 回転：両手の中心点を軸に回転

この機能は KVS のマウスイベントハンドラと同様に SupportOpenXR のデフォルトイベントとして実装すること。

### 3.2.3. VR空間のハンドモデル表示

OpenXR で取得する VR コントローラ的位置にハンドモデルを表示する。ハンドモデルは PLY 形式で読み込み可能とする。またデフォルトのハンドモデルとして配布してもライセンス的に問題のないモデルを付属させる。

### 3.2.4. フライスルー

VR コントローラを利用したフライスルー機能を実装する。OpenXR で取得する VR コントローラのスティック（縦横指定ボタン）とコントローラの向きの情報を利用して以下のように実装する（図 3）。この機能は片方のコントローラに実装し、指定により左右を選択可能なように実装する。

- スティック操作縦：コントローラの向きに前後移動
- スティック操作横：コントローラの向きに対する垂線を軸に回転



図 3 フライスルー機能と VR コントローラの対応

### 3.2.5. VR空間の2次元UI表示

CS-PBVR は多数の可視化機能をディスプレイ上の 2次元 GUI として持っている。この GUI を VR 空間で利用するために、バーチャルデスクトップの機能を実装する。バーチャルデスクトップは VR 空間内にパネルを表示して利用中のデスクトップ画面をパネルに表示する機能である（図 4）。以下の機能を開発する。

- マウス移動の代わりに VR コントローラの指す位置でマウスカーソルを操作する。
- マウスクリックの代わりに VR コントローラのボタン押下を割り当てる。
- バーチャルデスクトップの ON/OFF を VR コントローラのボタンに割り当てる。

- デスクトップの表示範囲を自由に指定、あるいはウインドウ指定できる。VR 空間中のパネルのサイズは指定できるようにする。
- 表示位置は眼の前とする。

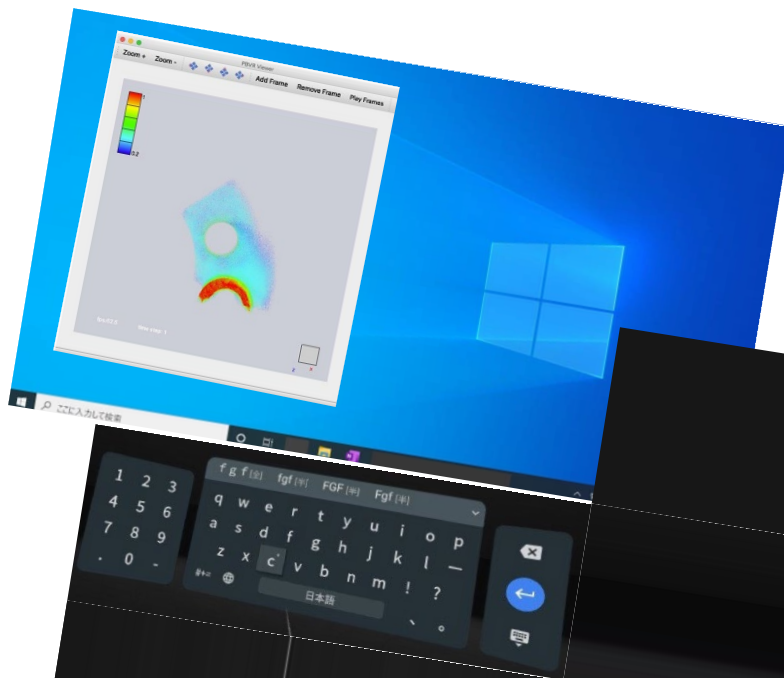


図 4 バーチャルデスクトップとバーチャルキーボード

### 3.2.6. VR 空間のキーボード

CS-PBVR の GUI では代数式やファイル入出力でキーボードを使用する。VR 空間でキーボードを利用するためにバーチャルキーボードを実装する。バーチャルキーボードのモデルは GUI ライブラリである IMGUI を利用し、開発する KVS に IMGUI を取り込むこととする。IMGUI はオープンソースの MIT ライセンスであるため、自由な利用、改造、再配布が許可されている。以下の機能を開発する。

- VR コントローラにボタン押下を割り当てる。
- バーチャルキーボードの ON/OFF を VR コントローラのボタンに割り当てる。
- 表示位置は眼の前とする。

バーチャルキーボード使用時の状態を図 5 に示す。



図 5 VR 空間のバーチャルキーボードとバーチャルハンド

### 3.2.7. kvs::OpenXR クラスによる VR 表示

OpenXR サポートの KVS を利用して、CS-PBVR に VR 可視化機能を追加する。CS-PBVR のコード中で呼び出しているクラスの名前空間を `kvs::OpenXR` に変更することで表示先を HMD にできるように開発すること。

### 3.3. 機能・性能評価試験

OpenXR サポートした KVS およびそれを利用した CS-PBVR に関して機能・性能評価試験を実施する。この試験は第 1 部 9 節に表 1 に示す計算機と VR 表示装置、あるいはそれらと同等かそれ以上の性能を有するものを使用して実施する。

- (1) KVS の機能評価として、KVS/Example/Visualization ディレクトリ内にある例題コードを OpenXR サポートに書き換えて HMD で可視化できるか確認する。
- (2) KVS の機能評価として、VR 対応 CS-PBVR を用いて、CCSE の CS-PBVR 公開ページから配布しているサンプルを可視化して、別添する検査表のシート「KVS の機能評価」の項目をクリアすること。
- (3) VR 対応 CS-PBVR の機能評価としてバーチャルデスクトップ内の CS-PBVR の GUI を利用して、別添する検査表のシート「VR 対応 CS-PBVR の機能評価」の項目をクリアすること。
- (4) VR 対応 CS-PBVR のフレームレート (fps) を計測し、対話的速度 (60fps 以上) で動作すること。

### 3.4. ドキュメント類の作成

以下のドキュメント等を作成する

- (1) 詳細設計書  
本作業において設計した内容をまとめること。
- (2) 作業報告書  
試作したプログラムを用いて行った機能の評価結果をまとめること。評価結果に関する部分は本仕様書の 3 節に対応した章立てと内容で記述すること。

(3) マニュアル

開発した機能を利用できるようにマニュアルを作成すること。

## 産業財産権特約条項

(乙が単独で行った発明等の産業財産権の帰属)

第1条 乙は、本契約に関して、乙が単独でなした発明又は考案(以下「発明等」という。)に対する特許権、実用新案権又は意匠権(以下「特許権等」という。)を取得する場合は、単独で出願できるものとする。ただし、出願するときはあらかじめ出願に際して提出すべき書類の写しを添えて甲に通知するものとする。

(乙が単独で行った発明等の特許権等の譲渡等)

第2条 乙は、乙が前条の特許権等を甲以外の第三者に譲渡又は実施許諾する場合には、本特約条項の各条項の規定の適用に支障を与えないよう当該第三者と約定しなければならない。

(乙が単独で行った発明等の特許権等の実施許諾)

第3条 甲は、第1条の発明等に対する特許権等を無償で自ら試験又は研究のために実施することができる。甲が甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に再実施権を許諾する場合は、乙の承諾を得た上で許諾するものとし、その実施条件等は甲、乙協議の上決定する。

(甲及び乙が共同で行った発明等の特許権等の帰属及び管理)

第4条 甲及び乙は、本契約に関して共同でなした発明等に対する特許権等を取得する場合は、共同出願契約を締結し、共同で出願するものとし、出願のための費用は、甲、乙の持分に比例して負担するものとする。

(甲及び乙が共同で行った発明等の特許権等の実施)

第5条 甲は、共同で行った発明等を試験又は研究以外の目的に実施しないものとする。ただし、甲は甲のために乙以外の第三者に製作させ、又は業務を代行する第三者に実施許諾する場合は、無償にて当該第三者に実施許諾することができるものとする。

2 乙が前項の発明等について自ら商業的实施をするときは、甲が自ら商業的实施をしないことにかんがみ、乙の商業的实施の計画を勘案し、事前に実施料等について甲、乙協議の上、別途実施契約を締結するものとする。

(秘密の保持)

第6条 甲及び乙は、第1条及び第4条の発明等の内容を出願により内容が公開される日まで他に漏洩してはならない。ただし、あらかじめ書面により出願を行った者の了解を得た場合はこの限りではない。

(委任・下請負)

第7条 乙は、本契約の全部又は一部を第三者に委任し、又は請け負わせた場合においては、その第三者に対して、本特約条項の各条項の規定を準用するものとし、乙はこのために必要な措置を講じなければならない。

2 乙は、前項の当該第三者が本特約条項に定める事項に違反した場合には、甲に対し全ての責任を負うものとする。

(協議)

第8条 第1条及び第4条の場合において、単独若しくは共同の区別又は共同の範囲等について疑義が生じたときは、甲、乙協議して定めるものとする。

(有効期間)

第9条 本特約条項の有効期限は、本契約締結の日から当該特許権等の消滅する日までとする。