フィルタリング関数の和積について

澤井 里枝[†] 塚本 昌彦[†]
寺田 努[††] 西尾 章治郎[†]

筆者らはこれまで，情報フィルタリングの数学的基盤を構築するために，フィルタリングを関数として表すフィルタリング関数を定義し，さまざまなフィルタリングの性質を明らかにしてきた．フィルタリングの数学的基盤を構築することにより，フィルタリングの定性的な評価や最適化，宣言的なフィルタリング言語の設計などが可能となる．実際のフィルタリングは，複数の手法を組み合わせて実現するのが一般的なことから，筆者らはこれまでフィルタリング関数の合成に関する性質を明らかにしてきたが，その他の演算についてはまだ取り扱っていなかった．そこで本稿では，フィルタリング結果の和（ユニオン）と積（インターセクション）の演算を行うフィルタリング関数を新たに定義し，それらの性質を明らかにする．本研究により，多様な方法で組み合わされたフィルタリングを定性的に表現し，それらの特性を明確にできる．

On Union and Intersection of Filtering Functions

Rie Sawai,[†] Masahiko Tsukamoto,[†] Tsutomu Terada[††] and Shojiro Nishio[†]

In our previous works, to establish mathematical foundation of information filtering, we defined the notion of filtering function that represents filtering as a function, and clarified the characteristics of different filtering. The constructed mathematical foundation makes it possible to qualitatively evaluate various filtering methods, to optimize processing methods in filtering, or to design a declarative language for describing the filtering policy. Since current filtering methods consist of multiple methods in practice, we have revealed the properties of composite filtering functions. However, we have not considered other operations. In this paper, we define new filtering functions that carry out union and intersection of the filtering results, and clarify their properties. From the results of this paper, we can qualitatively represent the filtering combined by more diverse strategies, and reveal their characteristics.

1. はじめに

近年，衛星放送や地上波放送のデジタル化および多チャンネル化，インターネットや無線通信などさまざまなネットワーク環境の発展により，多数の放送型サービスを通じて大量の情報を発信できるようになった[7),11),12)]．このような環境では，ユーザの多様な要求に応えることができるが，その中からユーザが必要なデータを探し出すことは非常に困難な作業である．そこで，自動的に受信データを取捨選択するフィルタリング機構や，フィルタリングのためのユーザ要求記述言語が多数提案されている[3),4),10),13)]．しかし，各フィルタリング機構は，キーワードマッチングやランキングなど，それぞれ独自の手法によってデータを処理しているにもかかわらず，それらの手法を定性的に表現する数学的基盤がなかったため，フィルタリングの特性の定性的な評価や処理方法の最適化，宣言的なフィルタリング言語の設計などができなかった．そこで筆者らはこれまでに，フィルタリングを関数として表す**フィルタリング関数**を定義し，フィルタリングの性質をフィルタリング関数が満たす制約条件として定性的に表現する手法を提案した[14),15)]．さらに，一般のフィルタリングは複数の手法を組み合わせて用いることから，筆者らはフィルタリング関数の合成関数の性質を明らかにした[17),18)]．

合成フィルタリング関数では，ある簡単な手法で前処理を行ってから別の複雑な手法で精細な結果を計算するフィルタリングのように，複数の手法を連続に組み合わせた手法を表現できるが，それ以外の方法で組

† 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
†† 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

み合わされたフィルタリングも存在する．たとえば，“あるキーワードを持つデータとあるカテゴリに属するデータが欲しい” といったように，複数のフィルタリングポリシーで得られたフィルタリング結果をすべて利用する手法は，フィルタリング結果の和（ユニオン）の演算を行う手法である．また，フィルタリング結果の信頼度を上げるため，複数のフィルタリング手法から必要であると判断されたデータのみを蓄積する手法は，フィルタリング結果の積（インターセクション）の演算を行う手法である．このように，和や積の演算により組み合わされたフィルタリング手法は，これまで筆者らが取り扱ってきた合成フィルタリング関数で表現できない．そこで本稿では，複数の手法により得られたフィルタリング結果の和や積の演算を行うフィルタリング関数を新たに定義し，その性質を明らかにする．フィルタリング関数の体系に和積の概念を追加することで，合成による組合せだけでなく，さらに多様な方法で組み合わされたフィルタリングを定性的に表現できる．また，本稿で明らかになる性質を利用することで，さまざまな性質を満たす手法を組み合わせたフィルタリングの特性を明らかにできる．

以下，2 章でフィルタリング関数の概要を述べる．3 章では，フィルタリング結果の和積演算を行うフィルタリング関数を定義し，それらの性質を明らかにする．4 章では，本稿で明らかになった結果をもとに，実際のフィルタリングシステムや関連研究を考察する．最後に 5 章でまとめを行う．

2. フィルタリング関数

本章では，本稿の基礎となるフィルタリング関数の概要について述べる．

2.1 フィルタリング処理の分類

あるフィルタリング手法が与えられたとき，実際の処理方法は以下に示すいくつかのパターンに分類できる．

データアイテムを受信するたびに，受信データと前回までのフィルタリング結果をあわせてフィルタリングする処理方法を**逐次処理**と呼ぶ．それに対し，放送データを受信側にある程度ためておいてから一括してフィルタリングする処理方法を**一括処理**と呼ぶ．また，データ集合を 2 つ以上の任意の集合に分割して各々フィルタリングし，結果をマージしたものをフィルタリング結果とする処理方法を**分配処理**と呼ぶ．さらに，分配処理の結果を再びフィルタリングする処理方法を**並列処理**と呼ぶ．

2.2 フィルタリング関数の性質

データアイテムの集合を $\mathbf{T}$ とする．フィルタリング関数とは，任意の $T \subset \mathbf{T}$ に対し☆，以下の 2 つの条件を満たす $2^{\mathbf{T}}$ 上の関数 f のことをいう[14),15)]．

減少性（D: Decreasing）

$$f(T) \subset T$$

ベキ等性（ID: Idempotent）

$$f(f(T)) = f(T)$$

また，フィルタリング関数について以下のような性質が定義されている．

逐次増加性（SI: Sequential Increasing）

$$f(S \cup T) \subset f(S \cup f(T))$$

逐次減少性（SD: Sequential Decreasing）

$$f(S \cup T) \supset f(S \cup f(T))$$

逐次等価性（SE: Sequential Equivalence）

$$f(S \cup T) = f(S \cup f(T))$$

分配増加性（DI: Distributed Increasing）

$$f(S \cup T) \subset f(S) \cup f(T)$$

分配減少性（DD: Distributed Decreasing）

$$f(S \cup T) \supset f(S) \cup f(T)$$

分配等価性（DE: Distributed Equivalence）

$$f(S \cup T) = f(S) \cup f(T)$$

並列増加性（PI: Parallel Increasing）

$$f(S \cup T) \subset f(f(S) \cup f(T))$$

並列減少性（PD: Parallel Decreasing）

$$f(S \cup T) \supset f(f(S) \cup f(T))$$

並列等価性（PE: Parallel Equivalence）

$$f(S \cup T) = f(f(S) \cup f(T))$$

単調性（M: Monotone）

$$S \subset T \text{ならば} \quad f(S) \subset f(T)$$

一貫性（C: Consistency）

$$f(S) \supset f(S \cup T) \cap S$$

ここで，S，T は $\mathbf{T}$ の任意の部分集合とする．これまでに筆者らは，これらの性質間に**図 1** に示すような相互関係があることを明らかにした．図 1 の矢印は包含関係を表し，包含関係が必ずしも成り立たないものには “×” を付す．たとえば，“M,DD”–“SD” 間の矢印は，単調性 M（または M と同値である分配減少性 DD）を満たすフィルタリング関数は逐次減少性 SD も満たすが，逐次減少性 SD を満たすフィルタリング関数は単調性 M（および分配減少性 DD）を必ずしも満たさないことを表す．また，“M,DD” のように，1 つの楕円内に列記した性質は同値であることを示す．

☆ 本稿では $A \subset B$ は A が B の部分集合である（A = B の場合を含む）ことを意味するものとする．

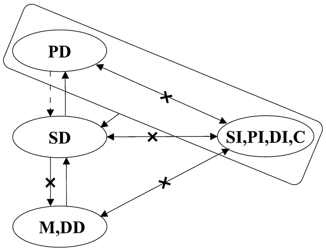

図 1 性質間の関係
Fig. 1 The relationship between the properties of filtering function.

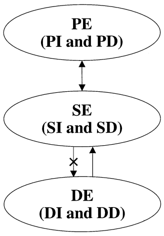

図 2 等価性間の関係
Fig. 2 The relationship between the equivalence properties.

さらに，異なる性質を囲った角丸四角の枠は枠内の性質をすべて満たす性質を表し，並列減少性 PD かつ逐次増加性 SI を満たすフィルタリング関数は逐次減少性 SD も満たすことを表す．ただし，“並列減少性 PD を満たすフィルタリング関数が逐次減少性 SD を満たす”（PD⇒SD 仮定と呼ぶ）が成立するかどうかは現在のところまだ明らかになっていないため点線で示している．今後 PD⇒SD 仮定が成立することが明らかになった場合，PD と SD が同値であることが新たに明確になるだけであり，PD⇒SD 仮定の成立・不成立にかかわらず，これまで筆者らが構築してきた数学的基盤をそのまま利用できる．したがって，PD⇒SD 仮定はオープンプロブレムとして今後の課題にしている．

逐次等価性は一括処理と逐次処理の結果が等価であることを意味する．同様に，分配等価性は一括処理と分配処理の結果が等価であり，並列等価性は一括処理と並列処理の結果が等価であることを意味する．図 1 に示す性質間の関係から，これらの等価性間の関係は**図 2** に示すようになる．図 2 より，一括処理と分配処理の結果が等価であるフィルタリングは，逐次処理や並列処理の結果とも等価となることが分かる．また，一括処理と逐次処理の結果が等価であるフィルタリングは，並列処理の結果とも等価となり，一括処理と並列処理の結果が等価であるフィルタリングは，逐次処理の結果とも等価となる．図 1，図 2 に示す性質間の関係より，ある性質を満たすフィルタリングが他の性質を満たすかどうかが判断できる．また，あるフィルタリングが等価性を満たすならば，ある同じ時点において，異なる処理方法によりフィルタリングした結果の一貫性が保証されるため，環境に応じてより効率的な処理方法に変換できる．

表 1 ベキ等性を満たさない和積フィルタリング関数
Table 1 A union function and an intersection function that do not satisfy the idempotent property.

x	$f(x)$	$g(x)$	$f^{\vee}g(x)$	$f^{\wedge}g(x)$
ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
$\{a\}$	$\{a\}$	$\{a\}$	$\{a\}$	$\{a\}$
$\{b\}$	$\{b\}$	$\{b\}$	$\{b\}$	$\{b\}$
$\{c\}$	$\{c\}$	ϕ	$\{c\}$	ϕ
$\{a,b\}$	$\{a\}$	ϕ	$\{a\}$	ϕ
$\{a,c\}$	$\{a\}$	$\{a,c\}$	$\{a,c\}$	$\{a\}$
$\{b,c\}$	$\{c\}$	$\{b,c\}$	$\{b,c\}$	$\{c\}$
$\{a,b,c\}$	$\{a\}$	$\{b\}$	$\{a,b\}$	ϕ

3. フィルタリング関数の和積

本章では，フィルタリング関数の和関数と積関数を定義し，それらの性質を明らかにする．まず，複数の手法によるフィルタリング結果の和や積の演算を行うフィルタリング関数を以下のように定義する．

f，g をフィルタリング関数とする．任意の $S \subset \mathbf{T}$ に対して

$$f^{\vee}g(S) \triangleq f(S) \cup g(S)$$

と定義される $f^{\vee}g$ を f と g の**和フィルタリング関数**と呼ぶ．また，

$$f^{\wedge}g(S) \triangleq f(S) \cap g(S)$$

と定義される $f^{\wedge}g$ を f と g の**積フィルタリング関数**と呼ぶ．一般に

$$f^{\vee}g(S) = g^{\vee}f(S) \qquad (1)$$

$$f^{\wedge}g(S) = g^{\wedge}f(S) \qquad (2)$$

が成り立つ．

フィルタリング関数の和積関数は必ずしもフィルタリング関数でない．和フィルタリング関数と積フィルタリング関数がベキ等性を満たさないフィルタリング関数の例を**表 1** に示す．

フィルタリング関数 f，g に対して，f と g が**フィルタリング和可能**であるとは，$f^{\vee}g$ がフィルタリング関数であることをいう．また，f と g が**フィルタリング積可能**であるとは，$f^{\wedge}g$ がフィルタリング関数であることをいう．ここで，$f : D_1 \rightarrow D_2$ のとき，$Im(f) = \{f(X) | X \in D_1\}$ を f の値域と呼ぶ[17]．

フィルタリング関数 f，g は減少性を満たすため，$f^{\vee}g$，$f^{\wedge}g$ も減少性を満たすことは自明である．ゆえに，$f^{\vee}g$ がフィルタリング和可能であることと任意の $X \in Im(f^{\vee}g)$ に対して $X = f(X) \cup g(X)$ が成立することは同値であり，$f^{\wedge}g$ がフィルタリング積可能であることと任意の $Y \in Im(f^{\wedge}g)$ に対して $Y = f(Y) \cap g(Y)$ が成立することは同値である．さらにフィルタリング和可能，フィルタリング積可能に関して次の定理が成立する．

定理 1 フィルタリング関数 f，g が一貫性（またはそれと等価な分配増加性，逐次増加性，並列増加性）を満たすならば，f と g はフィルタリング和可能かつフィルタリング積可能である．

《証明》$f^{\vee}g$，$f^{\wedge}g$ がベキ等性を満たすことを示す．S，X，$Y \subset \mathbf{T}$ に対して，

$$X = f^{\vee}g(S) = f(S) \cup g(S) \tag{3}$$

$$Y = f^{\wedge}g(S) = f(S) \cap g(S) \tag{4}$$

とすると，

$$X = f(X) \cup g(X) \tag{5}$$

$$Y = f(Y) \cap g(Y) \tag{6}$$

を示せばよい．f は一貫性を満たすので，

$$\begin{aligned} & f(f(S) \cup g(S)) \\ & \supset f(f(S) \cup g(S) \cup S) \cap (f(S) \cup g(S)) \\ & = f(S) \cap (f(S) \cup g(S)) \\ & = f(S) \end{aligned} \tag{7}$$

となる．同様に，g は一貫性を満たすので，

$$g(f(S) \cup g(S)) \supset g(S) \tag{8}$$

となる．したがって，式 (7)，(8) を辺々足し合わせて，

$$\begin{aligned} & f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) \\ & \supset f(S) \cup g(S) \end{aligned} \tag{9}$$

が成立する．一方，f，g は減少性を満たすので，

$$\begin{aligned} & f(S) \cup g(S) \\ & = (f(S) \cup g(S)) \cup (f(S) \cup g(S)) \\ & \supset f(f(S) \cup g(S)) \cup (f(S) \cup g(S)) \\ & \supset f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) \end{aligned} \tag{10}$$

が成り立つ．ゆえに，式 (9)，(10) より，

$$f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) = f(S) \cup g(S)$$

$$f(X) \cup g(X) = X$$

となり，式 (5) が示された．

同様に，式 (6) も示される． □

定理 2 フィルタリング関数 f，g が単調性（またはそれと等価な分配減少性）を満たすならば，f と g はフィルタリング和可能である．

《証明》$f^{\vee}g$ がベキ等性を満たすことを示せばよい．$S \subset \mathbf{T}$ に対して

$$f(S) \subset f(S) \cup g(S)$$

$$f(f(S)) \subset f(f(S) \cup g(S)) \quad (\because f\text{: M})$$

$$f(S) \subset f(f(S) \cup g(S)) \quad (\because f\text{: ID}) \tag{11}$$

が成り立つ．同様に，g が単調性を満たすことから

$$g(S) \subset g(f(S) \cup g(S)) \tag{12}$$

が成立する．式 (11)，(12) を辺々足し合わせて，

$$\begin{aligned} & f(S) \cup g(S) \\ & \subset f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) \end{aligned} \tag{13}$$

が導き出される．また，f，g が減少性を満たすことから式 (10) と同様に，

$$\begin{aligned} & f(S) \cup g(S) \\ & \supset f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) \end{aligned} \tag{14}$$

が成り立つ．したがって，式 (13)，(14) より

$$\begin{aligned} & f(S) \cup g(S) \\ & = f(f(S) \cup g(S)) \cup g(f(S) \cup g(S)) \end{aligned} \tag{15}$$

が成立する． □

3.1 和フィルタリング関数の性質

本節では，和フィルタリング関数の性質を明らかにする．ここで，**ゼロフィルタリング関数** e_0 とは，任意の $S \subset \mathbf{T}$ に対して

$$e_0(S) \triangleq \phi$$

と定義される関数のことをいう．ゼロフィルタリング関数は，本稿で扱う性質をすべて満たす．

以下，3.1.1 項で増加性または減少性を満たすフィルタリング関数について，3.1.2 項で等価性を満たすフィルタリング関数について，和フィルタリング関数の性質を明らかにする．

3.1.1 増加性または減少性を満たすフィルタリング関数

本稿で扱う増加性と減少性のうち，図 1 に示したように単調性 M，逐次増加性 SI，逐次減少性 SD，並列減少性 PD の 4 つの性質が同値ではない．本項では，これらの同値ではない性質のすべての組合せについて和フィルタリング関数の性質を明らかにするため，以下の補題を示す．

補題 1 フィルタリング関数 f，g が単調性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は単調性を満たす．

《証明》S，$T \subset \mathbf{T}$ に対して，$S \subset T$ ならば $f(S) \subset f(T)$，$g(S) \subset g(T)$ を満たす．これら 2 式を辺々足し合わせると，$f(S) \cup g(S) \subset f(T) \cup g(T)$ が成立するので，$f^{\vee}g(S) \subset f^{\vee}g(T)$ が導き出された． □

補題 2 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が単調性，g が逐次増加性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で単調性を満たさないもの，および逐次増加性を満たさないものが存在する．

《証明》図 1 より，単調性を満たすが逐次増加性を満

たさない f が存在する．また，逐次増加性を満たすが単調性を満たさない g が存在する．ここで，$f^{\vee}e_0$ は逐次増加性を満たさず，$g^{\vee}e_0$ は単調性を満たさないことが容易に確かめられる． □

補題 3 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が単調性，g が逐次減少性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で単調性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 2 と同様に証明できる）． □

補題 4 フィルタリング関数 f, g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が単調性，g が逐次減少性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は逐次減少性を満たす．

《証明》f，g は減少性を満たすので，$T \subset \mathbf{T}$ に対して $T \supset f(T)$，$T \supset g(T)$ である．これら 2 式を辺々足し合わせると，f は単調性を満たすので

$$T \supset f(T) \cup g(T)$$
$$S \cup T \supset S \cup f(T) \cup g(T)$$
$$f(S \cup T) \supset f(S \cup f(T) \cup g(T)) \qquad (16)$$

となる．一方，

$$\begin{aligned} & g(S \cup T) \\ & = g(S \cup T \cup f(T)) \quad (\because f\text{: D}) \\ & = g((S \cup f(T)) \cup T) \\ & \supset g((S \cup f(T)) \cup g(T)) \quad (\because g\text{: SD}) \qquad (17) \end{aligned}$$

が成立する．式 (16)，(17) を辺々足し合わせると

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \cup g(S \cup T) \\ & \supset f(S \cup f(T) \cup g(T)) \\ & \qquad \cup \ g(S \cup f(T) \cup g(T)) \qquad (18) \end{aligned}$$

となり，$f^{\vee}g(S \cup T) \supset f^{\vee}g(S \cup f^{\vee}g(T))$ が導き出された． □

補題 5 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が単調性，g が並列減少性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で単調性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 2 と同様に証明できる）． □

補題 6 フィルタリング関数 f，g が逐次増加性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は逐次増加性を満たす．

《証明》図 1 より，逐次増加性と分配増加性は同値なので，

$$f(S \cup T) \subset f(S) \cup f(T) \qquad (19)$$
$$g(S \cup T) \subset g(S) \cup g(T) \qquad (20)$$

が成立する．式 (19)，(20) を辺々足し合わせて

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \cup g(S \cup T) \\ & \subset (f(S) \cup f(T)) \cup (g(S) \cup g(T)) \\ & = (f(S) \cup g(S)) \cup (f(T) \cup g(T)) \qquad (21) \end{aligned}$$

となる．したがって，$f^{\vee}g(S \cup T) \subset f^{\vee}g(S) \cup f^{\vee}g(T)$ であることが導き出される．逐次増加性と分配増加性が同値であることから，題意は示された． □

補題 7 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が逐次増加性，g が逐次減少性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で逐次増加性を満たさないもの，および逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 2 と同様に証明できる）． □

補題 8 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が逐次増加性，g が並列減少性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で逐次増加性を満たさないもの，および並列減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 2 と同様に証明できる）． □

補題 9 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f，g が逐次減少性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は逐次減少性を満たす．

《証明》

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \\ & = f(S \cup T \cup g(T)) \quad (\because g\text{: D}) \\ & = f((S \cup g(T)) \cup T) \\ & \supset f((S \cup g(T)) \cup f(T)) \quad (\because f\text{: SD}) \qquad (22) \end{aligned}$$

が成立する．同様に，f の減少性と g の逐次減少性から

$$g(S \cup T) \supset g((S \cup f(T)) \cup g(T)) \qquad (23)$$

が成立する．式 (22) と (23) を辺々足し合わせると，

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \cup g(S \cup T) \\ & \supset f(S \cup g(T) \cup f(T)) \\ & \qquad \cup \ g(S \cup f(T) \cup g(T)) \qquad (24) \end{aligned}$$

となり，$f^{\vee}g(S \cup T) \supset f^{\vee}g(S \cup f^{\vee}g(T))$ が導き出された． □

PD⇒SD 仮定（並列減少性 PD を満たすフィルタリング関数が逐次減少性 SD を満たすこと）が成立するかどうかは，現在のところまだ明らかとなっていない．しかし，PD⇒SD 仮定が成立するかどうかが明らかになれば，以下の補題により，いくつかの和フィルタリング関数の性質を明確にできる．

補題 10 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が単調性，g が並列減少性を満たすとする．このとき，PD⇒SD 仮定が成立するならば $f^{\vee}g$ は逐次減少性を満たし，PD⇒SD 仮定が成立しないならば $f^{\vee}g$ で逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》PD⇒SD 仮定が成立するならば，図 1 より並列減少性と逐次減少性が同値であることが示される．したがって，補題 4 より $f^{\vee}g$ も逐次減少性を満たす．

表 2　増加性または減少性を満たす関数の和フィルタリング関数
Table 2　The properties of union filtering functions $f^{\vee}g$ for f, g that satisfy the increasing or decreasing properties.

$f \setminus g$	M	SI	SD	PD
M	M, SD, PD, ¬SI	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	SD, PD, ¬M, ¬SI	¬M, ¬SI (, SD)
SI	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	SI, ¬M, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD
SD	SD, PD, ¬M, ¬SI	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	SD, PD, ¬M, ¬SI	¬M, ¬SI (, SD)
PD	¬M, ¬SI (, SD)	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI (, SD)	¬M, ¬SI (, SD)

一方，PD⇒SD 仮定が成立しないならば，並列減少性を満たすが逐次減少性を満たさない g が存在する．ここで，$g^{\vee}e_0$ が逐次減少性を満たさないことは容易に確かめられる．□

補題 11　フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f が逐次減少性，g が並列減少性を満たすとする．このとき，PD⇒SD 仮定が成立するならば $f^{\vee}g$ は逐次減少性を満たし，PD⇒SD 仮定が成立しないならば $f^{\vee}g$ で逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 10 と同様に証明できる）．□

補題 12　フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング和可能であり，f，g が並列減少性を満たすとする．このとき，PD⇒SD 仮定が成立するならば $f^{\vee}g$ は逐次減少性を満たし，PD⇒SD 仮定が成立しないならば $f^{\vee}g$ で逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 10 と同様に証明できる）．□

3.1.2　等価性を満たすフィルタリング関数

補題 13　フィルタリング関数 f，g が分配等価性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は分配等価性を満たす．

《証明》文献 16) より

$$\exists X, \forall S, f(S) = S \cap X$$
$$\Longleftrightarrow \forall S, \forall T, f(S \cup T) = f(S) \cup f(T)$$

が成立するため，ある X，$Y \subset \mathbf{T}$ に対して $f(S) = S \cap X$，$g(S) = S \cap Y$ とおける．これを用いて，

$$\begin{aligned} f(S) \cup g(S) &= (S \cap X) \cup (S \cap Y) \\ &= S \cap (X \cup Y) \end{aligned} \quad (25)$$

となる．ゆえに，$f^{\vee}g$ は分配等価性を満たす．□

補題 14　フィルタリング関数 f，g に対して，f が分配等価性，g が逐次等価性を満たすとき，$f^{\vee}g$ で分配等価性を満たさないものが存在する．

《証明》図 2 より，逐次等価性を満たすが分配等価性を満たさない g が存在する．ここで，$g^{\vee}e_0$ が分配等価性を満たさないことは容易に確かめられる．□

補題 15　フィルタリング関数 f，g に対して，f が分配等価性，g が逐次等価性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は逐次等価性を満たす．

表 3　等価性を満たす関数の和フィルタリング関数
Table 3　The properties of union filtering functions $f^{\vee}g$ for f, g that satisfy the equivalence properties.

$f \setminus g$	DE	SE, PE
DE	DE, SE, PE	SE, PE, ¬DE
SE, PE	SE, PE, ¬DE	SE, PE, ¬DE

《証明》f は分配等価性を満たすので，図 2 より逐次等価性も満たす．したがって，補題 16 より $f^{\vee}g$ は逐次等価性を満たす．□

補題 16　フィルタリング関数 f，g が逐次等価性を満たすならば，$f^{\vee}g$ は逐次等価性を満たす．

《証明》

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \\ &= f(S \cup T \cup g(T)) \quad (\because g : \mathrm{D}) \\ &= f((S \cup g(T)) \cup T) \\ &= f((S \cup g(T)) \cup f(T)) \quad (\because f : \mathrm{SE}) \end{aligned} \quad (26)$$

が成立する．同様に，f の減少性と g の逐次等価性から

$$g(S \cup T) = g((S \cup f(T)) \cup g(T)) \quad (27)$$

が成立する．式 (26) と (27) を辺々足し合わせると，

$$\begin{aligned} & f(S \cup T) \cup g(S \cup T) \\ &= f(S \cup g(T) \cup f(T)) \\ &\quad \cup g(S \cup f(T) \cup g(T)) \end{aligned} \quad (28)$$

となり，$f^{\vee}g$ は逐次等価性を満たす．□

$f^{\vee}g$ がもとの関数 f，g の性質以外の性質を満たすかどうかは，簡単に証明できるため省略する．以上の補題より，**表 2** に増加性または減少性を満たすフィルタリング関数のすべての組合せについて，**表 3** に等価性を満たすフィルタリング関数のすべての組合せについて，和フィルタリング関数の性質をまとめる．表中の各要素は f，g がそれぞれ行，列の性質を持ち，f と g がフィルタリング和可能であるとき，和フィルタリング関数 $f^{\vee}g$ が満たす性質を表す．また，“¬” はその性質を必ずしも満たさないことを表す．括弧内の性質は，$f^{\vee}g$ がその性質を満たすかどうかはまだ明らかになっていないが，PD⇒SD 仮定と関係があることを表す．“(SD)” は，PD⇒SD 仮定が成立するならば $f^{\vee}g$ も逐次減少性を必ず満たし，PD⇒SD 仮定が成

立しないならば $f^{\vee}g$ は必ずしも逐次減少性を満たさないことを意味する．さらに，単調性を満たすフィルタリング関数と並列減少性を満たすフィルタリング関数を組み合わせたとき，逐次減少性（あるいは並列減少性）を満たすフィルタリング関数と並列減少性を満たすフィルタリング関数を組み合わせたときに，並列減少性を満たすかどうかは，現在のところまだ明らかになっていない．しかし，PD⇒SD 仮定が成立するならば，図 1 より両性質は等価となるため，これらの和フィルタリング関数は並列減少性を必ず満たすことがいえる．上記のように，証明が困難であるためいまだ明らかとなっていない性質に関しては，PD⇒SD 仮定が成立するかどうかにより，明確にできるものが存在することを示した．また，PD⇒SD 仮定を含め，いまだ性質が明らかになっていない関数は，必ずしもその性質を満たすことが保証できないため，実際のフィルタリングの実行において注意が必要であることが明らかになった．

表 2 より，単調性（あるいは逐次増加性，逐次減少性）を満たすフィルタリングどうしを組み合わせた場合や，単調性を満たすフィルタリングと逐次減少性を満たすフィルタリングを組み合わせた場合は，本稿で取り扱う性質で必ず満たすものが存在することが分かった．また，表 3 より，等価性を満たすフィルタリングを組み合わせる場合，あらゆる組合せにおいて，逐次等価性と並列等価性を満たすことが明らかになった．

3.2 積フィルタリング関数の性質

本節では，積フィルタリング関数の性質を明らかにする．ここで，**全フィルタリング関数** e_1 とは，任意の $S \subset \mathbf{T}$ に対して

$$e_1(S) \triangleq S$$

と定義される関数のことをいう．全フィルタリング関数は，本稿で扱う性質をすべて満たす．

以下，3.2.1 項で増加性または減少性を満たすフィルタリング関数について，3.2.2 項で等価性を満たすフィルタリング関数について，積フィルタリング関数の性質を明らかにする．

3.2.1 増加性または減少性を満たすフィルタリング関数

本項では，3.1.1 項と同様に，単調性 M，逐次増加性 SI，逐次減少性 SD，並列減少性 PD の同値ではない性質のすべての組合せについて積フィルタリング関数の性質を明らかにするため，以下の補題を示す．

補題 17 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f，g が単調性を満たすならば，$f^{\wedge}g$ は単調性を満たす．

《証明》S, $T \subset \mathbf{T}$ に対して，$S \subset T$ ならば $f(S) \subset f(T)$，$g(S) \subset g(T)$ を満たす．ゆえに，

$$\begin{aligned}&f(S) \cap g(S)\\ &\subset f(S) \cap g(T)\\ &\subset f(T) \cap g(T)\end{aligned} \tag{29}$$

となるので，$f^{\wedge}g(S) \subset f^{\wedge}g(T)$ が導き出された．□

補題 18 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が単調性，g が逐次増加性を満たすとき，$f^{\wedge}g$ で単調性を満たさないもの，および逐次増加性を満たさないものが存在する．

《証明》図 1 より，単調性を満たすが逐次増加性を満たさない f が存在する．また，逐次増加性を満たすが単調性を満たさない g が存在する．ここで，$f^{\wedge}e_1$ が逐次増加性を満たさず，$g^{\wedge}e_1$ が単調性を満たさないことは容易に確かめられる．□

補題 19 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が単調性，g が逐次減少性を満たすとき，$f^{\wedge}g$ で単調性を満たさないもの，および逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》図 1 より，逐次減少性を満たすが単調性を満たさない g が存在する．ここで，$g^{\wedge}e_1$ が単調性を満たさないことは容易に確かめられる．

表 4 反例
Table 4 A counter example.

x	$f(x)$	$g(x)$	$f^{\wedge}g(x)$
ϕ	ϕ	ϕ	ϕ
$\{a\}$	ϕ	$\{a\}$	ϕ
$\{b\}$	$\{b\}$	$\{b\}$	$\{b\}$
$\{a,b\}$	$\{b\}$	$\{a\}$	ϕ

また，$\mathbf{T} = \{a, b\}$ とする．**表 4** に示すフィルタリング関数は任意の S，$T \subset \mathbf{T}$ に対して，f は M，g は SD を満たすが，$S = \{b\}$，$T = \{a\}$ のとき $f^{\wedge}g(S \cup T) \supset f^{\wedge}g(S \cup f^{\wedge}g(T))$ を満たさない．□

補題 20 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が単調性，g が並列減少性を満たすとき，$f^{\wedge}g$ で単調性を満たさないもの，および並列減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 19 と同様に証明できる）．□

補題 21 フィルタリング関数 f，g が逐次増加性を満たすならば，$f^{\wedge}g$ は逐次増加性を満たす．

《証明》$f^{\wedge}g$ が一貫性を満たさない，つまり $f(S) \cap g(S) \not\supset (f(S \cup T) \cap g(S \cup T)) \cap S$ と仮定すると，ある $x \in \mathbf{T}$ に対して，

$$x \in (f(S \cup T) \cap g(S \cup T)) \cap S \tag{30}$$

$$x \notin f(S) \cap g(S) \tag{31}$$

表 5 増加性または減少性を満たす関数の積フィルタリング関数
Table 5 The properties of intersection filtering functions $f\hat{}g$ for f, g that satisfy the increasing or decreasing properties.

$f \setminus g$	M	SI	SD	PD
M	M, SD, PD, ¬SI	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD
SI	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	SI, ¬M, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD
SD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD
PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD	¬M, ¬SI, ¬SD, ¬PD

が成立する．式 (30) より，

$$x \in f(S \cup T) \tag{32}$$
$$x \in g(S \cup T) \tag{33}$$
$$x \in S \tag{34}$$

が満たされる．また，式 (31) より，

$$x \notin f(S) \tag{35}$$

または

$$x \notin g(S) \tag{36}$$

が成り立つ．ここで，次のように場合分けする．

i) $x \notin f(S)$ のとき
f は一貫性を満たすので $f(S) \supset f(S \cup T) \cap S$ となるが，これは式 (32)，(34)，(35) に矛盾する．

ii) $x \notin g(S)$ のとき
g は一貫性を満たすので $g(S) \supset g(S \cup T) \cap S$ となるが，これは式 (33)，(34)，(36) に矛盾する．

したがって，$f\hat{}g$ は一貫性を満たす．図 1 より逐次増加性と一貫性は同値であることから，題意は示された． □

補題 22 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が逐次増加性，g が逐次減少性を満たすとき，$f\hat{}g$ で逐次増加性を満たさないもの，および逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 18 と同様に証明できる）． □

補題 23 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が逐次増加性，g が並列減少性を満たすとき，$f\hat{}g$ で逐次増加性を満たさないもの，および並列減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 18 と同様に証明できる）． □

補題 24 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f，g が逐次減少性を満たすとき，$f\hat{}g$ で逐次減少性を満たさないものが存在する．

《証明》$\mathbf{T} = \{a, b\}$ とする．表 4 に示すフィルタリング関数 f，g は任意の S，$T \subset \mathbf{T}$ に対して SD を満たすが，$S = \{b\}$，$T = \{a\}$ のとき $f\hat{}g(S \cup T) \supset f\hat{}g(S \cup f\hat{}g(T))$ を満たさない． □

表 6 等価性を満たす関数の積フィルタリング関数
Table 6 The properties of intersection filtering functions $f\hat{}g$ for f, g that satisfy the equivalence properties.

$f \setminus g$	DE	SE, PE
DE	DE, SE, PE	¬DE, ¬SE, ¬PE
SE, PE	¬DE, ¬SE, ¬PE	¬DE, ¬SE, ¬PE

補題 25 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f が逐次減少性，g が並列減少性を満たすとき，$f\hat{}g$ で逐次減少性を満たさないもの，および並列減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 24 と同様に証明できる）． □

補題 26 フィルタリング関数 f，g に対して，f と g がフィルタリング積可能であり，f，g が並列減少性を満たすとき，$f\hat{}g$ で並列減少性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 24 と同様に証明できる）． □

3.2.2 等価性を満たすフィルタリング関数

補題 27 フィルタリング関数 f，g が分配等価性を満たすならば，$f\hat{}g$ は分配等価性を満たす．

《証明》文献 16) より

$$\exists X, \forall S, f(S) = S \cap X$$
$$\Longleftrightarrow \forall S, \forall T, f(S \cup T) = f(S) \cup f(T)$$

が成立するため，ある X，$Y \subset \mathbf{T}$ に対して $f(S) = S \cap X$，$g(S) = S \cap Y$ とおける．これを用いて，

$$\begin{aligned} f(S) \cap g(S) &= (S \cap X) \cap (S \cap Y) \\ &= S \cap (X \cap Y) \end{aligned} \tag{37}$$

となる．ゆえに，$f\hat{}g$ は分配等価性を満たす． □

補題 28 フィルタリング関数 f，g に対して，f が分配等価性，g が逐次等価性を満たすとき，$f\hat{}g$ で分配等価性を満たさないもの，および逐次等価性を満たさないものが存在する．

《証明》省略（補題 24 と同様に証明できる）． □

補題 29 フィルタリング関数 f，g が逐次等価性を満たすとき，$f\hat{}g$ で逐次等価性を満たさないものが

表 7 フィルタリングの分類
Table 7 Classification of filtering methods.

フィルタリング手法		性質
セレクション		SI(C,PI,DI),M(DD),SD,PD
ランキング		SI(C,PI,DI),SD,PD
データの相関性を考慮する手法	特定のデータにより評価を上げる	M(DD), SD, PD
	特定のデータにより評価を下げる	SI(C, PI, DI), SD, PD

存在する．
《証明》省略（補題 24 と同様に証明できる）． □

$f \hat{} g$ がもとの関数 f，g の性質以外の性質を満たすかどうかは，簡単に証明できるため省略する．以上の補題より，**表 5** に増加性または減少性を満たすフィルタリング関数のすべての組合せについて，**表 6** に等価性を満たすフィルタリング関数のすべての組合せについて，積フィルタリング関数の性質をまとめる．

表 5，表 6 より，単調性（あるいは逐次増加性，分配等価性）を満たすフィルタリング関数どうしを組み合わせた場合のみ，もとの関数と同じ性質を満たすことが分かった．一方，それ以外の組合せでは，いずれも本稿で取り扱う性質を必ずしも満たさないことが明らかになった．

4. 考　察

本章では，実際に用いられているいくつかのフィルタリング手法を取り上げ，本稿で示した性質から，各手法で実現できる処理方法について述べる．

まず，単一のフィルタリングについて，主な手法とそれらが満たす性質を**表 7** に示す[14)~16)]．セレクションとは，各データの取捨選択が潜在的に決まっている手法であり，たとえば特定のキーワードを含むデータを蓄積するキーワードマッチング手法や，データの内容から評価値を計算し，評価値が閾値よりも大きい（あるいは小さい）場合に蓄積する手法など多数存在する[1),5),19)]．セレクションに対し，データの相関性を考慮するフィルタリング手法とは，フィルタリングするデータ集合によって，各データの取捨選択が変化する手法である．つまり，一緒にフィルタリングするデータのコンテンツ，あるいは属性の相互関係に依存してデータの評価が変わるフィルタリングのことを指す．その中でも，特定のデータが揃うことで評価を上げるフィルタリングとは，連載放送のように何回かに分けて放送されたコンテンツに対して，すべてのデータが揃うことで意味をなすと判断し，それらを一緒にフィルタリングすることで評価を上げる手法である．一方，特定のデータが揃うことで評価を下げるフィルタリングとは，天気予報や番組表など日々配信されるコンテンツに対し，更新データを受信することで古いデータの評価を下げる手法である．また，ランキングとは，ユーザの嗜好に応じて受信データを重要な順序に並べ，最も重要なデータを特定の数だけ選択する手法である．

以下，表 7 に示す各手法を組み合わせた場合の性質について述べる．ただし，本研究では，頻繁に更新されるコンテンツに関しても，更新前のコンテンツと更新後のコンテンツを異なるデータアイテムとして扱うため，あるフィルタリングが等価性を満たすならば，処理方法の変換前後でコンテンツの一貫性も保証できる．

4.1 和フィルタリング関数の適用

Web ページのコンテンツに基づくフィルタリングと協調フィルタリングの両者の特徴を持った手法に Fab[2)] がある．Fab では，まず複数のコレクションエージェントが Web ページを収集し，その中からセレクションエージェントが各ユーザのプロファイルに基づいて必要なデータを選択する．各コレクションエージェントは，Web ページ中の単語に基づいて，それぞれ特定のトピックに関するページを収集するため，セレクションによるフィルタリングである．したがって，コレクションエージェント群によるページ収集処理は，分配等価性を満たすフィルタリング関数の和で表現でき，表 3 より分配等価性を満たすため，一括処理，分配処理，逐次処理，並列処理の間で処理方法を変更しても等価なフィルタリング結果が得られる．一方，セレクションエージェントは，あらゆるサイトのページを均一に選択し，ユーザがすでに閲覧したページを蓄積しないため，本稿で扱う性質をいずれも満たさない．ゆえに，セレクションエージェントの処理は本研究で扱う等価性を満たさないため，必ずしもフィルタリング結果の等価性を保ちながら処理方法を変更できない．

ここで，コレクションエージェントの一部（あるいはすべて）に逐次等価性を満たすフィルタリングを用いた場合，コレクションエージェント群によるページ収集処理は，分配等価性を満たすフィルタリング関数と逐次等価性を満たすフィルタリング関数の和（あるいは逐次等価性を満たすフィルタリング関数どうしの

```
EXTRACT    *
FROM       A_Broadcast
WHERE      GENRE = Animal

EXTRACT    *
FROM       B_Broadcast
WHERE      best (50, Broadcast_Time, DESC)
```

図 3 ユーザ要求の記述例 1
Fig. 3 An example of describing the filtering policy 1.

```
EXTRACT    *
FROM       A_Broadcast
WHERE      GENRE = Animal
PERIOD     2 weeks
かつ
//Animal/Bird[@name = "Penguin"]
```

図 4 ユーザ要求の記述例 2
Fig. 4 An example of describing the filtering policy 2.

和）で表現できる．逐次等価性を満たすフィルタリングには，表 7 より，ランキングによる手法や特定のデータが揃うことで評価を下げる手法などがある．コレクションエージェントにこのような手法を用いた場合，コレクションエージェント群によるページ収集処理は，表 3 より逐次等価性を満たすため，一括処理，逐次処理，並列処理の結果が等価となることが保証される．

Fab と同様に，Lau ら[9]のシステムは，インターネットの検索エンジンや外部のエージェント，検索システムを複数用いて Web ページを収集する．これも Fab と同様に和フィルタリング関数で表現できるが，上記のように各検索エージェントの性質に応じて，システム全体の性質も変化する．

さらに，和フィルタリング関数で実行される要求として，フィルタリング SQL[13]の記述例を**図 3** に示す．フィルタリング SQL とは，データベースへの問合せ言語である SQL をフィルタリングのために拡張した言語である．図 3 のユーザ要求は，「“A_Broadcast” から放送されたデータのうちジャンル “Animal” に属するデータと，“B_Broadcast” から放送されたデータのうち放送日時の最新度が 50 位以内のデータを抽出する」というポリシーを表す．このように，お互いに条件が干渉し合わない 2 つの要求を記述したとき，和フィルタリング関数によって実行できる．したがって，図 3 の要求は，セレクションによるフィルタリング（分配等価性 DE）とランキングによるフィルタリング（逐次等価性 SE）の和で表現されるため，表 3 より，逐次等価性と並列等価性を満たす．ゆえに，一括処理と逐次処理，並列処理の結果が等価となることを保証できるが，分配等価性を必ずしも満たさないために，分配処理と他の処理が等価となることを保証できない．

以上のように，結果が等価となる処理方法が複数存在する場合，ネットワークや受信機の負荷が高いときは負荷を分散できる並列処理や分配処理，つねに最新のフィルタリング結果が必要なときは逐次処理，複数の受信機を利用できないときは一括処理といったように，状況に応じて処理方法を等価変換できる．

4.2 積フィルタリング関数の適用

Foltz ら[8]は，1 つの手法で蓄積すべきと判断されたデータよりも，多数の異なる手法で蓄積すべきと判断されたデータの方がユーザの適応度が高いことを示した．このように，複数の手法により得られた結果のインターセクションを利用するフィルタリングは，表 5，表 6 より，逐次増加性（あるいは単調性，分配等価性）を満たすフィルタリングどうしを組み合わせた場合のみ，もとのフィルタリングと同じ性質を満たすことが明らかになった．特に，分配等価性を満たすフィルタリングどうしを組み合わせた場合は，本研究で扱う等価性（DE，SE，PE）を満たす．したがって，一括処理や分配処理，逐次処理，並列処理の結果がすべて等しくなるため，環境に応じて処理方法を変換できる．しかし，それ以外の組合せでは，必ずしも本研究で扱う等価性を満たさないため，処理方法を変更すると一貫したフィルタリング結果が保証されない．ゆえに，フィルタリング処理の開始前に環境を十分に調査し，最適な処理方法を決定しておく必要がある．

さらに，Foltz らの理論を利用し，フィルタリング SQL によって表現したセレクションと，XPath[6]によって表現したセレクションを組み合わせたユーザ要求の記述例を**図 4** に示す．XPath は，XML 文書のフィルタリングシステムである XFilter[1]がユーザ要求の記述に用いている．図 4 の後半が XPath による記述であり，XML 文書の構造を利用して「“Animal” というノードの子ノード “Bird” の属性 “name” が “Penguin” であるデータアイテムを抽出する」というポリシーを表す．また，前半のフィルタリング SQL 記述は，「“A_Broadcast” から放送されたデータのうち，ジャンル “Animal” に属するデータで 2 週間以内に受信したものを抽出する」というポリシーを表す．このように，フィルタリング SQL による受信日時の

条件と，XPath によるコンテンツ解析を組み合わせることで，より適応度の高いフィルタリング結果の取得が可能となる．両手法はセレクションによるフィルタリングであるため，表 6 より，分配等価性，逐次等価性，並列等価性を満たす．ゆえに，状況に応じて自由に処理方法の等価変換ができる．

5. おわりに

本稿では，フィルタリング関数の体系に和と積の概念を導入することで，複数の手法で得られた結果の和や積を計算するフィルタリングを定性的に表現するための枠組みを構築した．これにより，すでに筆者らが議論してきた合成フィルタリング関数では表現できない手法を取り扱えるようになった．また，本稿では，さまざまな性質を満たすフィルタリング関数に対して，和や積の性質を明らかにしたことにより，実際に運用されているフィルタリングの特性を明確にした．本稿で構築した枠組みにより，各手法の性質から，環境に応じてより効率的な処理方法へと動的に変更できる．

今後の課題を以下に示す．

- $M^{\vee}PD$，$SD^{\vee}PD$，$PD^{\vee}PD$ の性質
  本稿では，セレクションやランキングを含め，一般に用いられているさまざまなフィルタリング手法を組み合わせた場合の性質を明らかにした．また，表 2 に示す性質のうち，上記の 3 つの組合せの和フィルタリング関数は，必ずしも逐次減少性 SD や並列減少性 PD を満たすとは限らず，PD⇒SD 仮定が成立すれば逐次減少性 SD を必ず満たすことが保証できることを示した．しかし，それらの性質を満たすかどうかは，証明が困難であるため直接的には明らかになっていない．ゆえに，オープンプロブレムとして今後の解決を期待したい．
- 和積の条件
  本稿で論じた和フィルタリング関数や積フィルタリング関数は，必ずしも本稿で取り扱う性質を満たさない．しかし，和積の演算を行うとき特定の制約条件を追加することで，ある性質を満たす可能性がある．
- 合成フィルタリング関数との融合
  4 章では，Fab のコレクションエージェントおよびセレクションエージェントのうち，各エージェントにのみ注目して考察したが，Fab 全体では 1 つの合成フィルタリング関数で表現できる．このように，本稿で定義したフィルタリング関数の和積関数だけでなく，合成関数とも組み合わせた手法が存在する．ゆえに，合成関数の和積や，和積関数の合成など，フィルタリング関数の演算を複数用いて表現される手法の特性について考察する．

謝辞 本研究は，文部科学省振興調整費「情報フィルタリングの数学的基盤の確立」,「モバイル環境向 P2P 型情報共有基盤の確立」，および文部科学省 21 世紀 COE プログラム（研究拠点形成費補助金），科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））「大規模な仮想空間システムを構築する放送型サイバースペースに関する研究」（プロジェクト番号：15300033）の研究助成によるものである．ここに記して謝意を表す．

参 考 文 献

1) Altinel, M. and Franklin, M.J.: Efficient filtering of XML documents for selective dissemination of information, *Proc. 26th International Conference on Very Large Data Bases* (*VLDB2000*), pp.53–64 (2000).
2) Balabanovic, M. and Shoham, Y.: Fab: Content-based, collaborative recommendation, *Comm. ACM*, Vol.40, No.3, pp.66–72 (1997).
3) Belkin, N.J. and Croft, W.B.: Information filtering and information retrieval: Two sides of the same coin?, *Comm. ACM*, Vol.35, No.12, pp.29–38 (1992).
4) Bell, T.A.H. and Moffat, A.: The design of a high performance information filtering system, *Proc. SIGIR '96*, pp.12–20 (1996).
5) Chen, J., DeWitt, D.J., Tian, F. and Wang, Y.: NiagaraCQ: A scalable continuous query system for internet databases, *Proc. ACM SIGMOD2000*, pp.379–390 (2000).
6) Clark, J. and DeRose, S.: XML path language (XPath) version 1.0, W3C Recommendation (1999). http://www.w3.org/TR/xpath
7) 衛星放送協会ホームページ．
http://www.eiseihoso.org
8) Foltz, P.W. and Dumais, S.T.: Personalized information delivery: An analysis of information filtering methods, *Comm. ACM*, Vol.35, No.12, pp.51–60 (1992).
9) Lau, R., Hofstede, A. and Bruza, P.: Nonmonotonic reasoning for adaptive information filtering, *Proc. 24th Australasian Conference on Computer Science*, pp.109–116 (2001).
10) 森田昌宏：情報フィルタリングに関する研究動向，JAIST Research Report, IS-RR-93-9I, 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (1993).
11) 西　正，野村敦子：多チャンネル放送の衝撃，中央経済社 (1997).
12) Satellite Magazine.
http://www.satemaga.co.jp
13) 澤井里枝，寺田　努，塚本昌彦，西尾章治郎：

フィルタリング SQL: フィルタリングのためのユーザ要求記述言語，電子情報通信学会第 11 回データ工学ワークショップ（DEWS2000）論文集（CD-ROM）(2000).
14) Sawai, R., Tsukamoto, M., Loh, Y.H., Terada, T. and Nishio, S.: Functional properties of information filtering, *Proc. 27th International Conference on Very Large Data Bases* (*VLDB2001*), pp.511–520 (2001).
15) 澤井里枝，塚本昌彦，寺田　努，Loh Yin Huei, 西尾章治郎：情報フィルタリングの関数的性質について，電子情報通信学会論文誌 D-I，Vol.J85-D-I, No.10, pp.939–950 (2002).
16) 澤井里枝，塚本昌彦，寺田　努，西尾章治郎：フィルタリング関数におけるセレクションとランキングについて，情報処理学会論文誌：データベース，Vol.43，No.SIG12(TOD16)，pp.80–91 (2002).
17) 澤井里枝，塚本昌彦，寺田　努，西尾章治郎：合成フィルタリング関数の性質について，情報処理学会論文誌：データベース，Vol.44, No.SIG3(TOD17), pp.43–53 (2003).
18) 澤井里枝，塚本昌彦，寺田　努，西尾章治郎：情報フィルタリングの実行順序に関する関数的性質について，情報処理学会論文誌：データベース，Vol.44, No.SIG3(TOD17), pp.54–64 (2003).
19) Zhang, Y. and Callan, J.: Maximum likelihood estimation for filtering thresholds, *Proc. SIGIR '01*, pp.294–302 (2001).

(平成 15 年 3 月 25 日受付)
(平成 15 年 6 月 29 日採録)

（担当編集委員　安達 淳）

澤井　里枝

2000 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業．2002 年同大学院工学研究科博士前期課程修了．現在，同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士後期課程に在学中．

塚本　昌彦（正会員）

1987 年京都大学工学部数理工学科卒業．1989 年同大学院工学研究科修士課程修了．同年シャープ（株）に入社，同社研究員．1995 年大阪大学大学院工学研究科講師．1996 年より同大学院工学研究科助教授，2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授，現在に至る．工学博士．モバイルコンピューティング，分散知識ベースシステムの研究開発に従事．ACM，IEEE 等 7 学会の会員．

寺田　　努（正会員）

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業．1999 年同大学院工学研究科博士前期課程修了．2000 年同大学院工学研究科博士後期課程退学．同年より大阪大学サイバーメディアセンター助手，現在に至る．2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手を併任．アクティブデータベース，モバイルコンピューティング，データ放送の研究に従事．

西尾章治郎（正会員）

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業．1980 年同大学院工学研究科博士後期課程修了．工学博士．京都大学工学部助手，大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授，大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て，2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，現在に至る．2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター長を併任．この間，カナダ・ウォータールー大学，ビクトリア大学客員．データベース，マルチメディアシステムの研究に従事．現在，ACM Trans. on Internet Technology，Data & Knowledge Engineering，Data Mining and Knowledge Discovery，The VLDB Journal 等の論文誌編集委員．情報処理学会フェロー含め，ACM，IEEE 等 9 学会の会員．