

生研公開講演

時を遡る波—位相共役光学—

The Wave back to the Past—Optical Phase Conjugation—

黒 田 和 男*

Kazuo KURODA

1. は じ め に

ただいま紹介にあずかりました黒田です。本日は、「時を遡る波」という少し人目を引くようなタイトルをつけたのですが、専門家の間では位相共役光学と呼んでいる分野の話をしていただきます。位相共役と書くと、何のことかわからないだろうということで、ちょっと奇抜なタイトルをつけたわけです。内容的には、時間を逆戻りする、そういう性質を持った波をつくることができるという話です。

時間が逆戻りしないことを、よく「覆水盆に返らず」とか言います。私はあまりこういう故事に詳しくありませんが、広辞苑によると太公望の次のような話が由来となってきた言葉だそうです。太公望が不遇の時代に、愛想を尽かして奥さんが逃げてしまった。あとでその太公望が出世して斉の王になったときに奥さんが戻ってきて復縁を迫った。そのときお盆から水をこぼして、この水をもう一度集められたら再婚しよう、と言ったということです。

もちろん一度こぼれた水をもとに戻すことはできません。時間を逆に回して若返る方法があったら大変うれしいのですが、そういうことはもちろんできるわけがありません。「時を遡る波」というのはそういうことではなくて、いってみれば一度撮ったフィルムを逆に回すように、終わりの状態から始めの状態に戻っていくような状況をつくらうということです。私の専門は光なので光の波の話ですが、他の種類の波でも同じようなことができます。

2. 空間反転と時間反転

物理では対称性ということをよく議論します。われわれになじみが深いのは空間的な対称性で、鏡に映した世界です。横軸に空間を、縦軸に時間をとると、運動というものを一本の線で表すことができます(図1)。それを鏡に映した運動というのがありわけです。言ってみれば、右投げのピッチャーが投げたカーブと、左投げのピッチャーが投

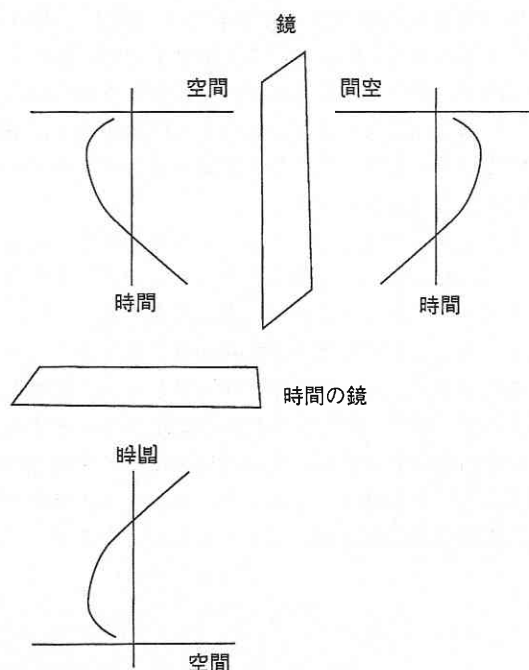


図1 空間反転と時間反転。

げたカーブに対応するようなものですが、ちょうど鏡に映して左右が反対になった世界を考えることができます。これが空間反転です。

それと似た感じで、時間の鏡なんてものがあるわけではないのですが、始めの状態と終わりの状態をひっくり返す。ある運動があったときに、終わってから始めに戻るような、そういう運動というものを考えることができます。これを時間反転と言います。

運動が時間の反転に対して対称かどうかというのを可逆的という言葉で表現します。そうしたときに、おもしろいことに、ほとんどの物理法則というのは可逆的なんですね。つまり後に戻ることができる。それは多くの物理法則が空間反転の対称性を持っているのと同じような意味です。

可逆的ではないものには、例えば摩擦を伴う運動とか、

*東京大学生産技術研究所 第1部

拡散があります。太公望の故事の水をこぼすことは、広い意味での拡散過程に入ります。それからわれわれ人間の成長も非可逆で、さすがに時間にさかかって若返ることはできません。しかし、個々の物理法則は実は時間を逆転した状態でも成り立つのだということになっております。

余談ですが、ただいまほとんどの物理法則は可逆的だと言いましたが、K 中間子という素粒子の崩壊過程に時間の対称性を破っているものが見つかっています。これがほとんど唯一の例外です。

3. 物体の運動の時間反転

ではいったい時間を遡る運動とはどういうものでしょうか。はじめに力学の物体の運動を考えてみましょう。いちばん簡単な可逆運動の例は振り子です(図2)。振り子が行ったり来たりしているわけで、振り子が右に振れるとき未来に向かっていていると考えれば、左に振れるときは過去に戻っていることになります。もちろん摩擦があれば運動は可逆的ではなくなり、だんだん振幅が小さくなっていて、いずれ止まってしまうす。

もう少し違った例として、ボールの運動を考えましょう(図3)。これは卓球のラケットのつもりです。このラケットをうまくコントロールして、入ってきたボールの速度に対して、ちょうど同じ速さで反対向きになるようにボールを打ち返します。そうすればボールはもと来た軌道に戻っていくはずす¹⁾。実際には空気の抵抗がありますから、そうはならないのですが、仮に真空中で、空気の摩擦のないところでやればボールはもとに戻っていきます。こうして、物体の運動を時間反転することができます。今日の

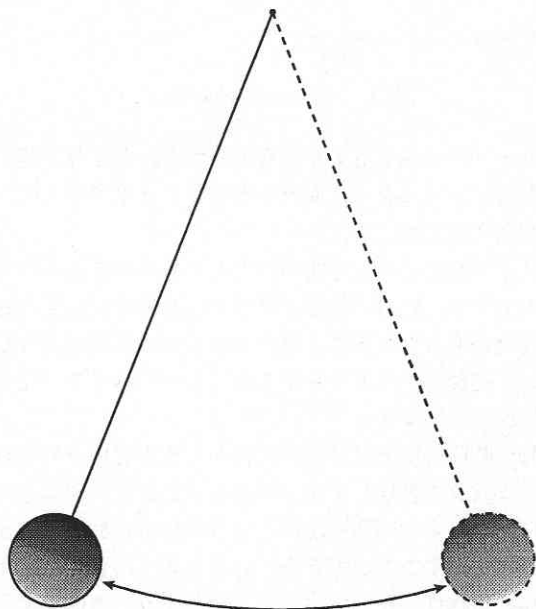


図2 可逆運動の例。摩擦のない振り子。

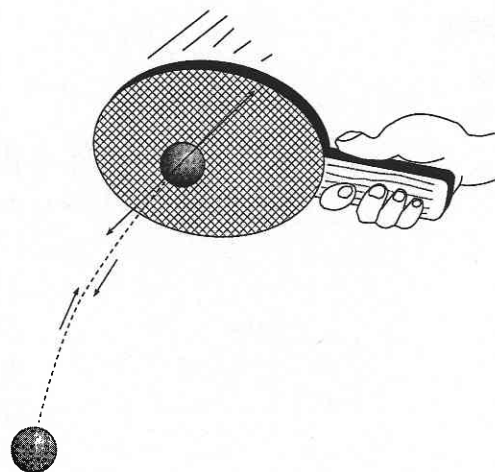


図3 ボールの運動の時間反転。時間反転ラケットは入ってきたボールの速度を正確に逆向きにする。

話は、光に対するラケットをつくってやろうということす。

4. コーナーキューブ

光の場合に時間反転をどういふに実現するか、いくつかの方法が考えられます。まずはじめに、ちょっと粒子に近い考え方から入らせていただきます。入ってきた光をもとの方向に反射するという性質を持ったコーナーキューブとかコーナリフレクターとか呼ばれるものがございます。これは、例えば道路の路肩の標識や自転車の後ろに使われています。自動車のヘッドライトで照らすと、そのヘッドライトの方向に光を反射しますので、自動車はどこにいても、ドライバーは反射光を認めることができます。

コーナーキューブは、図4のように、3枚の鏡を互いにちょうど90度で交わるように立体的に組みあわせた構造をしています。3次元ではわかりにくいので話を2次元にしますと、図4の下の方のように90度で交差する反射面があると、どんな方向から入ってきても2回反射したのちには入ってきた方向に戻っていきます。こうして、光の進む方向を逆転する仕組みができるわけです。ただしちょっと困るのは位置が横にずれる。その分だけ正確さが損なわれているわけです。そういうわけで100%満足する結果にはなりません。

ただ、これを実際に実験した方もいるんですね。ふつうの鏡の代りに、コーナーキューブのアレイを作って光を戻す。私は実物は知らないのですが、論文によると、わりとよく元に戻るのだと書いてあります。ただ何といたってもコーナーキューブのつなぎ目のところで波面が切れているということがありまして100%満足できるものにはなりません。

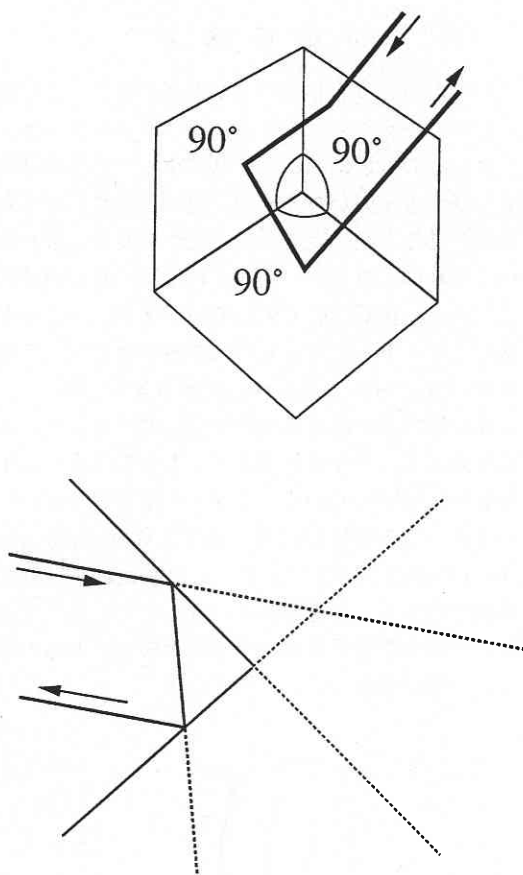


図4 光線を入射方向に反射する鏡。コーナーキューブ。

5. 位 相 共 役

ここで波というのはどういうものか、ちょっと振り返ってみましょう。例えば水面に石を放り投げる。そうすると円い波紋が広がっていく(図5)。これを波面といいます。光の場合3次元で考えますから、波面が球面の形をしているので球面波といいます。球面波は中心から湧き出のように伝わっていきます。

それから波面がまっ平らなものもあります。図5の例では右に進んでいく。これは波面が平面なので平面波といいます。こういうふうに、波面の形状で波を分類できます。そうしたとき波の非常に大事な性質として、波の進む方向は必ず波面と直交するということがあります。これは非常に特殊な物質の中、結晶などのように異方性がある物質の中ではちょっと違ってきますが、ふつうの空気の中を伝わる音とか、空気の中でもいいし、真空中でもいいし、ガラスの中でもいいのですが、異方性を持たない物質中を伝わる光に対して成り立ちます。

そういう性質を考えに入れますと、同じ波面を持って向きだけ逆転すれば、逆向きに進む波というのができるはずで。つまり波面はそのままにして、進む向きだけ逆転す

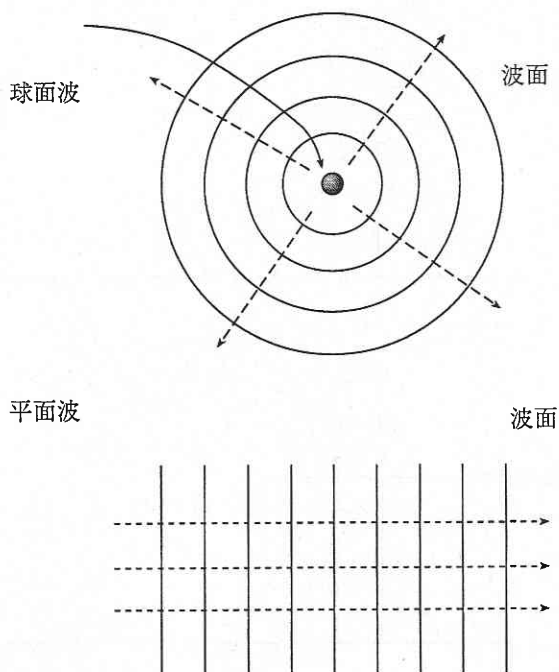


図5 波の性質。波面と波の進行方向は直交する。

ればいい。平面波だったら非常に簡単で、鏡を置けばいいわけです。今まで右向きに進んでいた平面波を、鏡で反射してやれば左向きに進む平面波になる。球面波の方はもう少し難しいですが、一点に収束する波に変えるわけです。

では向きだけ変えるというのはどういうことなのか。波の進む向きというのはどのように決まるのかということですが、こんなふうに考えることができます。

波というのは、一点一点は振動しているわけです。振動のどの状態にあるかを表す量を位相と言います。その位相の進み方が、隣り合う2点で、どちらが先でどちらが後かという関係で、波の進む方向が決まるのです。

図6は波の断面の形を描いたものです。波は右の方向に進んでいるとします。そうすると波ははじめにこの実線の状態にあります。それが時間が少し経つと波線の状態にシフトしているわけです。これを近接する2点で見ると、左の点の方が位相が進んでいます。波は位相の進んでいる点から遅れている点へ進むわけです。

では逆向きに進む波はどうなっているかという、図6の下に図のように、右側にある実線が先で、時間が経ってから波線になるわけですから、今度は右側の点の位相が先行することになります。要するに、時間反転をして逆戻りする波を作るには、その位相を逆転すればよろしい、ということになるわけです。

ここまで来て、本日の講演の副題にある「位相共役」という言葉の意味がわかります。位相の進み方を逆転するという操作を位相共役、英語で phase conjugation というの

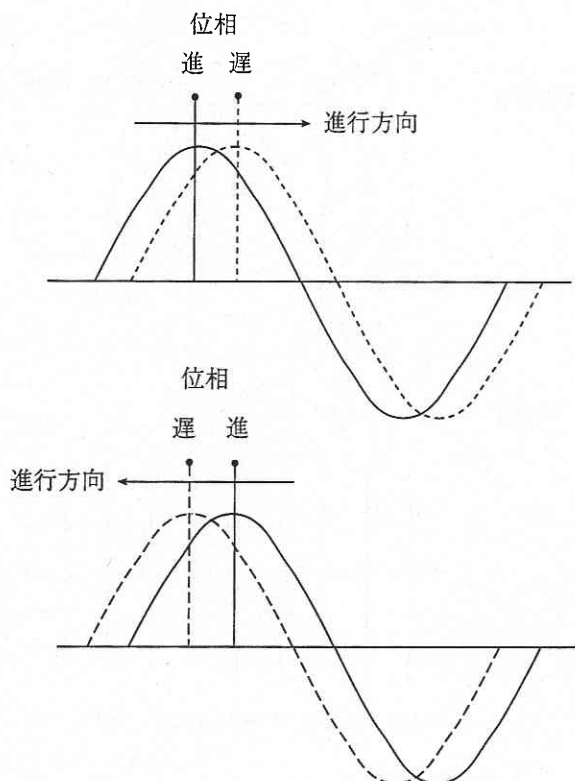


図6 波の進行方向と隣り合う2点の位相の先後関係。波は位相の進んでいる点から遅れている点に向かって進む。

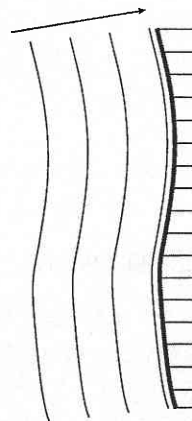
です。位相を逆転することが、時間を反転することになることは、上の説明から明らかでしょう。

これまで位相だけを考えたのですが、波にはもう一つ振幅というのがあります。この振幅はどうなるのかということを考えておく必要があります。全く吸収がなければ問題ありません。これは物体の運動で摩擦がないのと同じことになります。吸収があると、振幅はだんだん減っていくのですが、しかし現象が線形である限りは振幅の絶対値というのは波の伝播にとってあまり重要ではありません。つまりこの場合、波の伝わり方は、波が強いとか弱いとかいうことには依らないのです。というわけで、線形な範囲で考えているかぎりには、少々吸収があっても問題にはならないのです。

ただ場合によっては、線形ではない現象が重要になることがあります。そのようなときには振幅は問題になります。吸収がある場合、振幅については時間を逆転することはできません。吸収があれば波はだんだん減衰していくわけですが、位相を逆転しただけですと、波は確かにもとに遡っては行けけれど、エネルギーの方はさらに減衰していくわけです。波がもとに戻るとき、エネルギーが増幅されるということは残念ながら起きないわけです。ですからあくまで位相を逆転するということなのですが、その範囲で時間反転波を作りうるということがわかったわけです。

6. 適 応 光 学

ではいったいこれをどうやって実現するか、これも実は何通りかの方法がございます。先ほどのコーナークューブを使うというのも近似的にはそれになっているわけですが、もう少し違う考え方があります。先ほど説明したとおり、波面と波の進む方向は直交する。だから波面に合わせて鏡を置いてやればよろしい。そうすれば鏡の面で波は垂直に入りますから、垂直反射で戻っていきます。ちょうどこれが卓球のラケットみたいなものになるわけです。このため形を自由に変えられる鏡を作っておきます(図7)。そうして波面の形状を計測するわけです。で、計ったとおりに鏡の形を変える。そうすれば入ってきた光はそのまま各点で正反射されて戻っていく。こういう研究が今盛んに行われています。この分野には適応光学、英語で adaptive optics という名前がついています。ただ問題は、自由に変えられる鏡をどうやって作るかということで、ピエゾ素子とかそういうふうな素子を使った装置の研究があるのですが、まだこの部分で困っている状況です。



形状可変鏡

図7 形状可変鏡を用いた位相共役。入射する波の波面に合わせて鏡の形状を変化させる。

6. レーザー共振器

もう一つ似た話で、レーザー共振器というのがあります。レーザーそのものは光の増幅媒質なのですが、図8のように、それをふつう2枚の鏡で挟むんです。これをレーザー共振器といっているわけです。そのときに中にできる光の場をガウシアンモードと呼んでいるのですが、その波面がちょうど凹面鏡の面に合うようにできているんです。これは逆なんですね。先ほどの適応光学の場合は波面に合わせて鏡を変えるのですが、この場合は鏡の形状に合わせて光の場ができる。違う曲率半径の鏡を置けば別の格好の光の場ができる。鏡に合わせてできた光の場をモードとい

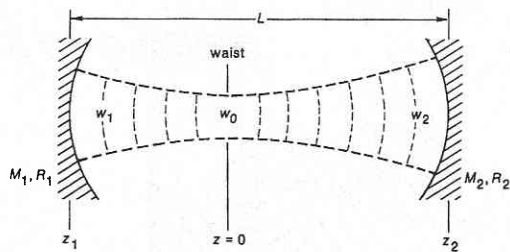


図8 レーザー共振器とガウシアンモード。光は2枚の鏡の間に往復する。

います。これはちょうど力学の振り子そのものですね。光は共振器の中を何度も往復しているわけですが、鏡の面で反射されるたびに位相共役になって戻ってきます。そういう意味でちょうど光の振り子になっている。

7. 非線形光学位相共役鏡—誘導ブリュアン散乱法

今述べたとおり直接鏡を波面に合わせてしまう方法があるわけですが、実は今日お話ししたいのはこれではなくて、難しいのですが、非線形光学と呼ばれる効果を使って位相共役波を発生させる方法です。実は非線形光学といってもいろいろあるんです。ですから、表1に示すとおり、いろんな方法で位相共役波を作ることができます。それぞれ特徴がありまして、こういう応用にはこの方法がよいというように分類がされているわけです。

今日これからお話しするのは主に縮退四光波混合法、その中のフォトリフラクティブ効果を使った方法です。しかしその前に、一言だけ、誘導ブリュアン散乱を使った方法に触れたいと思います。歴史的にはこれがいちばん最初に出たんですね。1972年、もう二十数年前になります。

ブリュアン散乱というのは何かというと、どんな物質でもその中に音波が存在します、その音波による光の散乱、反射をブリュアン散乱といいます。この場合はその前に「誘導」というのがついているのですが、これはちょっと説明が難しいのですが、この散乱プロセスの誘導放出過程という意味です。誘導放出というのはレーザーの出る原理であると言っておきましょう。それと似た現象がブリュアン散乱でも起きます。結論をいうと、光を増幅する能力が出てきます。位相共役波の発生の場合はちょうど正反射、音波によって光が180度逆向きに散乱される。このプロセスを通して光が増幅されるわけです。

それでなぜ位相共役波が出るかですが、これがまたちょっと微妙なのです。いま光を増幅するんだといったわけですが、散乱された光がちょうど位相共役波になったときに増幅率が最大になる。要するに、位相共役がいちばんマッチングがいいんですね。入ってきた光と出ていく光がぴたっと合って、増幅率がその状態で最大になる。そういうわけで散乱された光が位相共役波になっている。これが

表1 非線形光学効果を用いた位相共役波の発生法

- | |
|-------------------|
| ● 誘導ブリュアン散乱 (SBS) |
| ● 縮退四光波混合 |
| 光カー効果 |
| フォトリフラクティブ効果 |
| その他の実時間ホログラム |
| ● 光・エコー |
| ● その他の非線形光学効果 |

最初に見つけた方法です。

8. 縮退四光波混合

次に縮退四光波混合法に移りましょう。実はこれはホログラムといわれている光学で非常によく使われる原理の一つの応用と考えることができます。と言うわけでしばらくそのホログラムの話をさせていただきます。

ホログラムというのは、1948年でしたか、ガボアという人が最初に原理を提唱した方法です。図9のホログラムは写真乾板、要するに光を記録するものだと思います。ここに二つの光を入れます。一つは参照波といわれるもの。図9では、平面波である必要は必ずしもないのですが、平面波になっています。もう一つは物体波、これは一点から出た球面波になっている。これも何でも構わないのですが、説明上は一点から出た球面波としておきます。ホログラム上の両方が重なったところで干渉縞ができる。そのためにはこの二つの光が可干渉である、コヒーレントである必要があります。その干渉縞を写真として記録する。それがホログラムです。そういうものを用意する。

次に図10に移りまして、同じ位置に現像したホログラムを置く。これを作るときに使った参照波と同じ光で照明す

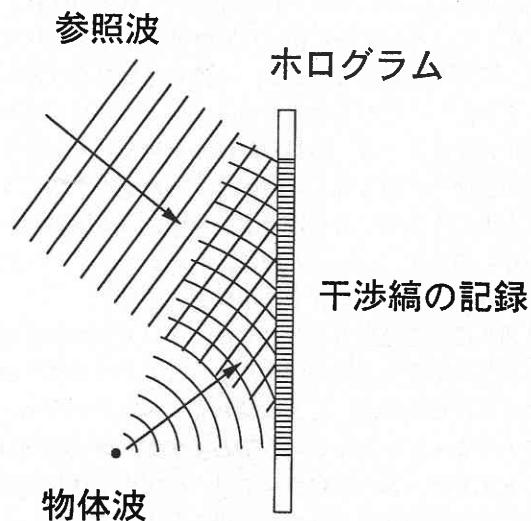


図9 ホログラムの記録。

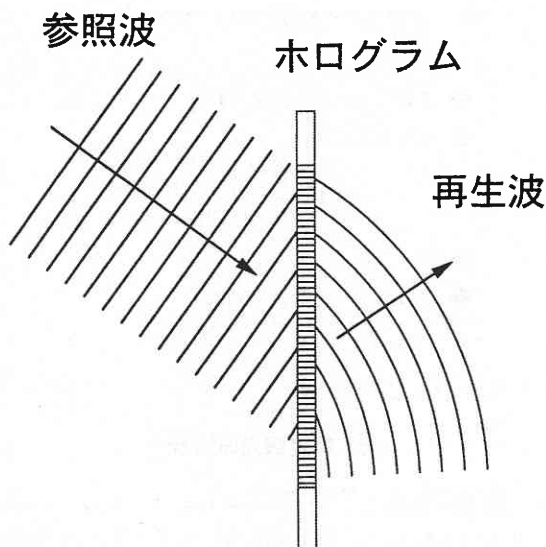


図10 ホログラムの再生.

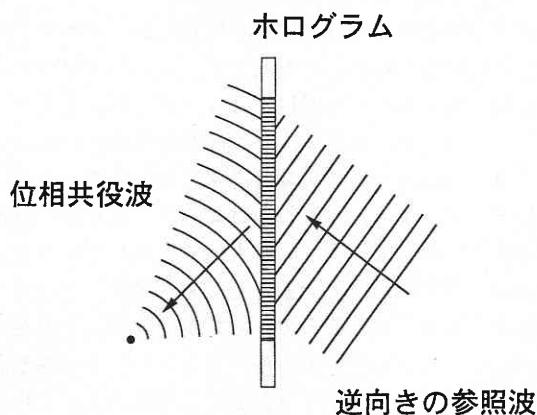


図11 位相共役波の再生. 参照波を逆向きから入れる.

る。そうすると、ホログラムに記録された回折格子が参照波を回折する。その回折された光が、これを再生波といいますが、ちょうど記録に使った物体波と同じものになっています。で、人間が見ていると、実際にはホログラムしかないのですが、あたかも物体があるかのように見えるわけです。物体を見るとき、われわれは光を見ているわけで、その光が画像の情報も持っていれば、あたかもそこに本物があるかのように見えるわけです。実際には本物はありません。言ってみれば、バーチャルリアリティです。これがふつうの意味でのホログラムです。

位相共役波を発生させるときは、図11のように、再生に使う参照波を逆向きに右側から照らしてやるんですね。そうすると位相共役波、もとに戻る光が再生されます。どうしてそうになっているかということですが、図10と図11を比べてみますと、ふつうのホログラムの再生(図11)では、入ってきた光がホログラムで回折されるのですが、そのときよく見ると、ホログラムの上の方が位相が先になってい

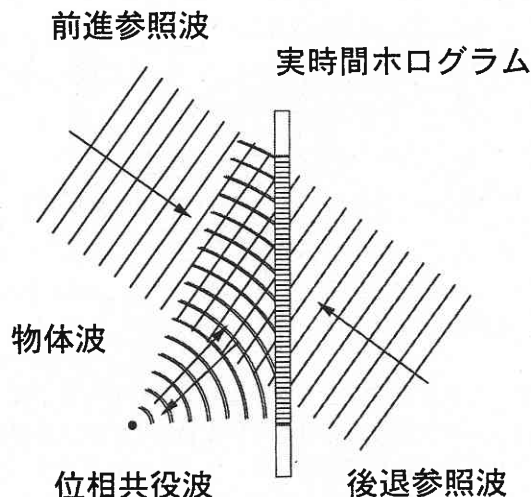


図12 実時間ホログラムを用いた位相共役波の発生. 縮退四光波混合法.

ます。参照波は上の方から進んできますから、上下に2点をとると、位相の関係は上の点が先になって、下の点があとになっているわけです。ところが図12では参照波は下から進んできますから、位相関係が逆転しているわけです。下の点の方が上の点のより位相が進んでいる。同じホログラムで回折されるので、波面は同じものができているのですが位相関係が逆転している、そういう再生になっている。というわけで、波面は同じで隣り合う位相の関係を逆転すれば位相共役波が出せる、というまさしくそういう原理で位相共役波がでてくるのです。

これはこれでいいのですが、ホログラムをいちいち現像するのは大変だということで、実際には実時間ホログラム、あるいはダイナミックホログラムというような呼び方をすることもあります。要するに現像不要のホログラムを使う(図12)。原理は今のホログラムの原理と同じですが、実時間ホログラムに光が当たると、その当たったときに干渉縞が記録されてしまう。実時間ホログラムには振幅型ホログラムと位相型ホログラムがあります。干渉縞が透過率の変化で記録されるか屈折率の変化で記録されるか2種類あります。これからあとの話では屈折率が変化するタイプを使います。ともかくどちらでも構いません。二つの光が当たると干渉縞が回折格子として記録される。できた回折格子を直ちに後ろからの光が読みだす。そうすると位相共役波が出てくる。物体波が時間的に変化するれば、それに応じて中に書き込まれる回折格子の形も変わって、位相共役波も変化していく。こういう方法で位相共役波をつくることができます。

これを総称して縮退四光波混合といいます。四光波といっているのは物体波が一つ、参照波が二つ、それに位相共役波も含めて合計四つの波のことで、それらがホログラ

ムの中で相互作用をしているという意味で四光波混合という名前がついています。

9. フォトリフラクティブ材料

さて、実時間ホログラムに何をを使うかが次の話題になります。われわれが使うのはフォトリフラクティブ材料、まさしく名前のとおりなのですが、光が当たると屈折率が変化する材料を使います。

具体的にはどんな材料か、表2に示します。フォトリフラクティブ材料と言われているものにはいろんな種類があります。大きく分類すると4種類に分けられます。強誘電性酸化物、立方晶の、つまり常誘電性の酸化物。それから化合物半導体、有機材料です。

われわれのところではいろいろな材料を使っていますが、今日の話に出てくるのはチタン酸バリウムという材料です。チタン酸バリウムというのは昔コンデンサーなどにも使われた強誘電性の材料です。コンデンサーの中では焼結で固めた状態、アモルファスの状態で使っているのですが、ここでは単結晶を使います。次になぜ光が当たると屈折率変化が起きるのか、どういうメカニズムを使っているのかという話をします。

詳しい話をすればいくらでもあるのですが、ごく簡単な話だけをします。図13はフォトリフラクティブ材料の電子構造です。半導体を想像していただければよいのですが、価電子帯と伝導帯というのがありまして、価電子帯には電子が全部詰まっていて、伝導帯は空っぽである。この材料は基本的には絶縁体です。ですから電気を通すようなものではない。ところが、価電子帯と伝導帯の間にいろんな不純物の準位がございまして、これが光を吸収して電子を伝導帯にジャンプさせる。で、電気が流れるんです。だから光が当たると少し抵抗値が小さくなって電気が流れる。

そういう材料に、図13のように、明暗の強度分布がある光を当てていきます。そうしますと、明るいところで専ら光イオン化が起こる。伝導帯に持ち上げられた電子がふらふらと動いてどこかで再結合を起こすのですが、それはいろんなところで起こるので、しばらく時間が経つと、光の当たっているところでは電子が消えて少なくなっているわけです。で、そこがプラスに荷電される。一方、暗いところには電子が集まるのでマイナスになっている。そういう現象が起こる。

もう一つ、このフォトリフラクティブ材料の条件として、電気光学効果と言いますが、電場がかかると屈折率が変化する性質を持たせます。そういう性質を持っている材料を選んでおきますと、中に生じた電場分布に応じた屈折率の変化が生じる。これがフォトリフラクティブ効果です。

フォトリフラクティブ材料そのものはいろんな使われ方をしております。いまお話ししている位相共役を使うという

表2 フォトリフラクティブ材料

- 強誘電体酸化物：LiNbO₃, BaTiO₃, ...
- 立方晶酸化物：Bi₁₂SiO₂₀, ...
- 化合物半導体
 - バルク：GaAs, InP, GaP, ...
 - 多重量子井戸：GaAs/AlGaAs, ...
- 有機材料
 - 結晶
 - ポリマー

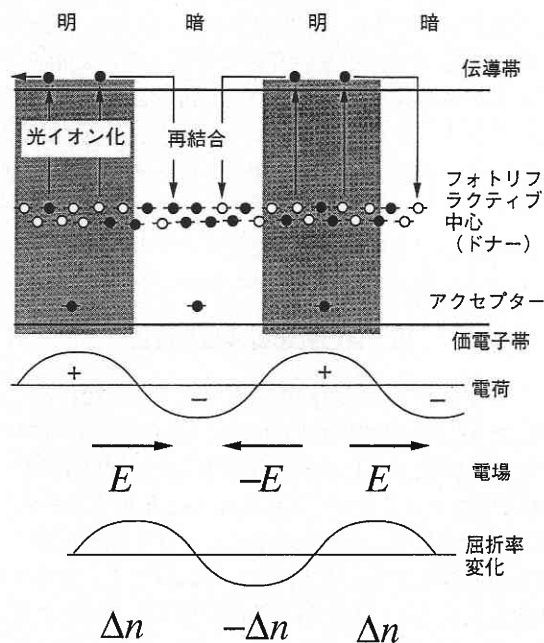


図13 フォトリフラクティブ効果。フォトリフラクティブ材料の電子構造。空間的に不均一な光で照明する。光イオン化で生じた電子は伝導帯を彷徨した後、イオン化されたドナーと再結合する。その結果、電荷分布が生じ、電場が発生して、屈折率が変化する。光の明暗のピークと屈折率変化のピークの位置がずれることに注意。

のは非常に大きな応用の一つなのですが、そのほかにも例えば体積型のメモリーであるとかニューラルネットワーク、光インターコネクションとか、いろいろな応用が考えられています。

ではフォトリフラクティブ材料はどんな特徴を持っているか。フォトリフラクティブ材料は非線形光学材料の一種なのですが、ふつう非線形光学材料というのは非常に強い光のパワーを必要とします。ところが、このフォトリフラクティブ材料は弱い光でも屈折率変化を起こすことができます。大出力レーザーを必要としないのです。

それからもう一つ、干渉縞と屈折率格子の位相がずれるという変な性質がありまして、これを非局所性と呼んでいます。二つの光を当てますと中に強度分布つまり干渉縞が生じます。ところがそれから生じた屈折率格子は横にずれるのです。もう一度原理図(図13)を見てください。光の

強いところ、弱いところ、電荷分布のピーク位置は一致します。ところが電場はその真ん中でいちばん強くなるのです。屈折率変化は電場に比例しますから、屈折率分布のピークは光の強度の最大と最小のピークの間にくるのです。

これはたいしたことがないかのように思うかもしれませんが、実は非常に大きな意味を持っていて、光を増幅する効果を発揮します。増幅するといっても、電気エネルギーを光のエネルギーに変えるという意味ではなく、二つの光が重なったときに一方の光が相手の光のエネルギーを奪い取ってしまう、そういうことが起こる。だから、1の強さの光を2本入れて、一方の光の強さを $1+1=2$ にすることができる。エネルギーを奪ったほうから見ますと増幅されたのと同じで、そういう機能を持ちます。この増幅効果は非常に大きくて、ちょうどレーザーと同じように発振させることができます。料理で使うヘラとフォトリフラクティブ結晶を使って発振をさせた例まであります。

10. 自己励起型位相共役鏡

これまで説明した実時間ホログラムでは、物体波と同時に参照波を2本入れていたわけです。合わせて3本の光を入れて位相共役波を出していたのですが、増幅効果を使うと2本の参照波を自前でつくってしまうことができます。

物体光を入れて、それを元手にレーザー発振を起こし、それを参照波にしてしまえ、というわけです。そうすると、物体波を入れただけで位相共役波を出すことができます。これを自己励起型位相共役鏡といいます。こういうことができるのは、フォトリフラクティブ材料が増幅効果を持っているからです。

図14は、いろいろな自己励起型位相共役鏡を分類したものです。そのいちばん進んだ形が図14(d)で、外側には何も着けないんです。ただ結晶のコーナーで光を反射する、そういう仕組みを使うんです。結晶中に入射した光が散乱されてコーナーに向かっていく。それがコーナーで反射されて戻っていく。これが発振して、位相共役波をつくるのに必要な参照波となるのです。

本当にそんなことが起こるのかと思いますが、それが起こるんですね。図15はその状態を上から撮った写真です。結晶はチタン酸バリウムです。物体波は右から入ってきます。何も起こらなければそのまままっすぐ突き抜けていくわけですが、中で光の回折が起きて、光は結晶の左下のコーナーに向かって進んでいます。ここではね返った光が参照波となって位相共役波が左側に出てきている。生き物を見ているみたいでちょっと信じがたいのですが、そういうことが起きている。この写真では、左上のコーナーを使ったループも作られています。

もう一つ、図14(c)がそうなのですが、リング型という

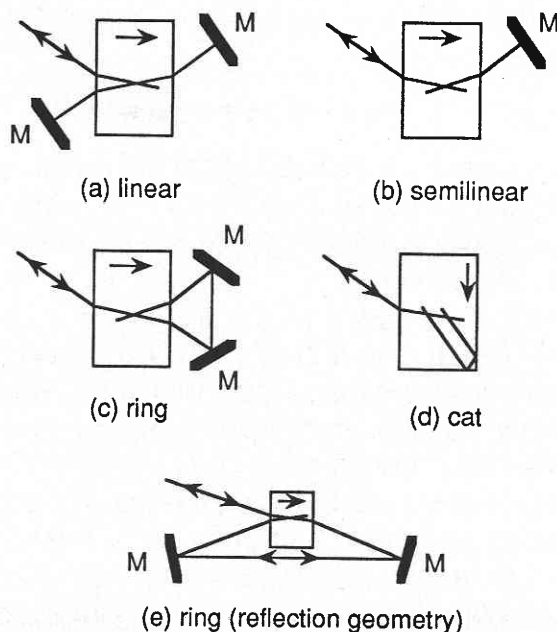


図14 いくつかの自己励起型位相共役鏡の光路図。1入力型。Mは反射鏡。

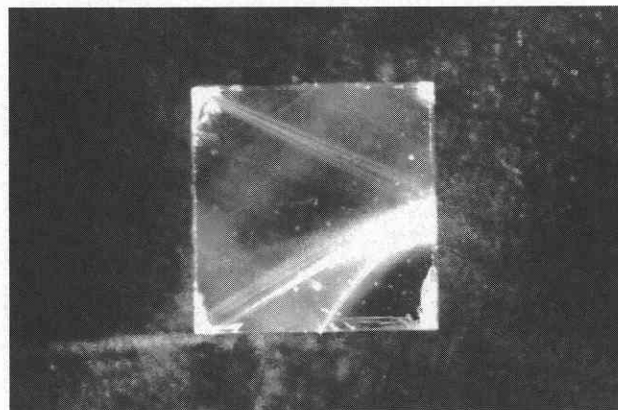


図15 猫型位相共役鏡。

のがあります。左側から入ってそのまま右側に抜けた光を、2枚の鏡で右側からもう一度結晶に戻してやる。こうするとリング状の発振が起きて、位相共役波が発生する。

リング型では一つの入射波が、左と右から2度結晶内に入ってくる。ところが鏡なしで、始めから右と左から別々に光を入れてしまうとどうなるか。要するに、2入力を持ってきて左右から結晶に入れる。これでも位相共役が出るんです。これを二重位相共役鏡といいます。図16(a)のように、Aという光を左から、Bという光を右から入射する。そうするとその間にうまくカップリングが起きて、Aの位相共役、Bの位相共役というのが同時に発生します。

図16に挙げましたように、これもいろんな種類がございまして、妙な名前がいろいろくっついていますが、AとBの2つの入力を入れると、お互いにお互いの位相共役とし

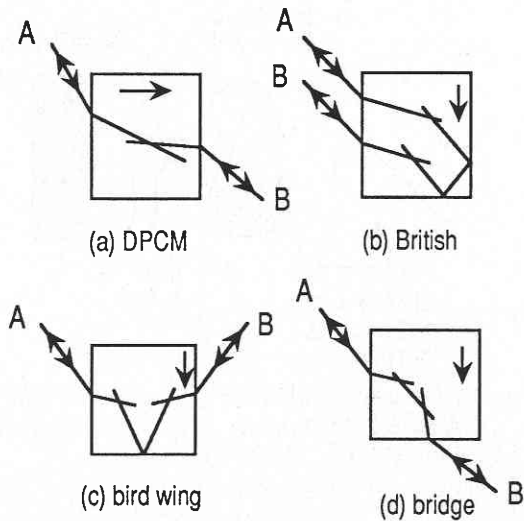


図16 いくつかの相互励起型位相共役鏡の光路図。2入力型。

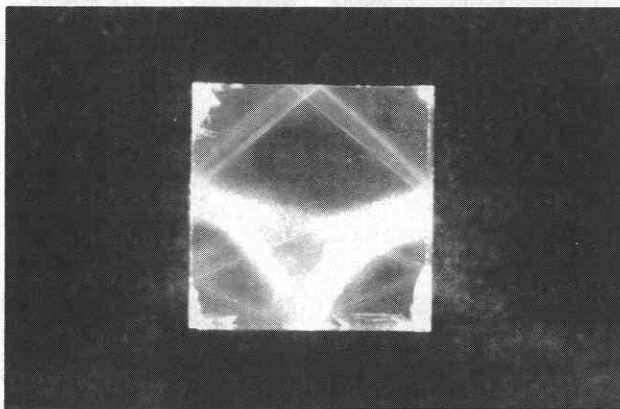


図17 鳥の翼型位相共役鏡。

て出てくる。

二重位相共役鏡はどんなになっているかというと、これは鳥の翼型という名前がついているのですが、図17のように見えるわけです。光は一方は左から入っています。もう一方は右側から入っている。何もなければそのまま突き抜けていくだけです。ところが両者の間にカップリングが生じて、あたかも光が曲がったかのように見えます。左側から入った光は、一度結晶の下面で反射してから、右側から入った光の位相共役波として右側から出ていく。同じことが、右側から入った光にも起こります。

11. 位相共役鏡の評価

次にいろいろある位相共役鏡をどう評価していくかということをお話します。

評価のファクターはいろいろあります。表3にそのポイントをまとめました。いちばん大事なのは、忠実度と呼んでいるのですが、どのくらいちゃんとしてきた光の位相共役になっているかという評価です。それから反射率は何

表3 いろいろな位相共役鏡の性能評価。

SBS：誘導ブリュアン散乱, Kerr：光カー効果, PR：フォトリフラクティブ効果, SA：飽和吸収, laser：レーザー媒質, PE：光エコー。

	反射率	応答速度	光強度	忠実度	安定度	自己励起
SBS	○	○	×	△	△	○
Kerr	△	○	×	○	△	×
PR	○	×	○	○	×	○
SA	○	△	△	○	△	×
laser	○	△	△	△	△	○
PE	×	○	△	△	△	×

パーセントあるのか。実際には物質が応答するわけですが、その応答速度はどのくらいか。安定度はどうなのか。入力としてはどのくらいのパワーを必要とするか。先ほどお話ししましたが、自己励起型の動作というのが可能なのかどうか。それから当然コストはどうか。実際のところこういったファクターがあって、それを全て100%満足するものはございません。なかなか難しいところですが、それぞれの方法に欠点があります。

例えばいまお見せしたチタン酸バリウムですと、忠実度はよろしい。反射率も十分高いのですが、問題は遅いんですね。非常に遅い現象です。あとでビデオでお見せしますが、要するにビデオで見てわかるぐらいなんです。人間がわかるぐらいの速さなんです。秒のオーダーのプロセスなんです。チタン酸バリウムに関してはこれがいちばんの欠点になっています。それから安定度もあまりよくないが、これは解決できます。コストは全然だめです。1個数十万円もする。これは数が出れば少しは安くなるのでしょうか。

時間がないのでいろんな方式の評価はやめておきますが、そういうわけで全ての点で合格するような材料がないのが残念なところ。

12. 位相共役の応用一位相ひずみの補償

最後に、ではいったいこれをどう応用できるのかという話をします。これもいろんなことが提案されていますが、その多くは本質的には時間反転という性質を使った位相歪みの補正、あるいは補償という応用法、そのバリエーションに帰着されます。原理はこういうことです。

図18にあるとおり、いま入射波、例えばレーザーからの光が左側から来る。これは波面のきれいな光であったとします。それが距離を伝播していく。空気中でもいいし、光ファイバーでもいいし何でもいいのですが、屈折率が乱れて分布している媒質中を伝播していく。そうすると波面

が乱れるというわけです。その結果、その光が運んでいた情報が乱れのため隠されてしまう。そのような光を位相共役鏡で戻してやる。そうすると光はちょうど逆向きに時間を遡るように戻りますから、媒質の中をもう一度通過して、きれいな波として戻ってくる。途中に屈折率のひずみとか揺らぎとかがあっても、位相共役鏡で戻すことによって全部そういうものを消し去ることができる。時間反転ということを考えれば、これは理解できると思います。

もちろん光には何か情報を載せなくてはいけないのですが、例えば強度の情報だったらいくら位相共役鏡でも回復できませんから、強度の情報はちゃんと通過してくる。ところが位相の擾乱は全部補正されて、きれいな波面に戻ってくる。

いくつか応用例があります。図19はいまいった原理のデモンストレーションです。レーザーからの光を拡げて、生研という字の書いてあるスライドを通します。光路の途中に、何か表面がグニャグニャと曲がった透明物体を置いておきます。この擾乱物質から出た途端に字は読みとれなくなります(図19(c))。それほど波面が乱れてしまうのです。ところがこの光を、チタン酸バリウムを使った位相共役鏡に導き、位相共役光をもう一度擾乱媒質に戻すと、波面の乱れが回復して、もとの字が読めるようになるのです(図19(d))。この方法を使えば、例えば光ファイバーに画像と通すことも可能になります。

実用になっている例は、大出力レーザーのビームをきれいにする装置です。図20の左側にあるのは、ふつうのレーザー発振器なんです。そのレーザー光のエネルギーを増幅するためにもう一台のレーザー増幅器を通します。ところが増幅器にはエネルギーを大量に注入するのでここで乱れが発生するのです。例えば固体レーザーでは、それを光で励起するのですが、その結果固体の内部に温度分布ができてひずみが生じます。こうして増幅器からでてきたレーザー光は、エネルギーは非常に強くなっているのですが、波面も乱れている。そういう光を例えば加工機に使うとしたときに一点に絞れないわけです。せっかくエネルギーが強くなったのですが、小さなスポットに絞れないので結局パワー密度を上げられないということになってしまいます。それを位相共役鏡でもう一度増幅器に戻してから出力を取りだす。そうすると入ってきたときと同じようにきれいな波面が出てきます。しかもエネルギーは増幅されているわけです。こうして大出力レーザーの増幅器による波面ひずみを補正して、収束性のいい、強力なレーザー光を取りだすことができるのです。この応用には誘導ブリュアン散乱法が使われています。図20には、4分の1波長板とか偏光ビームスプリッターとか描いてありますが、これは位相共役鏡で戻した光を発振器に戻してしまっただけでは意味がないので、光を外に取り出すための手段です。

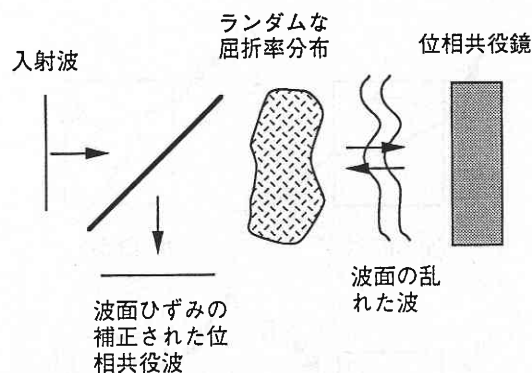


図18 位相ひずみの補償。屈折率がランダムに分布する媒質中を光が通過すると波面が乱れる。その光を位相共役鏡で戻すと、乱れを補正することができる。

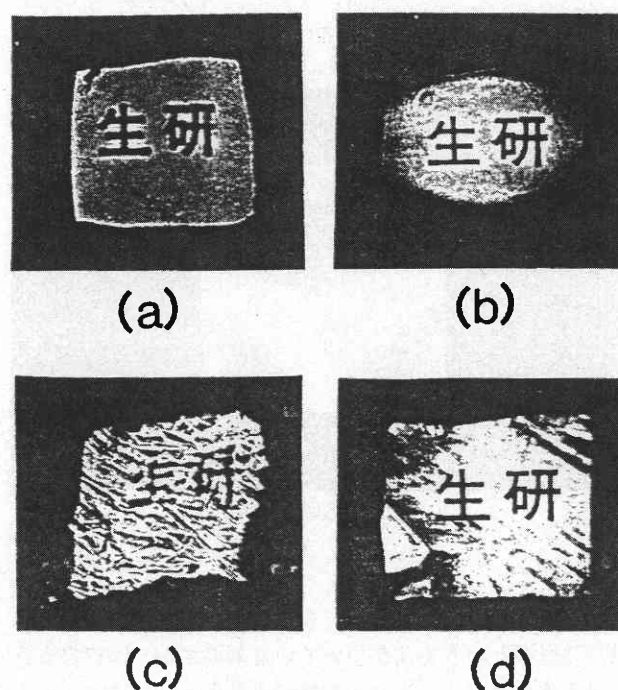


図19 位相ひずみの補償のデモンストレーション。(a)擾乱媒質がないときの伝送画像。(b)擾乱媒質がないときの位相共役像。(c)擾乱媒質が存在するときの伝送画像。波面が乱れて字が判読できない。(d)擾乱媒質が存在するときの位相共役像。波面の乱れが補正されて再び字が読めるようになっている。

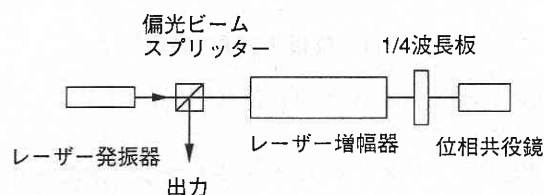


図20 往復光路位相共役レーザー増幅器。大出力レーザー増幅器による波面のひずみを位相共役鏡を用いて補正し、回折限界に近いきれいなビームを取り出す。

それから最近わりと話題になっているのは、光通信における、光ファイバー導波路を長距離伝搬したことによる信号のひずみを補償する技術で、位相共役がそういうことにも使われています。この位相ひずみの補正は大変面白いのですが、一つ問題になることがあります。それは、光は往復しなければいけないんですね。行って帰ってこなくては行けない。これでは遠くに信号を送ることができない。往復させる代りに、全く同じ特性のものを2つ置いて、中間点で位相共役鏡に通せばよいのですが、全く同じ特性のものを2つ用意するのが簡単ではないのです。単一モード光ファイバーの場合はいろんな特性が大体決まっておりますから、たまたまそういうことができるというわけで、戻すのではなく2倍の距離を送るということで、信号のひずみ

をある程度補正できるのです。

そのほかいろんな応用が考えられていますが、時間がまわりましたので位相共役光学の話をこの辺で終わらせていただきます。

どうもご清聴ありがとうございました。

(1996年6月7日講演)

参 考 文 献

- 1) 講演後、時間反転ラケットは実際の卓球のゲームでは使えないことを小久保旭氏より指摘されました。自分のコートで一回跳ね返ったボールを、相手方のコートに直接打ち込まなくてはならないからです。時間反転ラケットは、羽根つきやバトミントンならば使えるかもしれません。