

波長変換技術入門(1)

Chap.1 波長変換の概要

1-1. 波長変換の原理

1-2. 位相整合

Chap.1 波長変換の概要

- ・本章では、波長変換の原理の概略を説明します。

1-1. 波長変換の原理

- ・1960年レーザが発明されて以来、レーザ光の集光による強力な光電界の発生が可能となり、物質の線形応答から逸脱する光学的非線形現象が数多く見いだされるようになりました。
- ・高調波発生のもつ初めのは、Frankenによるルビーレーザ(694nm)の第2高調波(347nm)発生です[1.1]。これは入射光によって媒質に誘起された2次の非線形分極から生じます。ここでは、まず波長変換の原理の概略を説明します。

[1.1] P.A.Franken et al.; Phys. Rev. Letters, vol.7, NO.4 (1961) 118.

- Giordmaine[1.2]は波長変換の原理を、物質に光波が入射した場合の非線形性分極の発生とフーリエ級数とを関連付けて以下のように説明しています。
- 透明媒質に光波(正弦波を仮定)が入射すると、物質中ではその応答として電子変位(分極波)が誘起されます。
- 入射光強度が弱い場合、誘起される分極波は、図1.1に示す様に、電子変位の仕方は線形で、入射波と同じ応答を示し、入射波と同じ周波数の正弦波となります(線形応答)。ひずみ波ではないので高調波は存在しません。
- 一方、入射光電界が強い場合、誘起される分極波は、図1.2に示す様に、入射波と同じ正弦波ではなくなり、ひずんだ波形となります。
- 周期性のあるひずみ波は、すべてフーリエ級数で表わすことができます。すなわち、入射光波(基本波)とその高調波の重ね合わせで表すことができます。

[1.2] J. A. Giordmaine; "The interaction of light with light", Scientific American, April 1 (1964) 38.

●弱い入射光の場合

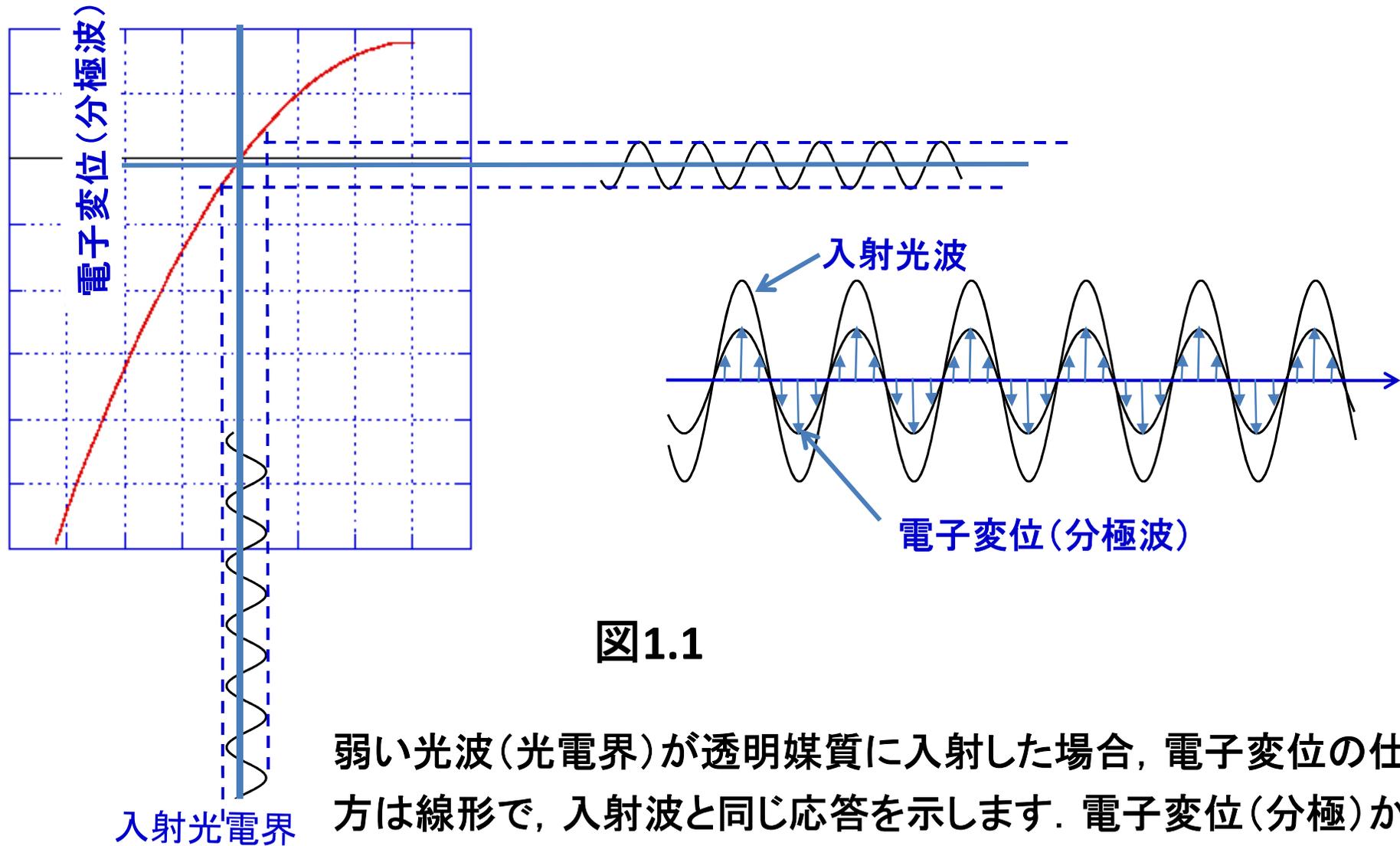


図1.1

弱い光波(光電界)が透明媒質に入射した場合、電子変位の仕方は線形で、入射波と同じ応答を示します。電子変位(分極)から電磁波が放射されますが、入射波と同じ波形(正弦波)で、ひずみ波ではありません。

●強い入射光の場合

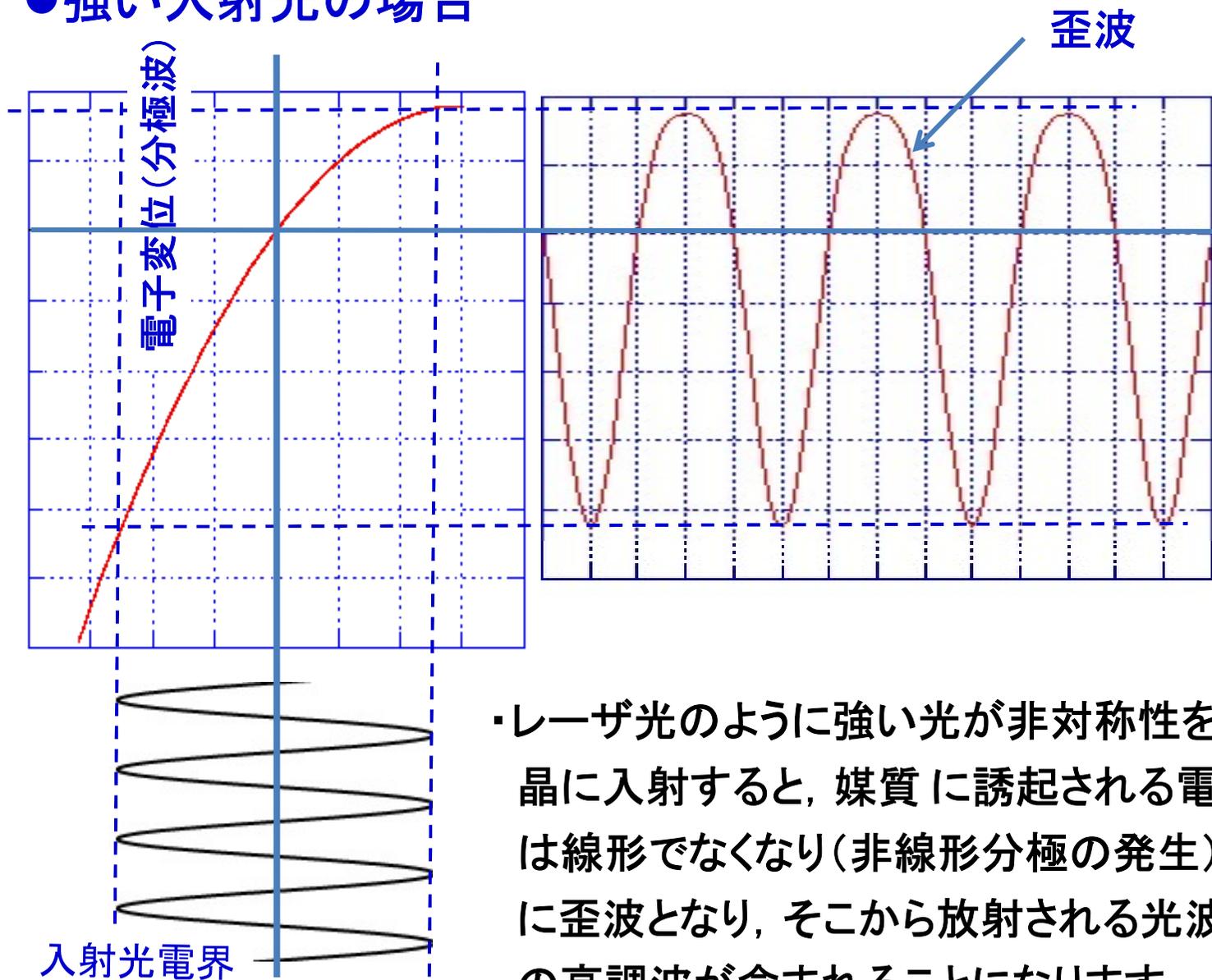
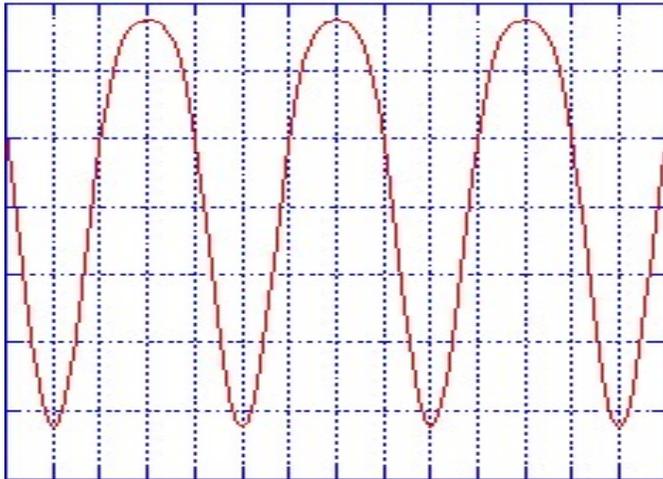


図1.2

注)このような現象は、レーザが発明されるまで見いだされることがなかった。

●歪波のフーリエ級数展開



- ・図1.2の歪波は右図のように、直流成分、基本波成分、第2高調波成分の重ね合わせで表される。

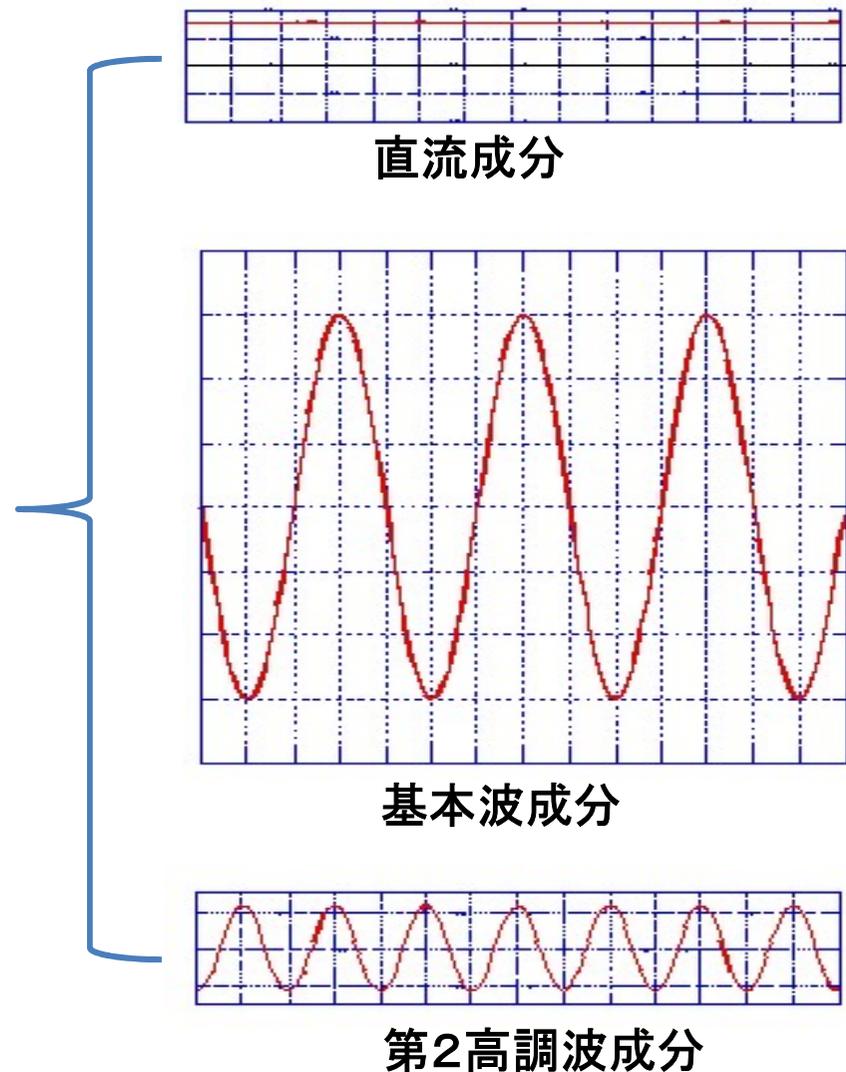


図1.3

注) 正弦波以外の周期性のある波は、フーリエ級数で表される。すなわち、直流項、基本波項、その高調波項の無限級数の和として表される。図1.2の波の主成分は、直流、基本波、第2高調波である。

1.2 位相整合

- ・高調波を強く発生させるには、“位相整合”の概念が重要となります。これを理解するため、先ず分極と光電界の関係について説明します。
- ・一般に、分極 \mathbf{P} と入射光電界 \mathbf{E} との間には、次式の関係があります。

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots] \quad (1-1)$$

ここで、 ε_0 は真空中の誘電率(permittivity of vacuum; 8.854×10^{-12} m/F)

$\chi^{(1)}, \chi^{(2)}, \dots, \chi^{(i)}$ は、 $(i+1)$ 階のテンソルで、電気感受率テンソル

(electric susceptibility tensor)と呼ばれる量です。したがって2次の非線形項は3階のテンソルで表されることとなります。

R. L. Byer and R. L. Herbst; "Nonlinear Infrared Generation ed Shen, Chp.3, Springer Verlag (1977) 81.

- ・入射光電界が通常光のように弱い場合には，第1項まで，レーザ光のように強い場合は，光強度に応じて，第2項，さらに強いと第3項と含めて考えなければなりません．

- ・簡単のためスカラー近似を用い，第2高調波発生を考えると次式第2項までが重要です．．

$$P = \varepsilon_0 [\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots] \quad (1-2)$$

- ・入射光として，次式を仮定します．

$$E = E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 r) \quad (1-3)$$

基本波振幅 \rightarrow E_0
 基本波角周波数 \rightarrow ω_1
 基本波波数 \rightarrow k_1
 光の進行方向にとった位置座標 \rightarrow r

- ・この入射光によって物質中に誘起される分極は，(1-3)を(1-2)に代入することにより，次式となります．

$$\begin{aligned}
 P &= \varepsilon_0 \chi_1 E_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2 \cos(2\omega_1 t - 2k_1 x) \\
 &= P_{\omega_1} + P_{DC} + P_{2\omega_1} \quad (1-4)
 \end{aligned}$$

・式(1-4)中辺第1項は、線形項から生じる基本波(ω_1)分極、第2、第3項は、2次の非線形項から生じる分極成分で、直流分極および第2高調波($2\omega_1$)分極です。

・ここで、第2高調波分極の位相速度 $v_p(2\omega_1)$ を考えると、その定義 ω/k と式(1-4)より、次式となり、基本波の位相速度と同じになります。

$$v_p(2\omega_1) = \frac{2\omega_1}{2k_1} = \frac{\omega_1}{k_1} = v_p(\omega_1) \quad (1-5)$$

・これは、当然のことで、分極は入射基本波によって誘起されるので、線形分極、非線形分極を問わず基本波の位相速度で媒質内を移動します。

・しかしながら、媒質中で誘起される分極の各点から電気双極子放射で放出される第2高調波光電界の波数は、 k_1 ではなく k_2 です。

・そして波数は、媒質中では次式で与えられます。

$$k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)n \quad (1-6)$$

← 媒質の屈折率

- ・よって、非線形分極から発生する第2高調波光電界の位相速度 $v_E(2\omega_1)$ は、次式となります。ここで $2\omega_1 \equiv \omega_2$ です。

$$v_E(2\omega_1) = \frac{2\omega_1}{k_2} = \frac{\lambda_2 \cdot 2\omega_1}{2\pi n_{\omega_2}} = \frac{(\lambda_1/2) \cdot 2\omega_1}{2\pi n_{\omega_2}} = \frac{\lambda_1 \cdot \omega_1}{2\pi n_{\omega_2}} \quad (1-7)$$

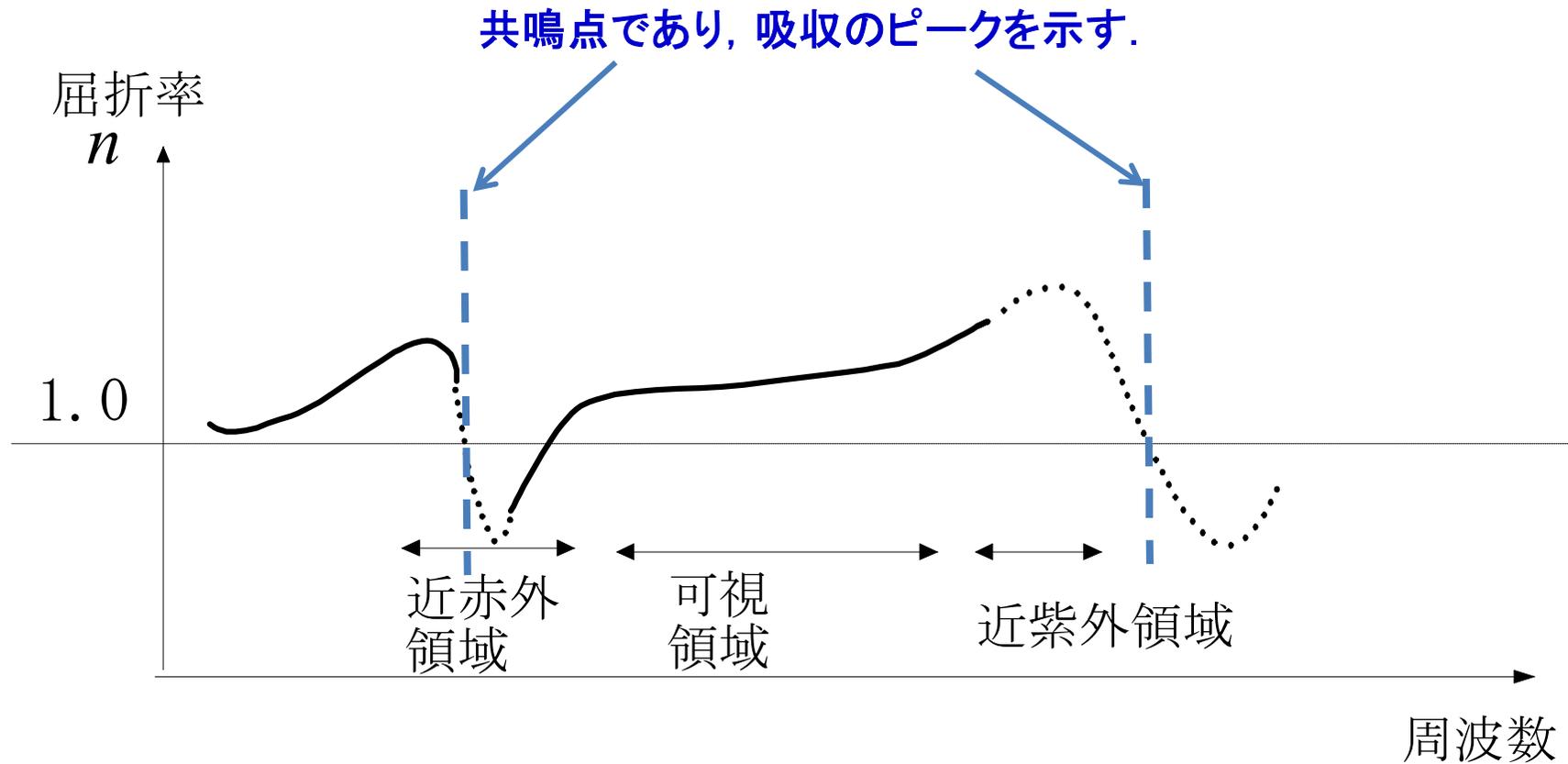
- ・また、(1-5)式より、分極の位相速度は次式となります。

$$v_p(2\omega_1) = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\lambda_1 \cdot \omega_1}{2\pi n_{\omega_1}} \quad (1-8)$$

- ・従って、 $n_{\omega_1} = n_{\omega_2}$ なら分極の位相速度と第2高調波光電界の位相速度が一致することになり、媒質中の各点で光電界が強め合うように重ね合わされることになり、第2高調波が増強されます。このような条件を **位相整合(phase matching)条件**といいます。

- ・通常、物質は正常分散特性を持ち、波長が短くなるほど屈折率が大きくなります。

- ・多くの透明固体材料は、近赤外から可視領域にかけて正の分散特性を持ちます。
- ・正の分散特性とは：周波数が高くなると（短波長になると）、材料の屈折率が大きくなることです。



- 通常、物質は正の分散特性を持つので、第2高調波分極とその分極の各点から放出される第2高調波光電界とは位相速度が一致せず下図のような状態となっていて、例えば点A4の位置では、各点で発生した第2高調波電界が互いに打ち消しあい消滅します。

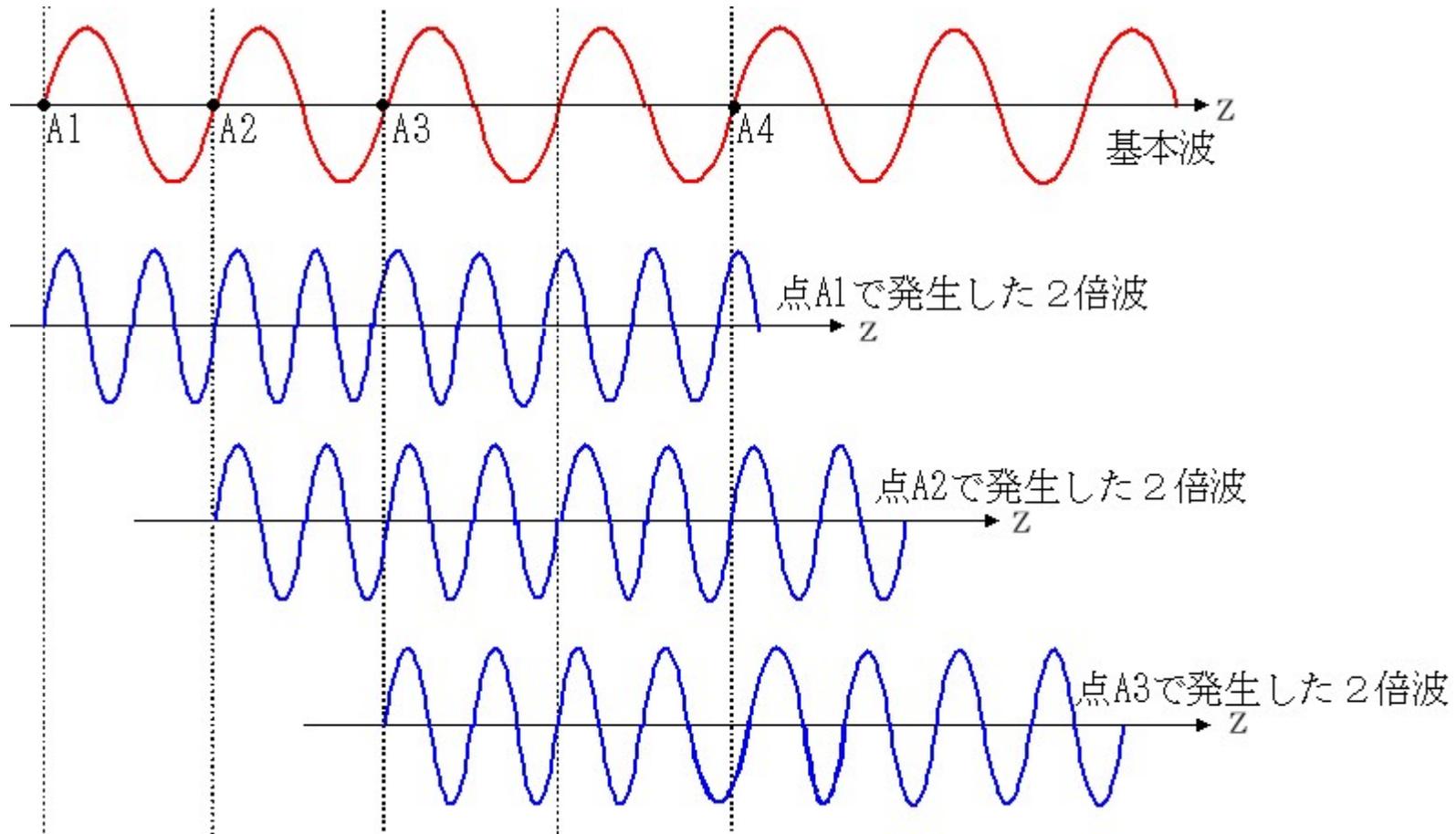


図1.4

- 一方、位相整合条件が満たされると下図のように各点での第2高調波光電界の位相がそろい、第2高調波(2倍波)が強められることになります。

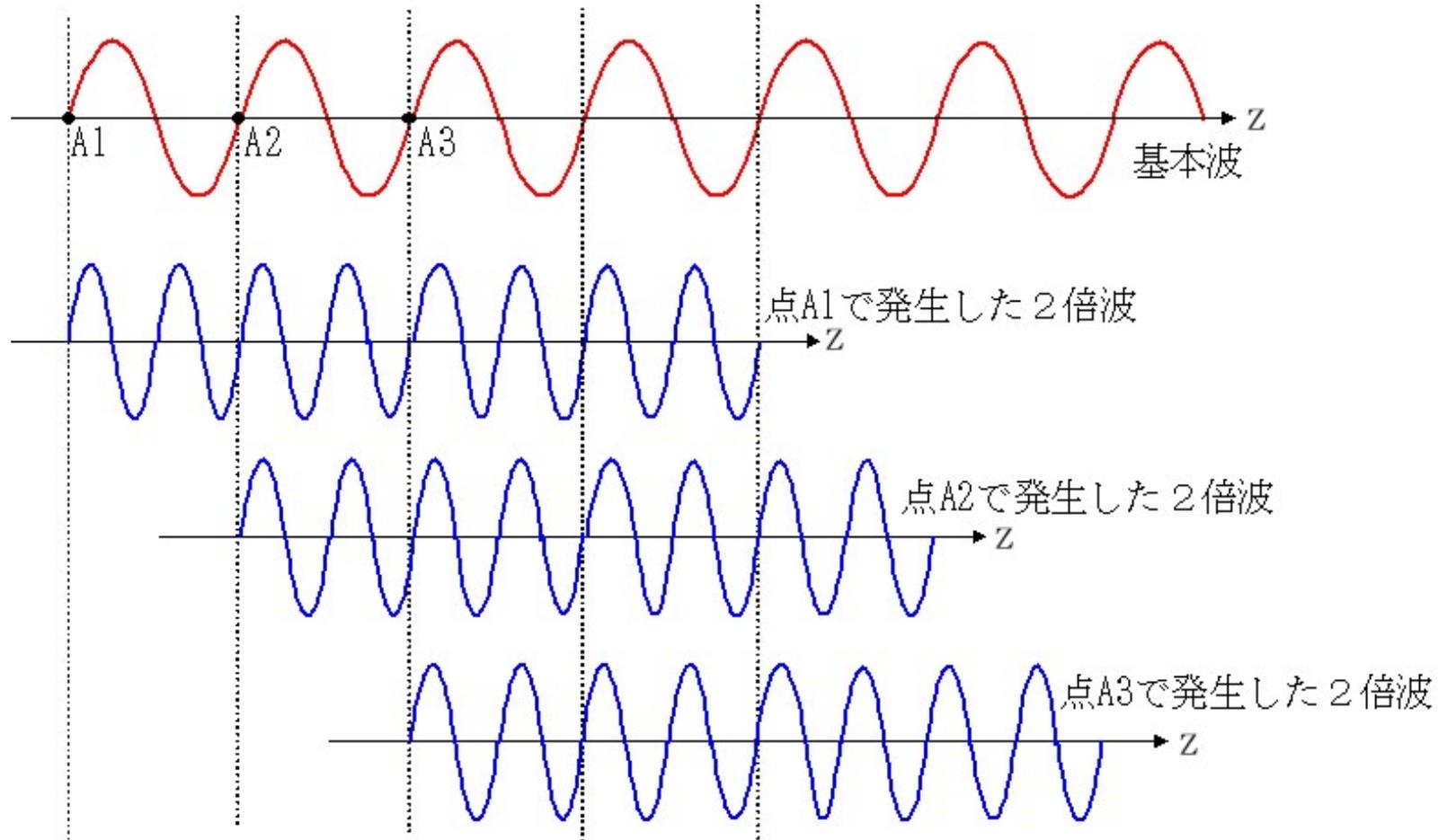


図1.5

・位相整合条件,

$$n_{\omega_1} = n_{\omega_2} \quad (1-9)$$

を満たす, “巧妙な方法が1962年, Giordmaine[1.3]とMakerら[1.4]により, 独立に考案されたとされています[1.5].

・巧妙な方法とは,

“ある種の異方性結晶では, 伝搬方位を選べば, ある周波数(波長)における異常光線屈折率を別の周波数(波長)での常光線屈折率と同一にできる“

ことを利用した方法です.

[1.3] J. A. Giordmaine; *Phys. Rev. Letters*, vol. 8(1962)19.

[1.4] P. D. Maker et al.; *Phys Rev. Letters*, vol. 8 (1962) 21.

[1.5] P. A. Franken and J. F. Ward; *Review of Modern Physics*, vol. 35, no.1 (1963)

- 例えば一軸性負性結晶では，下図のような分散特性が得られます．

ここで， $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2}$ なら，位相整合状態となります．

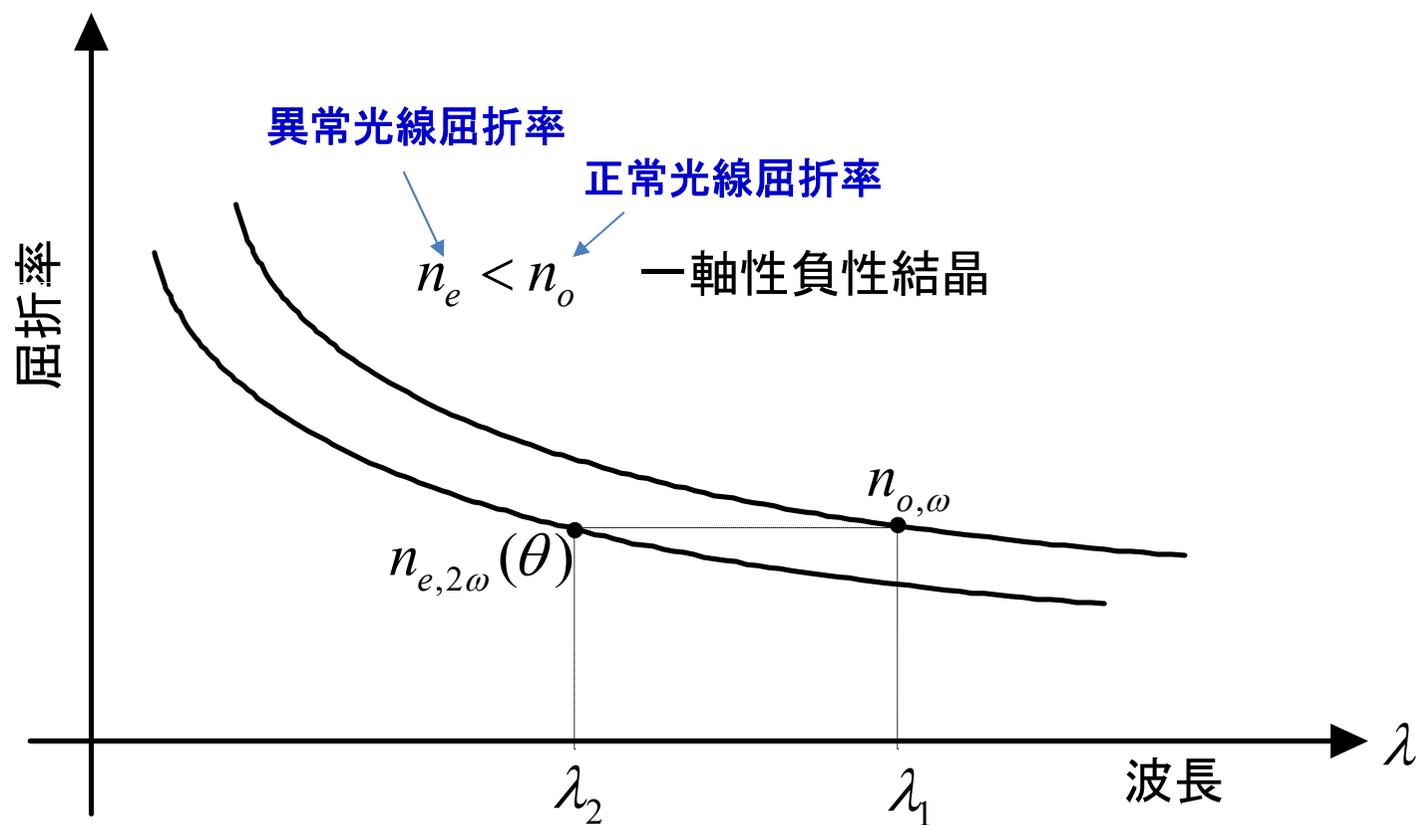


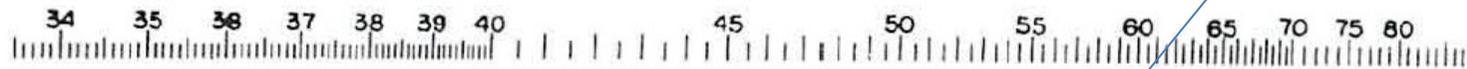
図1.6

- ・なお, Frankenによる, 最初のSHG実証実験のときには, 位相整合の概念がなく, 発生したSH光強度も微弱であったので,

印刷工が, シミと勘違いし, SH光スポットを消去したとされています.

VOLUME 7, NUMBER 4 PHYSICAL REVIEW LETTERS AUGUST 15, 1961

SH光(347.2nm)



ルビーレーザーの光(694.3nm)
(強くてハレーションしている)

P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, Generation of Optical Harmonics, Phys. Rev. Lett. 7, 118 (1961).

次回につづく